



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# Alocação de matérias-primas em indústria multiplanta

*Autor: Tomás Henrique Zimmer*

*Orientador: Pedro Rafael Bolognese Fernandes*

Porto Alegre, dezembro de 11

## Sumário

|  |    |
|--|----|
| Sumário  | 2  |
| Agradecimentos   | 3  |
| Resumo   | 4  |
| Lista de Figuras   | 5  |
| 1 Introdução e Motivação do Trabalho                     | 6  |
| 2 Revisão Bibliográfica                                  | 7  |
| 3 Estudo de caso   | 10 |
| 3.1 Descrição da empresa                                 | 10 |
| 3.2 Fluxo logístico de matérias-primas                   | 10 |
| 3.3 Metodologia Atual de Determinação do <i>Blending</i> | 12 |
| 3.3.1 Modelo de Rendimentos                              | 13 |
| 4 Metodologia  | 15 |
| 4.1 Desenvolvimento do modelo de <i>blending</i>         | 15 |
| 4.1.1 Hipóteses consideradas                             | 15 |
| 4.1.2 Equacionamento do <i>blending</i>                  | 16 |
| 4.1.2.1 Transferências de navios para o TEDUT            | 17 |
| 4.1.2.2 Transferências do TEDUT para a REFAP             | 18 |
| 4.1.2.3 Transferências da REFAP para a UNIB              | 20 |
| 4.1.2.4 Tanques de processamento da UNIB                 | 21 |
| 4.2 Desenvolvimento da ferramenta em Excel               | 22 |
| 4.2.1 Implementação do modelo de <i>blending</i>         | 23 |
| 4.2.2 Modelo de Rendimentos no Excel                     | 24 |
| 4.2.3 Configuração do Solver                             | 25 |
| 4.2.3.1 Função Objetivo                                  | 25 |
| 4.2.3.2 Restrições da otimização                         | 26 |
| 5 Resultados   | 28 |
| 6 Conclusões e Trabalhos Futuros                         | 30 |
| 7 Referências  | 31 |

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente à minha família, que tornou possível este momento. Especialmente meus pais Flávio e Susana, minha namorada Caroline e minha dinda Clarice. Amo todos vocês acima de tudo.

Agradeço aos colegas de empresa Tales Lazari da Silva, pela ideia do trabalho e pelas informações cedidas em conjunto com Israel Wink. As contribuições de vocês foram fundamentais para a execução plena deste trabalho.

Agradeço ao orientador Prof. Dr. Eng. Pedro Rafael Bolognese Fernandes, pela dedicação e pensamento positivo desde o início e sempre. Muito obrigado pelos ensinamentos e pelas risadas compartilhadas.

Agradeço à raça por existir e me incluir em suas jornadas particulares na engenharia. Vida longa gurizada!

## Resumo

Este trabalho teve por objetivo criar uma ferramenta que auxiliasse a análise integrada entre áreas distintas de uma petroquímica de primeira geração do pólo petroquímico de Triunfo – RS, no intuito de maximizar os lucros da unidade através de uma otimização no *blending* das naftas processadas. O equacionamento proposto para o *blending* dos tanques e dutos que compõe o fluxo logístico da nafta até chegar ao pólo foi implementado em *software* Microsoft Excel juntamente com o modelo de rendimentos de matérias-primas em produtos próprio da empresa, que permite saber qual a melhor qualidade de matéria-prima para um determinado perfil produtivo. As simulações foram feitas através do suplemento Solver do Excel. A ferramenta indica as transferências ideais a serem feitas, visando minimizar a diferença entre o perfil produtivo desejado e o calculado pelo modelo de rendimentos. As restrições matemáticas necessárias para tornar factível o resultado não impediram o funcionamento do solver, e o resultado obtido mostra-se uma alternativa melhor e com ganhos visíveis em relação ao fluxo de trabalho atual, além de ter robustez para análises de diferentes cenários de qualidade e disponibilidade de nafta.

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 2.1:</b> Uma propriedade não-linear e a aproximação linear proposta por Méndez et al. (2006)..... | 8  |
| <b>Figura 2.2:</b> Segmentos $d$ e $d+1$ com blocos de igual diâmetro .....                                 | 8  |
| <b>Figura 2.3:</b> Sistema com blocos de diferentes diâmetros.....  | 9  |
| <b>Figura 3.1:</b> Fluxo logístico das matérias-primas.....   | 11 |
| <b>Figura 3.2:</b> Metodologia atual do <i>blending</i> de nafta .....                                      | 12 |
| <b>Figura 4.1:</b> Fluxo logístico proposto no modelo.....  | 16 |
| <b>Figura 4.2:</b> Estrutura do balanço de massa do modelo de blending em Excel .....                       | 23 |
| <b>Figura 4.3:</b> Estrutura dos cálculos de qualidade do modelo de blending em Excel.....                  | 24 |
| <b>Figura 4.4:</b> Cálculos das massas transferidas do modelo de blending em Excel .....                    | 24 |
| <b>Figura 4.5:</b> Disposição das informações do modelo de rendimentos.....                                 | 25 |
| <b>Figura 4.6:</b> Estrutura do cálculo da função objetivo do <i>Solver</i> Excel .....                     | 26 |
| <b>Figura 4.7:</b> Configuração da otimização no <i>Solver</i> .....  | 27 |
| <b>Figura 5.1:</b> Resultado de simulação utilizando <i>solver</i> .....                                    | 28 |
| <b>Figura 5.2:</b> Resultado de simulação utilizando <i>solver</i> – frações transferidas .....             | 28 |

## 1 Introdução e Motivação do Trabalho

No cenário atual de competitividade em que se encontra a indústria do petróleo e petroquímica, a busca incessante por minimização de custos e maximização de receitas atinge todos os níveis dentro da empresa; especialmente as áreas envolvidas com o processo produtivo. Minimização dos custos energéticos e com insumos e matéria-prima, redução de perdas e otimização de processos são temáticas onde se busca a melhoria contínua, unidas em prol da maximização do lucro da empresa.

A indústria petroquímica brasileira tem na Braskem sua maior integrante, sendo esta empresa atualmente a maior do setor, tendo incorporado praticamente todas as unidades produtivas de primeira e segunda geração petroquímicas do país. A integração entre as gerações petroquímicas torna-se um desafio e atuações integradas podem alavancar o resultado da empresa frente à concorrência global cada vez mais intensa. Sinergias entre as unidades nacionais e internacionais de primeira e segunda geração da empresa tornam-se grandes pontos de otimização outrora inexistentes.

A petroquímica de primeira geração apresenta uma extensa gama de produtos que podem ser produzidos em maior ou menor quantidade, a partir da mistura de hidrocarbonetos que constituem a nafta, a matéria-prima base da maioria das unidades de primeira geração da Braskem. Parâmetros de processo ditam o perfil produtivo de uma unidade, mas a qualidade das matérias-primas consumidas tem um papel decisivo no resultado – um *blending* otimizado gera ganhos significativos através da maximização da produção daqueles produtos de maior valor agregado, como eteno, propeno e butadieno, por exemplo. Por ser uma petroquímica multinacional, seu poder de compra no mercado de nafta é alto e sinergias de transferências e análises integradas sobre a melhor cesta de matérias-primas a ser disponibilizada a cada unidade tornam-se pontos de otimização com possibilidades de ganhos significativos.

Uma ação integrada entre os responsáveis pela qualidade da nafta que alimenta as plantas de processamento e os analistas de planejamento de produção é o caminho para obter-se um *blending* ótimo e conseqüentemente uma produção gerando maior receita. Neste contexto, surgiu a motivação para este trabalho – a criação de uma alternativa que melhorasse o resultado econômico da unidade de Triunfo atuando no *blending* da nafta processada nas plantas, através de ação integrada ao planejamento estratégico desta unidade da primeira geração da petroquímica Braskem.

## 2 Revisão Bibliográfica

Um elevado número de artigos envolvendo a otimização de *blending* da indústria de petróleo e petroquímica tem sido publicado e inúmeros objetivos diferentes são traçados no desenvolvimento dos modelos. Por exemplo, um artigo de escopo semelhante ao deste trabalho foi publicado por Ristic et al. (1999), que utilizou o Microsoft Excel com auxílio do suplemento otimizador “What’s Best! Spreadsheet Solver” para otimizar o *blending* das correntes que constituem os produtos de uma refinaria, a fim de maximizar as receitas de vendas, mas mantendo um adequado nível de qualidade dos produtos e abastecimento do mercado.

A solução proposta por Ristic et al. (1999) para este problema envolveu a identificação de uma série de aspectos: os tipos de produtos necessários ao mercado, os preços de venda destes, a qualidade mínima dos produtos que deve ser alcançada, a demanda total do mercado, as frações disponíveis de cada corrente para compor as misturas e gerar os produtos, as propriedades físico-químicas de todas as frações a serem utilizados como componentes de mistura e os métodos matemáticos para estimar propriedades físico-químicas dos produtos misturados. O modelo linear desenvolvido descreve a decisão a ser tomada: que frações de quais correntes devem ser misturadas em qual produto a fim de maximizar a receita de vendas, dado o petróleo bruto disponível e as restrições dos padrões atuais para combustíveis líquidos, demanda do mercado e de balanço de materiais das unidades de processamento. Ristic et al. (1999) definiram a função objetivo na forma:

$$x = \sum p_{cfp,g} * G_{cfp} \quad (1)$$

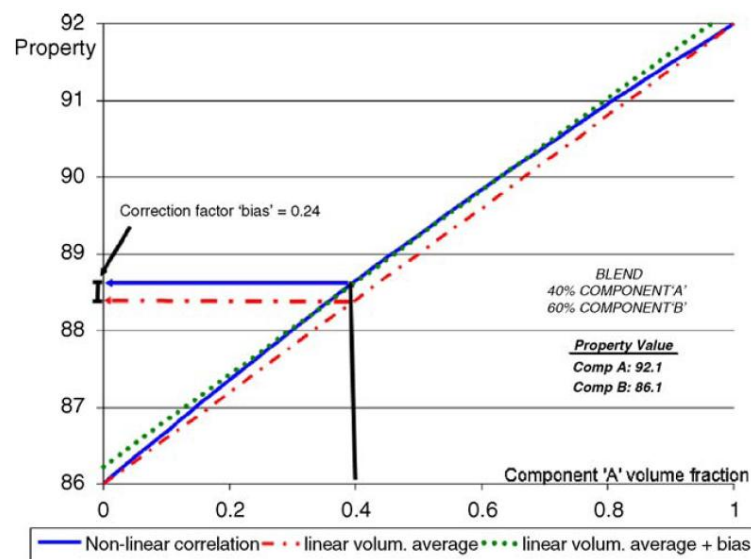
Na Equação 1,  $G_{cfp}$  é o valor da fração  $x$  a ser misturada no produto  $p$ , nas condições de operação  $c$ . O termo  $p_{cfp,g}$  é o preço de venda do produto, por unidade de massa.

Méndez et al. (2006) trataram do *blending* de gasolina automotiva através de otimização similar à de Ristic et al. (1999), maximizando o lucro mantendo a especificação mínima na mistura constituinte dos produtos. Em seu modelo, propriedades de comportamento não linear como a octanagem da gasolina, por exemplo, tiveram seu equacionamento de *blending* linearizado através da utilização de fatores de correção (bias), resultando em:

$$\begin{aligned} pr_{p,k}^{min} F_{p,t}^P + bias_{p,k,t} F_{p,t}^P \\ \leq \sum_i pr_{i,k} F_{i,p,t}^I \leq pr_{p,k}^{max} F_{p,t}^P + bias_{p,k,t} F_{p,t}^P, \quad \forall p, k, t \end{aligned} \quad (2)$$

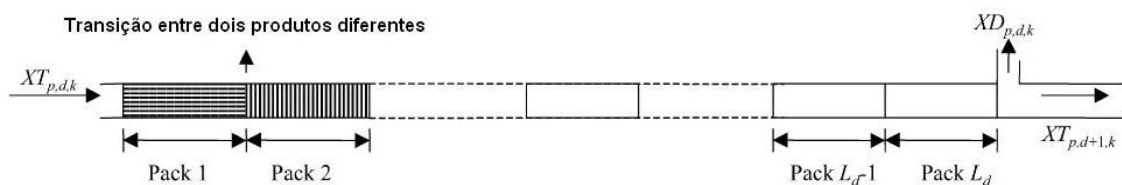
Na Equação 2, os termos  $pr_{p,k}^{min}$  e  $pr_{p,k}^{max}$  definem os valores mínimo e máximo respectivamente da propriedade  $k$  para o produto  $p$ . O termo  $F_{p,t}^P$  denota a vazão do produto  $P$  sendo misturada no intervalo de tempo  $t$ , enquanto o termo  $F_{i,p,t}^I$  define a vazão do componente  $i$  transferida para o produto  $p$ , no intervalo de tempo  $t$ . O valor da propriedade  $k$  no componente  $i$  é dado por  $pr_{i,k}$  e  $bias_{p,k,t}$  é o fator de correção da propriedade  $k$  para o produto  $p$ , no intervalo de tempo  $t$ . Para ilustrar o uso do procedimento iterativo e a aproximação linear proposta por Méndez et al. (2006), a Figura 2.1 mostra uma comparação entre os valores da média volumétrica linear, a

correlação não linear original e a aproximação linear proposta para uma propriedade não linear real de um produto, tal como o número de octanos. Neste exemplo, considera-se a mistura de dois componentes, A e B, apenas. A propriedade do produto final é uma função não-linear de concentrações de componentes. Como mostrado na Figura 2.1, se misturados 40% de A com 60% de B, os valores da média volumétrica e a correlação não-linear real são 88,5 e 88,74, respectivamente. Essa diferença surge porque todos os termos não-lineares envolvidos na correlação exata de octanos não estão incluídos na média volumétrica linear. A fim de corrigir esta discrepância, o fator de correção bias é calculado e utilizado para produzir uma previsão melhor de propriedade na próxima iteração. Esta aproximação substitui a solução de uma formulação MINLP (Programação Não Linear Inteira Mista) muito complexa por uma aproximação sequencial de MILP (Programação Linear Inteira Mista).



