



IBP1570_07 INTERFACES EM OLEODUTOS: OTIMIZANDO O PONTO DE CORTE

Alexandre F. Tepedino¹, Renan M. Baptista²,
Felipe B. Freitas Rachid³, José H. Carneiro de Araujo⁴

Copyright 2007, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*, realizada no período de 2 a 4 de outubro de 2007, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Pipeline Conference & Exposition 2007*.

Resumo

Este trabalho apresenta uma metodologia para determinar o ponto ótimo de corte na transferência de bateladas por oleodutos. A metodologia visa assegurar que os produtos armazenados nos tanques de destino não sejam retirados de suas especificações técnicas e, quando admissível, maximizando o volume de produto com maior valor econômico. As especificações dos produtos podem ser caracterizadas tanto em termos de pureza quanto em função da concentração de elementos químicos que integram a composição dos produtos. A metodologia requer o emprego de sensores de interface monitorando uma propriedade física que possa ser convertida em concentração dos produtos na mistura. Simulações com dados reais de sensores ultra-som em batelada de diesel-gasolina ilustram a aplicação da técnica.

Abstract

This paper presents a methodology for determining the optimal cut point in pipeline batch transfers. The methodology aims to ensure the quality of products and, when possible, to maximize the product with higher economic value. The quality of the products is specified based on their purities as well as on the trace of chemical elements in their composition. The proposed methodology requires the use of interface sensors capable to monitor physical properties which can be converted into concentration of the products on the mixture. Simulations carried out with ultra-sonic interface detectors in a diesel-gasoline batch are presented to illustrate the technique.

1. Introdução

O transporte de bateladas faz parte da rotina na operação dutoviária. Diferentes produtos são bombeados seqüencialmente em uma mesma linha, com uma batelada empurrando a outra. Todos os polidutos e a maioria dos oleodutos transportam bateladas. O petróleo possui diferentes graus e qualidades. O Diesel possui diferentes teores de enxofre. Nos polidutos a situação é ainda mais complexa, podendo incluir em uma mesma linha produtos tão diversos como o álcool e o GLP. Assim, minimizar misturas e evitar contaminações é preocupação contínua de todo operador.

O contato entre duas bateladas ao longo do transporte implica no desenvolvimento de uma zona de mistura, que pode apresentar um volume importante e uma curva de concentrações complexa. Para segregar as duas bateladas no destino do oleoduto, o operador precisa determinar em que ponto da zona de mistura as válvulas de corte devem ser acionadas, direcionando cada batelada para seu respectivo local de armazenamento. De modo a garantir a qualidade dos produtos recebidos, é preciso limitar a contaminação dos produtos, observando o limite de suas especificações e também os contratos de transporte. Para garantir a economicidade do transporte, é preciso minimizar a geração de interface não-especificada (*transmix*), reduzindo os custos associados ao re-transporte, re-processamento e a perda de valor em função da degradação do produto mais nobre.

Este trabalho apresenta uma visão geral sobre o problema do corte de interfaces, e propõe uma metodologia para otimizar a determinação do ponto de corte. A técnica proposta requer apenas o monitoramento contínuo dos sinais de um detector de interface e de um medidor de vazão num ponto à montante do *manifold* de corte, assim como a especificação da qualidade dos produtos, dos volumes existentes nos tanques de destino e, em especial, da curva de

¹ Mestre, Engenheiro de Equipamentos – Petrobras Transporte S.A.

² Mestre, Engenheiro de Petróleo – PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

³ D.Sc., Prof. Associado – TEM/PGMEC/Lab. de Transporte de Líquidos & Gases – Universidade Federal Fluminense

⁴ D.Sc., Prof. Associado – TCC/PGMEC/Lab. de Transporte de Líquidos & Gases – Universidade Federal Fluminense

concentrações ao longo da zona de interface. Simulações conduzidas com sinais de velocidade sônica ilustram a aplicabilidade da técnica. Fundamentada em técnicas de natureza estatística, a metodologia identifica o ponto de corte e o volume de produto que pode ser alocado no tanque de destino, sem retirá-lo de suas especificações. Os critérios para determinar a distância entre um ponto remoto onde se monitora as propriedades da interface e as válvulas de corte são também propostos. Simulações conduzidas com sinais de velocidade sônica ilustram a aplicação da técnica.

