



Otimização e Controle de Mistura em Linha para Certificação de Produtos de Refinarias de Petróleo

**Louise Borges Kling Leal de Oliveira
Nádia Helena Lima**

Projeto de Final de Curso

Orientadores

**Alain Cognac Carelli, M.Sc.
Prof. Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc.**

Agosto de 2010

Otimização e Controle de Mistura em Linha para Certificação de Produtos de Refinarias de Petróleo

Louise Borges Kling Leal de Oliveira
Nádia Helena Lima

Projeto de final de curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química,
como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro químico.

Aprovado por:

Marcel Joly, D.Sc.

Prof. José Carlos Costa da Silva Pinto, D.Sc.

Prof. Luiz Antonio d'Avila, D.Sc.

Orientado por:

Prof. Maurício Bezerra de Souza Jr., D.Sc.

Alain Cognac Carelli, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil
Agosto de 2010

de Oliveira, Louise Borges Kling Leal e Lima, Nádía Helena
Título/ Louise Borges Kling Leal de Oliveira e Nádía Helena
Lima.UFRJ/EQ, 2010.
xii, 70. p.; il.
(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, 2010.

Orientadores: Maurício Bezerra de Souza Jr. e Alain Cognac Carelli.
1. Otimização. 2. Blending. 3. Diesel. 4. Monografia. (Graduação – UFRJ/EQ). 5.
Maurício Bezerra de Souza Jr. e Alain Carelli.
I. Título.

A nossas famílias e amigos

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original.”
Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Aos nossos orientadores, Prof. Maurício Bezerra de Souza Jr. e Alain Cognac Carelli, pela disponibilidade, dedicação, por toda a ajuda que deram neste trabalho e pela contribuição em nossa formação.

Ao Marcel Joly, ao Prof. José Carlos Costa da Silva Pinto e ao Prof. Luiz Antonio d'Avila, por terem aceitado fazer parte desta banca, e dedicado um pouco do seu tempo para ler e avaliar este projeto.

A todos os nossos professores, por toda a dedicação e paciência ao longo destes anos, e pelo esforço constante para dividir conosco o máximo de conhecimento possível.

Agradecimentos Louise:

À Nádia, pelas noites na biblioteca dedicadas a este trabalho e por torná-las divertidas além de produtivas, também pela paciência e companheirismo ao longo destes anos.

À minha mãe, Patricia Borges, pelo apoio e sacrifício realizados para minha formação.

Aos meus amigos, companheiros de escola de química, tanto pelos momentos de concentração em estudos em grupo, quanto pelos divertidos momentos de descontração.

À Walter Kassinow, pela compreensão e apoio ao longo destes anos.

Agradecimentos Nádia:

À Louise, pelo ótimo trabalho, pela paciência e pela amizade.

Aos meus pais, por me criar, por ajudar a despertar meu interesse por esta área, por comprar os livros que eu precisei e pelas importantes contribuições e críticas a este trabalho.

Aos meus amigos da faculdade, pelas inúmeras discussões pertinentes, que me ajudaram a crescer como pessoa e como engenheira, e também pelas discussões impertinentes, que me distraíram e divertiram.

Aos meus outros amigos, que mesmo contra as suas vontades entenderam a minha ausência em inúmeras ocasiões ao longo da faculdade.

Ao Bernardo Cinelli, por me obrigar a estudar.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de engenheiro químico.

Otimização e Controle de Mistura em Linha para Certificação de Produtos de Refinarias de Petróleo

Louise Borges Kling Leal de Oliveira
Nádia Helena Lima

Agosto, 2010

Orientador: Prof. Maurício Bezerra de Souza Jr, D.Sc.
Alain Cognac Carelli, M.Sc.

A infraestrutura de transporte brasileira é caracterizada por uma malha essencialmente rodoviária. Deste modo, o óleo diesel torna-se o derivado de petróleo de maior importância no país e as refinarias frequentemente operam buscando maximizar a produção deste combustível. Além disso, a crescente preocupação com as condições ambientais faz com que as especificações impostas a estes produtos se tornem cada vez mais rígidas. Dentre estas especificações uma de interesse especial é a concentração de enxofre, uma vez que a sua presença nos combustíveis pode gerar poluentes extremamente tóxicos. Atualmente no Brasil são produzidos três tipos de diesel, S1800, S500 e S50, que diferem basicamente na quantidade de enxofre presente. Na tentativa de balancear um lucro máximo com a certificação do produto, a otimização torna-se uma ferramenta poderosa, teoricamente capaz de obter a melhor solução dentre todas as soluções existentes, garantindo, assim, um lucro máximo e um produto dentro das especificações desejadas. O presente trabalho teve como objetivo estudar os efeitos de diferentes estratégias de otimização na mistura em linha de diversas correntes de derivados de petróleo, para produzir óleo diesel. Particularmente, foi analisado o processo de produção de dois tipos de diesel, S1800 e S500, através da mistura de cinco correntes diferentes: diesel pesado, diesel leve, diesel hidrotratado, querosene e nafta pesada. Estas correntes são misturadas em um misturador em linha, e enviadas para um tanque de armazenamento, o qual é, posteriormente, certificado e vendido. Avaliou-se o desempenho de três estratégias de otimização distintas, uma estratégia “feedback”, na qual os cálculos foram realizados baseando-se na diferença entre as características medidas e desejáveis para o produto, uma estratégia “feedforward”, onde as características das correntes de entrada foram utilizadas para os cálculos da otimização e uma estratégia híbrida, em que os princípios de otimização “feedback” e “feedforward” foram combinados. A comparação entre os dois tipos de diesel estudados mostrou que a produção de diesel S500 pode levar a lucros mais elevados que a produção de diesel S1800. Por outro lado, manter as propriedades do produto dentro das especificações é mais complicado na produção de diesel S500. A respeito das estratégias de otimização, ainda que a otimização “feedback” tenha resultado em um valor maior para a função objetivo, esta técnica provou não ser eficiente em manter as especificações do produto. Considerando os custos elevados relacionados à instalação e ao manuseio dos equipamentos de medida necessários para a otimização “feedforward”, este estudo conclui que a estratégia de otimização híbrida promove o melhor equilíbrio entre lucro e qualidade do produto.

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| Capítulo I. Introdução | 1 |
| I.1. Contextualização e motivação..... | 1 |
| I.2. Objetivo..... | 2 |
| I.3. Organização..... | 3 |
| Capítulo II. Revisão Bibliográfica..... | 4 |
| II.1. Refino de petróleo..... | 4 |
| II.1.1. Petróleo | 4 |
| II.1.2. Refino de petróleo | 5 |
| II.1.3. Operações de mistura..... | 9 |
| II.1.4. Diesel Automotivo..... | 11 |
| II.2. Otimização | 14 |
| II.2.1. Otimização em uma empresa | 16 |
| II.2.2. Breve revisão sobre métodos de otimização | 18 |
| II.3. Aspectos computacionais da otimização implementada..... | 21 |
| Capítulo III. Metodologia..... | 24 |
| III.1. Unidade de mistura para estudo..... | 24 |
| III.2. Otimização..... | 26 |
| III.2.1. Descrição e Objetivos da Otimização | 26 |
| III.2.2. Estratégia “Feedforward” | 28 |
| III.2.3. Estratégia “Feedback” | 30 |
| III.2.4. Estratégia Híbrida | 32 |
| III.2.5. Método de Otimização | 34 |
| III.3. Dados..... | 35 |
| III.4. Simulação | 35 |
| Capítulo IV. Resultados..... | 37 |
| IV.1. S500..... | 38 |
| IV.1.1. Estratégia “Feedforward” | 38 |
| IV.1.2. Estratégia “Feedback” | 42 |
| IV.1.3. Estratégia Híbrida | 45 |
| IV.1.1. Comparação entre os métodos | 49 |
| IV.2. S1800..... | 52 |
| IV.2.1. Estratégia “Feedforward” | 52 |

| | | |
|--------------|-------------------------------------|----|
| IV.2.2. | Estratégia “Feedback” | 55 |
| IV.2.3. | Estratégia Híbrida | 58 |
| IV.2.4. | Comparação entre os métodos | 62 |
| IV.3. | Total de Tanques Especificados..... | 65 |
| Capítulo V. | Conclusões..... | 66 |
| Capítulo VI. | Bibliografia..... | 69 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura I-1: Estrutura do consumo de derivados de petróleo no Brasil (VICHI & MANSOR, 2009)..... | 1 |
| Figura II-1: Exemplo de agregação de valor através das unidades de processo (FERREIRA, 2008)..... | 4 |
| Figura II-2: Desenho esquemático das unidades de destilação atmosférica e à vácuo (GOMES, 2007)..... | 6 |
| Figura II-3: Exemplo de esquema de refino voltado para gasolina (ANP, 2009)..... | 8 |
| Figura II-4: Exemplo de esquema de refino voltado para diesel (ANP, 2009) | 8 |
| Figura II-5: Esquema de refino da REPAN (FERREIRA, 2008) | 8 |
| Figura II-6: Processo típico de mistura (CHÈBRE, CREFF, & PETIT, 2010)..... | 10 |
| Figura II-7: Representação Esquemática das Possibilidades de Mistura (FERREIRA, 2008) | 11 |
| Figura II-8: Óleo Diesel - Exportação e Importação: fev/08 a jan/10 Fonte: Ministério de Minas e Energia (2010) | 12 |
| Figura II-9: Hierarquia de tomada de decisões em uma empresa. (FERREIRA, 2008) | 17 |
| Figura III-1: Representação esquemática do processo simulado..... | 24 |
| Figura III-2: Estratégia “Feedforward” | 29 |
| Figura III-3: Estratégia “Feedback” | 30 |
| Figura III-4: Estratégia híbrida | 33 |
| Figura IV-1: Variação na densidade..... | 37 |
| Figura IV-2: Variação na concentração de enxofre | 37 |
| Figura IV-3: Vazão nas correntes de entrada do diesel S500 (“Feedforward”) | 38 |
| Figura IV-4: Vazão na corrente de saída do diesel S500 (“Feedforward”)..... | 38 |
| Figura IV-5: Densidade na corrente de saída do diesel S500 (“Feedforward”) | 39 |
| Figura IV-6: Densidade no tanque de armazenamento do diesel S500 (“Feedforward”) | 40 |
| Figura IV-7: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S500 (“Feedforward”).... | 40 |
| Figura IV-8: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S500 (“Feedforward”)..... | 41 |
| Figura IV-9: Vazão das correntes de entrada de diesel S500 (“Feedback”) | 42 |
| Figura IV-10: Vazão da corrente de saída de diesel S500 (“Feedback”)..... | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura IV-11: Densidade na corrente de saída do diesel S500 (“Feedback”) | 43 |
| Figura IV-12: Densidade no tanque de armazenamento de diesel S500 (“Feedback”) | 43 |
| Figura IV-13: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S500 (“Feedback”) | 44 |
| Figura IV-14: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S500 (“Feedback”) | 44 |
| Figura IV-15: Vazão das correntes de entrada do diesel S500 (Híbrida) | 45 |
| Figura IV-16: Vazão da corrente de saída do diesel S500 (Híbrida) | 46 |
| Figura IV-17: Densidade na corrente de saída do diesel S500 (Híbrida) | 46 |
| Figura IV-18: Densidade no tanque de armazenamento de diesel S500 (Híbrida) | 47 |
| Figura IV-19: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S500 (Híbrida) | 48 |
| Figura IV-20: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S500 (Híbrida) | 48 |
| Figura IV-21: Vazões das correntes de entrada do diesel S1800 (“Feedforward”) | 52 |
| Figura IV-22: Vazão da corrente de saída do diesel S1800 (“Feedforward”) | 52 |
| Figura IV-23: Densidade na corrente de saída do diesel S1800 (“Feedforward”) | 53 |
| Figura IV-24: Densidade no tanque de armazenamento de diesel S1800 (“Feedforward”) | 53 |
| Figura IV-25: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S1800 (“Feedforward”) | 54 |
| Figura IV-26: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S1800 (“Feedforward”) | 55 |
| Figura IV-27: Vazão das correntes de entrada do diesel S1800 (“Feedback”) | 55 |
| Figura IV-28: Vazão da corrente de saída do diesel S1800 (“Feedback”) | 56 |
| Figura IV-29: Densidade na corrente de saída do diesel S1800 (“Feedback”) | 56 |
| Figura IV-30: Densidade no tanque de armazenamento de diesel S1800 (“Feedback”) | 57 |
| Figura IV-31: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S1800 (“Feedback”) | 58 |
| Figura IV-32: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S1800 (“Feedback”) | 58 |
| Figura IV-33: Vazão das correntes de entrada do diesel S1800 (Híbrida) | 59 |
| Figura IV-34: Vazão da corrente de saída do diesel S500 (Híbrida) | 59 |
| Figura IV-35: Densidade na corrente de saída do diesel S1800 (Híbrida) | 60 |
| Figura IV-36: Densidade no tanque de armazenamento de diesel S1800 (Híbrida) | 60 |
| Figura IV-37: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S1800 (Híbrida) | 61 |
| Figura IV-38: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S1800 (Híbrida) | 61 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela II-1: Volume de petróleo refinado em janeiro/2010..... | 9 |
| Tabela II-2: Especificações para o Diesel..... | 13 |
| Tabela III-1: Propriedades das correntes de alimentação | 35 |
| Tabela III-2: Especificações desejadas para o produto final..... | 35 |
| Tabela IV-1: Média do Tempo de Operação para o diesel S1800..... | 49 |
| Tabela IV-2: Desgaste das válvulas para a produção de Diesel S500 | 50 |
| Tabela IV-3: Lucro obtido com a produção de Diesel S500..... | 50 |
| Tabela IV-4: Desvios da densidade em relação à especificação para o diesel S500..... | 51 |
| Tabela IV-5: Desvios da concentração de enxofre em relação à especificação para o diesel S500 | 51 |
| Tabela IV-6: Média do Tempo de Operação para o diesel S1800..... | 62 |
| Tabela IV-7: Desgaste das válvulas para a produção de Diesel S1800 | 63 |
| Tabela IV-8: Lucro obtido com a produção de Diesel S1800..... | 63 |
| Tabela IV-9: Desvios da densidade em relação à especificação para o diesel S1800.... | 64 |
| Tabela IV-10: Desvios da concentração de enxofre em relação à especificação para o diesel S1800 | 64 |
| Tabela IV-11: Número de tanques especificados para cada estratégia..... | 65 |

NOMENCLATURA

LETRAS LATINAS

| Símbolo | Descrição | Dimensão |
|----------------|-------------------------------|---------------------|
| d | Densidade relativa | Adimensional |
| S | Concentração de enxofre | ppm |
| F | Vazão volumétrica | m ³ /h |
| L | Lucro obtido | R\$ |
| V | Volume | m ³ |
| P | Preço do produto final | R\$ |
| C | Custo das correntes de insumo | R\$ |
| E | Erro do modelo | Adimensional ou ppm |
| t | Tempo de enchimento do tanque | h |

SUBSCRITOS

| Símbolo | Descrição |
|----------------|---|
| 1 | Corrente 1: Diesel Pesado |
| 2 | Corrente 2: Diesel Leve |
| 3 | Corrente 3: Querosene |
| 4 | Corrente 4: Nafta Pesada |
| 5 | Corrente 5: Diesel HDT |
| m | Propriedade da mistura na saída do misturador |
| T | Propriedade do produto no tanque |
| c | Propriedade relativa ao componente c |
| min | Valor mínimo permitido para a propriedade |
| máx | Valor máximo permitido para a propriedade |
| mod | Valor da propriedade de acordo com o modelo interno do otimizador |
| d | Referente à densidade |
| S | Referente ao teor de enxofre |
| medida | Valor da propriedade medida |

Capítulo I. Introdução

I.1. Contextualização e motivação

A otimização da produção de derivados de petróleo é um assunto de extrema relevância, especialmente se levarmos em consideração questões como a crescente demanda de energia mundial, os efeitos ambientais causados pelos gases estufa e a estrutura de transporte basicamente rodoviária do Brasil, o que leva o óleo diesel e a gasolina a serem produtos que requerem grande atenção tanto na sua produção quanto nos efeitos causados pelo seu consumo.

O óleo diesel, seguido pela gasolina, são os derivados de petróleo de maior consumo no país, o que pode ser confirmado pelo gráfico da Figura I-1. Este fato se deve à maior parte das matérias-primas e produtos gerados no Brasil serem transportados por via rodoviária, por meio de caminhões, tornando o óleo diesel um produto de importância estratégica.

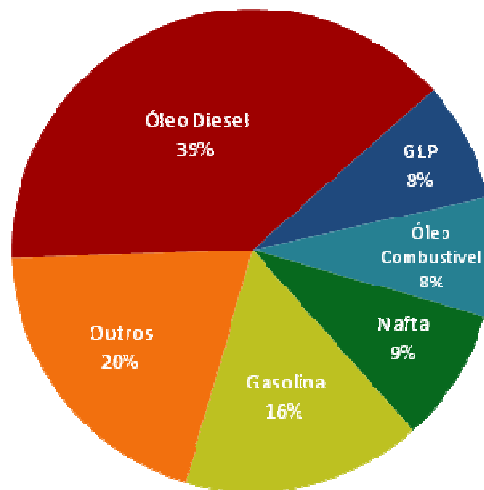


Figura I-1: Estrutura do consumo de derivados de petróleo no Brasil (VICHI & MANSOR, 2009)

Este alto consumo de combustíveis fósseis é um dos responsáveis pela alta emissão de gases que causam o efeito estufa, por isso o aspecto ambiental tem grande relevância na produção de combustíveis. Nessa trajetória, enquanto os combustíveis fósseis ainda predominam na solução de transporte mundial, é fundamental a busca por produtos de melhor qualidade, com processos produtivos de maior eficiência energética, onde se busca a redução das emissões (FERREIRA, 2008).

O Conselho nacional do meio ambiente (CONAMA) criou o programa de controle da poluição do ar por veículos automotores (PROCONVE), que tem por objetivo (CONAMA, 2002):

I - reduzir os níveis de emissão de poluentes pelo escapamento e por evaporação, visando o atendimento aos padrões nacionais de qualidade ambiental vigentes,

II - promover o desenvolvimento tecnológico nacional, tanto na engenharia de projeto e fabricação, como também em métodos e equipamentos para o controle de emissão de poluentes; e

III - promover a adequação dos combustíveis automotivos comercializados, para que resultem em produtos menos agressivos ao meio ambiente e à saúde pública, e que permitam a adoção de tecnologias automotivas necessárias ao atendimento do exigido por esta Resolução.

A especificação da qualidade dos derivados de petróleo, no entanto, é feita pela Agência Nacional do Petróleo (ANP). Esta limita, entre outras propriedades, o teor de enxofre permitido nos combustíveis.

Desta forma, muitos trabalhos vêm sendo desenvolvidos no sentido de aliar o aproveitamento econômico deste grande mercado de combustíveis com a redução do impacto ambiental causado por estes.

Para alcançar tais objetivos, a otimização se torna uma ferramenta poderosa, capaz de balancear um máximo aproveitamento dos recursos, com o atendimento as especificações impostas aos produtos.

I.2. Objetivo

O presente estudo tem por objetivo propor e comparar projetos de sistemas de controle e otimização para a etapa de “blending” de combustíveis, de forma que o custo deste processo seja minimizado, mantendo as especificações necessárias à certificação do produto. Na comparação, são analisados os efeitos de distúrbios estocásticos a diferentes frequências nas correntes de entrada do processo, que podem causar alterações no produto final.

Particularmente, o processo abordado aqui é a mistura em linha de frações de petróleo (diesel pesado, diesel leve, querosene, nafta pesada e diesel oriundo da unidade de hidrotratamento) para obtenção de óleos diesel comercialmente denominados S1800 (diesel interior) e S500 (diesel metropolitano), com o menor custo possível. Três estratégias de controle e otimização – diferenciadas em função das medições

empregadas, resultando em esquemas “feedback”, “feedforward” ou híbrido – são investigadas.

I.3. Organização

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos. Inicialmente são introduzidos conceitos relevantes sobre refino de petróleo, otimização da produção, certificação de óleo diesel e desenvolvimentos na área. Na sequência, são apresentados os casos de estudo simulados, os métodos utilizados e os resultados obtidos.

Os capítulos estão divididos da seguinte forma. O capítulo I é a presente introdução onde se encontra a contextualização, motivação e objetivos da dissertação. O capítulo II apresenta uma revisão bibliográfica do assunto, sintetizando informações pertinentes de trabalhos anteriores, sobre refino de petróleo, otimização de “blending”, aspectos econômicos e especificações de óleo diesel. No capítulo III são descritos os casos simulados, metodologia, considerações e modelos. O capítulo IV é composto dos resultados e discussão de cada um dos casos: estratégia “feedforward”, “feedback” e uma composição das duas. O capítulo V contém as conclusões baseadas nos resultados obtidos na simulação e sugestões para trabalhos futuros. Finalizando, o capítulo VI apresenta as referências bibliográficas.

Capítulo II. Revisão Bibliográfica

II.1. Refino de petróleo

II.1.1. Petróleo

Segundo a ASTM (ASTM - American Society for Testing and Materials), “o petróleo é uma mistura de ocorrência natural, consistindo predominantemente de hidrocarbonetos e derivados orgânicos sulfurados, nitrogenados e/ou oxigenados, o qual é, ou pode ser, removido da terra no estado líquido”.

O óleo é fracionado a princípio por destilação gerando frações de baixo, médio e alto peso molecular.

O petróleo leve apresenta maior valor agregado, pois possui maior rendimento na geração de produtos leves, que são os principais produtos do refino: GLP, querosene, gasolina e diesel. A Figura II-1 ilustra a agregação de valor ao petróleo com o processamento deste, para petróleos leve e pesado.

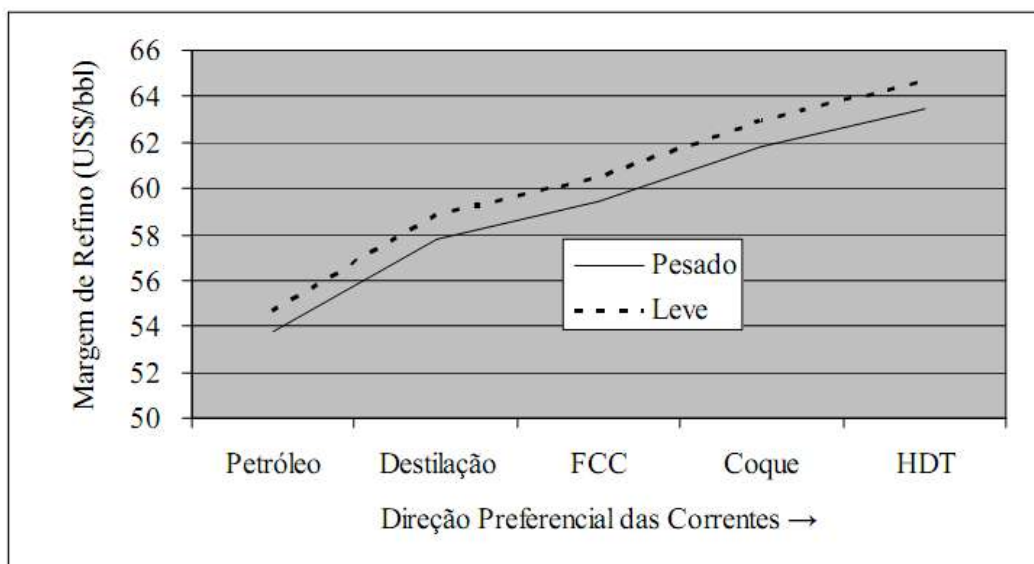


Figura II-1: Exemplo de agregação de valor através das unidades de processo (FERREIRA, 2008)

Os principais contaminantes do petróleo são os compostos sulfurados. O enxofre é o terceiro elemento mais abundante no petróleo e pode aparecer nas formas de mercaptans ou sulfetos, podendo ocasionar envenenamento de catalisadores, aumento da estabilidade óleo-água, corrosão, geração de poluentes altamente tóxicos, entre outros problemas.