**Figura 2.1:** Uma propriedade não-linear e a aproximação linear proposta por Méndez et al. (2006)

Pinto e Rejowski (2008) utilizaram MINLP para um sequenciamento de curto prazo através de uma tubulação (que na realidade representa fisicamente tanques agregados) utilizada por diferentes produtos. A programação se baseia em uma representação em tempo contínuo e também considera as restrições de balanço de massa e de operação detalhada dos tanques. Pinto e Rejowski (2008) consideram em seu modelo matemático uma configuração de segmentos de tubulação, conforme a Figura 2.2.



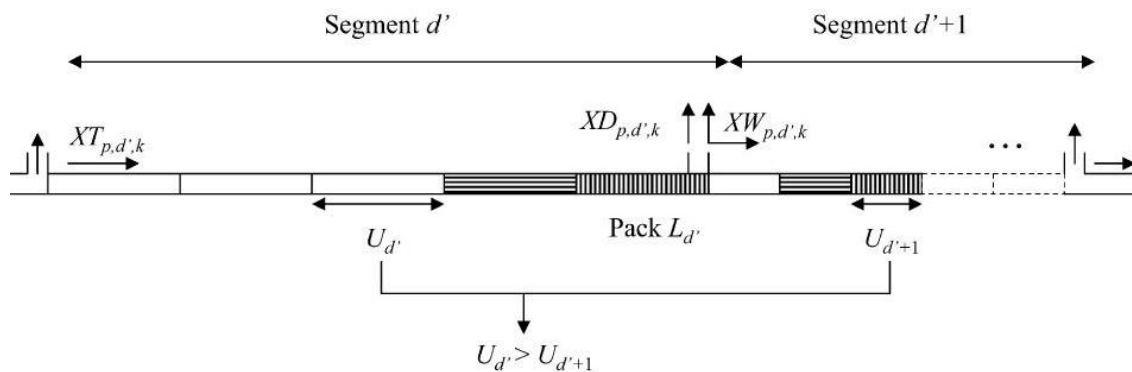
**Figura 2.2:** Segmentos d e d+1 com blocos de igual diâmetro

Nesta configuração, os segmentos d e d+1 são compostos por diversos blocos (packs) de capacidade volumétrica semelhante. O segmento d é composto por  $L_d$  blocos que compõem um produto, em qualquer intervalo de tempo. Se o produto p entra no segmento d no intervalo de tempo k, o conteúdo do primeiro bloco é transferido para o bloco seguinte – o mesmo ocorre para todos os blocos subsequentes dentro do mesmo



segmento. De acordo com esta configuração, a mesma quantidade de produto deve ou deixar o segmento ou ser transferido para o segmento  $d+1$ .

Outra configuração adotada por Pinto e Rejowski (2008) é demonstrada na Figura 2.3, onde os blocos dos segmentos  $d'$  e  $d'+1$  têm capacidades diferentes.



**Figura 2.3:** Sistema com blocos de diferentes diâmetros

Esta abordagem proposta por Pinto e Rejowski (2008) se faz necessária quando os segmentos de tubulação apresentam redução em seu diâmetro. Além disso, essa configuração permite que mais de um segmento descarregue produtos da tubulação ao mesmo tempo. O produto contido em  $L_d$  pode ser enviado exclusivamente para o segmento  $d'$  ou pode ser dividido entre este depósito e o segmento  $d'+1$ . Se nenhum produto entra em  $d'$  no tempo  $k$ , então todos os blocos mantêm seu conteúdo. As principais premissas do modelo de otimização proposto por Pinto e Rejowski (2008) são as seguintes:

- (1) Todos os produtos têm densidades constantes;
- (2) As taxas de produção e as demandas são conhecidas durante o horizonte de tempo;
- (3) Todos os tanques são tratados como capacidades agregadas;
- (4) No máximo, um tanque na refinaria e em todos os depósitos é conectado à tubulação a qualquer momento;
- (5) Os segmentos de tubulação são sempre completamente cheios;
- (6) Tempos de preparação para a mudança de um tanque para outro na refinaria são negligenciados na formulação;
- (7) Cada segmento é dividido em  $L_d$  pacotes com capacidade volumétrica  $U_d$ .

Em linhas gerais, existem inúmeras particularidades em cada problema de *blending* encontrado na literatura, mas também inúmeras semelhanças. Nas soluções por otimização matemática, os modelos são em sua maioria lineares em termos da função objetivo e nas restrições de capacidade. Variadas maneiras de efetuar aproximações lineares para os casos em que comportamentos não lineares ocorrem são propostas (estes casos ocorrem com determinadas propriedades físico-químicas, conforme cada caso). Além disso, o fator tempo também é tratado distintamente nas diversas formulações.

### **3 Estudo de caso**

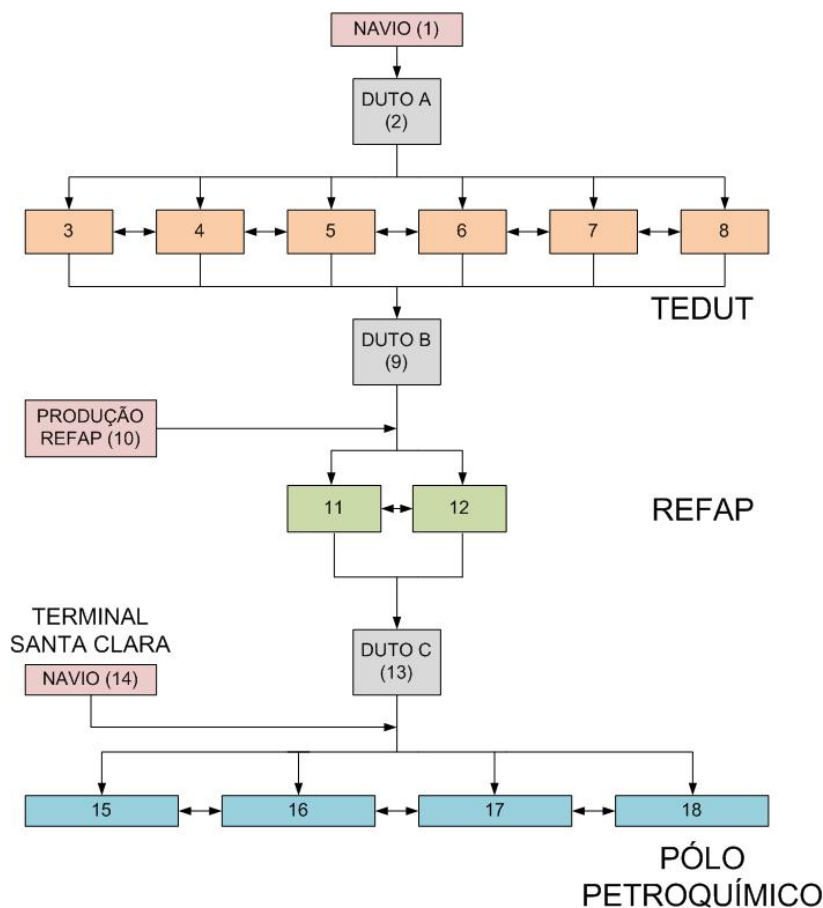
#### **3.1 Descrição da empresa**

Este trabalho foi desenvolvido a partir de uma demanda da Braskem SA, unidade do pólo petroquímico de Triunfo – RS, na unidade de petroquímicos básicos (UNIB), a primeira geração da indústria petroquímica. Em linhas, gerais, o processo petroquímico principal desenvolvido pela UNIB consiste em transformar a matéria-prima (basicamente nafta) em uma mistura de hidrocarbonetos compostos mais simples, através de craqueamento pirolítico, essencialmente. Para obtenção dos produtos finais do processo, a mistura de hidrocarbonetos resultante do fracionamento térmico, é separada e purificada para então ser processada pelas unidades de segunda geração da petroquímica.

#### **3.2 Fluxo logístico de matérias-primas**

A nafta que é consumida no pólo provém de duas fontes principais – produção da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP) de Canoas – RS e descargas no Terminal Almirante Dutra (TEDUT), terminal da Petrobras em Tramandaí – RS, oriundas de outras refinarias da Petrobras ou do exterior. Eventualmente – em períodos de mau tempo no litoral gaúcho, quando o TEDUT encontra-se fechado para manobras marítimas – ocorrem descargas pequenas no Terminal Santa Clara, em Triunfo – RS, a partir de navios que operam na Lagoa dos Patos.

O fluxo logístico da nafta – do navio descarregando no TEDUT até o tanque de consumo final nas plantas da UNIB é similar ao da Figura 3.1, que por questões de sigilo industrial apresenta número de tanques arbitrariamente modificado em todas as unidades (TEDUT, REFAP e UNIB). Volumes reais de tanques não serão especificados, uma vez que no modelo matemático que será posteriormente proposto basta alterar as restrições de inventário para representar qualquer volume arbitrário.



**Figura 3.1:** Fluxo logístico das matérias-primas

A numeração dos tanques foi arbitrada para facilitar a descrição e o detalhamento dos alinhamentos existentes e principalmente para a descrição do modelo matemático, que será feita posteriormente. A nafta descarregada pelo navio (1) através do Duto A, (tanque 2, considerado como um tanque de pequeno volume) segue para os tanques do TEDUT (3 a 8) que são interligados, podendo ocorrer transferência de inventário de um para outro. Operações de transferência entre estes tanques, no entanto, raramente são executadas por influenciar muito pouco na qualidade dos tanques finais do pólo e sendo assim, os alinhamentos entre os tanques foram simplificados na ilustração (existem alinhamentos entre todos os tanques e não só entre tanques vizinhos).

Todos os tanques do TEDUT estão alinhados também com o Duto B (9), que promove a ligação entre Tramandaí e Canoas. Este duto apresenta volume considerável e a nafta contida nele impacta significativamente na qualidade dos tanques posteriores, quando ocorrem envios a partir do TEDUT. Na REFAP a nafta é armazenada em dois grandes tanques (11 e 12), que também apresentam alinhamento entre si. A produção da refinaria é armazenada previamente em outros tanques (10), que são analisados quando cheios e, estando especificados, são enviados então para um dos tanques (11 ou 12). O Duto C (tanque 13, também de pequeno volume) faz a ligação da REFAP com os tanques 15 a 18 da UNIB. Estes tanques possuem alinhamento entre si e transferências entre tanques podem ocorrer eventualmente, em função da disponibilidade total de matéria-prima na região (Tramandaí, Canoas e Triunfo) e da qualidade da nafta disponível. No interior de todos os dutos de ligação entre as unidades a mistura entre as naftas é praticamente desprezível, podendo-se assumir simples deslocamento dos volumes de qualidades distintas, um após o outro.

O fluxo logístico da nafta foi apresentado pois pretende-se atuar diretamente no *blending* dos tanques, de modo a ampliar as possibilidades na busca de naftas que sejam capazes de produzir o que foi definido no plano de produção. Sendo assim, o trabalho visa não só analisar a alocação ótima da nafta contida nos tanques finais que alimentam as plantas bem como otimizar o *blending* nos tanques anteriores, de modo a garantir a melhor mistura que chega a estes tanques. Em outras palavras, pretende-se desenvolver um modelo capaz de avaliar diretamente a destinação da nafta contida nos tanques de processamento do pólo, mas que atue primeiramente no fluxo logístico da nafta e auxilie também o programador da equipe de Matérias-Primas a minimizar os desvios do plano produtivo. Nesse contexto, uma vez implementado o programa contendo o modelo na empresa, a análise dos tanques finais passa a ser necessária apenas quando ocorrerem desvios na capacidade produtiva da planta não detectados durante a programação do *blending*.