2. Delimitação das Interfaces e Determinação do Volume de Mistura

A instalação de corte ilustrada na Figura 1 é uma representação esquemática simplificada da concepção de uma estação de recebimento de produtos com corte automatizado. Através do oleoduto, representado pela linha preta em negrito, são transportados diferentes produtos ou diferentes graus de um mesmo produto, no sentido indicado pela seta. Sejam A e B a designação de dois dos produtos (ou graus de um mesmo produto) deslocados, sendo o produto B o fluido deslocador e o produto A o deslocado. Quando deslocados seqüencialmente ao longo do duto, os produtos A e B dão margem à formação de uma zona de mistura $A+B$, a qual deve ser adequadamente direcionada para os tanques do produto A (cor azul) ou do produto B (cor amarela) ou, ainda, para o tanque de mistura $A+B$ (cor verde), de acordo com a natureza do corte a ser realizado. Além do duto principal (linha preta em negrito), da estação de bombeio, dos tanques para acondicionamento da mistura e dos produtos deslocados, a Figura 1 ilustra também as tubulações secundárias (linha vermelha em negrito) conectando o duto principal aos tanques, através do *manifold* de corte (delimitado pelo retângulo em linha tracejado azul claro) constituído por um pequeno trecho de tubulação com um conjunto de válvulas para direcionamento adequado do fluxo.

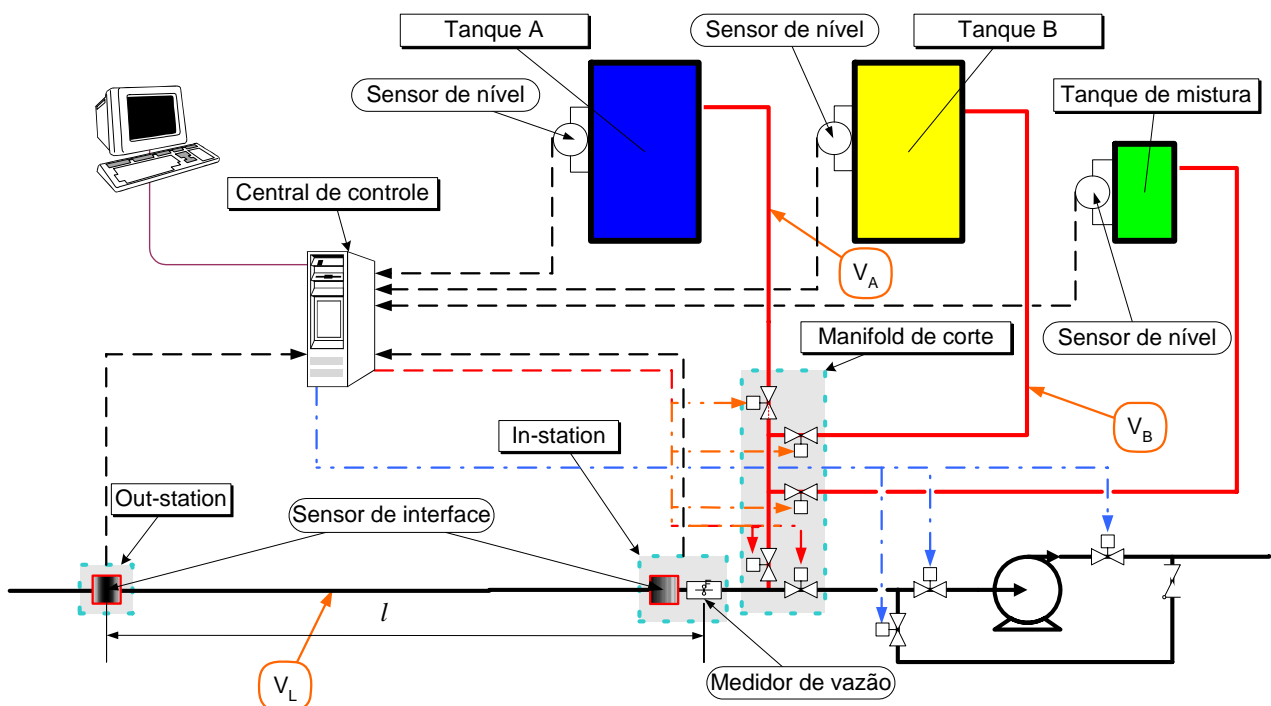


Figura 1. Representação esquemática de uma instalação de corte de um oleoduto.