Se estes compostos não forem eliminados ao longo do processamento estarão presentes no diesel e na gasolina produzidos e serão jogados à atmosfera na combustão destes combustíveis nos veículos, contribuindo para problemas ambientais, como o efeito estufa e a chuva ácida. Por isso a ANP, órgão responsável pela regulação do petróleo define limites cada vez mais baixos de enxofre nos combustíveis, como veremos ao longo deste trabalho.

II.1.2. Refino de petróleo

O objetivo principal de uma refinaria de petróleo é converter uma gama de crus (petróleo bruto) em produtos finais de grande valor agregado, tais como gasolina, querosene de aviação e óleo diesel. A mistura e programação de curto prazo são aspectos críticos neste processo grande e complexo (MENDÉZ, 2006).

Segundo Gomes (2007), os processos de refino podem ser divididos em processos de separação, conversão e tratamento.

Processos de Separação

Os processos de separação têm por objetivo dividir o petróleo em suas frações básicas. Nestes processos podem ser incluídas a destilação e a extração com solventes.

A destilação é normalmente a etapa inicial do refino, sua unidade é composta por dessalgadora, destilação atmosférica e destilação a vácuo. A dessalgadora separa emulsões água-óleo e retira sais do petróleo cru. A destilação atmosférica consiste no fracionamento do óleo e é realizada em colunas de fracionamento, com vários estágios de separação. Os derivados deste fracionamento são, principalmente, gás combustível, GLP, nafta, querosene, gasóleo atmosférico e resíduo atmosférico.

O resíduo atmosférico, fração mais pesada obtida no fundo da torre de destilação atmosférica, após novo aquecimento, é enviado à torre de destilação a vácuo, no qual são gerados cortes de gasóleos e um resíduo de vácuo, como ilustrado na Figura II-2.

A extração com solventes é realizada uma vez que no resíduo de vácuo ainda podem estar presentes frações oleosas que podem ter destino mais nobre do que a utilização como óleo combustível e, portanto, são recuperadas na extração.

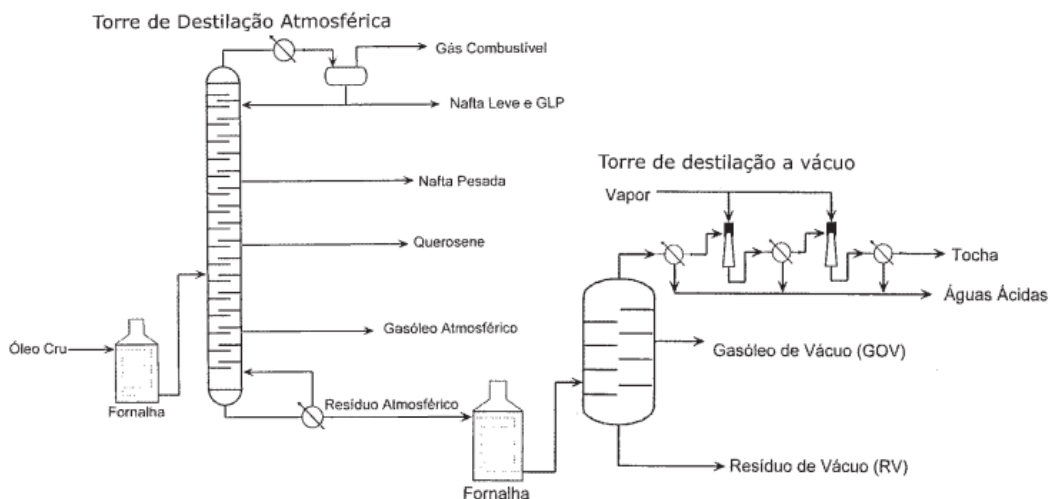


Figura II-2: Desenho esquemático das unidades de destilação atmosférica e à vácuo (GOMES, 2007)

Processos de Conversão

Os processos de conversão são transformações de natureza química dos derivados obtidos nos processos de separação em novos produtos, ou produtos de melhor qualidade. São estes os processos de craqueamento catalítico, a reforma catalítica e o coqueamento retardado.

O craqueamento catalítico é um processo químico que através da quebra de moléculas com o uso de catalisadores transforma frações pesadas em mais leves, tem como carga o gasóleo de vácuo. Na unidade de FCC (craqueamento catalítico fluido) os principais produtos obtidos são o GLP e a nafta, que segue para o “blending” de gasolina.

A reforma catalítica tem por objetivo aumentar a octanagem da gasolina e a obtenção de nafta petroquímica rica em aromáticos (benzeno, tolueno e xilenos) que compõe os petroquímicos básicos. O coqueamento retardado visa agregar valor às frações mais pesadas do petróleo por meio de um craqueamento térmico, desta forma tem normalmente como carga os resíduos da destilação atmosférica e a vácuo e o óleo decantado da unidade de FCC.

Processos de Tratamento

Estes processos visam a aumentar a qualidade das correntes semi-acabadas, eliminando ou reduzindo o nível de contaminantes. Dentre os processos de tratamento destaca-se o processo de hidrotreatamento (HDT).

A unidade de HDT utiliza de reações de hidrogenação objetivando a estabilização dos componentes reativos presentes na carga e a eliminação de contaminantes como enxofre, nitrogênio, oxigênio, halogênios e metais. Dessa forma é possível reduzir a corrosividade das frações, evitar o envenenamento de catalisadores pelos contaminantes e ajustar os produtos para as respectivas especificações.

II.1.2.1. Esquema de refino

O esquema de refino, ou seja, o arranjo das unidades, é definido entre outros aspectos, em função do tipo de petróleo a ser processado e das necessidades do mercado consumidor a ser atendido. Por exemplo, a maioria das refinarias tem por objetivo principal produzir combustíveis ao invés de lubrificantes, porque apesar de os lubrificantes terem maior valor agregado, a demanda de combustíveis é muito maior.

A indústria do refino incorpora um grau de versatilidade maior do que outras indústrias para atender às modificações em seus esquemas operativos. É o que se designa comumente por flexibilidade operacional. Tal versatilidade se refere tanto à qualidade da matéria-prima quanto à qualidade e quantidade dos produtos refinados. Além disso, a diversidade de projetos de uma refinaria não é igualada em qualquer outra indústria (SANTOS, 2006).

Na Figura II-3 pode-se ver um esquema de refino mais voltado para a produção de gasolina e GLP. A Figura II-4 esquematiza uma refinaria com um maior equilíbrio na oferta de óleo diesel e gasolina. Nesta, uma parte da carga que ia do coqueamento para o FCC, processo tipicamente produtor de gasolina, passa a ser enviada para a unidade de hidrotratamento (HDT), processo tipicamente produtor de óleo diesel, gerando no segundo esquema uma maior produção de diesel em relação ao primeiro esquema.

II.1.2.2. Refino no Brasil

Atualmente, segundo o Ministério de Minas e Energia, o Brasil possui treze refinarias e tem um volume refinado médio em torno de 1,8 milhões de barris/dia, como se pode perceber na Tabela II-1.

Tabela II-1: Volume de petróleo refinado em janeiro/2010

| Refinarias | Volume refinado | | | Capacidade Instalada | | Utilização da Capacidade Instalada |
|-----------------------|------------------|-----------------------|----------------|----------------------|-----------------------|------------------------------------|
| | Média jan | | Variação 09/10 | (barris/dia) | (m ³ /dia) | jan/10 |
| | (barris/dia) | (m ³ /dia) | jan/10 | | | |
| IPIRANGA (RS) * | 14.537 | 2.311 | 26,0% | 17.000 | 2.700 | 86% |
| LUBNOR (CE) | 7.586 | 1.206 | 22,4% | 6.900 | 1.100 | 110% |
| MANGUINHOS (RJ) | - | - | -1,3% | 13.800 | 2.200 | 0% |
| RECAP (SP) | 35.398 | 5.628 | 16,7% | 53.500 | 8.500 | 66% |
| REDUC (RJ) | 229.547 | 36.494 | 1,5% | 242.000 | 38.400 | 95% |
| REFAP (RS) | 163.907 | 26.058 | 5,8% | 188.700 | 30.000 | 87% |
| REGAP (MG) | 137.335 | 21.834 | 20,1% | 150.900 | 24.000 | 91% |
| REMAN (AM) | 42.867 | 6.815 | 20,1% | 45.900 | 7.300 | 93% |
| REPAR (PR) | 180.426 | 28.685 | 8,5% | 188.700 | 30.000 | 96% |
| REPLAN (SP) | 296.234 | 47.096 | 8,2% | 364.800 | 58.000 | 81% |
| REVAP (SP) | 247.922 | 39.415 | 1,4% | 251.600 | 40.000 | 99% |
| RLAM (BA) | 252.164 | 40.090 | 5,9% | 323.000 | 51.350 | 78% |
| RPBC (SP) | 166.330 | 26.444 | -3,8% | 169.800 | 27.000 | 98% |
| Total e Médias | 1.774.253 | 282.075 | 0,4% | 2.016.600 | 320.550 | 88% |

* Carga processada: condensados leves.

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2010)

II.1.3. Operações de mistura

Em refinarias, os produtos finais ou semi-acabados são produzidos pela mistura de vários componentes obtidos nas unidades de processamento. A mistura destes componentes em proporções adequadas resulta em um produto com as propriedades de interesse dentro das faixas requeridas para a especificação.

Um típico processo de mistura é representado na Figura II-6. Vários componentes são bombeados dos tanques de produtos intermediários para um misturador. Em seguida o produto final é armazenado num tanque, ou direcionado para outra unidade da refinaria ou ainda pode ser diretamente transportado para fora da refinaria (CHÈBRE, CREFF, & PETIT, 2010).

Conforme Glismann e Gruhn (2001), os processos de mistura podem ser caracterizados pelas seguintes funcionalidades chave:

- Os componentes das misturas apresentam propriedades extensamente diferentes e são fornecidos continuamente ou em batelada. Eles são enviados para tanques intermediários. As propriedades e a vazão dos componentes geralmente variam ao longo do tempo;

- Os diferentes componentes são misturados de acordo com a receita em linha ou em um tanque de mistura;
- As misturas são estocadas em tanques e/ ou enviadas diretamente para o cliente;
- As receitas devem garantir a especificação do produto de interesse com o mínimo de “give-away”¹. Os limites das propriedades dos produtos geralmente são restringidos por lei;
- Produtos similares podem ser misturados pela aplicação de diferentes receitas.

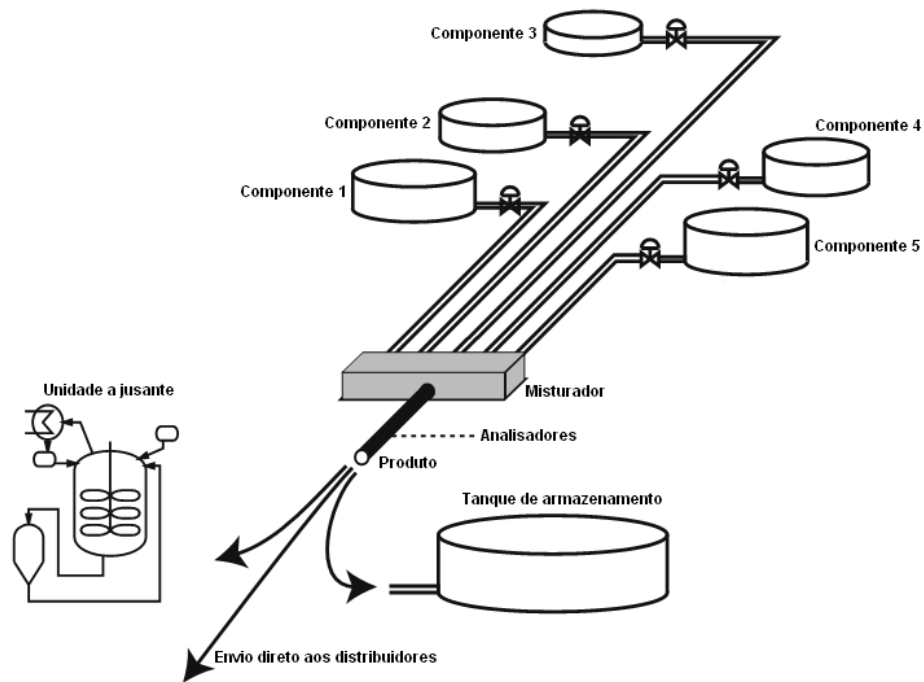


Figura II-6: Processo típico de mistura (CHÈBRE, CREFF, & PETIT, 2010)

Dessa forma, segundo Costa *et al.* (2010), um problema de mistura ou “blending” consiste na determinação da receita viável e ótima de um derivado produzido através da mistura de componentes. Devendo ser respeitadas restrições de disponibilidade dos componentes, bem como a existência ou não de receitas pré-definidas para a produção da mistura e, ainda, restrições de volume e qualidade final da mesma. Neste sentido as métricas normalmente utilizadas são o máximo lucro associado à produção da mistura, o mínimo custo da mesma, o mínimo custo associado ao desperdício de qualidade, o

¹ Venda de um produto com uma qualidade superior à necessária.

mínimo desvio em relação a uma receita desejada e o máximo de determinados componentes na mistura.

A Figura II-7 apresenta as principais considerações que devem ser feitas na solução de um problema de mistura. Infinitas soluções viáveis para o problema de “blending” estão localizadas na região delimitada por restrições físicas, operacionais e econômicas do modelo de otimização.

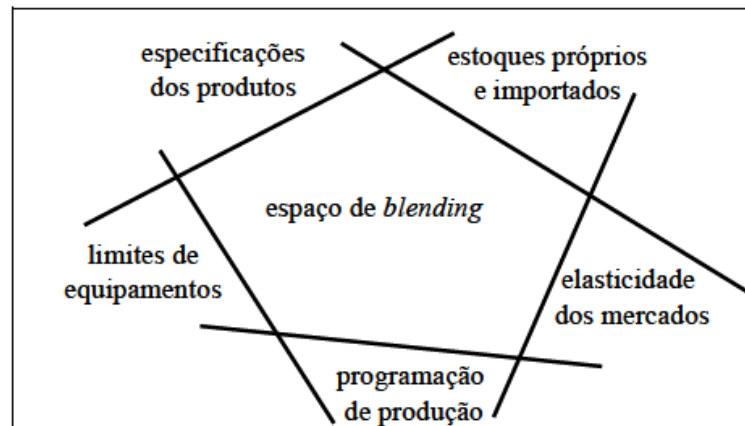


Figura II-7: Representação Esquemática das Possibilidades de Mistura (FERREIRA, 2008)

Atualmente no Brasil a mistura em linha é controlada de forma que há medições das propriedades na corrente de saída da mistura, e nas correntes de entrada são feitas medições apenas nas correntes mais críticas para minimizar o alto custo de obtenção e manutenção dos analisadores

Este processo de otimização e controle de mistura em linha ainda não é muito difundido no Brasil, sendo aplicado em poucas refinarias, no caso do diesel este procedimento é realizado apenas na REPLAN e na REFAP.

II.1.4. Diesel Automotivo

O óleo diesel é o principal combustível comercializado no mercado brasileiro. Ele é utilizado principalmente nos transportes de cargas e de passageiros, nas máquinas agrícolas e locomotivas (PETROBRAS, 2010).

No entanto, segundo Martins (2002), o Brasil ainda não é auto-suficiente em óleo diesel, o que pode ser confirmado pelo gráfico da Figura II-8, retirado do relatório mensal de derivados de petróleo do Ministério de Minas e Energia.

Isto pode ser explicado pelo fato de que apesar do óleo diesel ser o derivado de maior consumo no país, o perfil de produção das refinarias brasileiras, ou seja, as faixas

de rendimento dos vários derivados de petróleo, assim como a capacidade de processamento das mesmas, limitam a produção interna de óleo diesel. A diferença entre o grande consumo e a produção limitada é coberta por importações do produto (FERREIRA, 2008).

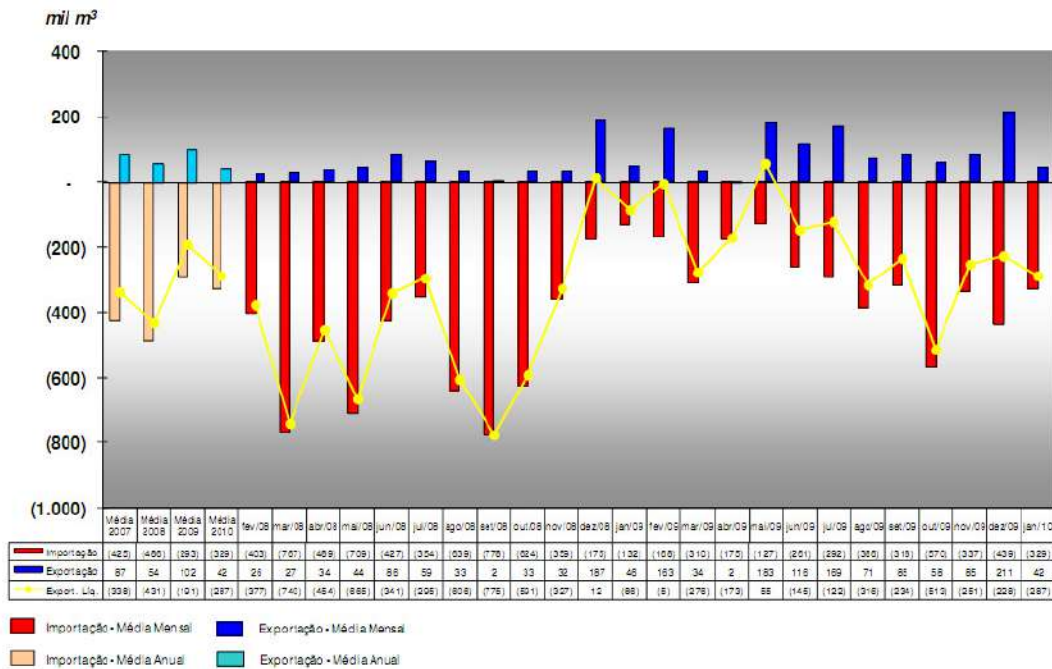


Figura II-8: Óleo Diesel - Exportação e Importação: fev/08 a jan/10
 Fonte: Ministério de Minas e Energia (2010)

De acordo com a Petrobras (PETROBRAS, 2010) atualmente no Brasil, os tipos de diesel comercializados são o diesel interior (S1800), o diesel metropolitano (S500) e desde janeiro de 2009 também está sendo comercializando o diesel S50, essas classificações se diferenciam basicamente pela concentração de enxofre, a qual a tendência é ser cada vez menor.

O diesel metropolitano apresenta um teor de enxofre de no máximo 500 partes por milhão (ppm), é encontrado nos centros urbanos onde há grande circulação de veículos, utilizado em ônibus, caminhões e outros transportes pesados.

O diesel interior é o combustível mais comercializado no Brasil. Ele é utilizado em locomotivas, máquinas agrícolas, tratores, colheitadeiras e em veículos de transporte de cargas e passageiros. É encontrado nos municípios brasileiros com menor circulação de frotas. Entre as características que o diferenciam do diesel metropolitano está a

concentração de no máximo 1800 partes por milhão de enxofre e a aplicação de um corante vermelho para um rápido e fácil reconhecimento pelos consumidores.

O Diesel S50 tem uma concentração de 0,005% de enxofre em sua composição (50 partes por milhão), o que permite uma redução maior das emissões de material particulado para o meio ambiente. Em janeiro de 2009, iniciou-se o fornecimento do Diesel S50 para as frotas cativas de ônibus urbanos das cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. No mês de maio, foi ampliada a distribuição para toda a frota de veículos metropolitanos em Fortaleza, Recife e Belém (PETROBRAS, 2010).

Segundo Ferreira (2008), a REPLAN, refinaria de maior capacidade instalada no Brasil, produz cerca de 800 000 m³ de óleo diesel interior e 100 000 m³ de óleo diesel metropolitano por mês, além de aproximadamente 100.000 m³ mensais de óleo diesel externo, que atendem a 25% do mercado brasileiro de óleo diesel.

As especificações do produto estão se tornando cada vez mais restritivas, motivadas por fatores como qualidade do produto, saúde e meio-ambiente, o que, assim como a diferença entre a demanda e a produção, estimula os esforços para a otimização da produção do óleo diesel.

Dentre os aperfeiçoamentos alcançados pelas especificações brasileiras do óleo diesel nos últimos anos, destaca-se o aumento do número de cetano de 40 para 42, a expressiva redução do teor de enxofre e a modificação da massa específica máxima para 865 Kg/m³ (óleo diesel metropolitano). Também se destacou a fixação do ponto de fulgor mínimo em 38°C, motivada pela segurança no manuseio do produto (FERREIRA, 2008).

A Tabela II-2 mostra algumas das especificações definidas pela ANP para o diesel:

Tabela II-2: Especificações para o Diesel

| CARACTERÍSTICA | LIMITE | | |
|--|-------------------------------|-----------|-----------|
| | S50 | S500 | S1800 |
| Aspecto | Límpido e isento de impurezas | | |
| Enxofre total, máx. (mg/kg) | 50 | 500 | 1800 |
| Massa específica a 20°C (kg/m ³) | 820 a 850 | 820 a 865 | 820 a 880 |
| Ponto de fulgor, mín. (°C) | 38 | | |
| Viscosidade a 40°C (mm ² /s) | 2,0 a 5,0 | | |
| Número de cetano, mín. | 46 | 42 | 42 |
| Número de cetano derivado (NCD), mín. | 46 | 42 | 42 |
| Cinzas, máx. (% massa) | 0,01 | | |
| Corrosividade ao cobre, 3h a 50°C, máx | 1 | | |
| Água e sedimentos, máx. (% volume) | 0,05 | | |
| Condutividade elétrica, mín (pS/m) | 25 | - | - |

Fonte: ANP (2009)

Em outubro de 2009 foi publicada a resolução nº6, do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE, 2009) estabelecendo o mínimo de 5% de adição de biodiesel ao óleo diesel comercializado ao consumidor final. O B5 passou a ser obrigatório em todo o território brasileiro a partir de 1º de janeiro de 2010.

A expansão da participação do biodiesel na matriz energética nacional é, em bases econômicas, sociais e ambientais, um objetivo da política energética nacional; o maior uso de biodiesel favorece a agregação de valor às matérias-primas oleaginosas de origem nacional, o desenvolvimento da indústria nacional de bens e serviços e a ampliação da geração de emprego e renda em sua cadeia produtiva; o biodiesel é uma fonte energética renovável e favorece a redução das emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa, assim como possibilita a redução da importação de diesel derivado de petróleo, com efetivos ganhos na balança comercial (CNPE, 2009).

II.2. Otimização

Fletcher (1987) define otimização como a ciência de determinar as “melhores” soluções para certos problemas definidos matematicamente, que são, frequentemente, modelos de realidades físicas. Isto envolve o estudo de critérios ótimos para o problema, a determinação de métodos algorítmicos para sua solução, o estudo da estrutura de tais métodos e testes computacionais destes, tanto em condições experimentais quanto aplicados a problemas reais.

Segundo Rao (1995), métodos de otimização são conhecidos desde a época de Newton, Lagrange e Cauchy. Nesta época surgiram contribuições importantes para a otimização, tais como os métodos de cálculo diferencial desenvolvidos por Newton e Leibnitz, fundamentos da minimização de funções relatados por Bernoulli, Euler, Lagrange e Weirstrass e a técnica de otimização de funções com restrição através da adição de multiplicadores, desenvolvida por Lagrange.

Apesar de todas estas contribuições, pouco progresso foi obtido nessa área até a metade do século XX, quando a utilização de computadores digitais tornou possível a implementação de técnicas de otimização, estimulando o desenvolvimento desta área. A partir daí, a otimização se tornou uma área de extremo interesse científico, resultando na produção de uma literatura massiva acerca de técnicas de otimização (RAO, 1995).