### 3.3 Metodologia Atual de Determinação do *Blending*

A qualidade média das matérias-primas consumidas na UNIB (basicamente nafta) é definida a partir de análise integrada junto a todas as unidades similares (primeira geração petroquímica) da empresa nos demais pólos petroquímicos do Brasil. Consideram-se todas as naftas disponíveis (produção do período pelas refinarias e importações) e a partir do plano produtivo integrado, define-se a distribuição dos lotes em cada *site*. O plano produtivo integrado, por sua vez, é definido a partir das demandas comerciais e das restrições produtivas do período, visando sempre maximizar o lucro global da empresa. Para a obtenção do plano produtivo integrado utiliza-se um *software* de otimização e os resultados são apresentados em base mensal. A análise integrada é feita mensalmente e projeta os próximos quatro meses a partir daquele em que é feita.

A equipe de Matérias-Primas – responsável pela compra e programação de recebimentos de nafta nas plantas de processamento – faz o *blending* das cotas de nafta recebidas de forma diária, de modo a minimizar os desvios em relação à qualidade média mensal definida no plano produtivo (o processo é similar ao da Figura 3.2). Este ajuste é feito com o auxílio de planilha em Excel, que indica a qualidade da nafta que alimentará a unidade produtiva a partir das manobras de transferência definidas pelo programador ao longo da cadeia logística da nafta.

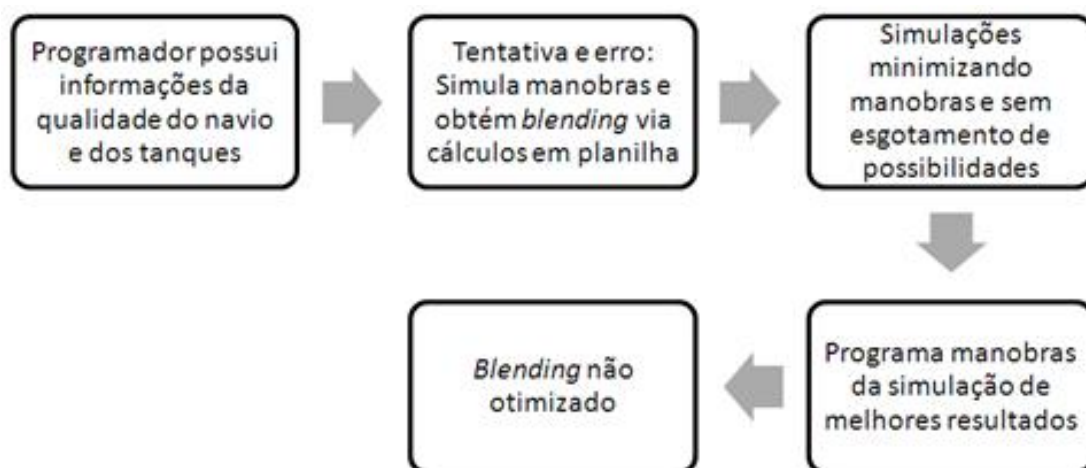


Figura 3.2: Metodologia atual do *blending* de nafta

Atualmente o processo é de tentativa e erro, sem otimização no *blending* – o programador faz simulações de transferências de cotas de nafta e obtém o resultado do *blending* destas manobras via cálculos automatizados na planilha. Nestas simulações, é necessário indicar todo inventário contido nos tanques bem como as propriedades das naftas para que os cálculos possam ser processados corretamente. De maneira geral, são feitas variadas simulações até que o cálculo de *blending* indique naftas nos tanques de processamento da UNIB com características próximas às solicitadas para atender ao plano de produção.

Desvios de qualidade em relação à nafta necessária para atender perfeitamente o plano produtivo ocorrem com frequência por uma série de fatores, em especial por alterações no *scheduling* de entregas de nafta importadas, que sofre alterações devido a oscilações de mercado – antecipação ou postergação na entrega de lotes – ou por restrições logísticas – atraso nas atracações e desatracações dos navios, além é claro de possíveis desvios na execução do *blending* programado. Quando ocorrem desvios, a equipe de Planejamento e Otimização da Produção (PCP) é consultada para decisão da melhor estratégia de alocação das matérias-primas disponíveis nas plantas de processamento. No entanto, atualmente a equipe de PCP baseia-se na experiência de seus analistas para a tomada de decisão, pois não há uma ferramenta que indique em tempo hábil a melhor decisão a ser tomada financeiramente – processar um determinado lote de nafta em uma ou em outra planta. Para tanto, seria necessário avaliar o rendimento em produtos dado pelo lote de matéria-prima em avaliação – a partir de um modelo que foi desenvolvido pela engenharia de processos da empresa – em uma e outra planta, e então comparar financeiramente os ganhos obtidos em cada uma delas. Não existe, no entanto, interface prática para tomada de decisão na forma desejada a partir deste modelo de rendimentos.

Sendo a decisão baseada apenas na experiência pessoal dos analistas de PCP, em geral são considerados apenas os principais produtos da cadeia petroquímica na avaliação de qual planta deve processar determinada cota de nafta. Esta simplificação, necessária para se obter resposta rapidamente, acaba prejudicando o resultado, que além de não ser otimizado pode até ser inadequado, uma vez que cada planta apresenta particularidades e alguns produtos exclusivos. Estes produtos, uma vez excluídos da avaliação econômica, podem resultar em uma operação não otimizada – conforme a qualidade da nafta processada em uma planta, possivelmente não se consiga produzir toda demanda de um de seus produtos exclusivos, resultando em cortes no atendimento de mercado, por exemplo. Neste contexto surge a demanda de PCP: obter uma ferramenta prática que auxilie numa melhor avaliação financeira, especialmente para períodos curtos e de perfil produtivo particular – alguma restrição de curta duração na capacidade produtiva que acaba diluída na análise mensal, por exemplo, e que tenha uma base técnica consolidada, que é o modelo de rendimentos.

### 3.3.1 Modelo de Rendimentos

Como dito anteriormente, o plano produtivo da unidade considera demandas comerciais e capacidades industriais de um determinado período para definir as produções ótimas e os atendimentos de mercado preferenciais. Considera também as matérias-primas disponíveis no período e a partir da qualidade destas, busca maximizar o lucro obtido pela produção total da unidade. Para indicar quais naftas devem ser consumidas preferencialmente e desta maneira obter o plano ótimo – priorizando uma produção maior de um determinado produto em detrimento de outro, o *software* de

otimização utiliza o modelo de rendimentos desenvolvido pela empresa, que indica a produção percentual de cada corrente a partir de uma série de especificações do processo no período avaliado.

Por questões de sigilo industrial, o modelo não é descrito em detalhes neste trabalho. As especificações que devem ser alimentadas no modelo referem-se às condições de operação dos fornos de pirólise (temperatura, pressão, etc.) – que são os principais responsáveis pela conversão da nafta em produtos finais – e à qualidade da matéria-prima (densidade, concentração de determinados componentes, etc.) alimentada nestes fornos. Cada equação do modelo é aplicada para um determinado grupo de fornos, e podem ser exibidas (por questões de sigilo) no seguinte formato:

$$P_i = f(C_{i,0}, R_{i,j}) \quad (3)$$

O rendimento percentual é representado na Equação 3 por  $P_i$ , onde  $i$  refere-se ao índice de cada produto.  $C_{i,0}$  indica uma constante de rendimento e  $R_{i,j}$  o valor da especificação, sendo  $j$  referente ao número de especificações.

O modelo está incorporado no *software* de otimização utilizado pela equipe de PCP e é possível conhecer a qualidade ótima da matéria-prima necessária para atender ao plano produtivo ao fixar-se nas equações o rendimento e as demais especificações (que não se referem à nafta). No entanto, para análises em períodos de tempo menores como, por exemplo, uma análise semanal ou até mesmo diária, quando por questões de estocagem uma troca nos tanques que alimentam as plantas é necessária, atualmente é inviável para a equipe de PCP alimentar o *software* com todos os valores necessários para a obtenção da qualidade da nafta requerida, por limitações de tempo e indisponibilidade de pessoas para execução da tarefa. Outro limitante é o fato de este *software* fazer uma série de análises conjuntas – existe uma série de restrições que precisa ser também atualizada para a condição real (que é diferente daquela assumida ao elaborar-se o plano produtivo original) para que o programa possa ser executado.

## 4 Metodologia

### 4.1 Desenvolvimento do modelo de *blending*

Neste capítulo será apresentado o modelo matemático desenvolvido – hipóteses, equações e restrições consideradas na representação do fluxo logístico de nafta.

As variáveis a serem determinadas são as frações mássicas transferidas entre tanques, a densidade da matéria-prima contida nos tanques ao final das transferências e a fração mássica de um componente específico, intitulado, por questões de sigilo industrial, componente X, nestes tanques. As variáveis foram definidas em conjunto com a equipe de PCP, que entende serem as mais importantes para a otimização do *blending*.

#### 4.1.1 Hipóteses consideradas

No desenvolvimento do modelo foi considerada uma série de hipóteses para tornar viável a modelagem em Excel. A primeira delas trata de definir o modelo como estático no que se refere à variável temporal.

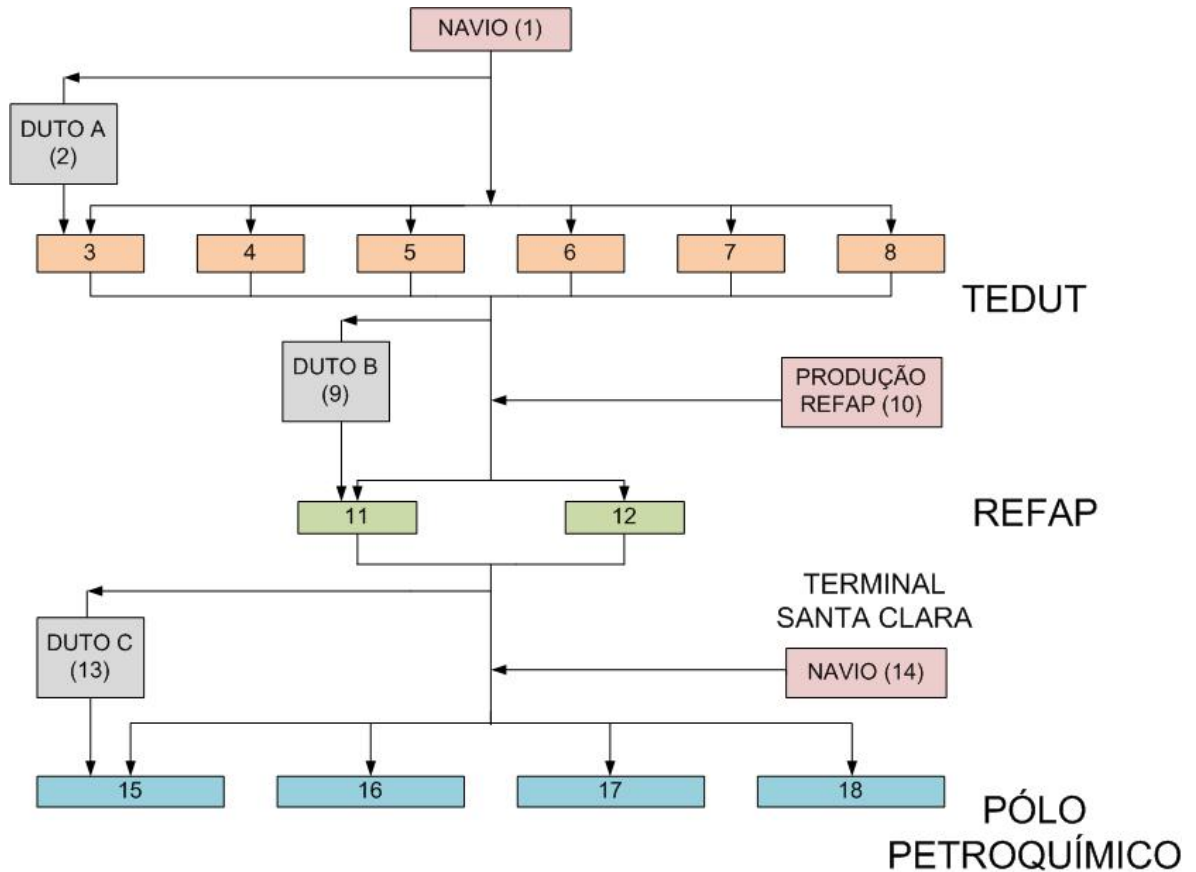
Esta simplificação foi adotada por entender-se que como as operações não são tão freqüentes (recebimentos de nafta), não é necessário considerar vazões e intervalos de tempo para a finalização das transferências que compõem o *blending*. A princípio o modelo será utilizado para operações futuras com início a partir de um momento em que o programador da equipe de Matérias-Primas, sabendo quais transferências devem ser realizadas, conseguir fazer a programação de um inventário que não será mais alterado desde o momento da simulação até o início das manobras. Além disso, o modelo pode ser facilmente modificado de modo a representar todas as manobras que acontecerão no período, simplesmente adicionando-se novas entradas no balanço de massa, o que será possível visualizar mais adiante.