A instrumentação empregada para realizar o corte é formada por um sensor de interface posicionado a uma distância l a montante da estação, cujo valor será caracterizado mais adiante. Além dos sensores de nível dos tanques, um medidor de vazão volumétrica e outro sensor de interface, ambos localizados à entrada do *manifold* de corte, completam a instrumentação requerida (os sensores de pressão e temperatura que corrigem e normalizam a vazão, densidade, velocidade sônica, e ainda outras variáveis, foram intencionalmente omitidos com o objetivo de manter simples o esquema). Aos sensores de interface compete a tarefa de identificação continuada da mudança de um produto para outro através da medida de uma propriedade a (como por exemplo, massa específica ou velocidade sônica), cuja posterior transformação em concentração (C_B ou C_A , nas quais C_i , com $i \in \{A, B\}$, representa a concentração do produto i na mistura) de um dos produtos na mistura seja possível. A vazão volumétrica Q é registrada pelo medidor de fluxo posicionado à entrada do *manifold* de corte. Esses sinais são amplificados, convertidos pelo analisador e

transmitidos via controladores lógicos programáveis (PLC – Programmable Logic Controller) para o sistema de controle supervisor e aquisição de dados (SCADA System – Supervisory Control and Data Acquisition System).

Sinais típicos da medida ao longo do tempo da propriedade a pelo sensor de interface, bem como da sua conversão em concentração do produto B na mistura C_B , são ilustrados na Figura 2 antes, durante e após a passagem da zona de mistura pela estação de medição à montante do manifold de corte. Os instantes de tempo t_o e t_l delimitam o início e o término da passagem zona de mistura pelo sensor de interface, sendo a_A e a_B as propriedades a dos produtos A e B com graus de pureza iguais a 100%, respectivamente.

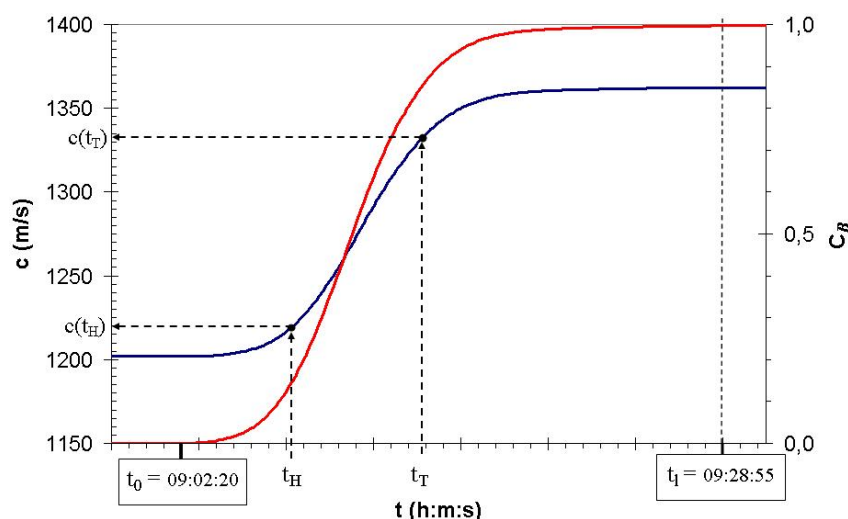


Figura 2. Valores típicos da propriedade a no sensor de interface (no caso a é a velocidade sônica c) e de sua conversão em termos da concentração do produto deslocador B para o medidor localizado na *out-station* (vide Figura 1)

Um conjunto de pontos discretos associando os valores $a(t_j)$ e $Q(t_j)$ ao instante de tempo t_j , com $j = 1, \dots, N$, sendo N o número total de pontos medidos, formam a base de dados disponibilizada ao centro de controle operacional. O sistema de aquisição é suposto coletar os dados no oleoduto em intervalos de tempo iguais Δt de tal forma que $\Delta t = t_{j+1} - t_j = \text{constante}$, para $j = 1, \dots, N-1$. Quando os dados são transmitidos de modo não uniforme, por exemplo: apenas quando a sua variação excede um limiar pré-determinado (estratégia comum nos sistemas SCADA), a seqüência temporal de dados deve ser normalizada e complementada, gerando uma seqüência equivalente de dados igualmente espaçados no tempo, permitindo aplicar a metodologia aqui proposta. Assim, da escala cronológica da base de dados, como caracterizada abaixo,

$$t_1, \dots, t_r, \dots, t_o, \dots, t_{H-1}, t_H, t_{H+1}, \dots, t_{T-1}, t_T, t_{T+1}, \dots, t_l, \dots, t_s, \dots, t_N,$$