O desejo de resolver um problema da melhor maneira possível é tão comum que modelos de otimização podem ser encontrados em quase todas as áreas. Estes modelos podem ser utilizados para conduzir um negócio com o maior lucro, o menor custo, a

maior eficiência ou o menor risco possível; podem ser utilizados para construir uma ponte com a maior resistência ou o menor peso; ou ainda para escolher uma rota que minimize o gasto de combustível ou o tempo de vôo de um avião (GRIVA, NASH, & SOFER, 2008).

Segundo Edgar e Himmelblau (1988), a otimização é uma das maiores ferramentas quantitativas para a tomada de decisões. A sua aplicação permeia os campos da ciência, engenharia e economia. Em uma planta industrial, uma grande variedade de problemas, em diversas etapas da implantação e operação da planta, tais como planejamento, construção, operação e análise de dados, podem ser resolvidos utilizando técnicas de otimização.

Atualmente, a otimização se tornou essencial, à medida que os negócios ficaram maiores e mais complicados. Em muitas circunstâncias já não é possível tomar decisões sem o uso de tais ferramentas. Em uma multinacional, por exemplo, uma pequena melhoria percentual na operação pode levar a aumentos significativos no lucro (GRIVA, NASH, & SOFER, 2008).

Problemas típicos de engenharia química tem muitas, possivelmente infinitas, soluções. A otimização busca encontrar a melhor dentre estas soluções utilizando métodos quantitativos eficientes, no lugar de tomadas de decisões intuitivas (EDGAR & HIMMELBLAU, 1988).

A formulação do problema é, talvez, o passo mais crucial para se resolver um problema de otimização. Para a formulação do problema faz-se necessário identificar os aspectos mais importantes do processo em estudo e organizá-los em uma dada estrutura matemática, composta de função objetivo (critérios econômicos) e modelo do processo (restrições) (EDGAR & HIMMELBLAU, 1988).

A função objetivo representa aquilo que se deseja maximizar ou minimizar (lucro, custo, energia, rendimento, etc.) em termos das variáveis-chave do processo a ser analisado. O modelo e as restrições do processo descrevem as inter-relações entre as variáveis-chave (EDGAR & HIMMELBLAU, 1988).

O modelo utilizado na otimização pode ser obtido pelo conhecimento prévio do comportamento do processo em questão, ou através de dados experimentais. Este modelo utiliza condições operacionais do processo como temperatura, pressão e vazão de alimentação das correntes de entrada, para prever as taxas de produção e algumas propriedades mensuráveis da corrente de saída. O modelo econômico envolve custo dos

materiais, valores dos produtos e custos de produção como função das condições operacionais (SEBORG et al. , 2003).

Segundo Seborg et al (2003), restrições típicas para tais modelos incluem: limites de vazão definidos pela capacidade das válvulas, limites para as características físicas do produto devido a restrições ambientais e limites para as taxas de produção devido a limitações na quantidade de matéria-prima disponível, na necessidade do mercado e na capacidade disponível para armazenamento do produto.

Em malhas de controle, a otimização é tipicamente utilizada para fornecer “set-points” para os controladores. Em alguns casos, a otimização é realizada apenas uma vez e controladores servos procuram manter as variáveis controladas nos “set-points” que foram definidos pela otimização. Este tipo de processo é chamado de otimização “offline”. Uma alternativa a este processo, conhecida como otimização “online”, ou otimização em tempo real (RTO), consiste em repetir a otimização a cada intervalo de tempo, calculando novos “set-points” para o processo, os quais são enviados para controladores regulatórios, que ajustam as variáveis manipuladas para atingir um novo estado estacionário. Segundo Seborg et al (2003), a combinação de RTO e controle regulatório é análoga a um controle em cascata.

II.2.1. Otimização em uma empresa

Devido à grande complexidade e ao grande número de operações que ocorrem simultaneamente em uma indústria, uma otimização completa da operação desta, abrangendo todos os níveis de tomada de decisões e considerando todas as informações disponíveis, não é uma tarefa viável, não só devido ao grande esforço computacional que esta demandaria, mas também considerando a diferente periodicidade com que as informações estão disponíveis.

Segundo Pinto, Joly, e Moro (2000), a otimização das unidades de produção isoladamente não é capaz de alcançar a otimização econômica da indústria. Com isto em mente, a otimização de plantas industriais vem sendo objeto de intenso estudo, e foram desenvolvidas diversas abordagens para tratar o assunto.

A otimização pode ser efetuada em diferentes níveis dentro de uma empresa, desde uma combinação complexa de plantas e unidades de suprimentos, passando por plantas individuais, combinações de unidades, equipamentos, peças de equipamentos, até entidades menores (BEVERIDGE & SCHECTER, 1970). Deste modo, o escopo de um problema de otimização pode ser toda a empresa, uma planta, um processo, um

equipamento, uma peça de um equipamento, ou qualquer sistema intermediário entre estes (SECCHI, 2005).

A Figura II-9 ilustra um esquema típico de hierarquia de tomada de decisões em uma empresa. As otimizações nos níveis hierárquicos mais altos são realizadas com uma frequência menor, e ditam os objetivos e restrições para as otimizações em níveis inferiores.

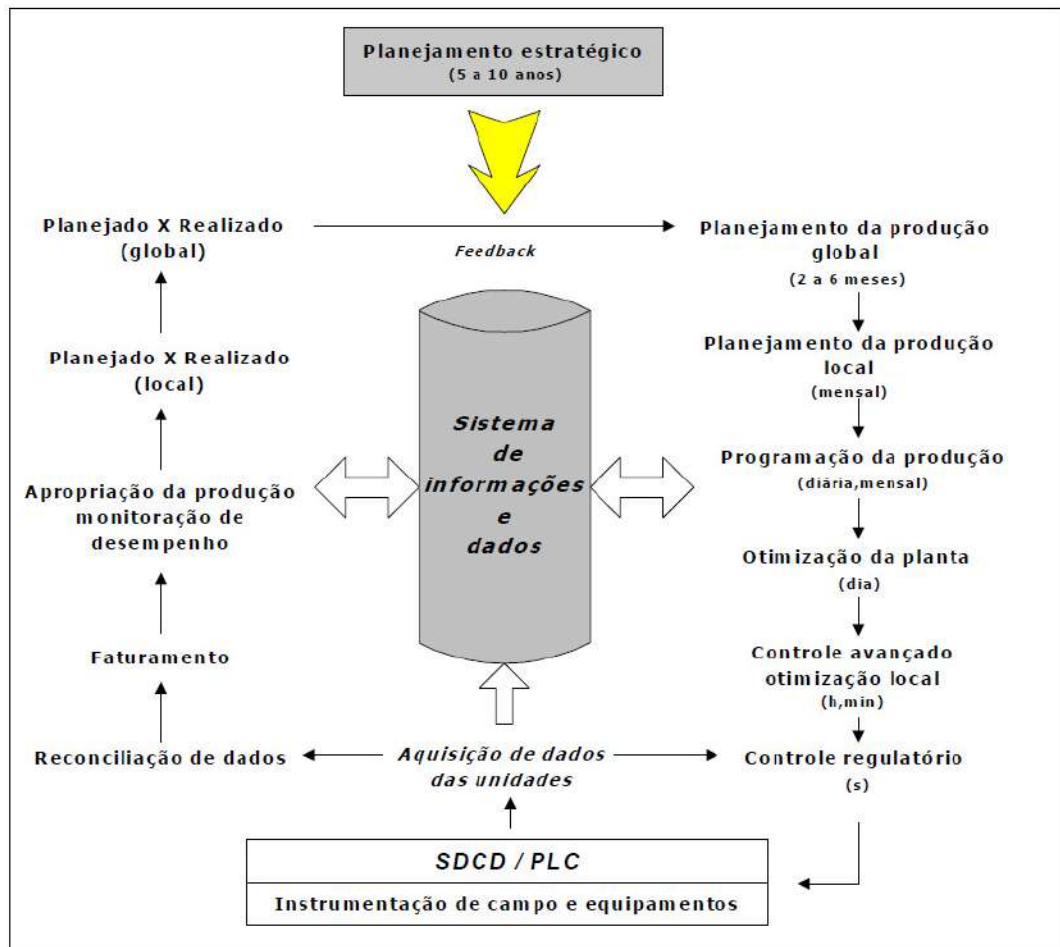


Figura II-9: Hierarquia de tomada de decisões em uma empresa. (FERREIRA, 2008)

O problema considerado neste trabalho trata da otimização de um processo de mistura isoladamente, e não considera a influência das outras unidades neste processo. Assim sendo, o escopo deste trabalho concentra-se nos dois últimos níveis de otimização ilustrados na Figura II-9, otimização local e controle regulatório, e a otimização proposta tem como objetivo encontrar o ponto de operação ótimo para este processo apenas, sem se preocupar com a otimização global da refinaria.

II.2.2. Breve revisão sobre métodos de otimização

Genericamente, a otimização tem como objetivo resolver a equação:

$$\min_x f(x) \quad (\text{II-1})$$

Ou

$$\max_x f(x) \quad (\text{II-2})$$

Sujeito a:

$$g_i(x) = 0 \quad (\text{II-3})$$

$$g'_j(x) \leq 0 \quad (\text{II-4})$$

onde $i = 1, 2, 3, \dots, n$,

$j = 1, 2, 3, \dots, m$,

e x pode ser um escalar ou um vetor.

Nenhum método de otimização é capaz de resolver todos os problemas existentes. Cada caso deve ser analisado individualmente, a fim de encontrar o método que melhor se adequa às suas características específicas. Edgar e Himmelblau (1988) listam seis passos que devem ser seguidos para a resolução de problemas de otimização:

1. Análise do processo e de suas variáveis.
2. Determinação do critério para otimização e especificação da função objetivo em termos das variáveis de processo, definidas no passo 1.
3. Desenvolvimento do modelo do processo, usando restrições de igualdade e desigualdade, a partir de modelos físicos, relações empíricas e restrições externas. Identificação do grau de liberdade do sistema.
4. Simplificação do problema, caso este seja muito complicado. O problema pode também, ser dividido em problemas menores.
5. Aplicação de uma técnica apropriada de otimização.
6. Análise da resposta obtida, e da sensibilidade desta resposta frente a variações no modelo e nos parâmetros utilizados.

Os passos de 1 a 4 envolvem a definição matemática do problema, e possíveis simplificações para estas equações, sem perder a essência do problema por elas representado. O passo 6 visa verificar se a solução obtida é de fato uma solução ótima, e se esta solução é representativa. O passo 5 refere-se à otimização propriamente dita, e a escolha de um método apropriado é essencial para um bom desempenho da otimização.

De acordo com Edgar e Himmelblau (1988), o método escolhido para cada caso vai depender, principalmente, das características da função objetivo, da natureza das restrições e do número de variáveis dependentes e independentes.

Programação linear

Em casos especiais onde todas as equações (função objetivo e restrições) são lineares, um método conhecido como programação linear pode ser aplicado. Muitos casos que envolvem equações não-lineares podem ser linearizados, para que a programação linear possa ser aplicada também a esses casos.

Segundo Edgar e Himmelblau (1988), a programação linear é uma das técnicas de otimização mais utilizadas e uma das mais eficientes. Com a ajuda de códigos computacionais, é possível resolver problemas com centenas, e até milhares de variáveis e restrições.

Na programação linear, a função objetivo é uma função convexa e as restrições formam um conjunto convexo, assim sendo, um ótimo local também será um ótimo global para o problema. Além disso, problemas de programação linear também apresentam a peculiaridade de que a solução para o problema sempre se encontra sobre uma restrição, ou na interseção entre restrições, e nunca no interior da região onde todas as restrições de desigualdade são satisfeitas (EDGAR & HIMMELBLAU, 1988).

Otimização sem restrições

Para a otimização sem restrições as técnicas de otimização existentes podem ser divididas em duas categorias: métodos de busca (ou métodos diretos) e métodos analíticos (ou métodos indiretos) (SECCHI, 2005).

Os métodos diretos são aqueles que buscam um ponto extremo (de máximo ou de mínimo) através da comparação direta dos valores de $f(x)$ para uma seqüência de pontos de teste (EDGAR & HIMMELBLAU, 1988). Os diversos métodos existentes nesta categoria diferem na forma de definir os pontos a serem testados. Secchi (2005), cita alguns destes métodos: método da seção áurea, método da aproximação polinomial, método de busca seccionada, método de Hooke & Jeeves, método dos poliedros flexíveis, e métodos de busca aleatória, como o método Complex, ou a otimização por enxame de partículas.

Os métodos indiretos calculam pontos de máximo ou mínimo em potencial utilizando as condições necessárias de otimalidade, as derivadas analíticas das funções e

os valores da função objetivo. Em comparação com os métodos diretos, estes métodos não necessitam de tanto esforço computacional, e, geralmente, convergem mais rápido. Porém, os métodos diretos são mais facilmente aplicáveis a funções mais complexas, por exemplo, funções com pontos de descontinuidade ou pontos de inflexão (EDGAR & HIMMELBLAU, 1988). Secchi (2005), cita os métodos mais relevantes desta categoria: métodos gradientes, método de Newton, método do gradiente conjugado, entre outros.

Otimização com restrições

A otimização com restrições é matematicamente mais complicada que a otimização sem restrições, e a maioria dos métodos existentes para resolver esse tipo de problema busca simplificar as equações e resolver o problema simplificado.

Segundo Edgar & Himmelblau (1988), uma maneira de manipular as restrições de igualdade é resolvê-las explicitamente para uma das variáveis, e eliminar esta variável da otimização. Infelizmente, em poucos problemas reais é possível eliminar as restrições desta maneira.

Uma simplificação típica para problemas com restrições de desigualdade consiste em transformá-las em restrições de igualdade, que são mais simples de se trabalhar.

De acordo com Edgar & Himmelblau (1988), os métodos mais utilizados para a resolução de problemas de otimização com restrições são: métodos iterativos lineares ou quadráticos, o método das funções penalidade e o método dos multiplicadores de Lagrange.

Os métodos iterativos são a forma mais simples de se resolver uma otimização com restrições. Estes consistem em aproximar o problema por uma equação linear ou quadrática, em torno de um ponto inicial, e realizar a otimização em torno deste ponto. Como resultado obtém-se um novo ponto, mais próximo do ótimo do que o ponto inicial. O procedimento é, então, repetido para este novo ponto e este processo continua até que se obtenha um ponto ótimo para o problema.

O método das funções penalidade busca reduzir o problema a uma única equação, sem restrições, que deve ser minimizada ou maximizada. Para isto, termos de penalidade referentes às restrições são adicionados a função objetivo. Embora muitas críticas sejam feitas a esse método, uma vez que ele converge lentamente e pode apresentar instabilidade numérica, ele ainda é bastante utilizado, por ser geral e simples em relação aos outros métodos de otimização com restrições (EDGAR & HIMMELBLAU, 1988).

O método dos multiplicadores de Lagrange também busca reduzir o problema com restrições a um problema sem restrições. Para isto, as restrições de igualdade e desigualdade são somadas a função objetivo, multiplicadas por fatores conhecidos como multiplicadores de Lagrange (SECCHI, 2005).

II.3. Aspectos computacionais da otimização implementada

Restringindo-se agora a revisão apenas à abordagem adotada neste trabalho, a qual deveria retornar o ponto de mínimo de uma função não-linear, multivariável, sujeita a restrições lineares e não-lineares, adotou-se a função ‘fmincon’ do MATLAB. De acordo com a Mathworks (MATHWORKS, 2010), essa função resolve o seguinte problema:

$$\min_x f(x) \quad (\text{II-5})$$

Sujeito a:

$$c(x) \leq 0 \quad (\text{II-6})$$

$$ceq(x) = 0 \quad (\text{II-7})$$

$$A \cdot x \leq b \quad (\text{II-8})$$

$$Aeq \cdot x = beq \quad (\text{II-9})$$

$$lb \leq x \leq ub \quad (\text{II-10})$$

onde x , b , beq , lb e ub são vetores, A e Aeq são matrizes, $c(x)$ e $ceq(x)$ são funções que retornam vetores e $f(x)$ é uma função que retorna um escalar.

A equação (II-5) refere-se à minimização da função objetivo; as equações (II-6) e (II-7) são as restrições não-lineares de desigualdade e de igualdade, respectivamente; as equações (II-8) e (II-9) são as restrições lineares de desigualdade e de igualdade, respectivamente e a equação (II-10) descreve os limites impostos para os valores de x , onde lb e ub são, respectivamente, os limites inferior e superior.

A ‘fmincon’ utiliza três algoritmos diferentes para a resolução do problema de otimização: o método da região de confiança, o método dos conjuntos ativos e o método do ponto interior.

Método da região de confiança

O método da região de confiança aproxima a função $f(x)$ por uma função mais simples $q(x)$, que reflete razoavelmente bem o comportamento da função $f(x)$ nas vizinhanças de um ponto x_0 , um chute inicial para x . Esta região é chamada região de confiança. A função $q(x)$ é, então, minimizada dentro da região de confiança e o ponto x_0 é atualizado para $x_0 + s$, se $f(x_0+s) < f(x)$; caso não se obtenha resultado, a região de confiança é reduzida, e a minimização é refeita.

Tipicamente, a função $q(x)$ é uma aproximação quadrática, definida pelos dois primeiros termos da série de Taylor de $f(x)$ em torno do ponto x_0 . A região de confiança é geralmente esférica ou elipsoidal. Porém, o esforço computacional necessário para resolver problemas com muitas variáveis por este método é muito grande (MORE & SORENSEN, 1983).

Desta forma, o método utilizado pela Toolbox 'fmincon' (MATLAB, versão 7.6.0.324) para problemas deste tipo consiste em reduzir a região de confiança a um espaço bi-dimensional.

O algoritmo descrito acima é utilizado para problemas sem restrição, porém modificações podem ser feitas de modo a possibilitar que este mesmo algoritmo seja utilizado para problemas com restrições lineares ou limites superiores e inferiores para as variáveis. Este algoritmo não resolve problemas com restrições não-lineares.

Método dos conjuntos ativos

A otimização com restrições geralmente se baseia em transformar o problema original em um subproblema mais simples, que pode ser resolvido, que é utilizado como base para um processo iterativo.

Originalmente, o método dos conjuntos ativos consistia em reduzir o problema com restrições a um problema sem restrições, incluindo no problema uma função penalidade para restrições que estão próximas de seus limites, ou estão sendo violadas. Desta forma, o problema original é resolvido utilizando uma série de otimizações parametrizadas sem restrição, que, no limite, convergem para uma otimização com restrições.

Porém, este método é, atualmente, considerado relativamente ineficiente, e em versões mais recentes do MATLAB (incluindo a versão utilizada neste trabalho), foi substituído por métodos que se concentram na solução das equações de Karush-Kuhn-Tucker (KKT).

As equações KKT são condições necessárias para a otimalidade de problemas de otimização com restrições. Para problemas ditos convexos, as equações KKT são condições necessárias e suficientes para a obtenção de uma solução global. Um problema de otimização é dito convexo se tanto a função objetivo quanto as restrições são equações convexas.

As equações KKT formam a base para muitos algoritmos de programação não-linear. Além do problema geral de otimização (função objetivo e restrições de igualdade e desigualdade), estes algoritmos se utilizam ainda de equações que ponderam os pesos da função objetivo e das restrições ativas, de modo a obter a solução ótima. Tais equações, baseada no uso de multiplicadores de Lagrange, são chamadas equações de Kuhn-Tucker.

Este método é comumente conhecido como programação quadrática seqüencial.

Método do ponto interior

Consiste na resolução de uma série de problemas de minimização aproximados.

A aproximação utilizada por este algoritmo transforma as restrições de desigualdade em restrições de igualdade, que são mais simples de resolver.

Para cada iteração, o algoritmo pode utilizar dois tipos de passo: em primeiro lugar, o algoritmo tenta utilizar um passo direto, também chamado passo de Newton, que busca resolver as equações KKT para o problema aproximado por uma aproximação linear; caso não seja possível usar um passo direto, como no caso do problema não ser convexo perto do ponto de iteração, o algoritmo utiliza um passo de gradiente conjugado, usando uma região de confiança (WALTZ, MORALES, NOCEDAL, & ORBAN, 2006).

Como a função objetivo a ser utilizada neste trabalho apresenta restrições não-lineares, o método da região de confiança não é capaz de resolver este problema e a otimização é realizada pelo método dos conjuntos ativos.

Capítulo III. Metodologia

III.1. Unidade de mistura para estudo

O processo estudado neste trabalho é o de mistura em linha para produção e certificação de diesel interior e metropolitano em uma refinaria de petróleo. O processo é composto por cinco correntes de alimentação, cada uma contendo um dos seguintes produtos: 1. diesel pesado, 2. diesel leve, 3. querosene, 4. nafta pesada e 5. diesel HDT, o que caracteriza uma situação industrial típica. Essas correntes são alimentadas em um misturador em linha e o produto deste misturador segue para um tanque de armazenamento de óleo diesel. Este tanque opera em batelada e, ao final do processo, é certificado e vendido. Um esquema deste processo pode ser observado na Figura III-1.

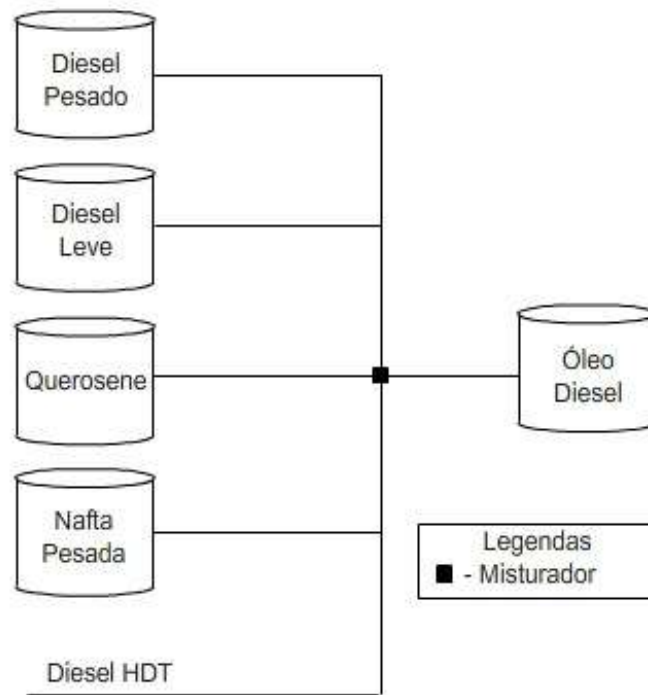


Figura III-1: Representação esquemática do processo simulado

Para a modelagem deste processo e dos elementos de atuação e medida, foram feitas as seguintes suposições: *i.* a mistura forma uma solução ideal; *ii.* o misturador é estático; *iii.* as dinâmicas das válvulas e dos elementos de medida são desprezíveis; *iv.* o sistema é isotérmico.

Misturador estático:

Fazendo o balanço de massa global e por componente (para o enxofre) para o misturador, as equações (III-1) e (III-2), respectivamente, foram obtidas.

$$F_m d_m = \sum_{c=1}^5 F_c d_c \quad (\text{III-1})$$

e

$$F_m d_m S_m = \sum_{c=1}^5 F_c d_c S_c \quad (\text{III-2})$$

onde d_c é a densidade relativa do componente c [adimensional]; S_c é a concentração de enxofre do componente c [ppm] e F_c , a vazão volumétrica do componente c [m^3/h]. Os subscritos numerados de 1 a 5 denotam cada uma das correntes de alimentação, o subscrito m denota uma propriedade da mistura na saída do misturador.

Para possibilitar o cálculo da densidade da mistura, considerou-se válida a equação:

$$F_m = \sum_{c=1}^5 F_c \quad (\text{III-3})$$

Esta equação vem da suposição de solução ideal, uma aproximação comumente adotada para cálculos de misturas líquidas em temperaturas próximas à ambiente. Isto significa dizer que o volume adotado por cada componente permanece inalterado após a mistura, ou seja, os efeitos de interação entre os componentes são desprezados (FERREIRA, 2008).