Outra hipótese assumida foi a de que transferências ocorrem somente a partir do nível anterior na cadeia de fornecimento. Considerando-se cada *site* (TEDUT, REFAP e UNIB) como um nível no fluxo logístico da Figura 3.1, assumiu-se que as transferências ocorrem somente a partir dos tanques do nível anterior, ou seja, um determinado tanque não pode receber ou enviar nafta dos tanques similares a ele, somente pode receber de tanques do *site* anterior e enviar aos tanques do *site* posterior. Um tanque da REFAP só recebe do TEDUT (e do Duto A) e só envia para a UNIB, por exemplo. Desprezou-se, portanto, as conexões existentes entre os tanques do mesmo *site*, simplificação necessária para possibilitar o equacionamento proposto e motivada pelo fato de que estas manobras não ocorrem com freqüência.

Assumiu-se também a hipótese de que a seqüência de manobras fisicamente inicia do navio (1) e termina nos tanques finais (15 a 18) do pólo petroquímico. O modelo adota uma lógica de cálculos no *blending* de tal maneira que, uma vez concluída a simulação, as transferências indicadas ocorram fisicamente sempre a partir do nível mais alto onde houverem volumes a serem transferidos. Para o *blending* proposto efetivamente acontecer, esta lógica hierárquica deve ser respeitada pelo programador de Matérias-Primas, não podendo um tanque enviar seu inventário inicial antes de receber a cota programada, caso exista. O navio envia uma cota para o tanque 3 e esta cota é misturada com o inventário inicial deste, antes de ocorrer transferência do tanque 3 para o Duto B, por exemplo.

#### 4.1.2 Equacionamento do blending

A seguir serão descritas as equações que constituem o modelo de *blending*, para todos os níveis do fluxo logístico. A Figura 4.1 representa como fica o fluxo logístico com as equações propostas.



**Figura 4.1:** Fluxo logístico proposto no modelo

Para todos os níveis são propostas equações que definem o balanço de massa, a densidade e a fração mássica de um componente genérico X na mistura.

De maneira geral, os balanços de massa dos dutos e tanques são divididos em duas etapas. Inicialmente o tanque recebe dos tanques do nível anterior, o balanço fica no seguinte formato:

$$M_{i,int} = M_{i,0} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \in I}}^N f_{j,i} * M_{j,int} \quad (4)$$

Na Equação 4  $M_{i,0}$  representa o inventário inicial contido – i refere-se ao número do tanque ou duto e int indica que é o valor intermediário. O termo  $f_{j,i}$  define a fração enviada do tanque j ao tanque i – a letra i sempre refere-se ao tanque do balanço de massa e a letra j aos tanques que enviam e recebem deste, sendo I o conjunto de tanques que podem enviar ao tanque i. Os termos  $M_{j,int}$  e  $M_{i,int}$  representam as massas que foram recebidas no tanque somadas a seus inventários iniciais, ou seja, representam o inventário intermediário máximo contido no tanque que vem a ser misturado e posteriormente enviado adiante.



A etapa seguinte consiste no envio de cotas para o nível seguinte, depois de misturado o inventário intermediário. O balanço fica então na forma:

$$M_{i,f} = M_{i,int} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \in K}}^N f_{i,j} * M_{i,int} \quad (5)$$

Na Equação 5  $M_{i,f}$  é a massa final (após todas as transferências). O termo  $f_{i,j}$  define a fração enviada do tanque  $i$  ao tanque  $j$  sendo  $K$  o conjunto de tanques que podem receber do tanque  $i$ . Em outras palavras, a massa final contida em um determinado tanque ou duto é resultado da soma de seu inventário inicial com a cota recebida de outro tanque, descontando-se o que é posteriormente enviado a outro tanque de nível inferior no fluxo logístico.

O cálculo da densidade  $D$  da mistura (ou massa específica), por sua vez, considera a razão entre a massa total contida ao final das manobras e o volume respectivo ocupado. Pode ser escrito na forma:

$$D_{i,f} = \frac{M_{i,int}}{\frac{M_{i,0}}{D_{i,0}} + \sum_{j \in I}^N f_{j,i} * M_{j,int} / D_{j,f}} \quad (6)$$

Na Equação 6  $D_{i,0}$  representa a densidade do inventário inicial,  $D_{j,f}$  a densidade da cota recebida e  $D_{i,f}$  a densidade final do tanque, após o recebimento de possíveis cotas de matéria-prima. De maneira resumida, o cálculo considera as densidades da nafta contida inicialmente e do produto possivelmente recebido para obter a densidade final do tanque, através de ponderação no balanço de massa. A etapa de descarregamento para os tanques seguintes não altera a densidade da mistura.

Já o cálculo de mistura da fração mássica  $C$  do componente  $X$  é obtido simplesmente ponderando o balanço de massa do tanque pelas frações mássicas do componente em cada uma das cotas envolvidas, resultando em:

$$C_{i,f} = \frac{M_{i,0} * C_{i,0} + \sum_{j \in I}^N f_{j,i} * M_{j,int} * C_{j,f}}{M_{i,int}} \quad (7)$$

Na Equação 7,  $C_{i,0}$  representa a fração mássica de  $X$  na massa contida inicialmente no tanque,  $C_{j,f}$  a fração mássica de  $X$  nas cotas recebidas e  $C_{i,f}$  a fração mássica final de  $X$ .

Como nos dutos não ocorre mistura, não existe cálculo para as alterações de densidade e fração mássica do componente  $X$  – ocorre apenas transferência seqüencial das cotas com diferentes qualidades. O detalhamento das equações de cada nível – equações, hipóteses e restrições específicas – será explicitado a seguir.

#### 4.1.2.1 Transferências de navios para o TEDUT

O equacionamento para o navio (1) que opera no TEDUT é simples, pois seu inventário é sempre totalmente enviado e não ocorrem misturas. A particularidade refere-se ao Duto A (2), que por apresentar volume reduzido, só envia para o tanque 3 no modelo matemático. Sendo assim, o balanço de massa para o navio (1) fica na forma:

$$M_{1,f} = M_{1,0} - \sum_{j=2}^8 f_{1,j} * M_{1,0} \quad (8)$$

Esta transferência apresenta as seguintes restrições adicionais:

$$M_{1,f} = 0 \quad (9)$$

$$\sum_{j=2}^8 f_{1,j} = 1 \quad (10)$$

Na Equação 9, a massa final  $M_{1,f}$  é igual a zero e na Equação 10 o somatório de frações enviadas  $f_{1,j}$  é igual a 1 pois esta operação sempre consiste em descarga total da nafta contida no navio.

Para o Duto A (2), o balanço de massa simplificado é dado por:

$$M_{2,f} = M_{2,0} \quad (11)$$

Isto ocorre devido a questões operacionais, pois os dutos devem permanecer sempre cheios e portanto o recebimento de nafta do navio 1 é igual ao envio para o tanque 3. Como não ocorre mistura no duto, a qualidade da nafta contida nele ao final da transferência é dada por:

$$D_{2,f} = D_{1,0} \quad (12)$$

$$C_{2,f} = C_{1,0} \quad (13)$$

O duto simplesmente fica com nafta de qualidade similar a do navio, como descrito pelas Equações 12 e 13.

As condições iniciais do sistema até aqui são:

$$M_{i,0} = m_i, \quad i = 1,2 \quad (14)$$

$$D_{i,0} = d_i, \quad i = 1,2 \quad (15)$$

$$C_{i,0} = c_i, \quad i = 1,2 \quad (16)$$

A massa inicial (Equação 14), a densidade inicial (Equação 15) e a fração mássica inicial de X (Equação 16) do navio (1) e do Duto A (2) devem ser informadas. Como restrição, ainda temos:

$$f_{1,2} * M_{1,0} \geq M_{2,0} \quad (17)$$

Pela Equação 17, garante-se que haverá deslocamento da nafta contida inicialmente no duto, o que sempre acontecerá quando houver descarga de navio e que precisa ser representado no modelo para que este represente ao máximo a realidade.

#### 4.1.2.2 Transferências do TEDUT para a REFAP

O balanço de massa para os tanques 4 a 8 é similar e da seguinte forma:

$$M_{i,f} = M_{i,0} + f_{1,i} * M_{1,0} - \sum_{j=11}^{12} f_{i,j} * M_{i,int}, \quad i = 4,5,6,7,8 \quad (18)$$

$$M_{i,int} = M_{i,0} + f_{1,i} * M_{1,0}, \quad i = 4,5,6,7,8 \quad (19)$$

A densidade final destes tanques é dada por:

$$D_{i,f} = \frac{M_{i,int}}{\frac{M_{i,0}}{D_{i,0}} + f_{1,i} * M_{1,0}/D_{1,0}}, \quad i = 4,5,6,7,8 \quad (20)$$

E a fração mássica final de X contida é igual a:

$$C_{i,f} = \frac{M_{i,0} * C_{i,0} + f_{1,i} * M_{1,0} * C_{1,0}}{M_{i,int}}, \quad i = 4,5,6,7,8 \quad (21)$$

O tanque 3 tem a inclusão dos termos referentes ao Duto A (2) em suas equações – a nafta contida em (2) é sempre e somente enviada ao tanque 3:

$$M_{3,f} = M_{3,0} + \sum_{i=1}^2 f_{i,3} * M_{i,0} - \sum_{j=11}^{12} f_{3,j} * M_{3,int} \quad (22)$$

$$M_{3,int} = M_{3,0} + \sum_{i=1}^2 f_{i,3} * M_{i,0} \quad (23)$$

$$D_{3,f} = \frac{M_{3,int}}{\frac{M_{3,0}}{D_{3,0}} + f_{1,3} * M_{1,0}/D_{1,0} + f_{2,3} * M_{2,0}/D_{2,0}} \quad (24)$$

$$C_{3,f} = \frac{M_{3,0} * C_{3,0} + f_{1,3} * M_{1,0} * C_{1,0}}{M_{3,int}} \quad (25)$$

Os demais tanques recebem somente o produto contido no navio e assim como o tanque 3, enviam para os tanques 11 e 12, na REFAP. Na prática, a primeira transferência a ser programada pela equipe de matérias-primas será alinhada com o tanque 3, de modo a deslocar a nafta contida no Duto A (2).

Para o Duto B (9), o balanço de massa simplificado é dado por:

$$M_{9,f} = M_{9,0} \quad (26)$$

Novamente, por questões operacionais, os dutos devem permanecer sempre cheios e portanto o recebimento total de nafta a partir do TEDUT (tanques 3 a 8) é igual ao envio para o tanque 11. Como não ocorre mistura no duto, a qualidade da nafta contida nele ao final da transferência é dada por:

$$D_{9,f} = D_{i,f} \quad (27)$$

$$C_{9,f} = C_{i,f} \quad (28)$$

Onde  $i$  refere-se ao tanque que transferir para (9). Na prática, as Equações 27 e 28 não compõem o modelo, pois não há como indicar qual tanque será o último a enviar produto para o duto. O programador é capaz de calcular o valor das propriedades com base no resultado das programações reais e então indicar os valores iniciais destas, na próxima simulação.

As condições iniciais destes tanques são:

$$M_{i,0} = m_i, \quad i = 3,4, \dots, 9 \quad (29)$$

$$D_{i,0} = d_i, \quad i = 3,4, \dots, 9 \quad (30)$$

$$C_{i,0} = c_i, \quad i = 3,4, \dots, 9 \quad (31)$$

Onde  $m_i$ ,  $d_i$ ,  $c_i$  são especificados. A seguinte restrição deve ser atendida:

$$m_{i,min} \leq M_{i,int} \leq m_{i,max}, \quad i = 3,4, \dots, 9 \quad (32)$$

A condição expressada pela Equação 32 é fundamental, pois o blending só faz sentido fisicamente se o inventário admitido em um tanque não exceder sua capacidade máxima de estocagem.