destacam-se os seguintes instantes de tempo $t_o < t_l$, sendo t_o o último instante de tempo que antecede a passagem do início da zona de mistura (ou seja, para qualquer instante de tempo t_r tal que $t_l < t_r \leq t_o$, registra-se na base de dados apenas a presença do fluido deslocado A com teor de pureza igual a 100%) e t_l o primeiro instante de tempo que sucede a passagem do final da zona de mistura (ou seja, para qualquer instante de tempo t_s tal que $t_l \leq t_s < t_N$, registra-se na base de dados apenas a presença do fluido deslocador B com teor de pureza igual a 100%). Os instantes de tempo t_H e t_T assinalados na Figura 2 estão vinculados ao ponto de corte e serão oportunamente caracterizados mais adiante.

Com base nos valores $a(t_j)$, $j = 1, \dots, N$, determinam-se os instantes de tempo da base de dados t_o e t_l que delimitam as interfaces da mistura e, simultaneamente, estimam-se os valores de a_A e de a_B .

2.1. Delimitação das Interfaces

O procedimento descrito a seguir será restrito ao caso em que as medidas $a(t)$ dos fluidos deslocados verificam a desigualdade $a_A < a_B$. A extensão do procedimento para o caso contrário, $a_A > a_B$, é trivial e, portanto, não será aqui apresentada. Se as condições de pressão e temperatura permanecessem constantes no ponto do oleoduto em que se realizou a aquisição de dados e não houvesse perturbações no processo de medição, as medidas a_i , com

$i \in \{A, B\}$, seriam prontamente identificadas e, conseqüentemente, a determinação de t_o e de t_l seria imediata. Neste caso, t_o seria igual ao maior instante de tempo, t_j , $j = 1, \dots, N$, da base de dados para o qual $a(t_j) = a_A$, e t_l seria igual ao menor instante de tempo, t_j , $j = o + 1, \dots, N$, para o qual $a(t_j) = a_B$. Como essas condições não se verificam na prática, necessita-se de um procedimento sistemático, baseado em um critério matemático, que além de viabilizar a determinação dos limites da zona de mistura, possibilite estimar as propriedades físicas a_A e a_B dos fluidos puros, a partir da base de dados. Essas estimativas devem ser feitas através de uma média dos conjuntos $\{a(t_1), \dots, a(t_o)\}$ e $\{a(t_l), \dots, a(t_N)\}$, respectivamente.

Adotou-se, então, um método estatístico para determinar t_o e t_l e, simultaneamente, estimar a_A e a_B . Fixados dois instantes de tempo arbitrários da base de dados t_r e t_s , com $t_r \leq t_s$, sejam a_A e a_B as médias das amostras de propriedades físicas $\{a(t_1), \dots, a(t_r)\}$ e $\{a(t_s), \dots, a(t_N)\}$, respectivamente, ou seja,

$$a_A = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r a(t_j) \quad e \quad a_B = \frac{1}{N-s+1} \sum_{j=s}^N a(t_j) \quad (1.1)$$

Considerando-se que estes conjuntos representam amostras de uma população infinita, a média da população e seu intervalo de confiança podem ser aproximados por,

$$a_A \pm z_A \frac{S_A}{\sqrt{r}} \quad e \quad a_B \pm z_B \frac{S_B}{\sqrt{N-s+1}} \quad (1.2)$$

nas quais z_i , $i \in \{A, B\}$, é o parâmetro t de *Student* para um limite de confiança de 95%¹, e os termos S_A e S_B representam os desvios padrões das amostras:

$$S_A = \left[\frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (a(t_j) - a_A)^2 \right]^{1/2} \quad e \quad S_B = \left[\frac{1}{N-s} \sum_{j=s}^N (a(t_j) - a_B)^2 \right]^{1/2}$$

Uma proposição, baseada no contexto anterior, para identificar t_o e t_l é que eles sejam os instantes de tempo t_r e t_s da base de dados que atendam as seguintes propriedades:

- I. maximizem o número de elementos das seqüências (sem exclusão de nenhum de seus elementos intermediários) $\{a(t_1), \dots, a(t_r)\}$ e $\{a(t_s), \dots, a(t_N)\}$, e
- II. minimizem as respectivas amplitudes dos intervalos de confiança definidas em (1.2).