Com isso, pode-se obter as equações que descrevem a densidade e o enxofre da mistura, em função das propriedades das correntes de entrada:

$$d_m = \frac{\sum_{c=1}^5 F_c d_c}{\sum_{c=1}^5 F_c} \quad (\text{III-4})$$

e

$$S_m = \frac{\sum_{c=1}^5 F_c d_c S_c}{\sum_{c=1}^5 F_c d_c} \quad (\text{III-5})$$

Tanque de Armazenamento:

Para a modelagem do tanque de armazenamento, optamos por uma abordagem discretizada. Desta forma, para um dado instante t , o volume no tanque é dado por:

$$V_T(t) = \sum_{i=1}^t F_m(i) \quad (\text{III-6})$$

onde o subscrito T refere-se ao tanque de armazenamento.

A densidade no tanque, em cada instante i , é dada por:

$$d_T(i) = \frac{V_T(i-1) \times d_T(i-1) + F_m(i) \times d_m(i)}{V_T(i)} \quad (\text{III-7})$$

e a concentração de enxofre no tanque, em cada instante i , é dada por:

$$S_T(i) = \frac{V_T(i-1) \times d_T(i-1) \times S_T(i-1) + F_m(i) \times d_m(i) \times S_m(i)}{V_T(i) \times d_T(i)} \quad (\text{III-8})$$

III.2. Otimização

III.2.1. Descrição e Objetivos da Otimização

Nesta aplicação, a otimização tem como objetivo determinar, a cada instante de tempo, a vazão de cada corrente de entrada que deve ser adicionada ao produto, para que este resulte no maior lucro possível neste instante, sem violar as especificações impostas a ele. É importante ressaltar, porém, que esta otimização abrange apenas as correntes de 1 a 4; a corrente 5 é considerada uma corrente “selvagem”, e o otimizador não tem controle sobre ela, pois se assumiu aqui que todo o diesel oriundo da unidade de hidrotreamento deveria ser incorporado ao diesel final

Desta forma, a otimização consiste em maximizar a função lucro para este processo, sujeita às restrições de densidade e concentração de enxofre impostas ao produto, além de outras restrições inerentes ao processo, como limites máximos de vazão impostos pelas válvulas. Em alguns casos, limites mínimos de vazão também foram

estabelecidos, a fim de se evitar que a corrente deixasse de ser utilizada no processo, além de se obter uma produtividade mínima a cada instante de tempo.

O otimizador atua levando em consideração as propriedades do produto em linha, na corrente que sai do misturador. As propriedades do produto no tanque não são consideradas para a otimização.

Dessa forma, foram adotadas estratégias de otimização, supondo:

- i. função objetivo para maximizar o lucro;
- ii. restrições físicas de operação e qualidade;
- iii. emprego do modelo do processo de mistura descrito no item III.1;
- iv. variáveis de otimização dadas pelas vazões das correntes de alimentação do misturador em linha (com exceção da corrente do HDT, conforme explicação anterior);
- v. distúrbio determinístico dado pela vazão da corrente de diesel HDT.

Formulando matematicamente o problema tem-se que o objetivo é maximizar a função:

$$L = F_m P - \sum_{c=1}^5 F_c C_c \quad (\text{III-9})$$

onde L é o lucro obtido [R\$/h]; P, o preço do produto final [R\$/m³]; C_c, o custo da corrente c [R\$/m³]; F_c, a vazão volumétrica do componente c [m³/h] e F_m, a vazão volumétrica do diesel na saída do misturador [m³/h]. O subscrito c denota uma corrente de alimentação enquanto o subscrito m denota uma propriedade da mistura na saída do misturador.

Sujeita às restrições:

$$d_{min} \leq d_m \leq d_{m\acute{a}x} \quad (\text{III-10})$$

$$S_m \leq S_{m\acute{a}x} \quad (\text{III-11})$$

$$F_{m,min} \leq F_m \leq F_{m,\acute{a}x} \quad (\text{III-12})$$

e

$$F_{c,min} \leq F_c \leq F_{c,\acute{a}x} \quad (\text{III-13})$$

onde d_m é a densidade relativa do diesel na saída do misturador [adimensional]; S_m , a concentração de enxofre do diesel na saída do misturador [ppm] e os subscritos min e máx denotam, respectivamente, os valores mínimo e máximo permitidos para uma propriedade no produto final.

Foram empregadas três estratégias de otimização: “feedforward”, “feedback” e híbrida (“feedforward” com correções “feedback”).

Ressalva-se *a priori* que, apesar das terminologias “feedback” e “feedforward” remeterem imediatamente a estruturas de controle clássico (PIDs e “lead-lags”, para “feedback” e “feedforward”, respectivamente), essas denominações são aqui adotadas sob um ponto de vista mais conceitual, ou seja, em função da localização das medições empregadas – se da resposta do processo ou da sua alimentação, para “feedback” ou “feedforward”, respectivamente – na abordagem de otimização e não da estrutura de controladores.

Em todas as estratégias aqui adotadas, supôs-se uma estrutura hierárquica na qual o otimizador está acima de malhas de controle de vazão com controladores PIs, de modo que os valores das vazões de alimentação obtidos pelo otimizador serviam como “set-points” (à guisa de uma esquema clássico de controle em cascata) para os PIs (escravos, novamente à guisa de esquemas em cascata convencionais).

Na sequencia, as especificidades das estratégias propostas são apresentadas.

III.2.2. Estratégia “Feedforward”

Em um controle “feedforward” os distúrbios são medidos e as ações de controle podem ser projetadas com base em um modelo do processo, de modo a evitar que a saída seja afetada. Similarmente, utilizou-se aqui uma estratégia “feedforward”, na qual a densidade e a concentração de enxofre das correntes de entrada (os distúrbios) são medidas e enviadas ao otimizador, que irá utilizá-las para definir os “set-points” para os controladores de vazão das correntes. Ressalva-se que a camada regulatória não foi efetivamente simulada nem para esta estratégia nem para as demais, pois se considerou sua dinâmica muito mais rápida que aquela associada à camada de otimização. A Figura III-2 ilustra esta estratégia.

Esta estratégia supõe que medições de densidade e enxofre para cada uma das correntes de alimentação estejam disponíveis a cada instante de tempo. Sendo assim, a otimização “feedforward” consiste apenas em resolver a função objetivo em cada instante i .

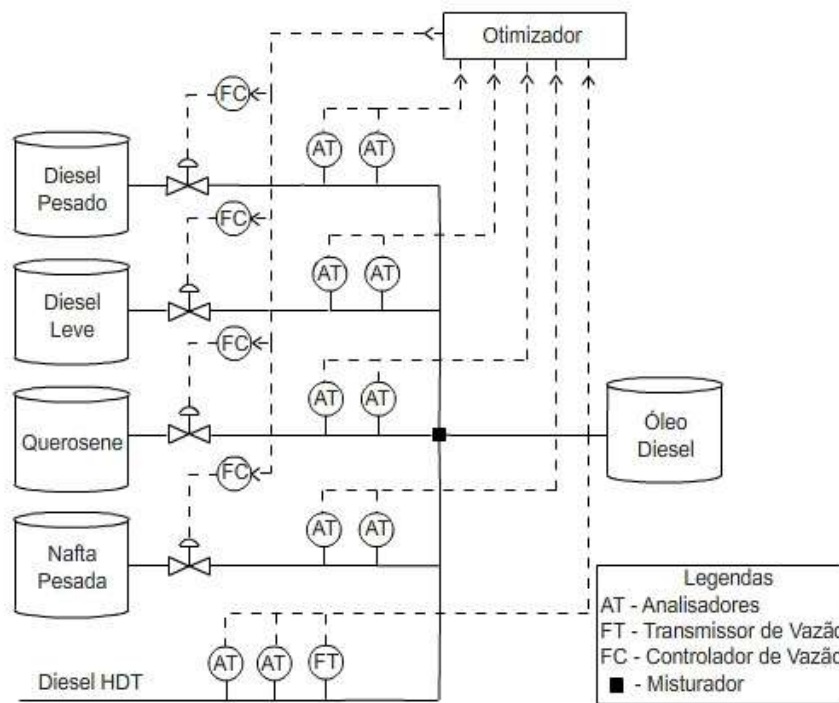


Figura III-2: Estratégia “Feedforward”

Em cada instante i , a função:

$$L(i) = F_m(i)P - \sum_{c=1}^5 F_c(i)C_c \quad (\text{III-14})$$

deve ser maximizada, sujeita as restrições:

$$d_{min} \leq d_m(i) \leq d_{m\acute{a}x} \quad (\text{III-15})$$

e

$$S_m(i) \leq S_{m\acute{a}x} \quad (\text{III-16})$$

e às condições de vazão impostas ao sistema:

$$F_{m,min} \leq F_m(i) \leq F_{m,m\acute{a}x} \quad (\text{III-17})$$

e

$$F_{c,min} \leq F_c(i) \leq F_{c,máx} \quad \text{(III-18)}$$

onde,

$$d_m(i) = \frac{\sum_{c=1}^5 F_c(i) d_c(i)}{\sum_{c=1}^5 F_c(i)} \quad \text{(III-19)}$$

e

$$S_m(i) = \frac{\sum_{c=1}^5 F_c(i) d_c(i) S_c(i)}{\sum_{c=1}^5 F_c(i) d_c(i)} \quad \text{(III-20)}$$

para se obter as vazões volumétricas ótimas para as correntes 1, 2, 3 e 4.

III.2.3. Estratégia “Feedback”

Na abordagem aqui adotada, o “feedback” provém da informação, a cada tempo de amostragem, de medidas de variáveis da corrente de saída do misturador (densidade e concentração de enxofre). Essas medidas são usadas para corrigir o modelo preditivo, o qual por sua vez é empregado como restrição no procedimento de otimização que visa a maximizar o lucro, mantendo a qualidade do produto. Assim, os erros de predição do modelo são calculados, realimentados ao processo e, a partir do resultado da otimização, os controladores manipulam as vazões das correntes de entrada (Figura III-3).

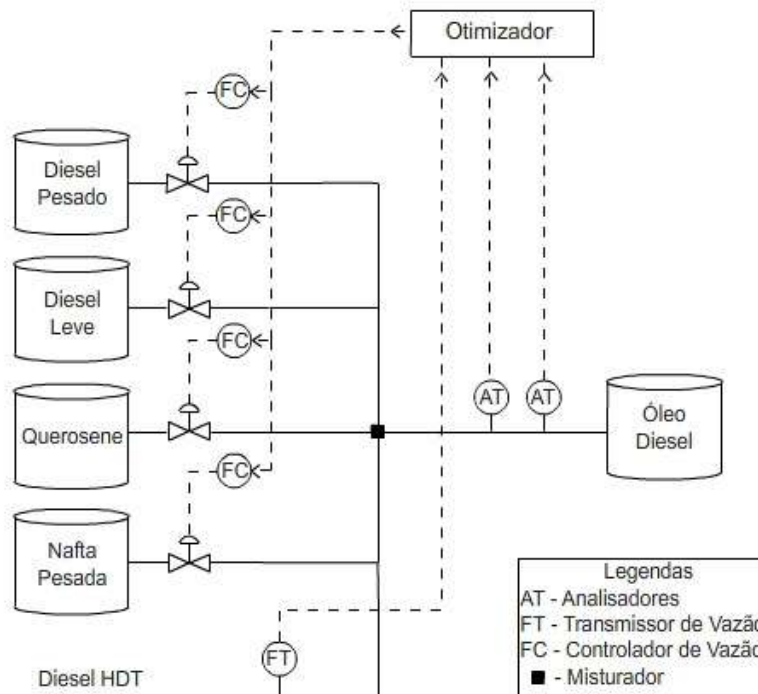


Figura III-3: Estratégia “Feedback”

Ao contrário da estratégia “feedforward”, a estratégia “feedback” parte da suposição de que as propriedades das correntes de entrada não são conhecidas em nenhum momento. Por outro lado, as propriedades da corrente de saída podem ser obtidas a cada instante.

Sendo assim, passa a existir uma distinção entre o modelo interno ao otimizador (ou seja, os valores que ele considera para as entradas do processo) e o processo real. Na tentativa de minimizar o erro provocado por essa discrepância, torna-se necessário a adição de um fator de correção às restrições da otimização.

Para cada instante i , a função:

$$L(i) = F_m(i)P - \sum_{c=1}^5 F_c(i)C_c \quad \text{(III-21)}$$

deve ser maximizada, sujeita as restrições:

$$d_{min} \leq d_{m,mod}(i) + E_d(i) \leq d_{máx} \quad \text{(III-22)}$$

e

$$S_{m,mod}(i) + E_S(i) \leq S_{máx} \quad \text{(III-23)}$$

onde E_d é o erro de predição do modelo em relação ao processo real para a densidade [adimensional]; E_S é o erro de predição do modelo em relação ao processo real para o enxofre [ppm] e o subscrito mod faz referência ao modelo interno do otimizador - e às condições de vazão impostas ao sistema:

$$F_{m,min} \leq F_m(i) \leq F_{m,máx} \quad \text{(III-24)}$$

e

$$F_{c,min} \leq F_c(i) \leq F_{c,máx} \quad \text{(III-25)}$$

Dessa forma, quando as medições das propriedades na saída do misturador são disponibilizadas, calculam-se os erros entre esses valores e os preditos pelo modelo

(considerando as últimas condições de vazão calculadas pelo otimizador e condições de entrada fixas); esses erros são, por sua vez, empregados na otimização para calcular as novas vazões ótimas.

Sendo,

$$d_{m,mod}(i) = \frac{\sum_{c=1}^5 F_c(i-1)d_{c,mod}(i)}{\sum_{c=1}^5 F_c(i-1)} \quad (\text{III-26})$$

onde:

$$E_d(i) = d_{medida}(i) - d_{mod}(i) \quad (\text{III-27})$$

e

$$S_{m,mod}(i) = \frac{\sum_{c=1}^5 F_c(i-1)d_{c,mod}(i)S_{c,mod}(i)}{\sum_{c=1}^5 F_c(i-1)d_{c,mod}(i)} \quad (\text{III-28})$$

onde:

$$E_S(i) = S_{medida}(i) - S_{mod}(i) \quad (\text{III-29})$$

para se obter as novas vazões volumétricas ótimas para as correntes 1, 2, 3 e 4.

III.2.4. Estratégia Híbrida

Neste caso foram medidas tanto as variáveis de entrada quanto as de saída. Dessa forma, com as variáveis da corrente de saída e o modelo calcula-se o erro, como na estratégia “feedback”, a diferença nesta estratégia é que a cada cinco intervalos de tempo os valores de densidade e concentração de enxofre no modelo são corrigidos de acordo com as medidas nas correntes de entrada (Figura III-4).

Esta estratégia é equivalente a estratégia “feedback”, porém supõe-se que a cada 5 intervalos de tempo podem ser obtidas medições das propriedades das correntes de entrada. Sendo assim, a cada 5 intervalos de tempo, o modelo interno do otimizador é corrigido.

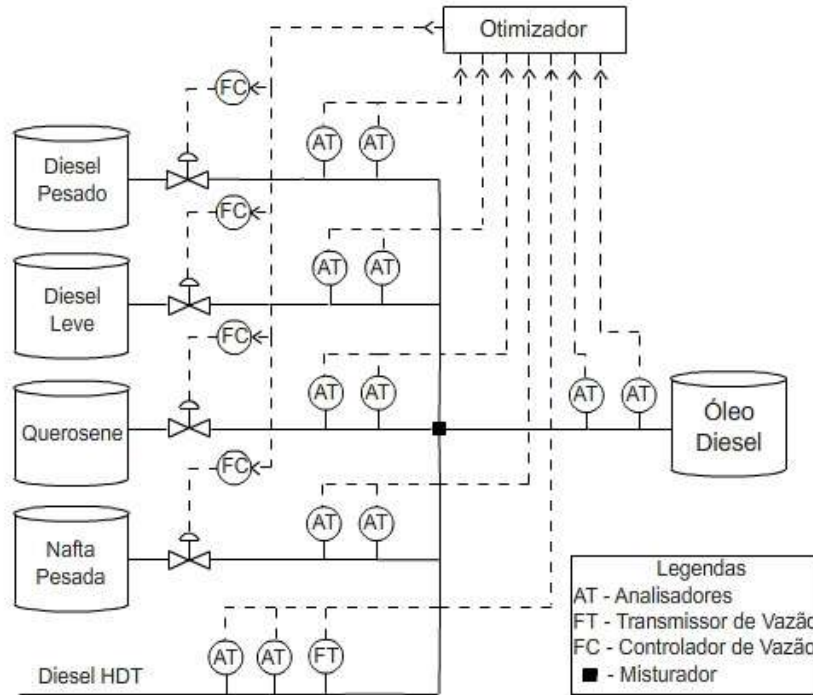


Figura III-4: Estratégia híbrida

Para cada instante i , a função:

$$L(i) = F_m(i)P - \sum_{c=1}^5 F_c(i)C_c \quad \text{(III-30)}$$

deve ser maximizada, sujeita as restrições:

$$d_{min} \leq d_{m,mod}(i) + E_d(i) \leq d_{m\acute{a}x} \quad \text{(III-31)}$$

e

$$S_{m,mod}(i) + E_s(i) \leq S_{m\acute{a}x} \quad \text{(III-32)}$$

e às condições de vazão impostas ao sistema:

$$F_{m,min} \leq F_m(i) \leq F_{m,m\acute{a}x} \quad \text{(III-33)}$$

e

$$F_{c,min} \leq F_c(i) \leq F_{c,m\acute{a}x} \quad \text{(III-34)}$$

Sendo,

$$d_{m,mod}(i) = \frac{\sum_{c=1}^5 F_c(i-1)d_{c,mod}(i)}{\sum_{c=1}^5 F_c(i-1)} \quad (\text{III-35})$$

onde:

$$E_d(i) = d_{medida}(i) - d_{mod}(i) \quad (\text{III-36})$$

e

$$S_{m,mod}(i) = \frac{\sum_{c=1}^5 F_c(i-1)d_{c,mod}(i)S_{c,mod}(i)}{\sum_{c=1}^5 F_c(i-1)d_{c,mod}(i)} \quad (\text{III-37})$$

onde:

$$E_S(i) = S_{medida}(i) - S_{mod}(i) \quad (\text{III-38})$$

Para cada 5 intervalos de tempo, faz-se:

$$d_{c,mod} = d_{c,medida}(i) \quad (\text{III-39})$$

e

$$S_{c,mod} = S_{c,medida}(i) \quad (\text{III-40})$$

Deste modo, obtêm-se as novas vazões volumétricas ótimas para as correntes 1, 2, 3 e 4.

III.2.5. Método de Otimização

Para realizar a otimização, optou-se por utilizar a função 'fmincon' do MATLAB (versão 7.6.0.324). Esta função retorna o ponto de mínimo de uma função não-linear, multivariável, sujeita a restrições lineares e não-lineares.

Uma vez que o objetivo deste trabalho é encontrar o ponto de operação que resulta em um lucro máximo, a função lucro (Equação (III-9)) foi multiplicada por menos um (-1) antes de ser minimizada no MATLAB.

III.3. Dados

A Tabela III-1 e a Tabela III-2, indicam, respectivamente, as propriedades consideradas, inicialmente, para cada uma das correntes de entrada e as restrições de densidade e enxofre utilizadas na otimização.

Tabela III-1: Propriedades das correntes de alimentação

| Propriedades das correntes de alimentação | | | |
|---|--------------------|---------------|-----------------------------|
| Corrente | Densidade Relativa | Enxofre (ppm) | Custo (R\$/m ³) |
| Diesel Pesado | 0.900 | 4800 | 760.00 |
| Diesel Leve | 0.700 | 2300 | 880.00 |
| Querosene | 0.820 | 1300 | 990.00 |
| Nafta Pesada | 0.760 | 45 | 740.00 |
| Diesel HDT | 0.890 | 294 | 690.00 |

Tabela III-2: Especificações desejadas para o produto final

| Especificações de venda para o Diesel | | | | |
|---------------------------------------|-------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| Produto | Diesel Interior (S1800) | | Diesel Metropolitano (S500) | |
| | Valor Mínimo | Valor Máximo | Valor Mínimo | Valor Máximo |
| Densidade Relativa | 0.820 | 0.880 | 0.820 | 0.865 |
| Enxofre (ppm) | - | 1800 | - | 500 |

III.4. Simulação

Conforme dito anteriormente, as correntes de 1 a 4 (Diesel Pesado, Diesel Leve, Querosene e Nafta Pesada) são as correntes a serem controladas no processo, e provêm de tanques de armazenamento. A corrente 5 (Diesel HDT), é uma corrente selvagem, encaminhada diretamente da unidade de hidrotreatamento para o misturador. Para esta corrente, a vazão é conhecida, mas não pode ser controlada.

Para simular as flutuações que ocorrem nas propriedades das correntes de entrada ao longo do processo, ruídos aleatórios de distribuição normal foram somados ao valor original destas propriedades a cada intervalo de iteração. Este ruído foi gerado pela função 'randn' do MATLAB e passado por um filtro para torná-lo dependente dos

valores aleatórios anteriores, simulando um amortecimento das flutuações. Este filtro segue a equação (III-41).

$$r_c = 'randn' + 0,5.r_c(i - 1) + 0,25.r_c(i - 2) \quad \text{(III-41)}$$

Nas correntes de 1 a 4, os ruídos foram passados duas vezes no filtro já que foi considerado que estas correntes viriam de tanques de armazenamento e portanto teriam um amortecimento das propriedades maior do que a corrente de diesel HDT. De forma que esta última corrente tem o ruído filtrado apenas uma vez.

Também foram consideradas flutuações na vazão de entrada da corrente 5, porém estas flutuações supostamente ocorreriam com uma frequência menor, e ruídos aleatórios foram somados ao valor original desta vazão apenas a cada 5 intervalos de tempo.

Desta forma, este processo foi otimizado a cada iteração, com um intervalo de uma hora entre as iterações, até que o volume total do tanque de produto atingisse 20.000 m³.

Para possibilitar uma análise estatística dos resultados, foram criadas 15 séries diferentes de ruídos aleatórios e cada uma destas séries foi utilizada para simular cada estratégia de controle, para ambos os tipos de diesel produzidos. Desta forma, foram gerados 15 resultados diferentes para cada caso considerado neste trabalho. Estes resultados são analisados no capítulo seguinte. Uma destas 15 séries será discutida particularmente, como uma forma de exemplificar como os resultados de cada estratégia se apresentam graficamente.

Capítulo IV. Resultados

Os gráficos apresentados neste capítulo são relativos a uma das séries de ruídos aleatórios simuladas. Estes gráficos são apresentados para ilustrar o comportamento geral do processo otimizado e suas tendências, mas este resultado é alterado de acordo com o ruído de entrada.

Primeiramente é apresentado o efeito do ruído inserido nas correntes de entrada. A Figura IV-1 e a Figura IV-2 indicam as variações ao longo do tempo, decorrentes deste ruído, na densidade e na concentração de enxofre, respectivamente, das correntes de entrada do processo. Este comportamento é particular para o caso específico que será analisado ao longo deste capítulo, e é o mesmo para todas as abordagens analisadas a seguir.