#### 4.1.2.3 Transferências da REFAP para a UNIB

No modelo foram considerados apenas dois grandes tanques na REFAP, de modo que as equações são específicas para cada um deles, uma vez que somente o tanque 11 recebe o produto contido no Duto 9. Para ambos os tanques, considera-se também o recebimento da produção própria da REFAP (10).

Para o tanque 11, o equacionamento é o seguinte:

$$M_{11,f} = M_{11,0} + \sum_{i=3}^{10} f_{i,11} * M_{i,int} - f_{11,13} * M_{11,int} - \sum_{j=15}^{18} f_{11,j} * M_{11,int} \quad (33)$$

$$M_{11,int} = M_{11,0} + \sum_{i=3}^{10} f_{i,11} * M_{i,int} \quad (34)$$

$$D_{11,f} = \frac{M_{11,int}}{\frac{M_{11,0}}{D_{11,0}} + \sum_{i=3}^{10} f_{i,11} * M_{i,int} / D_{i,f}} \quad (35)$$

$$C_{11,f} = \frac{M_{11,0} * C_{11,0} + \sum_{i=3}^{10} f_{i,11} * M_{i,int} * C_{i,f}}{M_{11,int}} \quad (36)$$

Como a produção da REFAP (10) é uma entrada lateral do fluxo logístico e considera-se todo lote transferido, temos:

$$M_{10,int} = M_{10,0} \quad (37)$$

$$M_{10,f} = 0 \quad (38)$$

Já o Tanque 12 tem equacionamento na forma:

$$M_{12,f} = M_{12,0} + \sum_{i=3}^8 f_{i,12} * M_{i,int} + f_{10,12} * M_{10,int} - f_{12,13} * M_{12,int} - \sum_{j=15}^{18} f_{12,j} * M_{12,int} \quad (39)$$

$$M_{12,int} = M_{12,0} + \sum_{i=3}^8 f_{i,12} * M_{i,int} + f_{10,12} * M_{10,int} \quad (40)$$

$$D_{12,f} = \frac{M_{12,int}}{\frac{M_{12,0}}{D_{12,0}} + \frac{\sum_{i=3}^8 f_{i,12} * M_{i,int}}{D_{i,f}} + f_{10,12} * M_{10,int} / D_{10,f}} \quad (41)$$

$$C_{12,f} = \frac{M_{12,0} * C_{12,0} + \sum_{i=3}^8 f_{i,12} * M_{i,int} * C_{i,f} + f_{10,12} * M_{10,int} * C_{10,f}}{M_{12,int}} \quad (42)$$

Para o Duto C (13), o balanço de massa simplificado é dado por:

$$M_{13,f} = M_{13,0} \quad (43)$$

Como não ocorre mistura no duto, a qualidade da nafta contida nele ao final da transferência será semelhante à final do último tanque que transferir para (13).

As condições iniciais destes tanques são:

$$M_{i,0} = m_i, \quad i = 10,11,12 \quad (44)$$

$$D_{i,0} = d_i, \quad i = 10,11,12 \quad (45)$$

$$C_{i,0} = c_i, \quad i = 10,11,12 \quad (46)$$

A restrição de capacidade do sistema é:

$$m_{i,min} \leq M_{i,int} \leq m_{i,max} , \quad i = 11,12 \quad (47)$$

#### 4.1.2.4 Tanques de processamento da UNIB

Os tanques de processamento do pólo (15 a 18) além de receberem a nafta da REFAP podem receber descargas de navio (14). Além disso, compõe a extremidade do fluxo logístico e no modelo apenas recebem nafta – o consumo pelas plantas não é considerado. O tanque 15 apresenta equacionamento distinto dos demais, pois recebe transferências do Duto C (13). Seu equacionamento é o seguinte:

$$M_{15,f} = M_{15,0} + \sum_{i=11}^{14} f_{i,15} * M_{i,int} \quad (48)$$

$$D_{15,f} = \frac{M_{15,f}}{\frac{M_{15,0}}{D_{15,0}} + \frac{\sum_{i=11}^{14} f_{i,15} * M_{i,int}}{D_{i,f}}} \quad (49)$$

$$C_{15,f} = \frac{M_{15,0} * C_{15,0} + \sum_{i=11}^{14} f_{i,15} * M_{i,int} * C_{i,f}}{M_{15,f}} \quad (50)$$

Os demais tanques não recebem do Duto C (13) e têm equacionamento na forma:

$$M_{i,f} = M_{i,0} + f_{11,i} * M_{11,int} + f_{12,i} * M_{12,int} + f_{14,i} * M_{14,0}, \quad i = 16,17,18 \quad (51)$$

$$D_{i,f} = \frac{M_{i,f}}{\frac{M_{i,0}}{D_{i,0}} + \frac{f_{11,i} * M_{11,int}}{D_{i,f}} + \frac{f_{12,i} * M_{12,int}}{D_{i,f}} + \frac{f_{14,i} * M_{14,int}}{D_{i,f}}}, \quad i = 16,17,18 \quad (52)$$

$$C_{i,f} = \frac{M_{i,0} * C_{i,0} + f_{11,i} * M_{11,int} * C_{i,f} + f_{12,i} * M_{12,int} * C_{i,f} + f_{14,i} * M_{14,int} * C_{i,f}}{M_{i,f}} \quad (53)$$

$$i = 16,17,18$$

As condições iniciais do sistema são:

$$M_{i,0} = m_i, \quad i = 14,15, \dots, 18 \quad (54)$$

$$D_{i,0} = d_i, \quad i = 14,15, \dots, 18 \quad (55)$$

$$C_{i,0} = c_i, \quad i = 14,15, \dots, 18 \quad (56)$$

A restrição a ser atendida é:

$$m_{i,min} \leq M_{i,int} \leq m_{i,max}, \quad i = 15,16,17,18 \quad (57)$$

Por se tratar dos tanques que alimentam as plantas de primeira geração, em geral o programador deve definir o estoque mínimo como sendo próximo ao máximo – de modo que o inventário final nestes tanques seja elevado, visando assim minimizar a troca de tanques e o número de manobras e análises de controle de qualidade em laboratório da nafta que será processada.

## 4.2 Desenvolvimento da ferramenta em Excel

Para atender plenamente à demanda das áreas da empresa envolvidas no trabalho, PCP e Matérias-Primas, o modelo matemático desenvolvido foi implementado em Microsoft Excel, *software* acessível e de uso freqüente na empresa. Para resolver o problema de otimização integrando os dois modelos, foi utilizado o suplemento *Solver* do Excel. Apesar de ser limitado para determinadas aplicações, este *software* atendeu às necessidades deste trabalho. Além de o Excel ser utilizado na empresa, as equações do modelo de rendimentos já estão disponíveis em planilhas, o que facilitou muito sua utilização e integração ao modelo de *blending*.

#### 4.2.1 Implementação do modelo de blending

A inserção das equações e termos no *software* foi simples, uma vez que o formato de planilha permite uma flexibilidade grande. As informações que foram dispostas em células são as equações (cada uma em uma célula), bem como as condições iniciais e restrições do modelo, além das frações mássicas transferidas. Estruturou-se a planilha da seguinte forma: cada coluna refere-se a informações comuns a uma determinada propriedade ou cálculo, sendo cada linha referente a um tanque e seus respectivos cálculos.

Na Figura 4.2 é apresentada a estrutura da planilha, no que se refere ao balanço de massa global.

|    | B      | H         | I     | J     | K               | L       | S                                 | T    | U    | V    | W    | X    | Y    | Z    | AA   | AB   | AC   | AD   | AE   | AF   | AG   |   |
|----|--------|-----------|-------|-------|-----------------|---------|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|
| 56 |        |           |       |       |                 |         | fração transferida para o tanque: |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |
| 57 | TANQUE | M inicial | M min | M max | M intermediário | M final | 2                                 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 11   | 12   | 13   | 15   | 16   | 17   | 18   |   |
| 58 | 1      | 35        | 0     | 0     | 35              | 0       | 0,11                              | 0,60 | 0,06 | 0,09 | 0,09 | 0,03 | 0,03 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 59 | 2      | 4         | 4     | 4     | 8               | 4       | -                                 | 0,50 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 60 | 3      | 30        | 1     | 65    | 55              | 1       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,09 | 0,86 | 0,03 | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 61 | 4      | 1         | 1     | 65    | 3               | 2       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,18 | 0,02 | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 62 | 5      | 30        | 1     | 65    | 33              | 33      | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,00 | 0,01 | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 63 | 6      | 1         | 1     | 65    | 4               | 3       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,25 | 0,02 | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 64 | 7      | 1         | 1     | 65    | 2               | 1       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,00 | 0,48 | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 65 | 8      | 1         | 1     | 65    | 2               | 1       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,04 | 0,48 | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 66 | 9      | 5         | 5     | 5     | 10              | 5       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,50 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 67 | 10     | 0         | 0     | 0     | 0               | 0       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,00 | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 68 | 11     | 1         | 1     | 120   | 55              | 1       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,08 | 0,44 | 0,00 | 0,47 | 0,00 | - |
| 69 | 12     | 1         | 1     | 120   | 5               | 1       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,68 | 0,00 | - |
| 70 | 13     | 5         | 5     | 5     | 10              | 5       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,50 | -    | -    | -    | - |
| 71 | 14     | 0         | 0     | 0     | 0               | 0       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,00 | - |
| 72 | 15     | 1         | 30    | 70    | 30              | 30      | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 73 | 16     | 1         | 1     | 70    | 1               | 1       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 74 | 17     | 1         | 30    | 70    | 30              | 30      | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |
| 75 | 18     | 1         | 1     | 70    | 1               | 1       | -                                 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |

**Figura 4.2:** Estrutura do balanço de massa do modelo de blending em Excel

As células na cor azul identificam os tanques aos quais se referem às informações das demais células apresentadas. Na coluna H (células na cor verde) são inseridos os inventários iniciais dos tanques – tarefa executada pelo programador na montagem da simulação. As colunas I e J (células na cor vermelha) apresentam as restrições de inventário – mínimos e máximos físicos dos tanques, que devem respeitados na simulação – estes valores em geral não são alterados pelo programador, a não ser que se considere alguma condição muito particular – reduzir lastro de tanques por indisponibilidade de nafta, por exemplo. As colunas K e L (células na cor cinza) apresentam os cálculos de inventário intermediário e final, respectivamente. Já o intervalo S58:AG75 da planilha (na cor laranja) dispõe as frações transferidas (que são as variáveis de decisão do problema) – é através da manipulação destas variáveis pelo *Solver* que se obtém o blending otimizado, por isso a colocação de uma fração isolada por célula.

A Figura 4.3 apresenta a estrutura dos cálculos de qualidade – densidade D e fração mássica (percentual) C do fluxo logístico da nafta. Seguindo a mesma estrutura do balanço de massa, nas colunas M e P (células na cor verde) são informadas pelo programador as qualidades dos inventários iniciais dos tanques, enquanto nas colunas N, O, Q e R estão inseridos os cálculos de mistura do modelo.