Uma abordagem possível para encontrar t_o e t_l satisfazendo as propriedades anteriores é o método iterativo apresentado a seguir, o qual admite como premissa básica que o sinal $a(t_j)$, com $j = 1, \dots, N$, satisfaz a seguinte condição:

$$a_A = a(t_j < t_o) < a(t_j) < a(t_j > t_l) = a_B, \quad \forall t_j \in [t_o, t_l] \quad (1.3)$$

A1. Calcula-se a propriedade física média, \bar{a}_0 , da base de dados,

$$\bar{a}_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a(t_j)$$

A2. Cálculo de t_o :

A2.1. Determina-se o maior instante de tempo, t_j , da base de dados que verifica $a(t_j) \leq \bar{a}_0$. Calcula-se a velocidade sônica média, \bar{a} , e o desvio padrão, S , da amostra $\{a(t_1), \dots, a(t_j)\}$. Define-se a aproximação inicial $r^{(0)}$ de r como $r^{(0)} = j$. Conseqüentemente, a aproximação inicial $a_A^{(0)}$ de a_A vale $a_A^{(0)} = \bar{a}$ e a aproximação inicial, $h_A^{(0)}$, da metade da amplitude do intervalo de confiança h_A vale $h_A^{(0)} = z_A S / \sqrt{j}$. Define-se $n = 0$.

A2.2. Enquanto $t_r^{(n)} > t_2$, faça:

A2.2.1. Determina-se o maior instante de tempo, t_j , $t_j \leq t_r^{(n)}$, da base de dados que verifica $a(t_j) \leq a_A^{(n)}$.

¹ Na realidade, z_i depende do número de elementos da amostra. Por exemplo, se o número de elementos é maior que 30 então $z_i = 2$.

A2.2.2. Se $t_j = t_r^{(n)}$, então $t_o = t_j$ e passa-se ao item 4. Caso contrário, calcula-se a propriedade física média, \bar{a} , e o desvio padrão, S , da amostra $\{a(t_1), \dots, a(t_j)\}$. Define-se $r^{(n+1)} = j$. Conseqüentemente, $a_A^{(n+1)} = \bar{a}$ e

$$h_A^{(n+1)} = z_A S / \sqrt{j}.$$

A2.2.3. Se $h_A^{(n+1)} > h_A^{(n)}$, então $t_o = t_r^{(n)}$ e passa-se ao item 4. Caso contrário retorna-se ao item 2.2, com $n = n + 1$.

A3. Não foi possível calcular t_o !

A4. Cálculo de t_i :

A4.1. Determina-se o menor instante de tempo, t_j , da base de dados que verifica $a(t_j) \geq \bar{a}_0$. Calcula-se a propriedade física média, \bar{a} , e o desvio padrão, S , da amostra $\{a(t_j), \dots, a(t_N)\}$. Define-se a aproximação inicial $s^{(0)}$ de s como $s^{(0)} = j$. Conseqüentemente, a aproximação inicial $a_B^{(0)}$ de a_B vale $a_B^{(0)} = \bar{a}$ e a aproximação inicial, $h_B^{(0)}$, da metade da amplitude do intervalo de confiança h_B vale $h_B^{(0)} = z_B S / \sqrt{N - j + 1}$. Define-se $n = 0$.

A4.2. Enquanto $t_s^{(n)} < t_{N-1}$, faça:

A4.2.1. Determina-se o menor instante de tempo, t_j , $t_j \geq t_s^{(n)}$ da base de dados que verifica $a(t_j) \geq a_B^{(n)}$.

A4.2.2. Se $t_j = t_s^{(n)}$, então $t_l = t_j$ e passa-se ao item 6. Caso contrário, calcula-se a velocidade sônica média \bar{a} e o desvio padrão, S , da amostra $\{a(t_j), \dots, a(t_N)\}$. Define-se $s^{(n+1)} = j$. Conseqüentemente, $a_B^{(n+1)} = \bar{a}$ e $h_B^{(n+1)} = z_B S / \sqrt{N - j + 1}$.

A4.2.3. Se $h_B^{(n+1)} > h_B^{(n)}$, então $t_l = t_s^{(n)}$ e passa-se ao item 6. Caso contrário retorna-se ao item 4.2, com $n = n + 1$.

A5. Não foi possível calcular t_l !

A6. Fim.