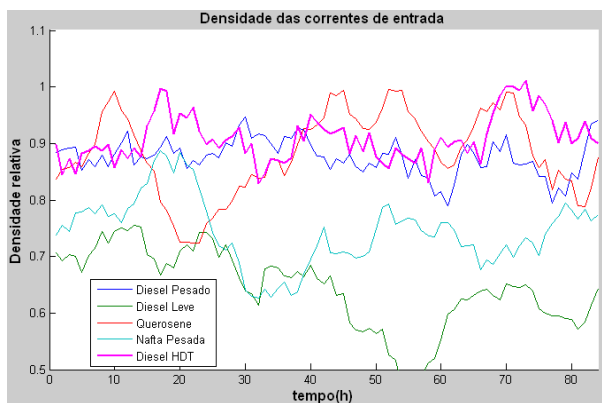


Figura IV-1: Variação na densidade

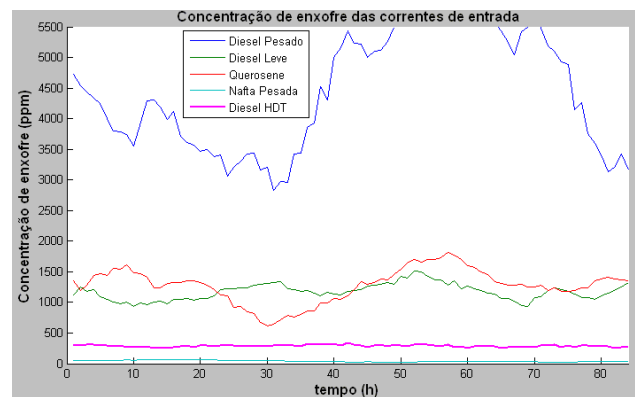


Figura IV-2: Variação na concentração de enxofre

É importante ressaltar que, embora para o otimizador sejam consideradas as propriedades do produto em linha, na saída do misturador, o objetivo do processo estudado neste trabalho é a certificação do tanque de diesel. Desta forma, embora seja preferível que o produto na saída do misturador atenda às restrições impostas, a análise dos resultados foi baseada nas características do produto no tanque, e um produto que esteja especificado no tanque é considerado um resultado satisfatório, mesmo que as propriedades na linha flutuem consideravelmente.

IV.1. S500

IV.1.1. Estratégia “Feedforward”

Vazão

Os gráficos da Figura IV-3 e da Figura IV-4 representam, respectivamente, a vazão das correntes de entrada e a vazão da corrente de saída do misturador em função do tempo, quando utilizada a estratégia “feedforward”.

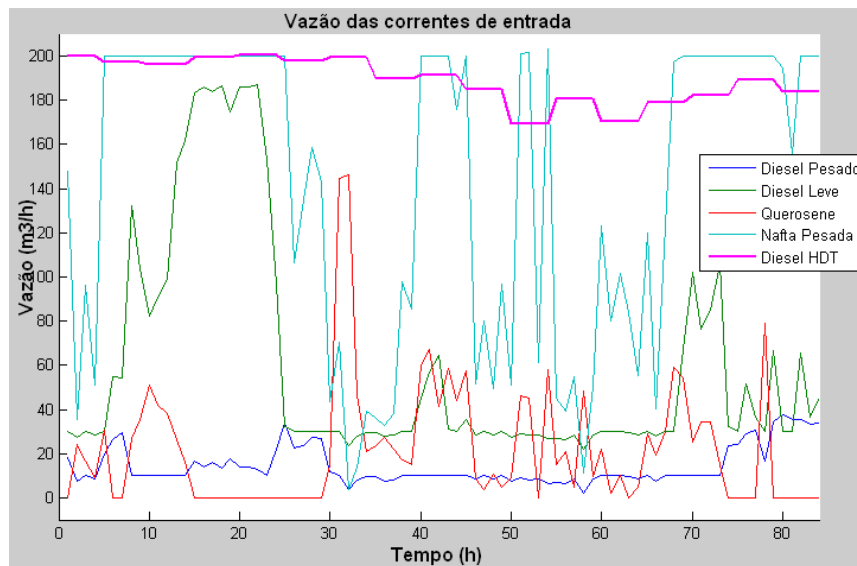


Figura IV-3: Vazão nas correntes de entrada do diesel S500 (“Feedforward”)

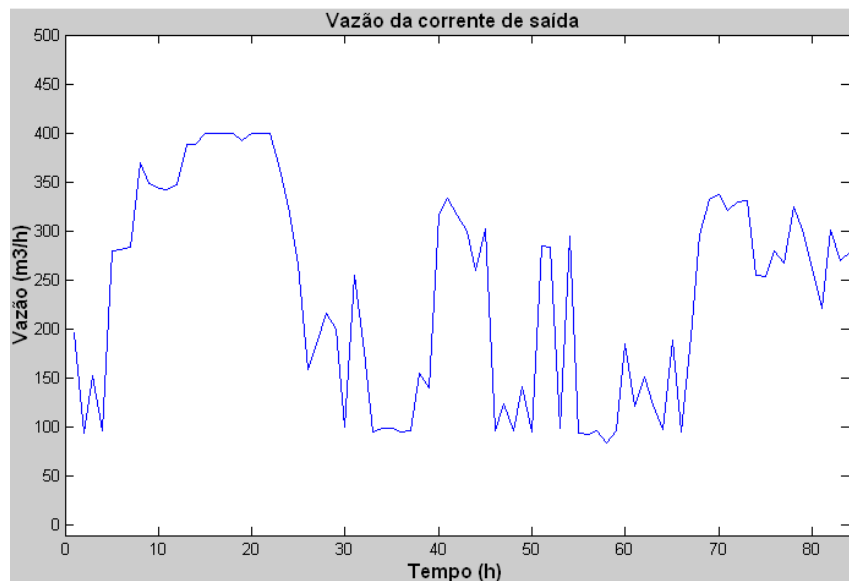


Figura IV-4: Vazão na corrente de saída do diesel S500 (“Feedforward”)

É importante ressaltar que a otimização foi conduzida de forma a buscar uma maximização da utilização de diesel pesado, nafta pesada, e, especialmente, diesel leve, assim como uma minimização do uso de querosene. Querosene é um produto de maior valor agregado, que pode ser vendido como querosene de aviação (QAV), e a sua utilização como insumo para a produção de diesel não é necessária. O diesel pesado e a nafta pesada, por sua vez, são insumos de menor valor agregado, porém, se não forem utilizados na produção de diesel podem ser deslocados para a produção de gasolina, no caso da nafta pesada, ou para a unidade de HDT, no caso do diesel pesado. Por outro lado, o único destino da corrente de diesel leve é a produção de diesel, desta forma, a utilização desta corrente deve ser maximizada.

Densidade

Como se pode ver exemplificado na Figura IV-5, a densidade da corrente de saída na maior parte do tempo de enchimento do tanque fica dentro da faixa especificada, no entanto em alguns momentos ultrapassa o limite inferior. Este erro é geralmente absorvido quando se observa a densidade no tanque, pode-se ver que na Figura IV-6 a densidade se mantém dentro da especificação durante todo o procedimento.

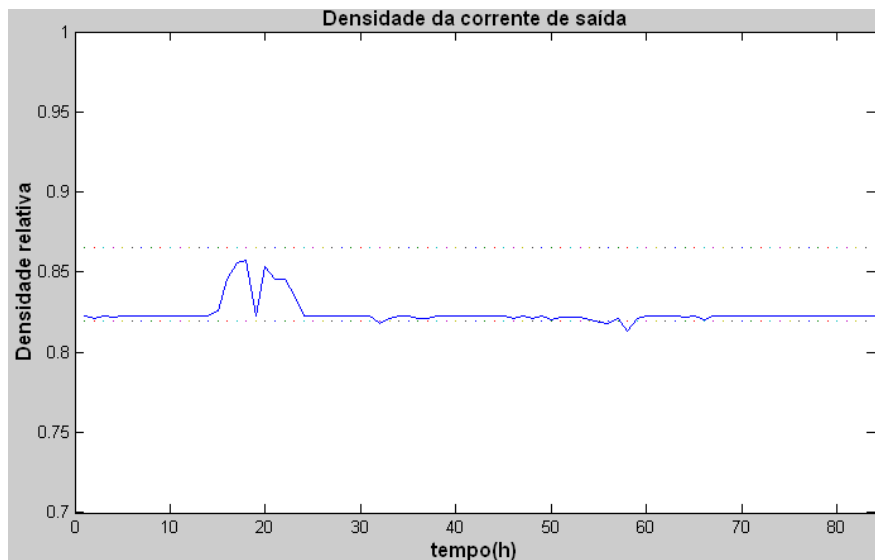


Figura IV-5: Densidade na corrente de saída do diesel S500 (“Feedforward”)

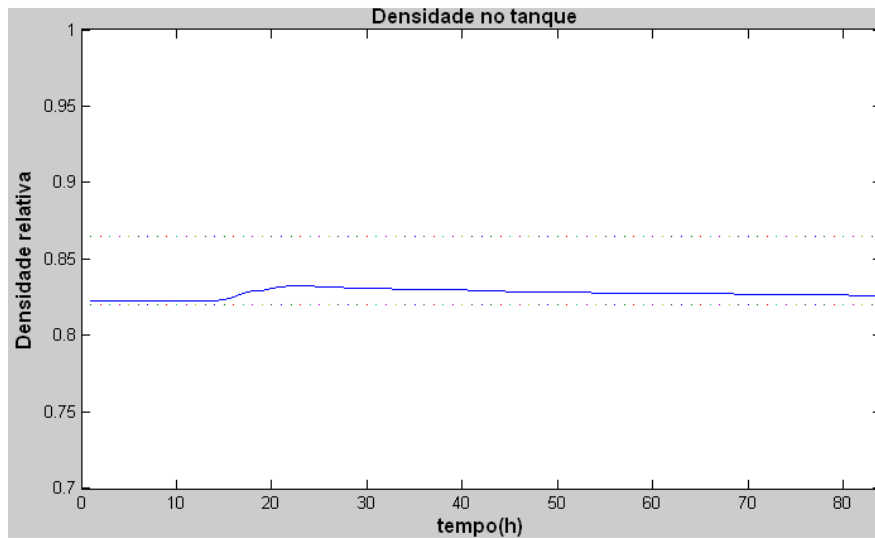


Figura IV-6: Densidade no tanque de armazenamento do diesel S500 (“Feedforward”)

Enxofre

A Figura IV-7 e a Figura IV-8 mostram o comportamento da concentração de enxofre na corrente de saída do misturador e no tanque de armazenamento, respectivamente.

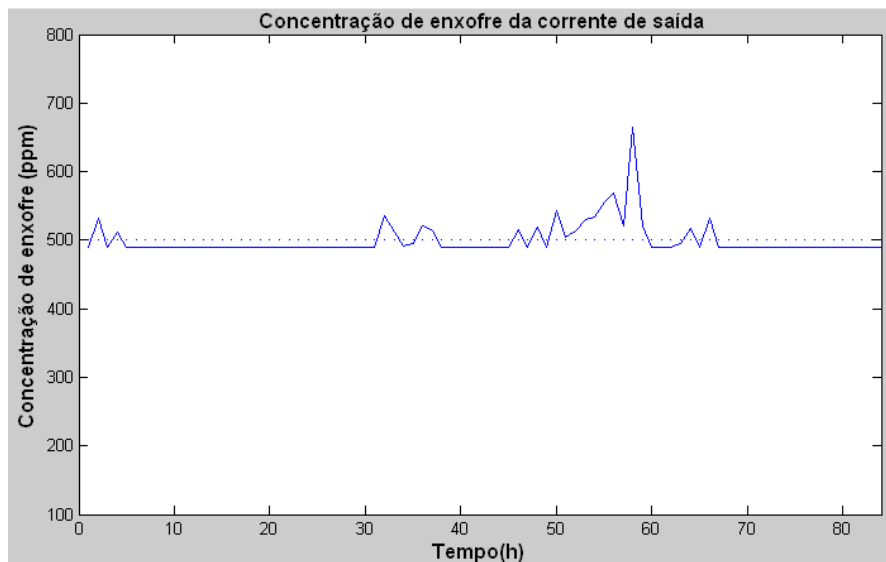


Figura IV-7: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S500 (“Feedforward”)

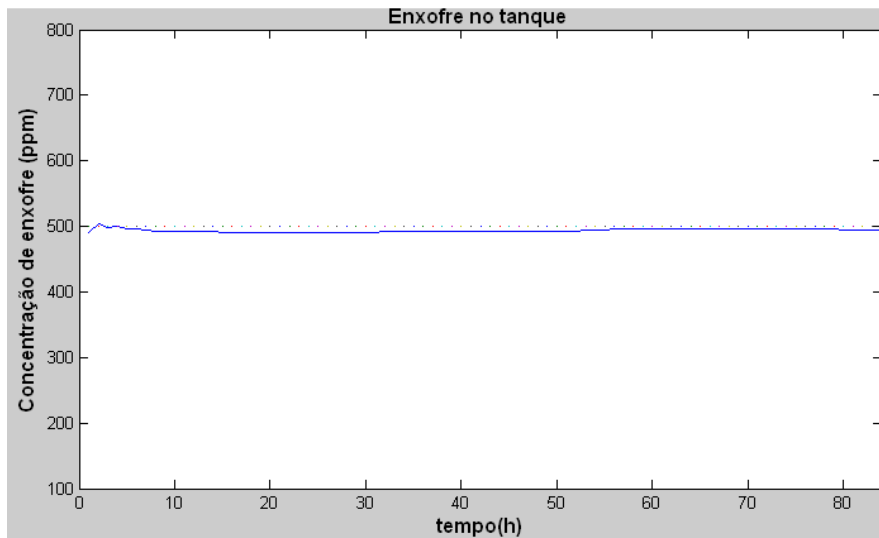


Figura IV-8: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S500 (“Feedforward”)

Para a concentração de enxofre a situação é similar ao que ocorre com a densidade, com a diferença que na corrente de saída do misturador o limite de enxofre é ultrapassado com maior frequência, o que já era esperado visto que três das cinco correntes de alimentação possuem um alto teor de enxofre comparado ao da especificação do S500, apenas as correntes de diesel HDT e nafta pesada possuem uma concentração de enxofre baixa o suficiente para corrigir o enxofre da corrente final, e a corrente de diesel HDT não pode ser manipulada para satisfazer as restrições.

No caso particular representado pela Figura IV-7 e pela Figura IV-8 aparecem picos na concentração de enxofre da corrente de saída no tempo entre 50 e 60 horas. Provavelmente uma das razões para este fato é uma grande alta no teor de enxofre da corrente de diesel pesado, no entanto o otimizador tenta reverter este quadro colocando uma vazão baixa desta corrente, que neste período passa a representar menos de 5% da vazão da corrente final da mistura, como pode ser observado na Figura IV-3. Ainda assim, como sua concentração de enxofre é em torno de dez vezes maior do que o limite, mesmo esta baixa vazão causa um efeito significativo. Outra razão é uma redução da vazão de diesel oriundo da unidade de HDT neste período. Esta corrente tem um papel fundamental na mistura com relação ao enxofre, devido ao seu baixo custo e baixo teor do elemento.

Na prática fatos como estes, que neste trabalho são ocasionados por ruídos, podem ocorrer por diversos motivos como alterações na carga da refinaria ou na carga de cada unidade. Por exemplo, a baixa na vazão de saída da unidade de HDT pode ocorrer por uma redução na vazão de alimentação desta unidade, ou a alta na concentração de

enxofre das correntes pode ser ocasionada pela alimentação com um petróleo mais pesado, com um maior teor de enxofre.

IV.1.2. Estratégia “Feedback”

Vazão

A Figura IV-9 e a Figura IV-10 representam, respectivamente, a vazão das correntes de entrada e a vazão da corrente de saída do misturador em função do tempo, quando utilizada a estratégia “feedback”.

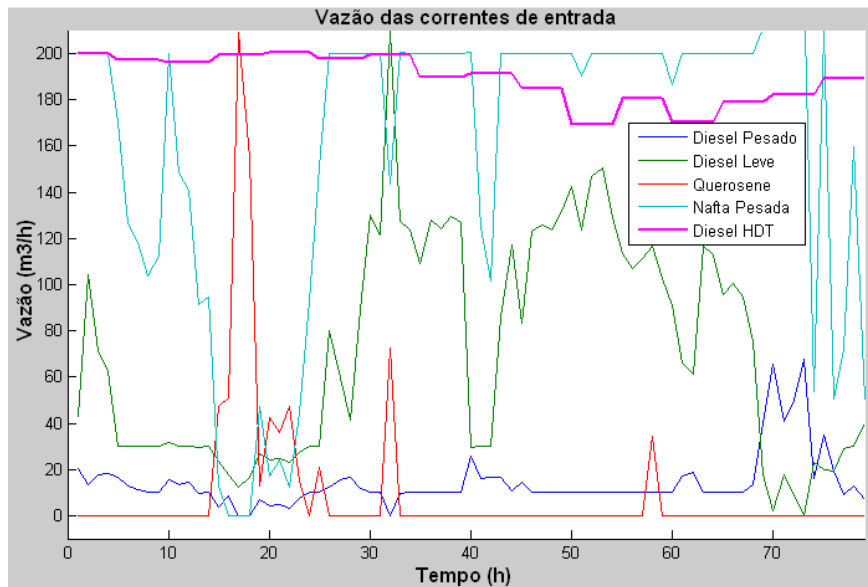


Figura IV-9: Vazão das correntes de entrada de diesel S500 (“Feedback”)

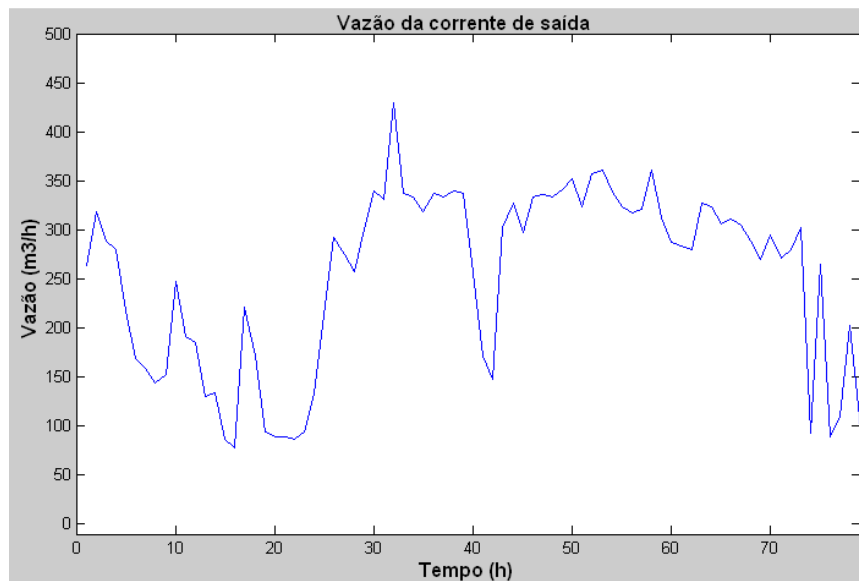


Figura IV-10: Vazão da corrente de saída de diesel S500 (“Feedback”)

Densidade

O comportamento da densidade na linha e no tanque para a estratégia “feedback” esta demonstrado na Figura IV-11 e na Figura IV-12, respectivamente.

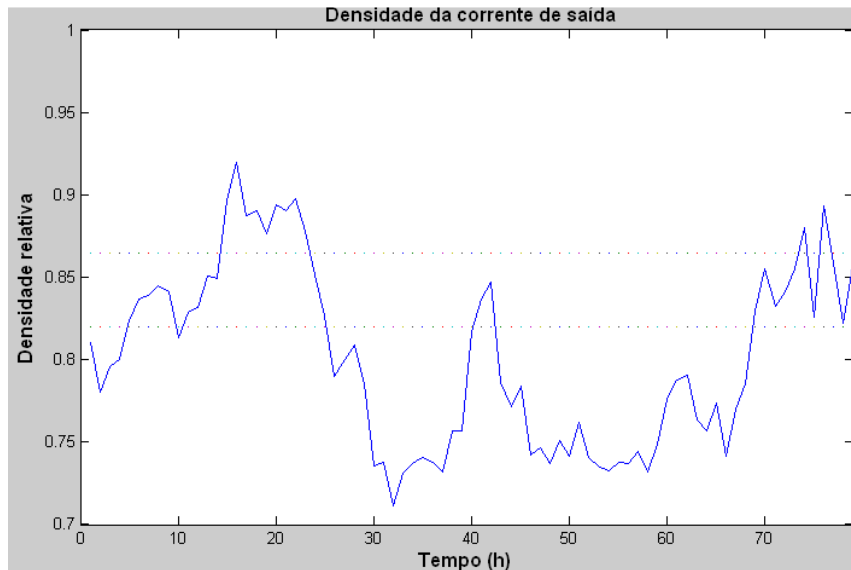


Figura IV-11: Densidade na corrente de saída do diesel S500 (“Feedback”)

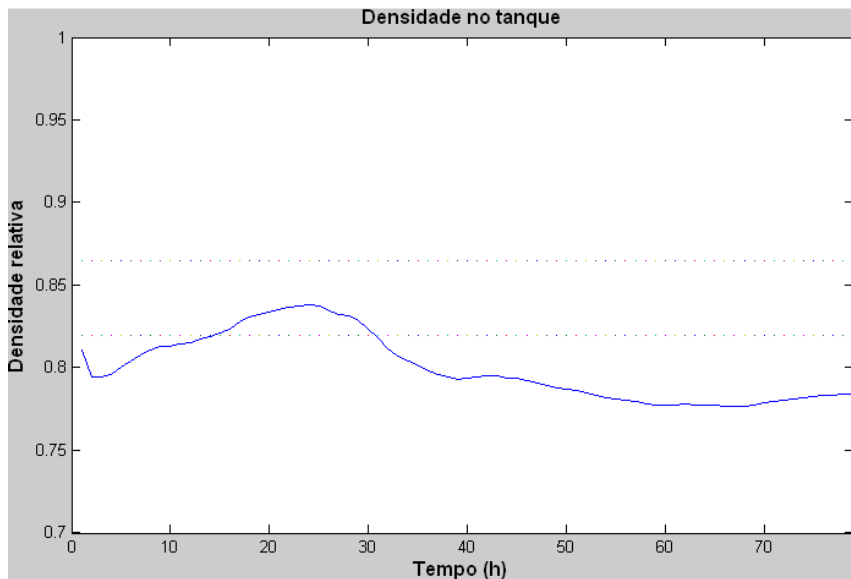


Figura IV-12: Densidade no tanque de armazenamento de diesel S500 (“Feedback”)

No caso simulado utilizando a abordagem “feedback”, a otimização, em geral, não consegue manter a resposta dentro da faixa especificada. No exemplo apresentado, claramente a densidade na corrente de saída varia muito mais, se comparada à resposta que aparece no item IV.2.1.2. No tanque, apesar desta variação ser amortecida, a

densidade não consegue ser mantida na faixa da especificação, o maior problema acontece com o limite inferior, que é por várias vezes ultrapassado.

Enxofre

A Figura IV-13 e a Figura IV-14 mostram o comportamento da concentração de enxofre na corrente de saída do misturador e no tanque de armazenamento, respectivamente.