|    | B      | M                                 | N               | O       | P         | Q               | R       | S    | T    | U    | V    | W    | X    | Y    | Z    | AA   | AB   | AC   | AD   | AE   | AF   | AG   |   |   |
|----|--------|-----------------------------------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---|---|
| 56 |        | fração transferida para o tanque: |                 |         |           |                 |         |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |   |   |
| 57 | TANQUE | D inicial                         | D intermediário | D final | C inicial | C intermediário | C final | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 11   | 12   | 13   | 15   | 16   | 17   | 18   |   |   |
| 58 | 1      | 0,70                              | 0,70            | 0,70    | 32,00     | 32,00           | 32,00   | 0,11 | 0,60 | 0,06 | 0,09 | 0,09 | 0,03 | 0,03 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |   |
| 59 | 2      | 0,70                              | 0,70            | 0,70    | 26,00     | 26,00           | 32,00   | -    | 0,50 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |   |
| 60 | 3      | 0,70                              | 0,70            | 0,70    | 30,00     | 30,00           | 30,47   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,09 | 0,86 | 0,03 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |   |
| 61 | 4      | 0,70                              | 0,70            | 0,70    | 29,00     | 31,00           | 31,00   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,18 | 0,02 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |   |
| 62 | 5      | 0,30                              | 0,32            | 0,32    | 20,00     | 21,13           | 21,13   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,00 | 0,01 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |   |
| 63 | 6      | 0,70                              | 0,70            | 0,70    | 31,00     | 31,75           | 31,75   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,25 | 0,02 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |   |
| 64 | 7      | 0,69                              | 0,69            | 0,69    | 33,00     | 32,52           | 32,52   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,00 | 0,48 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |   |
| 65 | 8      | 0,69                              | 0,70            | 0,70    | 31,00     | 31,53           | 31,53   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,04 | 0,48 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |   |
| 66 | 9      | 0,69                              | 0,69            | 0,70    | 30,00     | 30,00           | 30,23   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,50 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |   |
| 67 | 10     | 0,69                              | 0,69            | 0,69    | 31,50     | 31,50           | 31,50   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,00 | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - |   |
| 68 | 11     | 0,68                              | 0,70            | 0,70    | 30,00     | 30,45           | 30,45   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,08 | 0,44 | 0,00 | 0,47 | 0,00 | -    | - |   |
| 69 | 12     | 0,70                              | 0,63            | 0,63    | 32,00     | 30,57           | 30,57   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,12 | 0,00 | 0,00 | 0,68 | 0,00 | -    | - |   |
| 70 | 13     | 0,69                              | 0,69            | 0,69    | 30,00     | 30,00           | 30,23   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,50 | -    | -    | -    | -    | - | - |
| 71 | 14     | 0,70                              | 0,70            | 0,70    | 32,00     | 32,00           | 32,00   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | 0,00 | 0,00 | 0,50 | 0,00 | - | - |
| 72 | 15     | 0,71                              | 0,70            | 0,70    | 30,00     | 30,36           | 30,36   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - | - |
| 73 | 16     | 0,69                              | 0,69            | 0,69    | 29,00     | 29,00           | 29,00   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - | - |
| 74 | 17     | 0,69                              | 0,69            | 0,69    | 29,60     | 30,43           | 30,43   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - | - |
| 75 | 18     | 0,70                              | 0,70            | 0,70    | 30,00     | 30,00           | 30,00   | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | -    | - | - |

Figura 4.3: Estrutura dos cálculos de qualidade do modelo de blending em Excel

No que se refere ao modelo de *blending*, a planilha inclui também o cálculo das massas transferidas (obtidas pela multiplicação dos inventários intermediários com as frações transferidas), conforme mostra a Figura 4.4, nas colunas AI até AW.

|    | B      | K   | L       | M         | N               | O       | P         | Q               | R       | AI  | AJ   | AK  | AL  | AM  | AN  | AO   | AP   | AQ   | AR | AS  | AT   | AU  | AV   | AW  |     |
|----|--------|---|---------|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|-----|------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|----|-----|------|-----|------|-----|-----|
| 56 |        | transferência mássica para o tanque:            |         |           |                 |         |           |                 |         |     |      |     |     |     |     |      |      |      |    |     |      |     |      |     |     |
| 57 | TANQUE | M intermediário                                 | M final | D inicial | D intermediário | D final | C inicial | C intermediário | C final | 2   | 3    | 4   | 5   | 6   | 7   | 8    | 9    | 11   | 12 | 13  | 15   | 16  | 17   | 18  |     |
| 58 | 1      | 35  | 0       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 32,00     | 32,00           | 32,00   | 4,0 | 20,8 | 2,0 | 3,1 | 3,0 | 0,9 | 1,1  | -    | -    | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 59 | 2      | 8   | 4       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 26,00     | 26,00           | 32,00   | -   | 4,0  | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 60 | 3      | 55  | 1       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 30,00     | 30,47           | 30,47   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | 5,0  | 47,4 | 1,5  | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 61 | 4      | 3   | 2       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 29,00     | 31,00           | 31,00   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | 0,0  | 0,5  | 0,0  | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 62 | 5      | 33  | 33      | 0,30      | 0,32            | 0,32    | 20,00     | 21,13           | 21,13   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | 0,0  | 0,0  | 0,4  | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 63 | 6      | 4   | 3       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 31,00     | 31,75           | 31,75   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | 0,0  | 1,0  | 0,1  | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 64 | 7      | 2   | 1       | 0,69      | 0,69            | 0,69    | 33,00     | 32,52           | 32,52   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | 0,0  | 0,0  | 0,9  | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 65 | 8      | 2   | 1       | 0,69      | 0,70            | 0,70    | 31,00     | 31,53           | 31,53   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | 0,0  | 0,1  | 1,0  | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 66 | 9      | 10  | 5       | 0,69      | 0,69            | 0,70    | 30,00     | 30,00           | 30,23   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | -    | -    | 5,0  | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 67 | 10     | 0   | 0       | 0,69      | 0,69            | 0,69    | 31,50     | 31,50           | 31,50   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | -    | 0,0  | 0,0  | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 68 | 11     | 55  | 1       | 0,68      | 0,70            | 0,70    | 30,00     | 30,45           | 30,45   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -  | 4,4 | 24,0 | 0,0 | 25,6 | 0,0 |     |
| 69 | 12     | 5   | 1       | 0,70      | 0,63            | 0,63    | 32,00     | 30,57           | 30,57   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -  | 0,6 | 0,0  | 0,0 | 3,4  | 0,0 |     |
| 70 | 13     | 10  | 5       | 0,69      | 0,69            | 0,69    | 30,00     | 30,00           | 30,23   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -  | -   | 5,0  | -   | -    | -   | -   |
| 71 | 14     | 0   | 0       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 32,00     | 32,00           | 32,00   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -  | -   | -    | 0,0 | 0,0  | 0,0 | 0,0 |
| 72 | 15     | 30  | 30      | 0,71      | 0,70            | 0,70    | 30,00     | 30,36           | 30,36   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 73 | 16     | 1   | 1       | 0,69      | 0,69            | 0,69    | 29,00     | 29,00           | 29,00   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 74 | 17     | 30  | 30      | 0,69      | 0,69            | 0,69    | 29,60     | 30,43           | 30,43   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 75 | 18     | 1   | 1       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 30,00     | 30,00           | 30,00   | -   | -    | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -  | -   | -    | -   | -    | -   | -   |
| 76 |        | transferência de inventário inicial obrigatória |         |           |                 |         |           |                 |         |     |      |     |     |     |     | 4,00 | 5,00 | 5,00 |    |     |      |     |      |     |     |

Figura 4.4: Cálculos das massas transferidas do modelo de blending em Excel

Esta estrutura foi criada visando facilitar a montagem das equações e para a inserção de restrições de transferência mínima de inventário no *solver*, que serão abordadas posteriormente. Tanto na tabela das frações quanto das massas recebidas, a descarga de navios no TEDUT (1), a produção da REFAP (10) e o recebimento via Terminal Santa Clara (14) não são considerados, pois fisicamente eles não recebem nafta, apenas enviam para os tanques.

#### 4.2.2 Modelo de Rendimentos no Excel

O modelo de rendimentos percentuais em produtos, desenvolvido pela empresa, já estava estruturado no *software*, e sua descrição será feita a seguir. Para possibilitar a utilização do Solver adequadamente, integraram-se as estruturas dos dois modelos em uma única planilha.

A Figura 4.5 mostra a estrutura e a disposição das informações referentes ao modelo de rendimentos na planilha.



| D                  | E         | F    | G    | H    | I    | J    | K    | L    | M    | N                | O    | P     | Q     | R    | S     | T     | U     | V     | W    | X            | Y    | Z    | AB   | AC    | AD   | AE    | AF    | AG    | AH    | AI    | AJ   | AK   | AL   | AM   |
|--------------------|-----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|------|--------------|------|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| Setpoint           |           |      |      |      |      |      |      |      |      | Valor Referência |      |       |       |      |       |       |       |       |      | Normalização |      |      |      |       |      |       |       |       |       |       |      |      |      |      |
|                    | P1        | P2   | P3   | P4   | P5   | P6   | P7   | P8   | P9   | P10              |      | P1    | P2    | P3   | P4    | P5    | P6    | P7    | P8   | P9           |      | P1   | P2   | P3    | P4   | P5    | P6    | P7    | P8    | P9    |      |      |      |      |
| GE1                | 505,0     | 0,31 | 26,0 | 5,0  | 90,0 | 2,0  | 2,0  | 6,0  | 95,0 | 92,0             | GE1  | 500,0 | 0,3   | 27,0 | 3,0   | 100,0 | 3,0   | 1,0   | 8,0  | 6,0          | GE1  | 0,01 | 0,24 | -0,04 | 0,67 | -0,10 | -0,33 | 1,00  | -0,25 | 14,83 |      |      |      |      |
| GE2                | 505,0     | 0,31 | 26,0 | 5,0  | 90,0 | 90,0 | 95,0 | 6,0  | 95,0 | 92,0             | GE2  | 500,0 | 0,3   | 27,0 | 3,0   | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 8,0  | 6,0          | GE2  | 0,01 | 0,24 | -0,04 | 0,67 | -0,10 | -0,10 | -0,05 | -0,25 | 14,83 |      |      |      |      |
| GE3                | 505,0     | 0,31 | 26,0 | 5,0  | 12,0 | 90,0 | 95,0 | 6,0  | 95,0 | 92,0             | GE3  | 500,0 | 0,3   | 27,0 | 3,0   | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 8,0  | 6,0          | GE3  | 0,01 | 0,24 | -0,04 | 0,67 | 0,20  | -0,10 | -0,05 | -0,25 | 14,83 |      |      |      |      |
| GE4                | 505,0     | 0,31 | 26,0 | 5,0  | 90,0 | 90,0 | 95,0 | 6,0  | 95,0 | 1,0              | GE4  | 500,0 | 0,3   | 27,0 | 3,0   | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 8,0  | 6,0          | GE4  | 0,01 | 0,24 | -0,04 | 0,67 | -0,10 | -0,10 | -0,05 | -0,25 | 14,83 |      |      |      |      |
| GE5                | 505,0     | 0,31 | 26,0 | 5,0  | 90,0 | 0,8  | 3,0  | 95,0 | 95,0 | 1,0              | GE5  | 500,0 | 0,3   | 27,0 | 3,0   | 100,0 | 0,8   | 3,5   | 6,0  | 6,0          | GE5  | 0,01 | 0,24 | -0,04 | 0,67 | -0,10 | -0,05 | -0,14 | 14,83 | 14,83 |      |      |      |      |
| GE6                | 505,0     | 0,31 | 26,0 | 5,0  | 90,0 | 0,8  | 3,0  | 95,0 | 95,0 | 1,0              | GE6  | 500,0 | 0,3   | 27,0 | 3,0   | 100,0 | 0,8   | 3,5   | 6,0  | 6,0          | GE6  | 0,01 | 0,24 | -0,04 | 0,67 | -0,10 | -0,05 | -0,14 | 14,83 | 14,83 |      |      |      |      |
| GE7                | 505,0     | 0,31 | 26,0 | 5,0  | 12,0 | 0,8  | 3,0  | 95,0 | 95,0 | 1,0              | GE7  | 500,0 | 0,3   | 27,0 | 3,0   | 10,0  | 0,8   | 3,5   | 6,0  | 6,0          | GE7  | 0,01 | 0,24 | -0,04 | 0,67 | 0,20  | -0,05 | -0,14 | 14,83 | 14,83 |      |      |      |      |
| GE8                | 505,0     | 0,31 | 26,0 | 5,0  | 90,0 | 0,8  | 3,0  | 95,0 | 95,0 | 1,0              | GE8  | 500,0 | 0,3   | 27,0 | 3,0   | 100,0 | 0,8   | 3,5   | 6,0  | 6,0          | GE8  | 0,01 | 0,24 | -0,04 | 0,67 | -0,10 | -0,05 | -0,14 | 14,83 | 14,83 |      |      |      |      |
| modelo rendimentos |           |      |      |      |      |      |      |      |      | PRODUÇÃO (t/h)   |      |       |       |      |       |       |       |       |      | x1           |      |      |      |       |      |       |       |       |       |       |      |      |      |      |
|                    | Carga (t) | x1   | x2   | x3   | x4   | x5   | x6   | x7   | x8   | x9               | x10  | x11   | x12   | x13  | x14   | x15   | x16   |       | CTE  | P1           | P2   | P3   | P4   | P5    | P6   | P7    | P8    | P9    |       |       |      |      |      |      |
| GE1                | 98        | 0,63 | 2,16 | 4,94 | 1,04 | 1,36 | 3,99 | 7,04 | 2,85 | 1,87             | 4,60 | 18,93 | 24,58 | 3,62 | 14,20 | 0,91  | 1,25  | GE1   | 0,01 | 0,04         | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| GE2                | 76        | 0,49 | 1,67 | 3,82 | 0,80 | 0,99 | 3,17 | 5,54 | 2,26 | 1,51             | 3,69 | 14,58 | 19,17 | 2,90 | 10,84 | 0,39  | 1,01  | GE2   | 0,01 | 0,04         | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| GE3                | 41        | 0,30 | 0,77 | 1,83 | 0,36 | 0,46 | 1,48 | 2,57 | 1,01 | 0,66             | 1,67 | 7,26  | 11,06 | 4,31 | 5,15  | 0,20  | 0,45  | GE3   | 0,01 | 0,04         | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| GE4                | 20        | 0,10 | 0,66 | 1,12 | 0,41 | 0,45 | 1,48 | 0,94 | 0,48 | 0,37             | 0,51 | 2,68  | 5,06  | 0,70 | 3,39  | 0,12  | 0,60  | GE4   | 0,01 | 0,05         | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| GE5                | 21        | 0,13 | 0,73 | 1,08 | 0,34 | 0,36 | 1,06 | 1,52 | 0,68 | 0,33             | 0,67 | 2,49  | 5,98  | 0,69 | 3,71  | 0,12  | 0,29  | GE5   | 0,01 | 0,04         | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| GE6                | 38,9      | 0,25 | 1,36 | 2,01 | 0,64 | 0,67 | 1,96 | 2,81 | 1,26 | 0,60             | 1,24 | 4,57  | 11,07 | 1,27 | 6,88  | 0,23  | 0,53  | GE6   | 0,01 | 0,04         | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| GE7                | 60        | 0,44 | 1,80 | 2,68 | 0,78 | 0,83 | 2,50 | 3,90 | 1,68 | 0,75             | 1,72 | 6,30  | 18,38 | 5,41 | 9,25  | 0,34  | 0,64  | GE7   | 0,01 | 0,04         | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| GE8                | 20        | 0,16 | 0,72 | 1,20 | 0,37 | 0,34 | 1,12 | 1,13 | 0,61 | 0,13             | 0,52 | 2,98  | 5,44  | 0,63 | 3,39  | 0,10  | 0,38  | GE8   | 0,01 | 0,04         | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00  | 0,00 | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00  | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |

Figura 4.5: Disposição das informações do modelo de rendimentos

O modelo de rendimentos está estruturado no Excel através de grupos de fornos (cada grupo contém um determinado número de fornos similares – cada linha da planilha traz as informações referentes a um grupo), de modo que os cálculos de rendimentos do grupo são reproduzidos para os fornos que compõe o grupo.

No intervalo G17:Z25 da planilha (células de cor laranja), estão as produções calculadas (multiplicação da carga dos fornos pelos rendimentos). Os termos que compõe a equação dos rendimentos são os valores das propriedades (células de cor verde), os valores de referência destas (células de cor azul), o fator de normalização (células em bege) e os coeficientes para cada produto (células em cinza) – na Figura 4.5 apenas é demonstrado o formato destes coeficientes, na planilha existe igual quantidade de valores para todos os demais produtos. Em relação à parte da planilha que se refere ao modelo de rendimentos, o único cálculo é o de rendimentos e os demais valores são constantes. Os valores que devem ser verificados pelo programador para cada nova simulação (condições iniciais) são os valores das propriedades e das cargas dos grupos de fornos (todos os números em células verdes). Por questões de sigilo industrial, alterou-se o número de grupos, produtos e propriedades do modelo bem como seus valores correspondentes.

#### 4.2.3 Configuração do Solver

Nesta sessão será detalhado o problema de otimização, configurado no suplemento Solver do Excel.

##### 4.2.3.1 Função Objetivo

O objetivo da ferramenta desenvolvida é auxiliar no atendimento ao plano produtivo definido pela empresa, que considera uma série de análises – que não serão detalhadas, mas que basicamente consistem na busca da maximização do lucro com atendimento pleno das demandas. Sendo assim, a função objetivo do problema de otimização é a minimização da diferença entre o que se deseja produzir e o que é produzido a partir dos cálculos do modelo de rendimentos. A função pode ser descrita por:

$$f = (P_d - P_c)^2 \tag{58}$$

Na Equação 58,  $P_d$  representa a produção definida no plano de produção e  $P_c$  a produção calculada via modelo de rendimentos. A diferença é quadrática para evitar valores negativos na solução. A estrutura do cálculo em Excel é exibida na Figura 4.6.

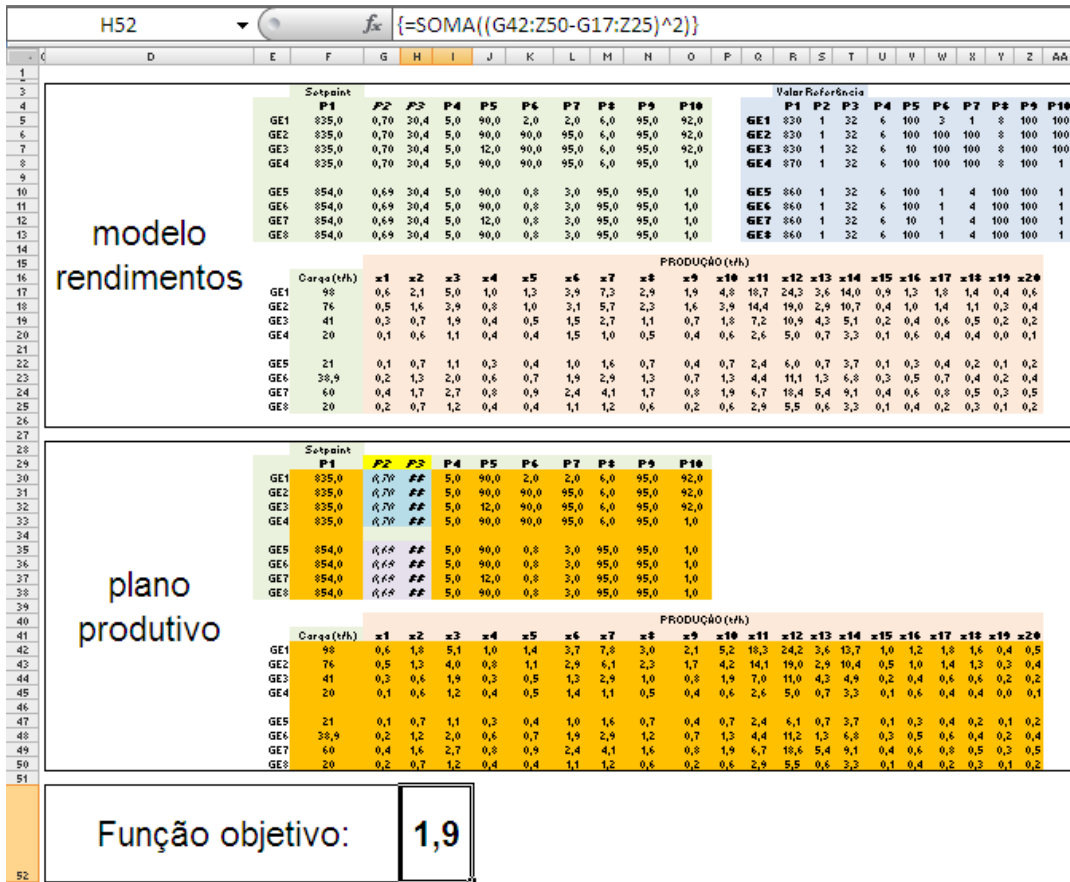


Figura 4.6: Estrutura do cálculo da função objetivo do Solver Excel

Para que a função objetivo pudesse ser construída no Excel, copiou-se a estrutura das equações para a inserção dos valores desejados de produções, de modo que é feito um cálculo matricial das diferenças entre o desejado (produções nas células de cor laranja) e o calculado pelo modelo de rendimentos (produções das células de cor salmão). Como se deseja realizar a otimização através da alteração da densidade e da fração mássica de X, as demais propriedades que compõe os cálculos de rendimentos do modelo são igualadas aos valores considerados no plano.

O objetivo é processar a nafta mais adequada possível nas plantas de modo a minimizar o desvio em relação ao plano produtivo. Sendo assim, deve-se atuar no blending, de modo a obter-se densidade e fração mássica de X ideais pela alteração nas frações transferidas entre os tanques. Portanto, os valores das propriedades de interesse no modelo de rendimentos são na realidade vinculadas aos valores das propriedades dos tanques finais do pólo, no modelo de blending.

#### 4.2.3.2 Restrições da otimização

Para que a simulação apresentasse resultados fisicamente factíveis, foi necessário inserir nas configurações do Solver as restrições do modelo matemático. As restrições adicionadas são de desigualdades e referem-se às transferências nos dutos – o inventário transferido pelos dutos deve ser igual ou maior a seu inventário inicial (para garantir que

seu inventário inicial seja fisicamente deslocado, o que sempre ocorre quando há transferência a partir do nível anterior) – e aos limites físicos dos tanques – inventários mínimos e máximos devem ser respeitados. Admitiram-se também somente valores positivos para as transferências, de modo a garantir que a hipótese de que os tanques somente recebem do nível anterior e enviem ao nível posterior seja respeitada e a solução faça sentido.

Na Figura 4.7 é possível ver a configuração do *Solver* – as células variáveis da planilha são as frações transferidas entre os tanques; as restrições de desigualdades são associadas às colunas em vermelho (que informam inventários mínimos e máximos dos tanques) e à linha 76 (células em verde na borda inferior da imagem), onde são calculadas as transferências mássicas nos dutos.

|    |        | transferência mássica para o tanque: |       |       |                 |         |                                     |      |     |     |      |     |     |      |      |     |    |    |    |    |    |   |
|----|--------|--------------------------------------|-------|-------|-----------------|---------|-------------------------------------|------|-----|-----|------|-----|-----|------|------|-----|----|----|----|----|----|---|
| 57 | TANQUE | M inicial                            | M min | M max | M intermediário | M final | 2                                   | 3    | 4   | 5   | 6    | 7   | 8   | 9    | 11   | 12  | 13 | 15 | 16 | 17 | 18 |   |
| 58 | 1      | 35                                   | 0     | 0     | 35              | 0       | 4,0                                 | 20,8 | 2,0 | 3,1 | 3,0  | 0,9 | 1,1 | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 59 | 2      | 4                                    | 4     | 4     | 8               | 4       | -                                   | 4,0  | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 60 | 3      | 30                                   | 1     | 65    | 55              | 1       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | 5,0  | 47,4 | 1,5 | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 61 | 4      | 1                                    | 1     | 65    | 3               | 2       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 62 | 5      | 30                                   | 1     | 65    | 33              | 33      | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 63 | 6      | 1                                    | 1     | 65    | 4               | 3       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 64 | 7      | 1                                    | 1     | 65    | 2               | 1       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 65 | 8      | 1                                    | 1     | 65    | 2               | 1       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 66 | 9      | 5                                    | 5     | 5     | 10              | 5       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 67 | 10     | 0                                    | 0     | 0     | 0               | 0       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 68 | 11     | 1                                    | 1     | 120   | 55              | 1       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 69 | 12     | 1                                    | 1     | 120   | 5               | 1       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 70 | 13     | 5                                    | 5     | 5     | 10              | 5       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 71 | 14     | 0                                    | 0     | 0     | 0               | 0       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 72 | 15     | 1                                    | 30    | 70    | 30              | 30      | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 73 | 16     | 1                                    | 1     | 70    | 1               | 1       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 74 | 17     | 1                                    | 30    | 70    | 30              | 30      | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 75 | 18     | 1                                    | 1     | 70    | 1               | 1       | -                                   | -    | -   | -   | -    | -   | -   | -    | -    | -   | -  | -  | -  | -  | -  | - |
| 76 |        |                                      |       |       |                 |         | transferência de inventário inicial | 4,00 |     |     | 5,00 |     |     | 5,00 |      |     |    |    |    |    |    |   |

Figura 4.7: Configuração da otimização no *Solver*

A interface da planilha permite ao programador alterar o tamanho da simulação simplesmente alterando as restrições – mínimos e máximos a serem respeitados nos tanques, por exemplo. A restrição de transferência mínima de inventários nos dutos só pode ser removida caso o nível anterior ao duto em questão for excluído da análise. Os tanques finais (15 a 18) são os de interesse na simulação, e de acordo com a disponibilidade de nafta e a simulação proposta, um ou mais tanques precisarão ser consumidos – portanto, o inventário mínimo definido pelo programador para estes tanques de maneira geral não representará o lastro do tanque e sim o inventário necessário para alimentar as plantas de processamento durante o período analisado.

Na integração entre os modelos, por se tratar de duas plantas de processamento, vinculou-se no modelo de rendimentos a qualidade dos grupos de fornos referentes à cada uma com um dos quatro tanques finais no modelo de *blending*, não utilizando os outros dois tanques. Esta igualdade pode ser alterada conforme a necessidade, é apenas um *default* da ferramenta. Em linhas gerais, pode-se dizer que a ferramenta é robusta e sua utilização requer treinamento do programador, para que alterações possam ser feitas de diversas formas sem prejudicar o funcionamento do otimizador – basicamente, programar simulações diversas respeitando as restrições necessárias para que os resultados façam sentido fisicamente.