Este algoritmo estabelece os instantes de tempo t_o e t_l e as propriedades físicas dos fluidos deslocado a_A e deslocador a_B , para um teor de pureza igual a 100%. Se n_A representa o número de elementos da amostra definida pela seqüência $\{a(t_1), \dots, a(t_o)\}$, ($n_A = o$), então

$$a_A = \frac{1}{n_A} \sum_{j=1}^o a(t_j) \text{ e } S_A = \left[\frac{1}{n_A - 1} \sum_{j=1}^o (a(t_j) - a_A)^2 \right]^{1/2} \quad (1.4)$$

na qual S_A é o desvio padrão da amostra. Analogamente, se n_B representa o número de elementos da amostra definida pela seqüência $\{a(t_l), \dots, a(t_N)\}$, ($n_B = N - l + 1$), então

$$a_B = \frac{1}{n_B} \sum_{j=l}^N a(t_j) \text{ e } S_B = \left[\frac{1}{n_B - 1} \sum_{j=l}^N (a(t_j) - a_B)^2 \right]^{1/2} \quad (1.5)$$

na qual S_B é o desvio padrão da amostra.

2.2. Determinação do Volume de Mistura

Uma vez identificados os instantes de tempo t_o e t_l que delimitam a zona de mistura quando de sua passagem pela estação de medição à montante do *manifold* de corte, o volume de mistura pode ser computado a partir da integração da vazão (corrigida para temperatura e pressão arbitradas como padrão) durante o intervalo de tempo $[t_o, t_l]$. Considerando-se que a vazão na estação de medição pouco difere daquela $Q(t)$ medida nas proximidades do *manifold* de corte, então o volume de mistura V_m em condições padrão pode ser avaliado pela expressão:

$$V_m = \int_{t_o}^{t_l} Q(t) dt \quad (1.6)$$

A determinação do volume de mistura fornecida por (1.6) é fundamental para a adequada especificação da distância l que separa o sensor de interfaces da entrada do *manifold* de corte (vide Figura 1). Impõe-se como requisito operacional do corte que se verifique *a priori* (antes de efetivamente iniciar as operações de válvula no *manifold* de corte) se há disponibilidade de acondicionar parcela da mistura nos tanques dos produtos A e/ou B sem retirá-los de sua especificação, então o sistema deve ser capaz de estimar o volume de mistura antes que o início desta zona alcance o

manifold. Em outras palavras, é necessário que o final da zona de mistura tenha passado pelo sensor de interface antes que o seu início tenha alcançado o *manifold* de corte. Como através de um oleoduto são conduzidos diferentes pares de produtos B/A sob adversas condições operacionais (baixa e alta vazão, com poucas ou muitas paradas de bombeio) resultando, portanto, em valores bastante diferenciados de volumes de mistura, a especificação da distância l de uma determinada estação de corte deverá atender a seguinte restrição:

$$l > \frac{1}{A} \max \{V_m\} \quad (1.7)$$

na qual A é a área de seção reta do duto e $\max \{V_m\}$ representa o maior valor de volume de mistura de todas as transferências avaliadas na entrada daquela estação sob todas condições operacionais empregadas. É importante ressaltar que (1.7) admite como hipótese básica que não há aumento significativo do volume de mistura quando esta percorre a distância l no oleoduto; o que é uma condição bastante próxima da realidade. A desigualdade (1.7) sugere, também, a necessidade de se dispor ou de ferramentas que possibilitem estimar com bastante confiança os volumes de mistura sob diferentes condições operacionais (preferencialmente aquelas que incorporem em seu modelo a ocorrência do fenômeno de laminação (ou *batch-overlapping* como é conhecido na literatura técnica)), ou de um histórico de dados de campo de volumes de mistura medidos naquela estação.

3. Determinação da Curva de Concentração

Para identificar o(s) ponto(s) de corte de forma a assegurar as especificações técnicas dos produtos nos tanques não basta delimitar a zona de mistura e estimar o volume de mistura. É necessário também dispor da curva de concentração dos produtos na zona de mistura no interior do oleoduto. Para isso, é fundamental que a medida da propriedade física a realizada pelos sensores de interface possa ser transformada em concentração. Diferentes tipos de concentração (volumétrica, mássica, densimétrica, etc.) podem ser empregados. Neste trabalho, restringir-se-á a análise à concentração volumétrica, embora a extensão a outros tipos de concentração seja trivial.

Considerando uma mistura binária formada pelos produtos miscíveis A e B , cujos volumes valem, respectivamente, V_i com $i \in \{A, B\}$ e admitindo que o volume ocupado pela mistura vale $V = V_A + V_B$, então as concentrações volumétricas $C_i \in [0, 1]$, podem ser definidas como:

$$C_i = V_i/V, \text{ para } i \in \{A, B\}, \text{ com } C_A + C_B = 1 \quad (1.8)$$

Dependendo da propriedade física medida pelo sensor de interface pode-se converter a partir de relações teóricas o sinal $a(t_j)$ em termos da concentração $C_i \in [0, 1]$, conforme apresentado a seguir para os casos em que a é a massa específica ou a velocidade sônica.