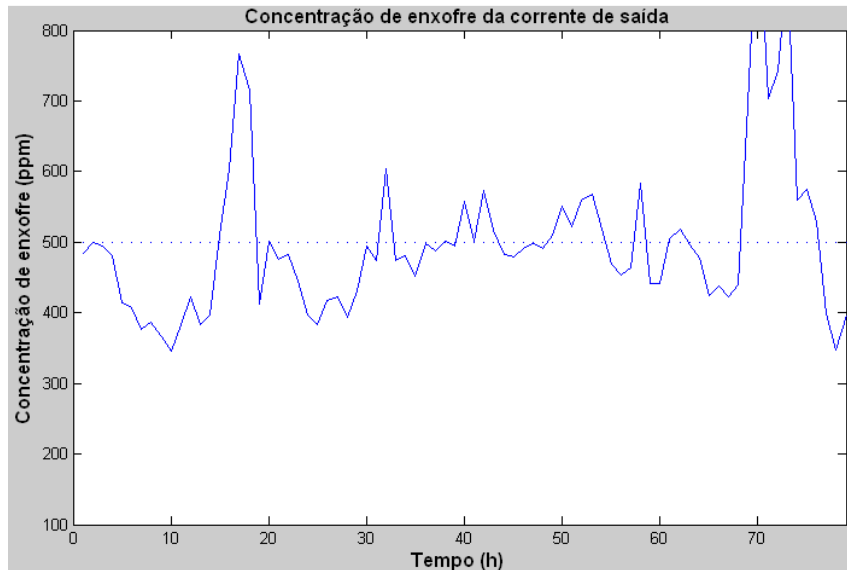


Figura IV-13: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S500 (“Feedback”)

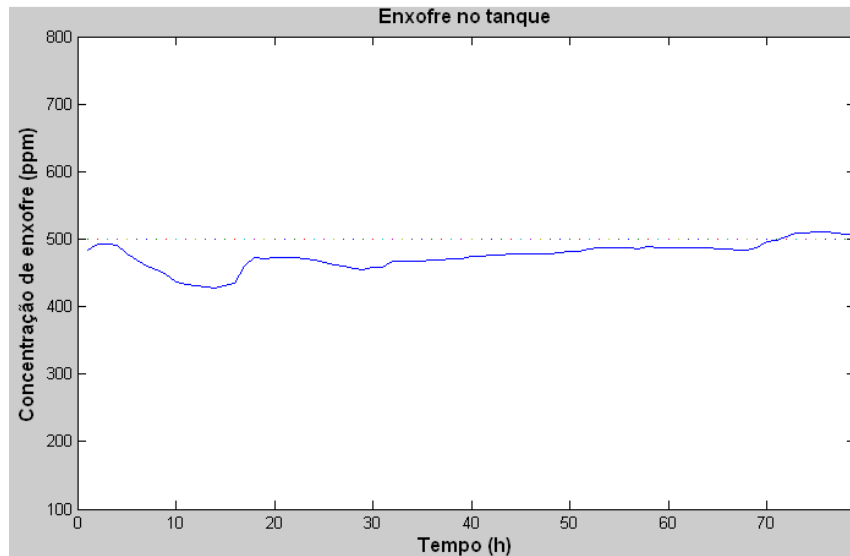


Figura IV-14: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S500 (“Feedback”)

Nas primeiras 70 horas, apesar da concentração de enxofre na linha, apresentar diversos picos, superiores ao limite permitido, esta rapidamente retornava a valores

dentro das restrições, amortecendo o efeito destas alterações no tanque, e mantendo a concentração de enxofre no tanque especificada. Após este período, uma alta prolongada na concentração de enxofre na corrente de saída fez com que o tanque não fosse mais capaz de absorver estas variações, o que fez com que o teor de enxofre no tanque ultrapassasse o limite de 500ppm. Isso provavelmente acontece porque neste momento a vazão de diesel pesado é aumentada em uma tentativa de corrigir a densidade sem aumentar muito o custo, já que o diesel pesado possui uma alta densidade e custo relativamente baixo (Figura IV-9). No entanto seu teor de enxofre é muito alto o que faz com que o tanque fique fora do limite para certificação.

Desta forma, uma possibilidade para que esta corrente pudesse alcançar a especificação seria a sua recirculação na mistura, para que pudesse ser novamente corrigida, o que geraria um aumento no custo e no tempo necessário para encher o tanque, que já é maior do que na estratégia “feedforward”.

IV.1.3. Estratégia Híbrida

Vazão

A Figura IV-15 e a Figura IV-16 representam, respectivamente, a vazão das correntes de entrada e a vazão da corrente de saída do misturador em função do tempo, quando utilizada a composição das estratégias “feedback” e “feedforward”.

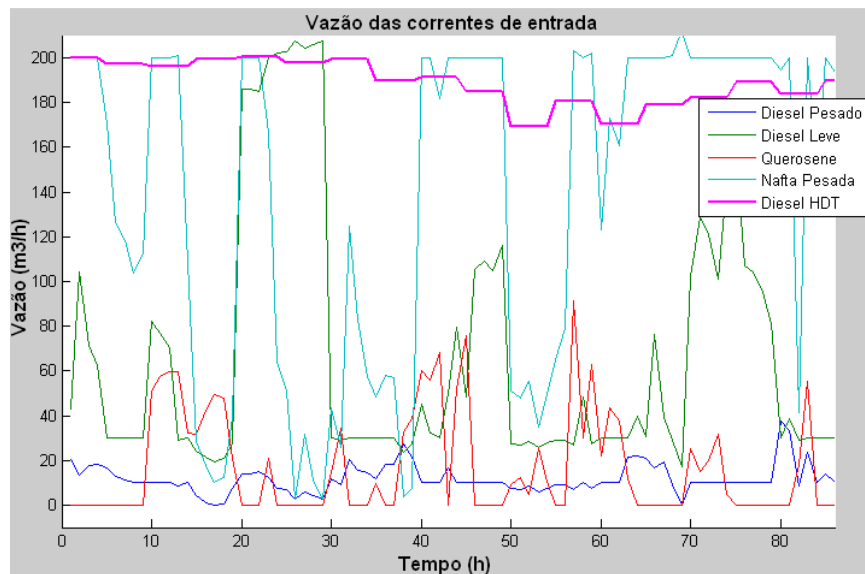


Figura IV-15: Vazão das correntes de entrada do diesel S500 (Híbrida)

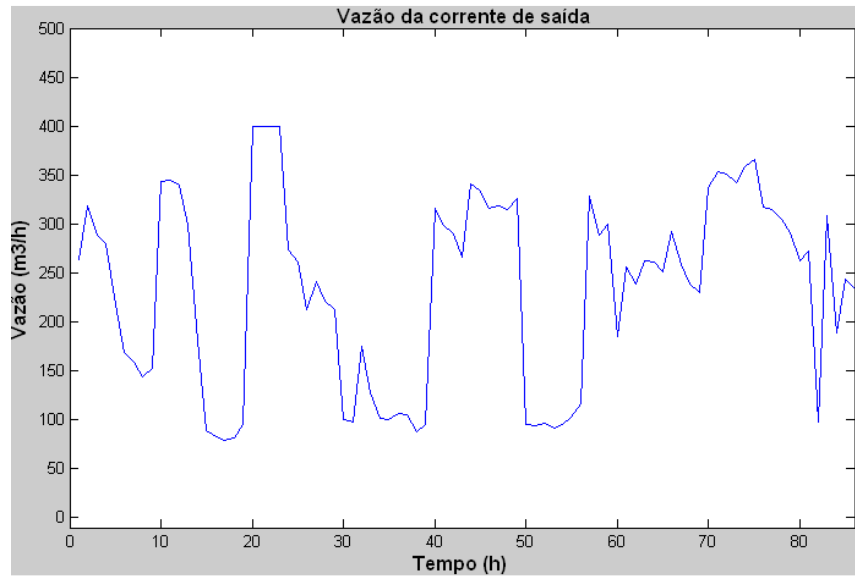


Figura IV-16: Vazão da corrente de saída do diesel S500 (Híbrida)

Densidade

O comportamento da densidade na linha e no tanque para esta estratégia esta demonstrado na Figura IV-17 e na Figura IV-18, respectivamente.

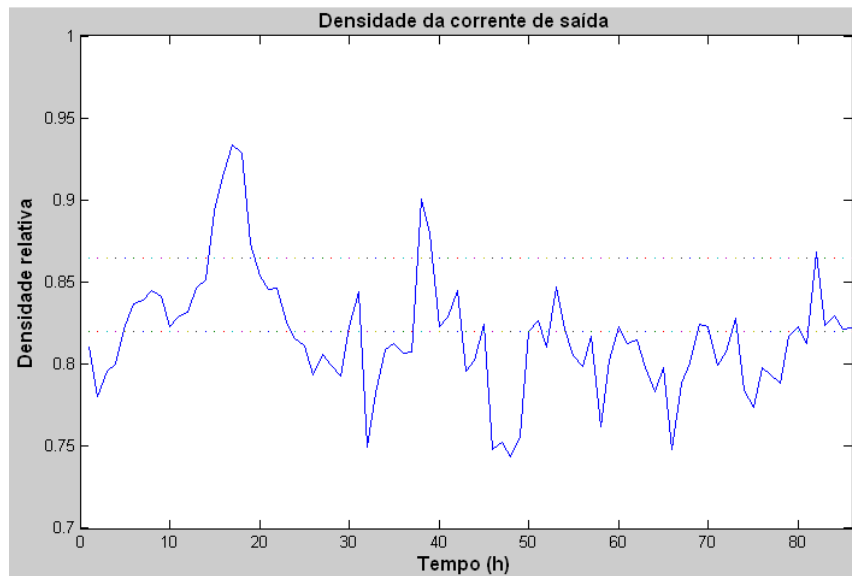


Figura IV-17: Densidade na corrente de saída do diesel S500 (Híbrida)

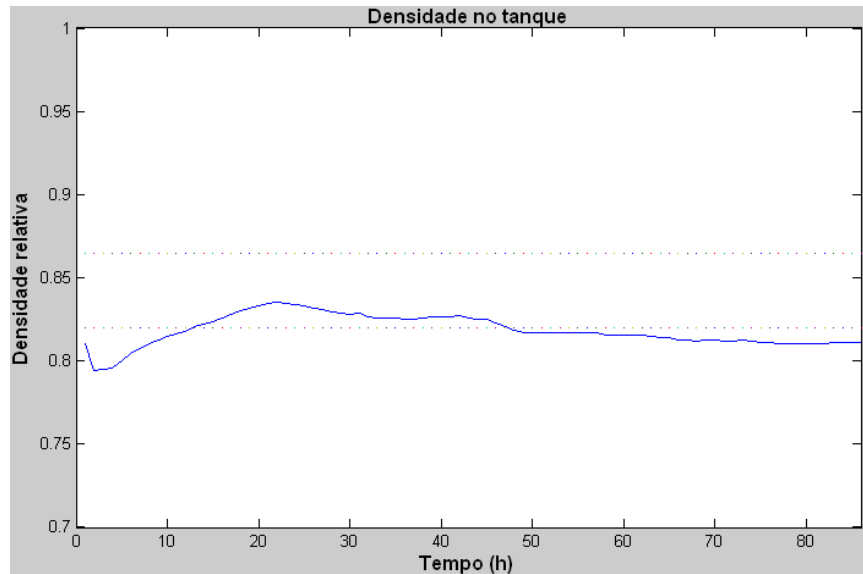


Figura IV-18: Densidade no tanque de armazenamento de diesel S500 (Híbrida)

Em geral, esta estratégia, quando não consegue alcançar a especificação da densidade no tanque, fica muito próxima disso, com pequenas diferenças em relação à faixa limite.

No caso apresentado, apesar da oscilação da densidade na corrente de saída, no tanque ela é mantida dentro da especificação até o tempo em torno de 50h, daí em diante o otimizador não consegue trazê-la de volta para a faixa da especificação. O provável motivo é que, dentre as quatro correntes manipuladas, as duas mais utilizadas são a de diesel leve e nafta pesada (Figura IV-15), ambas inicialmente já possuem densidade abaixo do limite e o ruído aleatório no tempo em torno de 50h reduz ainda mais a densidade da corrente de diesel leve, fazendo com que o otimizador não consiga mais aumentar a densidade final.

Enxofre

A Figura IV-19 e a Figura IV-20 mostram o comportamento da concentração de enxofre na corrente de saída do misturador e no tanque de armazenamento, respectivamente.

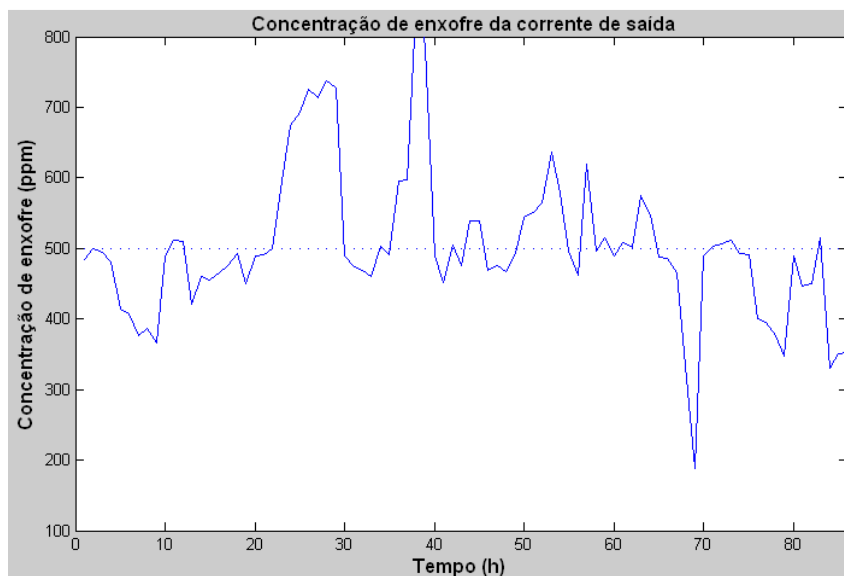


Figura IV-19: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S500 (Híbrida)

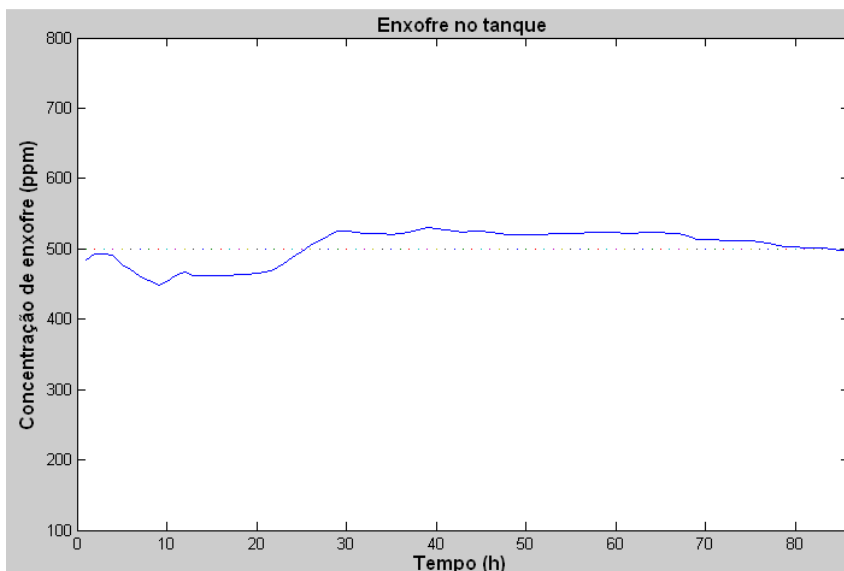


Figura IV-20: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S500 (Híbrida)

Na Figura IV-19 e na Figura IV-20, pode-se ver que, apesar de ficar um longo tempo fora da especificação, no fechamento do tanque o teor de enxofre está abaixo de 500ppm. Esta redução da concentração de enxofre no final da simulação foi possível, pois ocorre um ligeiro aumento na vazão de diesel HDT (Figura IV-15), que possui baixo teor do elemento em questão.

No entanto este é um fator que não está sob o controle da otimização, a corrente de diesel HDT não é manipulada, portanto possivelmente em outras simulações a concentração de enxofre especificada não será alcançada.

IV.1.1. Comparação entre os métodos

Para avaliação da eficácia dos métodos propostos foi realizada a otimização para diferentes ruídos, esta simulação foi realizada com 15 diferentes casos e foram aplicadas, para cada caso, as três estratégias citadas acima. Nestas simulações foram avaliados o tempo necessário para o enchimento do tanque, o desgaste das válvulas das correntes de entrada (associado ao esforço de atuação do controlador), o lucro obtido e o desvio em relação às especificações. Os resultados alcançados são apresentados na sequência:

A Tabela IV-1 apresenta uma média do tempo necessário para o enchimento do tanque em cada estratégia. A comparação mostra que este tempo não varia significativamente entre as estratégias, apenas o tempo da estratégia híbrida é ligeiramente menor, no entanto, considerando o desvio padrão pode-se dizer que as diferenças entre as estratégias não tiveram muita influência sobre o tempo de enchimento do tanque.

Tabela IV-1: Média do Tempo de Operação para o diesel S1800

| S500 | Tempo Total (h) | Desvio Padrão (h) |
|---------------|-----------------|-------------------|
| “Feedforward” | 85 | 11 |
| “Feedback” | 86 | 12 |
| Híbrida | 83 | 9 |

O desgaste das válvulas (associado ao esforço de atuação do controlador) foi levado em consideração nesta análise diante do custo que pode causar caso alguma das estratégias acione as válvulas de forma mais intensa, para tal foi calculado um coeficiente de desgaste da seguinte maneira:

$$Desgaste\ total = \sum_{i=2}^t \sum_{c=1}^4 (F_c(i) - F_c(i-1))^2 \quad (IV-1)$$

$$Desgaste\ médio = \frac{Desgaste\ total}{t} \quad (IV-2)$$

Onde t é o tempo total de operação [h].

A Tabela IV-2 mostra o valor destes coeficientes para cada uma das estratégias. O maior desgaste das válvulas ocorre na estratégia híbrida, as outras duas estratégias possuem valores similares. Este maior valor na estratégia híbrida pode ser explicado pelo fato de que neste caso existem sinais transmitidos dos analisadores tanto nas correntes de entrada quanto na de saída, o que leva a uma maior percepção das variações e, portanto, pode levar a ações mais intensas nas válvulas.

Tabela IV-2: Desgaste das válvulas para a produção de Diesel S500

| S500 | Desgaste Total das Válvulas | Desvio Padrão | Desgaste Médio das Válvulas | Desvio Padrão |
|---------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|
| “Feedforward” | 334.077 | 89.813 | 3.948 | 944 |
| “Feedback” | 336.207 | 125.383 | 3.878 | 1.416 |
| Híbrida | 499.518 | 130.054 | 6.052 | 1.543 |

A Tabela IV-3, apresenta, para cada estratégia, o lucro médio obtido com um tanque de produto, ao final da operação, assim como o lucro por hora de operação. Este lucro apresentado tem apenas um valor comparativo, já que só considera os custos das matérias-primas e o preço de venda como descrito na função objetivo. Portanto ele deve ser analisado junto a fatores como o desgaste das válvulas, que pode aumentar o custo, e o atendimento às especificações, já que quando o tanque não está especificado ele terá um custo adicional para corrigir as suas propriedades.

Como se pode ver na Tabela IV-3 as três estratégias possuem valores bem similares para o lucro.

Tabela IV-3: Lucro obtido com a produção de Diesel S500

| S500 | Lucro Total (R\$) | Desvio Padrão (R\$) | Lucro Médio (R\$/h) | Desvio Padrão (R\$/h) |
|---------------|-------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| “Feedforward” | 8.820.713 | 691.381 | 104.968 | 6.667 |
| “Feedback” | 8.894.240 | 632.177 | 104.001 | 7.844 |
| Híbrida | 8.555.013 | 546.819 | 103.757 | 6.218 |

A Tabela IV-4 e a Tabela IV-5 apresentam, para a simulação do diesel S500, a frequência com que o tanque fica dentro da especificação e em que faixa de erro se enquadra quando não especificado.

Tabela IV-4: Desvios da densidade em relação à especificação para o diesel S500

| S500 - Densidade | | | |
|-----------------------------------|---------------|------------|---------|
| Desvio em Relação à Especificação | “Feedforward” | “Feedback” | Híbrida |
| Especificada (0%) | 100% | 7% | 33% |
| entre 0% e 1% | 0% | 7% | 47% |
| entre 1% e 2,5% | 0% | 20% | 20% |
| entre 2,5% e 5% | 0% | 60% | 0% |
| maior que 5% | 0% | 7% | 0% |

Tabela IV-5: Desvios da concentração de enxofre em relação à especificação para o diesel S500

| S500 - Teor de Enxofre | | | |
|-----------------------------------|---------------|------------|---------|
| Desvio em Relação à Especificação | “Feedforward” | “Feedback” | Híbrida |
| Especificada (0%) | 73% | 20% | 20% |
| entre 0% e 1% | 27% | 7% | 0% |
| entre 1% e 5% | 0% | 13% | 40% |
| entre 5% e 10% | 0% | 27% | 13% |
| entre 10% e 15% | 0% | 27% | 13% |
| maior que 15% | 0% | 7% | 13% |

Quanto à densidade, como se pode ver no resultado acima a estratégia “feedforward” apresentou 100% dos casos dentro da especificação sendo assim esta otimização foi muito satisfatória quanto à especificação da densidade. A estratégia “feedback” apresenta, em sua maioria, um erro de 2,5% a 5% com relação à especificação da densidade, particularmente o limite inferior da densidade confere uma maior dificuldade à otimização do que o limite superior. A estratégia que une as duas anteriores não possui a mesma eficácia do “feedforward”, no entanto apresenta um erro majoritariamente menor do que no “feedback”, menor do que 1%, e uma frequência de 33% das amostras dentro da especificação.

Quanto ao teor de enxofre, a comparação entre os métodos é semelhante à da densidade, visto que a estratégia “feedforward” se apresenta claramente com menor faixa de erro e com a maioria dos tanques especificados. Neste caso, no entanto, as faixas de erro obtidas foram bem mais significativas, sendo que o “feedback” possui a maioria dos casos com um erro entre 5% e 15%.

IV.2. S1800

IV.2.1. Estratégia “Feedforward”

Vazão

A Figura IV-21 e a Figura IV-22 representam, respectivamente, a vazão das correntes de entrada e a vazão da corrente de saída do misturador em função do tempo, quando utilizada a estratégia “feedforward”.

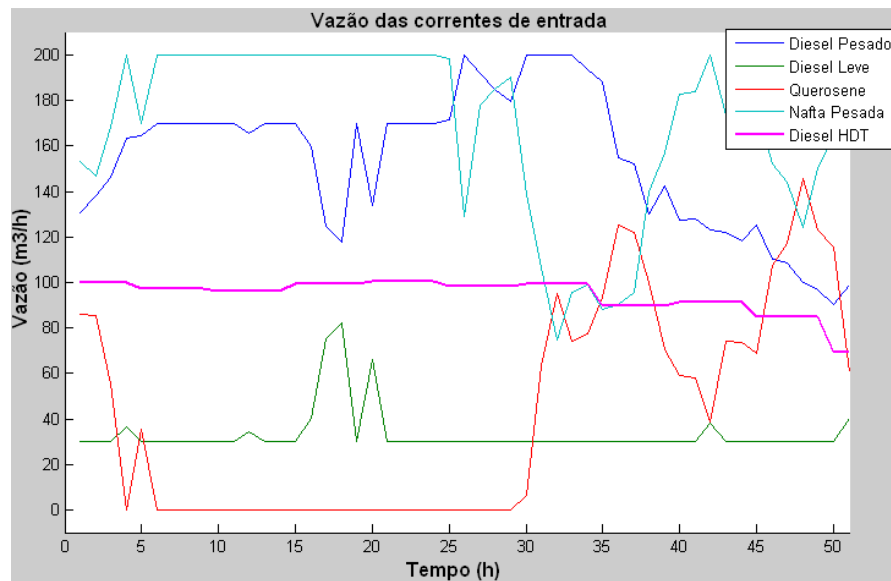


Figura IV-21: Vazões das correntes de entrada do diesel S1800 (“Feedforward”)

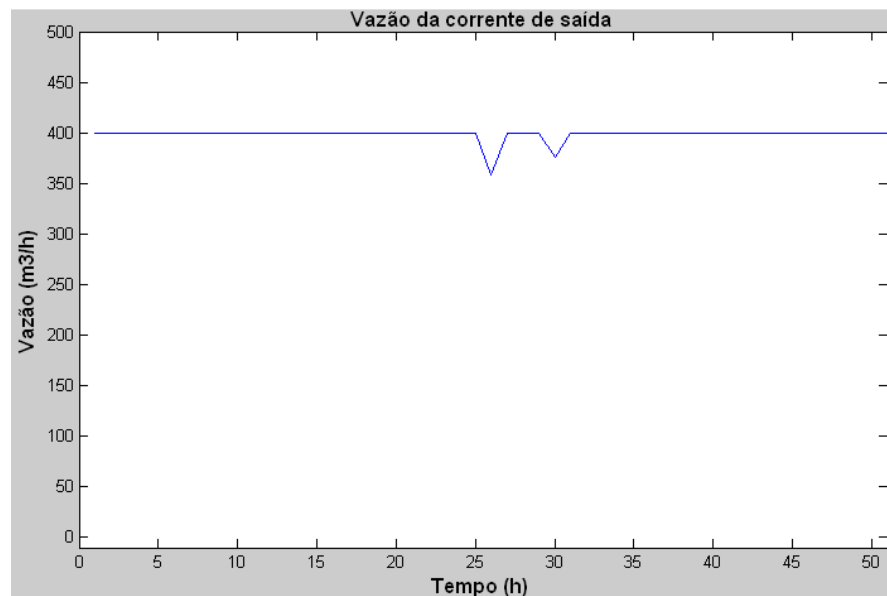


Figura IV-22: Vazão da corrente de saída do diesel S1800 (“Feedforward”)

Densidade

Como é possível observar na Figura IV-23 e na Figura IV-24, para o exemplo considerado, a estratégia “feedforward” foi capaz de manter a densidade dentro das especificações durante todo o processo, tanto no tanque como na corrente de saída do misturador.