## 5 Resultados

Uma vez que o objetivo deste trabalho era o desenvolvimento de uma ferramenta de otimização para auxiliar o processo de programação de produção e não a solução de um cenário específico, serão apresentados neste capítulo resultados que demonstram a validação da ferramenta desenvolvida.

Para exemplificar a validação da otimização integrada produzida em Excel com a realidade, é proposta a situação ilustrada na Figura 5.1, que apresenta condição inicial e resultado da otimização.

|    | B  | H         | I     | J     | K               | L       | M         | N               | O       | P         | Q               | R       |
|----|----|-----------|-------|-------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|-----------|-----------------|---------|
| 57 |    | M inicial | M min | M max | M intermediário | M final | D inicial | D intermediário | D final | C inicial | C intermediário | C final |
| 58 | 1  | 20        | 0     | 0     | 20              | 0       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 32,00     | 32,00           | 32,00   |
| 59 | 2  | 4         | 4     | 4     | 8               | 4       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 26,00     | 26,00           | 32,00   |
| 60 | 3  | 35        | 1     | 65    | 39              | 1       | 0,68      | 0,68            | 0,68    | 30,00     | 29,59           | 29,59   |
| 61 | 4  | 20        | 1     | 65    | 20              | 20      | 0,40      | 0,40            | 0,40    | 25,00     | 25,00           | 25,00   |
| 62 | 5  | 35        | 1     | 65    | 35              | 1       | 0,68      | 0,68            | 0,68    | 30,00     | 30,00           | 30,00   |
| 63 | 6  | 1         | 1     | 65    | 1               | 1       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 31,00     | 31,00           | 31,00   |
| 64 | 7  | 1         | 1     | 65    | 17              | 1       | 0,68      | 0,70            | 0,70    | 33,00     | 32,06           | 32,06   |
| 65 | 8  | 1         | 1     | 65    | 1               | 1       | 0,69      | 0,69            | 0,69    | 31,00     | 31,00           | 31,00   |
| 66 | 9  | 5         | 5     | 5     | 16              | 5       | 0,69      | 0,69            | 0,69    | 30,00     | 30,00           | 29,72   |
| 67 | 10 | 20        | 0     | 0     | 20              | 0       | 0,69      | 0,69            | 0,69    | 33,00     | 33,00           | 33,00   |
| 68 | 11 | 1         | 1     | 120   | 48              | 1       | 0,68      | 0,69            | 0,69    | 30,00     | 31,94           | 31,94   |
| 69 | 12 | 1         | 1     | 120   | 62              | 1       | 0,70      | 0,68            | 0,68    | 32,00     | 29,85           | 29,85   |
| 70 | 13 | 5         | 5     | 5     | 11              | 5       | 0,69      | 0,69            | 0,68    | 30,00     | 30,00           | 29,92   |
| 71 | 14 | 15        | 0     | 0     | 15              | 0       | 0,69      | 0,69            | 0,69    | 32,00     | 32,00           | 32,00   |
| 72 | 15 | 1         | 60    | 70    | 65              | 65      | 0,71      | 0,69            | 0,69    | 30,00     | 31,75           | 31,75   |
| 73 | 16 | 1         | 1     | 70    | 1               | 1       | 0,69      | 0,69            | 0,69    | 29,00     | 29,00           | 29,00   |
| 74 | 17 | 1         | 60    | 70    | 60              | 60      | 0,69      | 0,68            | 0,68    | 29,60     | 29,98           | 29,98   |
| 75 | 18 | 1         | 1     | 70    | 1               | 1       | 0,70      | 0,70            | 0,70    | 30,00     | 30,00           | 30,00   |

Figura 5.1: Resultado de simulação utilizando *solver*

As condições iniciais da simulação podem ser observadas na coluna H (inventários iniciais) e nas colunas M e P (densidade e fração mássica do componente X, respectivamente). Buscou-se disponibilizar um inventario próximo ao mínimo requerido pelo sistema (conforme coluna I), com a particularidade de um dos tanques apresentar qualidade muito abaixo da típica para naftas (tanque 4).

|    | B  | H         | K               | L       | AI                      | AJ  | AK  | AL  | AM  | AN   | AO  | AP   | AQ   | AR   | AS  | AT   | AU  | AV   | AW  |
|----|----|-----------|-----------------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|------|------|-----|------|-----|------|-----|
| 56 |    |           |                 |         | transferência mássica t |     |     |     |     |      |     |      |      |      |     |      |     |      |     |
| 57 |    | M inicial | M intermediário | M final | 2                       | 3   | 4   | 5   | 6   | 7    | 8   | 9    | 11   | 12   | 13  | 15   | 16  | 17   | 18  |
| 58 | 1  | 20        | 20              | 0       | 4,0                     | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 16,0 | 0,0 | -    | -    | -    | -   | -    | -   | -    | -   |
| 59 | 2  | 4         | 8               | 4       | -                       | 4,0 | -   | -   | -   | -    | -   | -    | -    | -    | -   | -    | -   | -    | -   |
| 60 | 3  | 35        | 39              | 1       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | 10,9 | 0,0  | 27,1 | -   | -    | -   | -    | -   |
| 61 | 4  | 20        | 20              | 20      | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | 0,0  | 0,0  | 0,0  | -   | -    | -   | -    | -   |
| 62 | 5  | 35        | 35              | 1       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | 0,0  | 0,0  | 34,0 | -   | -    | -   | -    | -   |
| 63 | 6  | 1         | 1               | 1       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | 0,0  | 0,0  | 0,0  | -   | -    | -   | -    | -   |
| 64 | 7  | 1         | 17              | 1       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | 0,0  | 16,0 | 0,0  | -   | -    | -   | -    | -   |
| 65 | 8  | 1         | 1               | 1       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | 0,0  | 0,0  | 0,0  | -   | -    | -   | -    | -   |
| 66 | 9  | 5         | 16              | 5       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | -    | 10,9 | -    | -   | -    | -   | -    | -   |
| 67 | 10 | 20        | 20              | 0       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | -    | 20,0 | 0,0  | -   | -    | -   | -    | -   |
| 68 | 11 | 1         | 48              | 1       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | -    | -    | -    | 0,0 | 46,9 | 0,0 | 0,0  | 0,0 |
| 69 | 12 | 1         | 62              | 1       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | -    | -    | -    | 5,8 | 0,0  | 0,0 | 55,3 | 0,0 |
| 70 | 13 | 5         | 11              | 5       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | -    | -    | -    | -   | 5,8  | -   | -    | -   |
| 71 | 14 | 15        | 15              | 0       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | -    | -    | -    | -   | 11,3 | 0,0 | 3,7  | 0,0 |
| 72 | 15 | 1         | 65              | 65      | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | -    | -    | -    | -   | -    | -   | -    | -   |
| 73 | 16 | 1         | 1               | 1       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | -    | -    | -    | -   | -    | -   | -    | -   |
| 74 | 17 | 1         | 60              | 60      | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | -    | -    | -    | -   | -    | -   | -    | -   |
| 75 | 18 | 1         | 1               | 1       | -                       | -   | -   | -   | -   | -    | -   | -    | -    | -    | -   | -    | -   | -    | -   |

Figura 5.2: Resultado de simulação utilizando *solver* – frações transferidas

A idéia desta simulação era observar o que aconteceria com este tanque de qualidade atípica, além é claro de avaliar o atendimento das restrições. Os resultados são apresentados também na Figura 5.2. Pela coluna K da planilha é possível observar que os inventários intermediários não excederam a restrição de máximo inventário físico nos tanques, assim como os inventários finais (coluna L), que também não ficaram abaixo dos mínimos exigidos. Observa-se também que houve transferência dos inventários iniciais dos dutos (tanques 2, 9 e 13) e que os navios e a produção da REFAP (tanques 1, 10 e 14) tiveram seus inventários totalmente transferidos. Estas condições são essenciais para que a simulação seja factível e foram atendidas.

Qualitativamente, observa-se na Figura 5.2 que o tanque 4 (de qualidade muito inferior) não foi utilizado no *blending*, seu inventário permaneceu inalterado conforme pode ser observado comparando as células H61 e L61 e não houve recebimento (célula AL58) ou envio (intervalo AP61:AR61). Este comportamento já era esperado, uma vez que fisicamente os valores de qualidade informados neste tanque são muito diferentes do valor típico para a nafta.

Na prática, os tanques apresentam qualidades mais parecidas e os inventários em geral são maiores, de modo que a solução pode ser mais otimizada. A simulação apresentada serve, portanto, para evidenciar a razoabilidade física da solução encontrada. Convém ressaltar também que todo inventário vai, em algum momento, ser processado. Sendo assim, cabe ao programador ter sensibilidade no momento de definir o cenário da simulação, ou seja, que inventário considerar nos tanques e qual o horizonte de tempo que será considerado na análise – tanques que estejam cheios, por exemplo, podem ser ignorados na simulação, mas deverão ser incluídos em algum momento nas simulações futuras.

A principal restrição na utilização da ferramenta está relacionada com as características do otimizador *Solver* do Excel. É possível colocar restrições de valor mínimo para transferências entre os tanques, só que nesse caso a transferência “zero” não seria possível, restrição não desejada. Para resolver isto, só com programação mista inteira (MILP). Portanto, não é possível restringir o tamanho das transferências, dentro dos limites físicos de inventário. Sendo assim, a solução pode indicar transferências muito pequenas, o que na prática é inviável, pois é pouco prático alinhar um tanque para receber poucas toneladas e em seguida trocar o alinhamento, por exemplo. Havendo casos em que isso ocorra, a sensibilidade do programador em ajustar o tamanho das transferências programadas é que vai ditar o tamanho do desvio em relação à solução proposta.

O modelo matemático de *blending* resulta em um problema não linear, em decorrência dos cálculos de mistura (densidade e fração mássica). O *solver*, no entanto, não apresentou restrição ao equacionamento proposto e funcionou adequadamente, sem restrições quanto à não linearidade dos cálculos. A limitação do cálculo da qualidade final nos dutos pode ser eliminada por uma lógica de planilha Excel e não afeta o resultado, uma vez que esta informação só é útil na simulação seguinte e está sujeita à validação pelas transferências que efetivamente ocorreram.

## 6 Conclusões e Trabalhos Futuros

A ferramenta desenvolvida mostrou-se capaz de realizar uma integração eficiente e útil entre as necessidades das equipes de PCP e Matérias-Primas, e os ganhos com a sua utilização são evidentes, pois a ação integrada entre as equipes visando atingir o plano produtivo, através da utilização da ferramenta, produz resultados muito melhores do que pela metodologia atual de trabalho, que não é integrada. O suplemento *Solver* do Excel atendeu às necessidades do problema e a restrição de não limitar o tamanho das transferências não prejudicaria significativamente o resultado prático, já que os inventários de nafta consumidos na empresa são elevados – pequenos ajustes não acarretam em desvios significativos no perfil produtivo.

São necessárias ainda novas simulações com a ferramenta, envolvendo diversos cenários, e também a validação com a metodologia de *blending* atual, para verificar aderência do modelo com a realidade. O *feedback* dos funcionários da empresa envolvidos com a ferramenta também será essencial na avaliação do resultado obtido com a integração dos modelos, assim como uma familiarização do programador com a ferramenta, de modo que o domínio da técnica seja absoluto e toda e qualquer simulação que respeite as restrições do modelo possa ser executada sem problemas.

Como sugestão de trabalho futuro a partir do que foi desenvolvido, a melhoria contínua da interface da planilha, com base no *feedback* dos usuários, é essencial. Ações na medida de aumentar a adequação da ferramenta – removendo-se a restrição das frações de qualquer tamanho pela adição de variáveis inteiras, por exemplo, também são válidas e prioritárias no intuito de aperfeiçoar a integração do fluxo de trabalho entre as equipes.

## 7 Referências

Méndez, C.A., et al., *A simultaneous optimization approach for off-line blending and scheduling of oil-refinery operations*. Science Direct – Computers and Chemical Engineering, 2006. 30: p. 614-634.

Pinto, J.M., Rejowski Jr., R., *A novel continuous time representation for the scheduling of pipeline systems with pumping yield rate constraints*. Science Direct – Computers and Chemical Engineering, 2008. 32: p. 1048-1066.

Ristic, J., et al., *Optimization of refinery products blending*. Bulletin of the Chemists and Technologists of Macedonia, 1999. 18(2): p. 171-178.