3.1. Determinação da Curva de Concentração Através da Medição de Massa Específica

A aplicação de densímetros em identificação de interfaces é amplamente empregada quando os produtos apresentam densidades relativamente distintas. No caso específico de bateladas diesel-gasolina, a diferença entre as massas específicas é da ordem de 100 kg/m^3 , o que permite a identificação da zona de mistura com bastante confiança. As medidas de massa específica podem ser convertidas em medidas de concentração volumétrica dos produtos (por exemplo, a de produto B , C_B) com base na relação:

$$C_B = \frac{\rho - \rho_A}{\rho_B - \rho_A}, \text{ se } \rho_B \geq \rho \geq \rho_A \text{ ou } \rho_B \leq \rho \leq \rho_A \quad (1.9)$$

na qual ρ , ρ_A e ρ_B representam as massas específicas da mistura, do produto A e do produto B , sendo estas duas últimas propriedades determinadas pelo procedimento descrito na seção 2.

Nos casos em que os produtos possuem massas específicas ligeiramente diferentes, como diferentes tipos de gasolina (Premium e comum), os densímetros podem se tornar incapazes de discernir entre um e outro produto (Yarborough, 2001 e Zacharias, 1972). Nestes casos, outros tipos de sensores como, por exemplo, os de velocidade sônica podem ser utilizados.

3.2. Determinação da Curva de Concentração Através da Medição de Velocidade Sônica

A velocidade sônica é uma propriedade termodinâmica do meio associada à propagação de ondas mecânicas de pequena amplitude. Para fluidos, é comumente definida pela expressão:

$$c = \sqrt{K/\rho} \quad (1.10)$$

na qual ρ representa a massa específica do produto e K o seu módulo de bulk isentrópico.

A identificação de interfaces em bateladas de produtos A e B com medida de velocidade sônica permite o estabelecimento direto dessa propriedade com a concentração em volume de um dos produtos na mistura, por exemplo a do produto B C_B , mesmo quando suas massas específicas ρ_A e ρ_B são iguais. É possível mostra (Freitas Rachid, Carneiro Araújo e Baptista, 2002) que para $\rho_A/\rho_B = 1$, a concentração do produto B é dada por:

$$C_B = \frac{c_B^2(c_A^2 - c^2)}{c^2(c_A^2 - c_B^2)}, \quad \text{se} \quad c_B \leq c \leq c_A \quad \text{ou} \quad c_B \geq c \geq c_A \quad (1.11)$$

na qual c , c_A e c_B representam as velocidades sônicas da mistura, do produto A e do produto B , respectivamente. Para $\rho_A/\rho_B \neq 1$, a concentração do produto B é expressa de acordo com as condições abaixo (Freitas Rachid, Carneiro Araújo e Baptista, 2002);

$$C_B = \begin{cases} \frac{1}{2\alpha_I} \left(\alpha_I + \sqrt{\alpha_I^2 - 4\alpha_{II}\alpha_{III}} \right), & \text{se} \quad c_B \leq c \leq c_A \\ \frac{1}{2\alpha_I} \left(\alpha_I - \sqrt{\alpha_I^2 - 4\alpha_{II}\alpha_{III}} \right), & \text{se} \quad c_B \geq c \geq c_A \end{cases} \quad (1.12)$$

na qual os termos α_I , α_{II} e α_{III} valem:

$$\begin{aligned} \alpha_I &= (2 - \rho_B/\rho_A)c_B^2 - (\rho_A/\rho_B)c_A^2 \\ \alpha_{II} &= (1 - \rho_B/\rho_A)c_B^2 + (2 - \rho_A/\rho_B)c_A^2 \\ \alpha_{III} &= c_B^2(c^2 - c_A^2)/c^2 \end{aligned}$$

O emprego de sensores de interface baseados na medida de velocidade sônica pode ser uma alternativa eficaz à utilização de densímetros quando se deseja identificar bateladas de diferentes graus de um mesmo produto. Testes realizados em 22 amostras de gasolina mostraram existir diferença suficiente nas velocidades sônicas, da ordem de 12 m/s, de forma a permitir a identificação da zona de mistura em bateladas de gasolina Premium (58.5 °API) e comum (58.4 °API) (Zacharias, 1972).