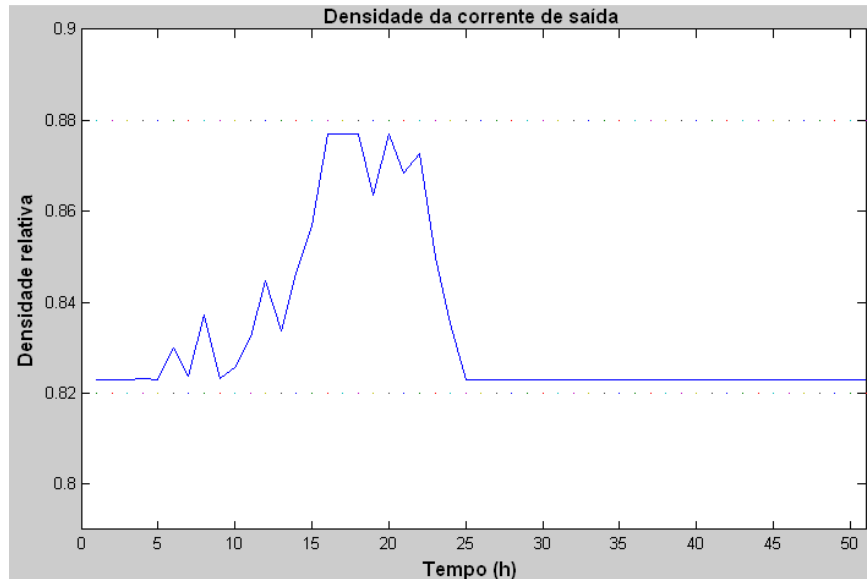


Figura IV-23: Densidade na corrente de saída do diesel S1800 (“Feedforward”)

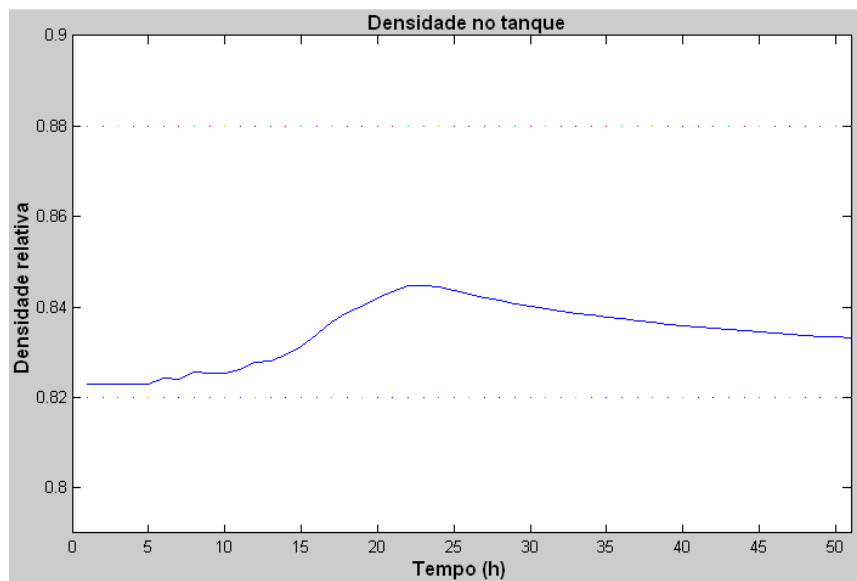


Figura IV-24: Densidade no tanque de armazenamento de diesel S1800 (“Feedforward”)

Uma comparação com o resultado obtido para o diesel S500 mostra que o resultado para o diesel S1800 foi ligeiramente melhor, uma vez que a corrente de saída para o diesel S500 sai da especificação de densidade em pelo menos um ponto, como é visto na Figura IV-5. Embora as correntes de entrada sejam as mesmas, assim como as restrições de densidade impostas ao sistema, a maior flexibilidade do sistema, em decorrência da maior composição de enxofre permitida, faz com que a otimização para o diesel S1800 tenha maior facilidade de se adequar as variações na entrada.

Enxofre

A Figura IV-25 e a Figura IV-26 mostram que, assim como a densidade, a concentração de enxofre se manteve dentro da especificação durante todo o processo.

Neste caso fica evidente, em uma comparação com os resultados obtidos para o diesel S500, que o melhor desempenho da otimização para o diesel S1800 está ligado ao aumento do limite imposto a esta propriedade.

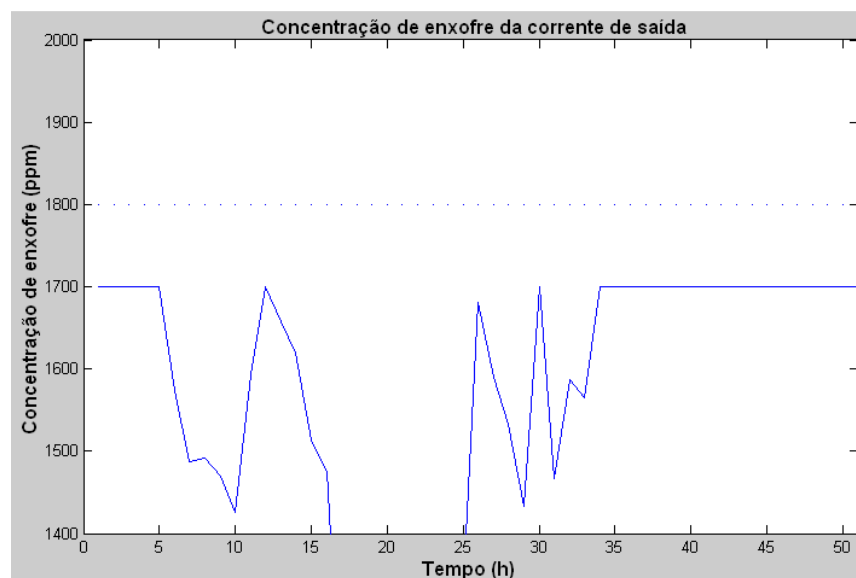


Figura IV-25: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S1800 (“Feedforward”)

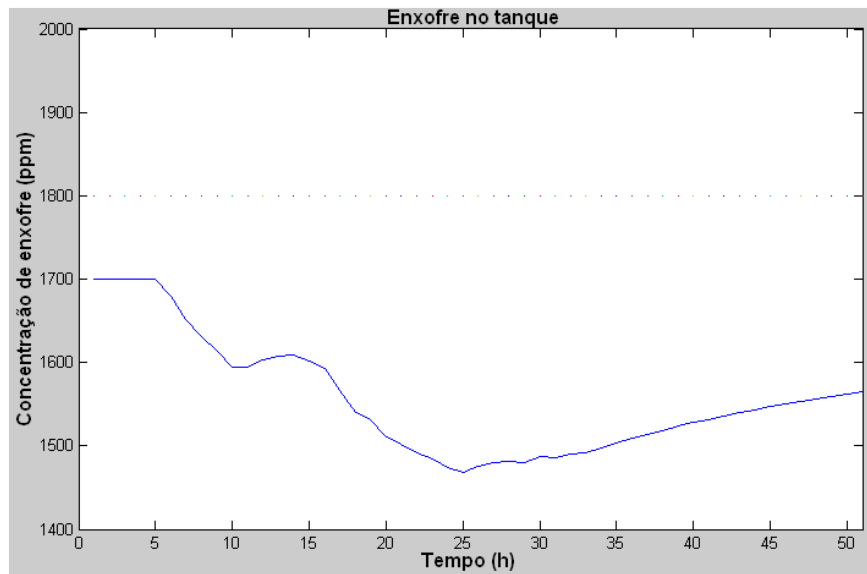


Figura IV-26: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S1800 (“Feedforward”)

IV.2.2. Estratégia “Feedback”

Vazão

A Figura IV-27 e a Figura IV-28 representam, respectivamente, a vazão das correntes de entrada e a vazão da corrente de saída do misturador em função do tempo, quando utilizada a estratégia “feedback”.

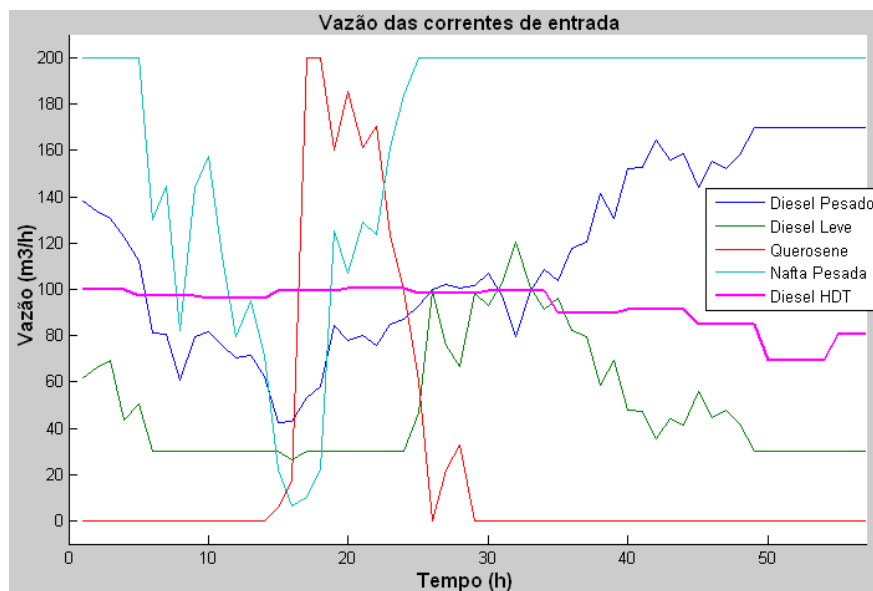


Figura IV-27: Vazão das correntes de entrada do diesel S1800 (“Feedback”)

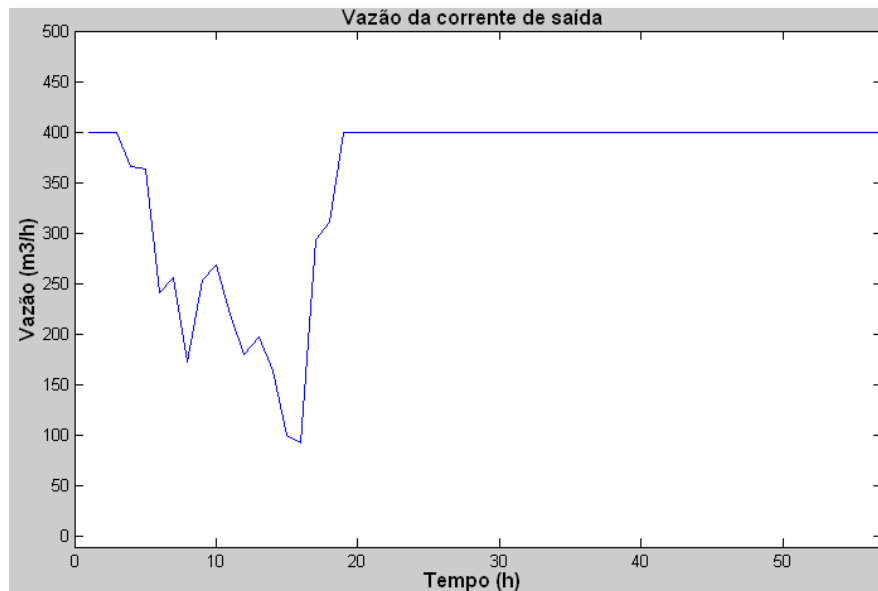


Figura IV-28: Vazão da corrente de saída do diesel S1800 (“Feedback”)

Densidade

O comportamento da densidade na linha e no tanque para esta estratégia esta demonstrado na Figura IV-29 e na Figura IV-30, respectivamente.

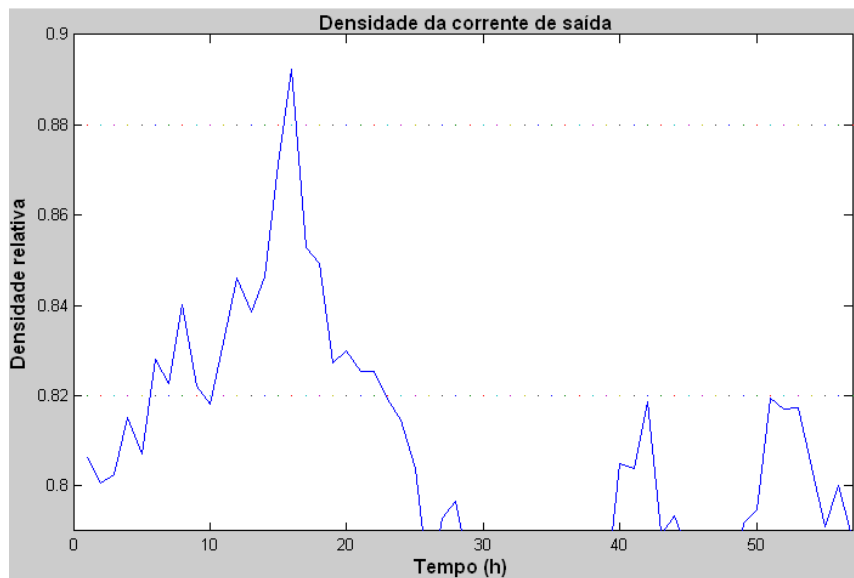


Figura IV-29: Densidade na corrente de saída do diesel S1800 (“Feedback”)

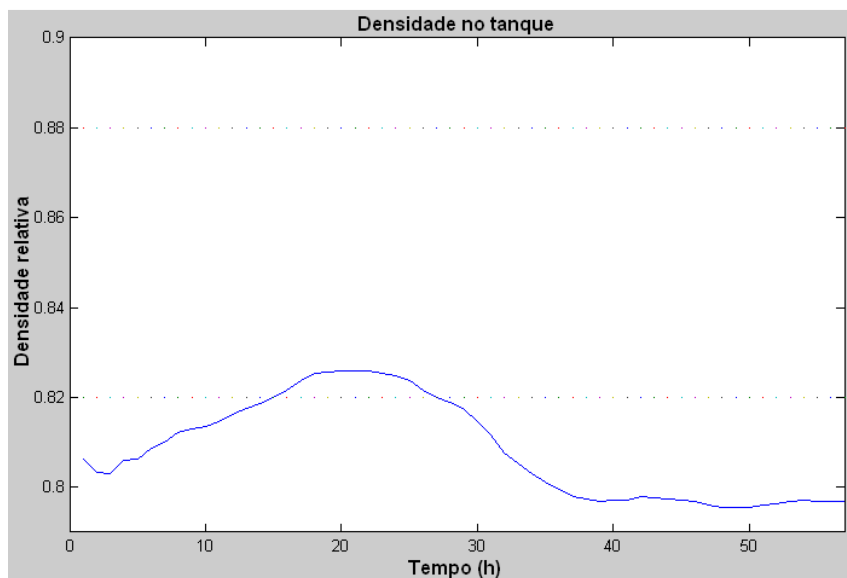


Figura IV-30: Densidade no tanque de armazenamento de diesel S1800 (“Feedback”)

No caso considerado, variações aleatórias fizeram com que a densidade das correntes de diesel leve e nafta pesada decaíssem consideravelmente após aproximadamente 25h de operação, conforme mostrado na Figura IV-1. Embora a densidade da corrente de querosene tenha sofrido um aumento, o preço elevado deste insumo impede que este fato contrabalanceie o efeito gerado pelas outras duas correntes na corrente de saída. Este fato fez com que, após este período a densidade na linha e no tanque decaísse para valores inferiores ao mínimo permitido, e não retornassem mais para a especificação. Embora houvesse soluções possíveis para o problema, que levariam a densidade de volta para a margem permitida, o otimizador não foi capaz de encontrar estas soluções. Este fato decorre das próprias características do otimizador “feedback”, que opera com base em um modelo do processo, e nos erros medidos em cada iteração. As mudanças consideráveis que ocorreram nas correntes de alimentação fizeram com que o modelo do processo divergisse consideravelmente da realidade, tornando as previsões do otimizador errôneas.

Enxofre

Com relação à concentração de enxofre, esta se manteve consideravelmente baixa na linha durante as primeiras 30h, aproximadamente, assim, os picos observados na composição após aproximadamente 40h de operação, observados na Figura IV-31, foram totalmente absorvidos no tanque, mantendo o enxofre dentro da especificação, como pode ser visto na Figura IV-32.

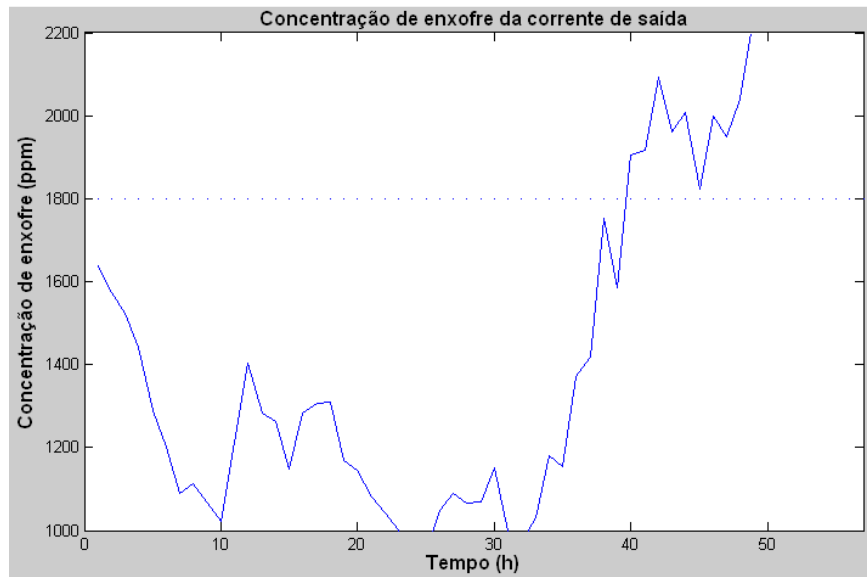


Figura IV-31: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S1800 (“Feedback”)

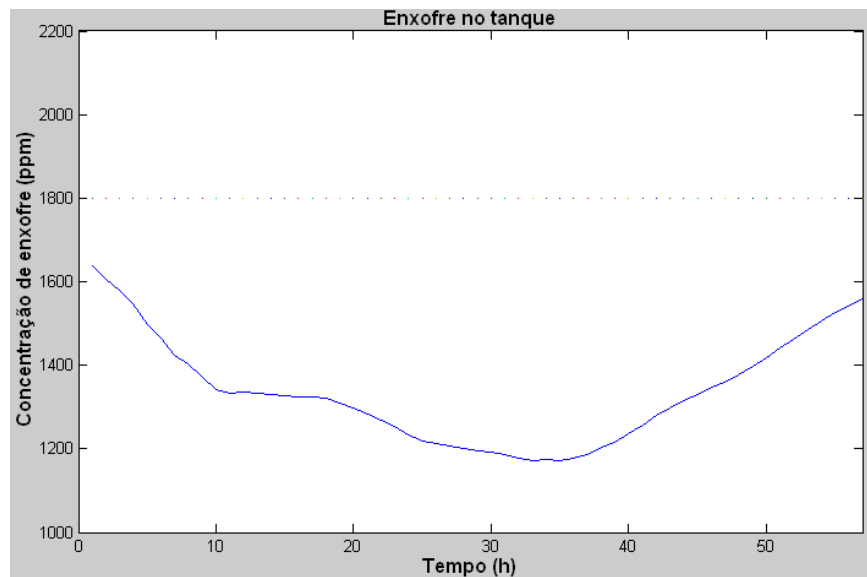


Figura IV-32: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S1800 (“Feedback”)

IV.2.3. Estratégia Híbrida

Vazão

A Figura IV-33 e a Figura IV-34 representam, respectivamente, a vazão das correntes de entrada e a vazão da corrente de saída do misturador em função do tempo, quando utilizada a composição das duas estratégias.

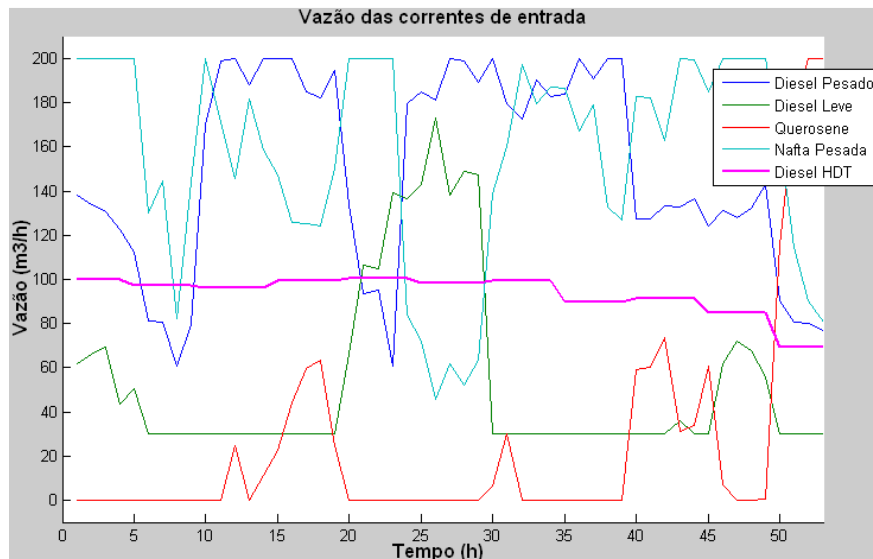


Figura IV-33: Vazão das correntes de entrada do diesel S1800 (Híbrida)

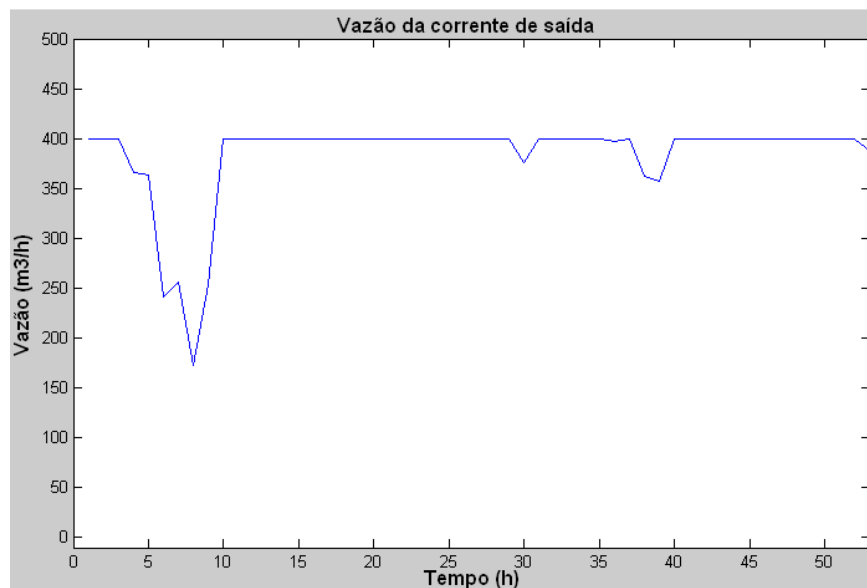


Figura IV-34: Vazão da corrente de saída do diesel S500 (Híbrida)

Densidade

O comportamento da densidade na linha e no tanque para esta estratégia esta demonstrado na Figura IV-35 e na Figura IV-36, respectivamente.

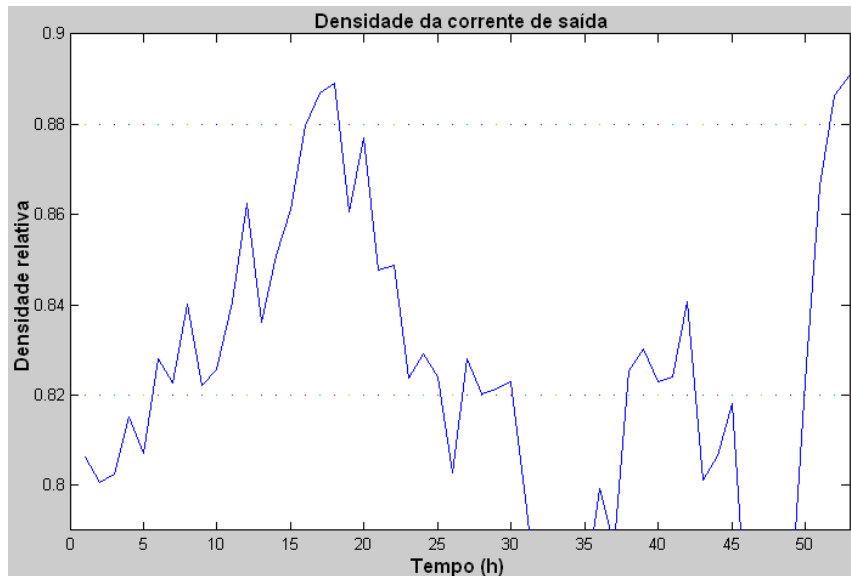


Figura IV-35: Densidade na corrente de saída do diesel S1800 (Híbrida)

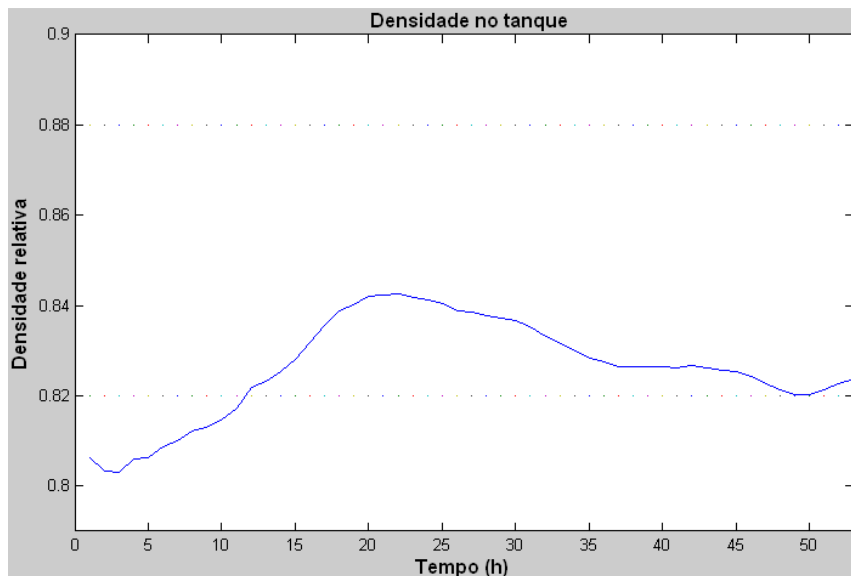


Figura IV-36: Densidade no tanque de armazenamento de diesel S1800 (Híbrida)

Se comparada à estratégia “feedback”, a estratégia híbrida tem a vantagem de contar com correções do modelo do processo a cada 5h. Tais correções garantem a confiabilidade do modelo nestes instantes, e impedem que o modelo divirja muito da realidade durante toda a operação. Esta característica faz com que o otimizador tenha uma capacidade maior de se ajustar as variações nas correntes, e seja mais eficiente para corrigir os desvios da densidade na linha, fazendo com que o tanque esteja dentro das especificações no final do processo.

Enxofre

A Figura IV-37 e a Figura IV-38 permitem observar que as variações de concentração de enxofre que ocorrem na linha durante o processo são totalmente absorvidas no tanque.

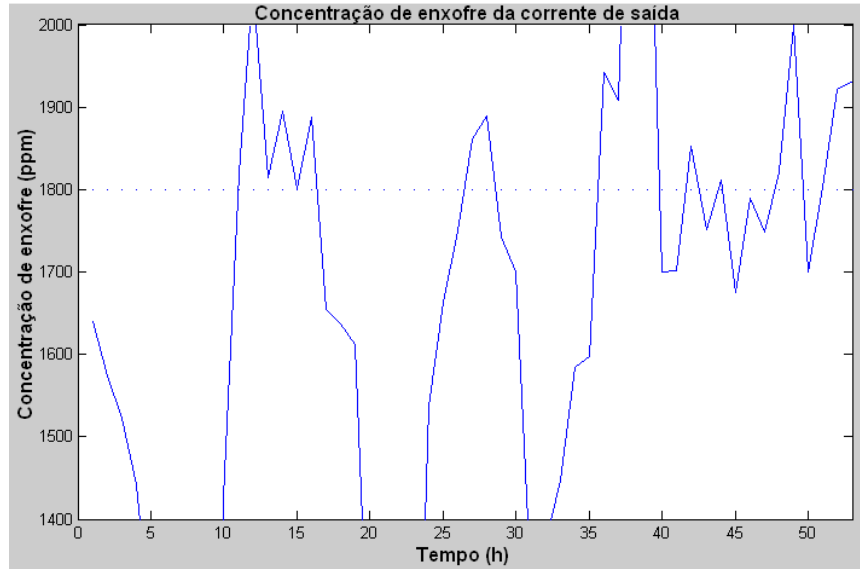


Figura IV-37: Teor de enxofre na corrente de saída do diesel S1800 (Híbrida)

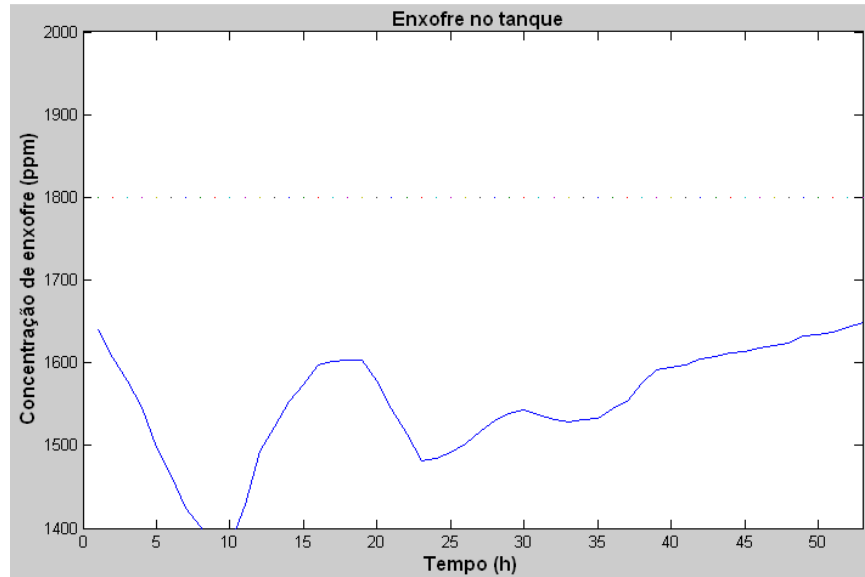


Figura IV-38: Teor de enxofre no tanque de armazenamento de diesel S1800 (Híbrida)

IV.2.4. Comparação entre os métodos

Da mesma forma que para o diesel S500, as tabelas a seguir apresentam de uma forma resumida os resultados obtidos para as 15 simulações realizadas para cada estratégia estudada.

A Tabela IV-6 apresenta a média do tempo de operação para cada estratégia. Assim como para o diesel S500 a comparação entre as estratégias mostra que o tempo que o tanque de produto leva para encher completamente não varia significativamente entre as estratégias, embora neste caso seja possível perceber que o tempo de operação para a estratégia “feedback” é maior que para as outras estratégias. Uma comparação com o resultado obtido para o diesel S500 (Tabela IV-1) mostra que a produção de diesel S1800 leva um tempo consideravelmente mais curto para encher totalmente um tanque de produto final.

Tabela IV-6: Média do Tempo de Operação para o diesel S1800

| S1800 | Tempo Total (h) | Desvio Padrão (h) |
|---------------|-----------------|-------------------|
| “Feedforward” | 57 | 8 |
| “Feedback” | 61 | 6 |
| Híbrida | 56 | 5 |

A

Tabela IV-7 mostra o desgaste médio nas válvulas, total e por hora de operação, relativo a cada uma das estratégias. Uma análise da tabela torna perceptível o maior desgaste das válvulas que ocorre na estratégia híbrida, numa comparação com as outras estratégias, resultado semelhante ao obtido para o diesel S500 (Tabela IV-2).

A estratégia “feedback” é a que apresenta o menor desgaste. Este resultado também é semelhante ao obtido para o diesel S500, e era esperado, uma vez que a estratégia “feedback” não tem uma percepção tão boa das variações que ocorrem no sistema, em comparação com as outras estratégias, e, por isso, leva a ações de controle mais amenas. Em uma análise mais cautelosa, pode-se perceber que, de uma forma geral, um maior desgaste na válvula, na estratégia híbrida, acontece justamente nos períodos onde ocorre a correção “feedforward” das variáveis de entrada.

Em relação ao diesel S500 (

Tabela IV-7), embora o desgaste das válvulas seja ligeiramente menor para o diesel S1800, a variação não é significativa.

Tabela IV-7: Desgaste das válvulas para a produção de Diesel S1800

| S1800 | Desgaste Total das Válvulas | Desvio Padrão | Desgaste Médio das Válvulas | Desvio Padrão |
|----------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------------------|----------------------|
| “Feedforward” | 322.914 | 156.082 | 5.515 | 2.481 |
| “Feedback” | 287.975 | 195.643 | 4.590 | 2.830 |
| Híbrida | 403.131 | 189.414 | 7.024 | 3.067 |

Na Tabela IV-8, pode-se observar o lucro médio obtido com um tanque de produto, ao final da operação, para cada estratégia de otimização, assim como o lucro por hora de operação. Uma análise dos resultados obtidos mostra que o lucro não varia consideravelmente entre uma estratégia e outra.

Por outro lado, comparando-se os resultados obtidos para o diesel S1800, e para o diesel S500 (Tabela IV-3), é possível perceber que a produção de diesel S500 pode ser consideravelmente mais lucrativa.

Tabela IV-8: Lucro obtido com a produção de Diesel S1800

| S1800 | Lucro Total (R\$) | Desvio Padrão (R\$) | Lucro Médio (R\$/h) | Desvio Padrão (R\$/h) |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| “Feedforward” | 5.544.867 | 463.185 | 97.645 | 10.697 |
| “Feedback” | 5.713.920 | 311.949 | 94.278 | 10.743 |
| Híbrida | 5.388.493 | 322.260 | 96.062 | 9.893 |

A Tabela IV-9 e a Tabela IV-10 mostram os desvios em relação às especificações que ocorreram ao longo das 15 simulações realizadas para cada estratégia de otimização. A Tabela IV-9 mostra os desvios que ocorreram na densidade, e a Tabela IV-10 os desvios que ocorreram na concentração de enxofre.

Tabela IV-9: Desvios da densidade em relação à especificação para o diesel S1800

| S1800 – Densidade | | | |
|--|----------------------|-------------------|----------------|
| Desvio em Relação à Especificação | “Feedforward” | “Feedback” | Híbrida |
| Especificada (0%) | 100% | 7% | 53% |
| entre 0% e 1% | 0% | 13% | 33% |
| entre 1% e 2,5% | 0% | 33% | 13% |
| entre 2,5% e 5% | 0% | 40% | 0% |
| maior que 5% | 0% | 7% | 0% |

Tabela IV-10: Desvios da concentração de enxofre em relação à especificação para o diesel S1800

| S1800 - Teor de Enxofre | | | |
|--|----------------------|-------------------|----------------|
| Desvio em Relação à Especificação | “Feedforward” | “Feedback” | Híbrida |
| Especificada (0%) | 100% | 80% | 100% |
| entre 0% e 1% | 0% | 0% | 0% |
| entre 1% e 5% | 0% | 7% | 0% |
| entre 5% e 10% | 0% | 7% | 0% |
| entre 10% e 15% | 0% | 0% | 0% |
| maior que 15% | 0% | 7% | 0% |

A partir das tabelas acima, pode-se observar que a estratégia “feedforward” é capaz de manter o produto especificado com bastante eficiência. Dentre os casos analisados, para o diesel S1800, todos os tanques de produto final ficaram dentro das especificações para esta estratégia.

Por outro lado, a estratégia “feedback”, embora tenha uma eficiência razoável para as especificações de teor de enxofre, na maior parte das vezes não consegue manter a densidade dentro das especificações. Uma análise mais profunda permite observar que a maior parte dos desvios na densidade leva a uma densidade menor que o limite inferior. Este resultado pode ser explicado considerando-se que das cinco correntes utilizadas, três apresentam uma densidade igual ou menor que o limite inferior (diesel leve, querosene e nafta pesada), e entre as duas correntes com uma densidade maior, uma (diesel HDT) não pode ser controlada, e a outra (diesel pesado) apresenta um teor de

enxofre muito alto, não podendo ser utilizada em grandes quantidades sem prejudicar esta propriedade.

A estratégia híbrida, “feedforward” + “feedback”, apresenta um desempenho intermediário, melhor que a otimização “feedback”, porém não tão eficiente quanto à “feedforward”. Neste caso, a otimização tem uma performance muito boa para a concentração de enxofre (100% dos casos analisados), e aproximadamente metade dos casos apresenta densidade do produto final dentro das especificações.

Comparando os resultados obtidos com os resultados para o diesel S500 (Tabelas Tabela IV-4 e Tabela IV-5), observa-se claramente uma maior facilidade em manter as especificações na produção de diesel S1800, especialmente para o teor de enxofre. A melhora significativa de desempenho para a restrição quanto ao teor de enxofre no caso do diesel S1800 se deve, naturalmente, ao fato de a especificação, neste caso, ser menos rígida, permitindo quantidades maiores de enxofre no produto.

Já para o caso da densidade, também existe uma melhora na performance da otimização para o diesel S1800, porém esta melhora é menos significativa que para o enxofre. Especialmente para o caso “feedback”, o diesel S1800 apresenta desvios menores com relação às especificações do que o diesel S500. Para o caso da estratégia híbrida, é possível observar um aumento considerável no número de amostras especificadas.

IV.3. Total de Tanques Especificados

A Tabela IV-11 mostra o percentual de tanques dentro das especificações de enxofre e densidade, obtidos com cada uma das estratégias de otimização estudadas.

Tabela IV-11: Número de tanques especificados para cada estratégia

| Estratégia de Otimização | Tanques Especificados | | |
|--------------------------|-----------------------|-------|-------|
| | S500 | S1800 | Total |
| “Feedforward” | 73% | 100% | 87% |
| “Feedback” | 7% | 0% | 3% |
| Híbrida | 7% | 53% | 30% |

Uma análise dos dados contidos nesta tabela mostra que a estratégia “feedforward” apresenta os melhores resultados, e a estratégia “feedback”, os piores. Além disso, é

possível perceber um melhor desempenho na produção de diesel S1800, em relação ao diesel S500.

Capítulo V. Conclusões

Observando-se os resultados obtidos, conclui-se que a aplicação de uma técnica de otimização no processo de mistura em linha para produção de diesel é capaz de levar a resultados satisfatórios, permitindo-se que se obtenha lucro no processo, buscando, simultaneamente, manter as restrições impostas ao produto.

A princípio, a comparação entre os diferentes produtos estudados, diesel S1800 e diesel S500, permitiria concluir que a produção de diesel S500 é capaz de gerar lucros aparentemente mais elevados do que a produção de diesel S1800. Por outro lado, manter as propriedades do diesel dentro das especificações mostrou ser mais trabalhoso para o diesel S500, e o número de tanques não especificados obtidos para este diesel, dentre os casos analisados, foi significativamente maior. Ocorre que, na prática, tanques fora da especificação não podem ser vendidos, e estes tanques teriam que ser corrigidos; na maioria dos casos esta correção é feita com o deslocamento de uma parcela do produto que pode então ser reprocessada; aumentando significativamente, o custo de produção e reduzindo a margem de lucro obtida. Para uma análise rigorosa do lucro obtido para cada tipo de diesel este fato teria de ser levado em conta, o que, provavelmente, reduziria, ou até inverteria, a vantagem do diesel S500 em relação ao S1800.

A análise das diferentes estratégias de otimização estudadas neste trabalho mostra uma clara superioridade da estratégia “feedforward” para manter os produtos dentro das especificações. Esta estratégia obteve resultados excelentes, conseguindo obter produtos especificados na maior parte das vezes, mesmo para os casos mais complicados, como a concentração de enxofre do diesel S500, onde as outras estratégias tiveram desempenhos medianos.

Em contrapartida, a implantação e operação de um sistema de otimização “feedforward” envolve custos elevados, referentes à instalação e ao manuseio dos equipamentos de medida necessários para obter os dados requeridos pelo otimizador “feedforward”.

A estratégia “feedback”, por outro lado, embora tenha levado a lucros ligeiramente superiores e envolva custos de implantação e operação consideravelmente mais baixos, provou não ser eficiente em manter as especificações do produto, resultando, na maior

parte das vezes, em um tanque fora da especificação. Assim sendo, esta estratégia não é adequada para a otimização do processo de produção de diesel por mistura em linha.

A estratégia de otimização híbrida envolve os maiores custos de implantação comparada às outras duas, visto que possui um maior número de instrumentos de medida, em contraposição seu desempenho quanto às especificações do diesel é melhor do que o da otimização “Feedback”, tendo sido obtidos resultados satisfatórios quando aplicado ao diesel S1800.

Concluí-se então que os excelentes resultados apresentados pela estratégia “feedforward” superam o ônus de seus custos em comparação às outras estratégias e fazem desta a que apresenta um melhor equilíbrio entre o lucro obtido e a qualidade do produto final. Vale destacar que caso existam distúrbios no processo não medidos a estratégia híbrida possui a vantagem de conseguir perceber a influência destes nas propriedades através do cálculo do erro e tentaria então corrigi-los.

É importante ressaltar, no entanto, que a certificação de diesel para venda envolve outras propriedades, que não foram consideradas neste trabalho, tais como ponto de fulgor, viscosidade, número de cetano e corrosividade. Assim sendo, uma sugestão para trabalhos futuros seria a de incluir outras restrições na otimização, tornando o problema mais próximo do que acontece na prática.

Outra proposta plausível é a de realizar a otimização para a produção de diesel S50. Este produto, porém, não pode ser alcançado com as mesmas correntes de insumos que são utilizadas para a produção de diesel S1800 e diesel S500, e o processo teria que ser adaptado, considerando correntes de entrada com teores menores de enxofre.

Uma alternativa para a otimização aqui estudada seria a implementação de um controle preditivo, com o objetivo de manter a qualidade do produto dentro das especificações e talvez reduzir o esforço de controle com o uso de trajetória de referência. Uma comparação entre técnicas de otimização e controle preditivo poderia vir a ser uma extensão deste trabalho, estudando outras maneiras de se obter máximo lucro com o processo, mantendo as propriedades dentro das especificações.

A certificação em linha, onde o produto, recém produzido, é enviado diretamente para o cliente, eliminando a necessidade de tanques de armazenamento, é um processo de grande interesse prático nas refinarias, pois possibilita ganhos como: redução de tancagem, redução de estoques, agilidade na entrega dos produtos ao cliente e flexibilidade na produção de produtos finais. Neste trabalho, a qualidade dos produtos em linha foi analisada apenas para a realização da otimização, porém, o objetivo deste

trabalho era manter a certificação do produto no tanque. O estudo aqui realizado poderia ser aprimorado, tornando-se mais rigoroso em suas restrições, a fim de possibilitar a otimização de um processo de certificação em linha.

Capítulo VI. Bibliografia

- ANP. (2009). Resolução nº 42 da Agência Nacional do Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis. *Diário Oficial da União* , p. 104.
- Beveridge, G. S., & Schechter, R. S. (1970). *Optimization: Theory and Practice*. McGraw-Hill.
- Chèbre, M., Creff, Y., & Petit, N. (2010). Feedback control and optimization for the production of commercial fuels by blending. *Journal of Process Control* , pp. 441-451.
- CNPE. (2009). Resolução nº 6 do Conselho Nacional de Política Energética . *Diário Oficial da União - DOU* , p. 99.
- CONAMA. (2002). Resolução nº315 do Conselho Nacional do Meio Ambiente. *Diário Oficial da União* .
- Costa, F., Souza, L., Mendonça, P., Joly, M., Takahashi, M., & Magalhães, M. (2010). Sistema de otimização de misturas de derivados. *Petro & Química (nº-322)* , pp. 36-41.
- Edgar, T. F., & Himmelblau, D. M. (1988). *Optimization of chemical processes*. McGraw-Hill.
- Ferreira, A. C. (2008). Modelos de Otimização na Produção de Óleo Diesel: Uma Aplicação Industrial. *Dissertação de doutorado* . Campinas-SP: Universidade Estadual de Campinas.
- Fletcher, R. (1987). *Practical methods of optimization*. Wiley-Interscience.
- Glismann, K., & Gruhn, G. (5 de Janeiro de 2001). Short-term scheduling and recipe optimization of blending processes. *Computers & Chemical Engineering* , pp. 627 - 634.
- Gomes, A. C. (2007). Refino de Petróleo. In: A. Antunes, *Setores da Indústria Química Orgânica* (pp. 35-65). Rio de Janeiro: e-papers.
- Griva, I., Nash, S. G., & Sofer, A. (2008). *Linear and Nonlinear Optimization*. Siam.
- Martins, C. G. (2008). Determinação de Estoque de Segurança de Diesel para uma Base de Distribuição de Derivados. *Dissertação de Mestrado* . Universidade Federal de Santa Catarina.

- Mathworks. (2010). *User's Guide*. Acesso em 20 de Julho de 2010, disponível em The Mathworks:
http://www.mathworks.it/access/helpdesk/help/toolbox/optim/optim_product_page.html
- Mendéz, C. A. (2006). A simultaneous optimization approach for off-line blending and scheduling of oil-refinery operations. *Computers & Chemical Engineering*, pp. 614 - 634.
- Moré, J. J., & Sorensen, D. (1983). Computing a Trust Region Step. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing (Vol.3)*.
- PETROBRAS. (2010). *Produtos*. Acesso em 18 de Julho de 2010, disponível em PETROBRAS: <http://www.petrobras.com.br/pt/produtos/para-o-seu-negocio/rodoviario/>
- Pinto, J. M., Joly, M., & Moro, L. F. (2000). Planning and Scheduling Models for Refinery Operations. *Computers and Chemical Engineering (nº-24)*.
- Rao, S. S. (1995). *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Wiley-Interscience.
- Santos, M. M. (2006). *Qualificação das barreiras e a viabilidade de competição no refino de petróleo após a quebra do monopólio*. Salvador: Universidade Federal da Bahia.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., & Mellichamp, D. A. (2003). *Process Dynamics and Control*. Wiley.
- Secchi, A. R. (2005). *Otimização de Processos*. PPGEQ/UFRGS.
- Vichi, F. M., & Mansor, M. T. (Nº 3 de Vol. 32 de 2009). Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. *Química Nova*.
- Waltz, R. A., Morales, J. L., Nocedal, J., & Orban, D. (2006). An interior algorithm for nonlinear optimization that combines line search and trust region steps. *Mathematical Programming (Vol.107, Nº-3)*.