4. Identificação do Ponto de Corte

Considerando-se que os instantes de tempo que delimitam a zona de mistura t_o e t_l já foram determinados e a curva de concentração $C_B(t_j)$, ou $C_A(t_j)$, com $t_j \in [t_o, t_l]$ encontra-se disponível, o problema de identificação do(s) ponto(s) ótimo(s) de corte consiste em identificar o(s) instante(s) de tempo $t_H \in [t_o, t_l]$ e $t_T \in [t_o, t_l]$ (referidos à passagem da interface pela *out-station*), os quais permitem identificar os valores $a_H = a(t_H)$ e $a_T = a(t_T)$ medidos pelo sensor de interface na localizado na *out-station* (vide Figura 2) a serem empregados pelo segundo sensor de interface (localizado próximo ao *manifold* de corte) como *set-point* para acionar a abertura e o fechamento das válvulas de corte.

Dois tipos de corte são geralmente realizados, de acordo com a natureza do par A/B de produtos transportados: corte segregado e corte direcionado. Se o corte a ser realizado é do tipo segregado, o que consiste em acondicionar parcela do volume de mistura no tanque de mistura $A+B$ (situação em que o par de fluidos transportado A e B gera *transmix*) o valor a_H é utilizado como *set-point* para o acionamento da abertura da válvula de acesso ao tanque de mistura $A+B$ e fechamento da válvula de acesso ao tanque do produto A , enquanto que a_T é empregado como *set-point* de abertura da válvula de acesso ao tanque B e fechamento da válvula de acesso ao tanque de mistura $A+B$. Por outro lado, quando a mistura pode ser incorporada ao produto A ou ao produto B , o corte é denominado direcionado. Neste

caso, $t_H = t_T = t_U$, com $t_U \in [t_o, t_l]$, e o valor $a_U = a(t_U)$ é utilizado como *set-point* para a abertura da válvula de acesso ao tanque *B* e fechamento da válvula de acesso ao tanque *A*.

A estratégia empregada para identificar os instantes de tempo t_H e t_T consiste em assegurar que os produtos armazenados nos tanques *A* e *B* encontrar-se-ão sempre dentro das suas especificações técnicas, para todo e qualquer instante de tempo. As especificações técnicas dos produtos *A* e *B* podem ser caracterizadas através de suas concentrações mínimas toleráveis C_A^{min} e C_B^{min} (ou alternativamente em termos do seus graus de impureza máximos I_A^{max} e I_B^{max} , sendo $C_i^{min} = 1 - I_i^{max}$ com $i \in \{A, B\}$) e/ou em termos do traço máximo permitido $T_{i,k}^{max}$, com $k \in \{1, \dots, M\}$, do k -ésimo elemento na composição química do produto i , com $i \in \{A, B\}$ (como, por exemplo, o teor de enxofre), sendo M o número de componentes em consideração.

Denominando-se $C_i^T(t_o)$, $T_{i,k}^T(t_o)$ e $V_i^T(t_o)$ a concentração, o traço do k -ésimo elemento na composição química e o volume do produto i no seu respectivo tanque no instante de tempo t_o , com $i \in \{A, B\}$, e $T_{i,k}$ o traço do k -ésimo elemento na composição química dos produtos deslocados, é possível mostrar, à luz das hipóteses abaixo especificadas,

- o produto nos tanques *A* e *B* encontra-se sempre homogeneizado;
- durante o intervalo de tempo $t \in [t_o, t_l]$ não há retirada de produto dos tanques *A* e *B*;
- os volumes V_A e V_B encerrados pelas linhas que interligam os tanques *A* e *B* ao *manifold* de corte são desprezíveis se comparados aos volumes desses produtos dentro dos respectivos tanques, para todo e qualquer instante de tempo;
- logo após a realização do corte todo fluido direcionado ao tanque *A* e ao tanque *B* é instantaneamente lá acondicionado, não havendo retenção de produto nas linhas que os interligam ao *manifold* de corte;

que as concentrações dos produtos nos tanques *A* e *B* num instante t_* logo após a realização do corte valem:

$$C_A^T(t_*; t_H) = \frac{C_A^T(t_o)V_A^T(t_o) + V_L + \int_{t_o}^{t_H} C_A(t)Q(t)dt}{V_A^T(t_o) + V_L + \int_{t_o}^{t_H} Q(t)dt} \quad C_B^T(t_*; t_T) = \frac{C_B^T(t_o)V_B^T(t_o) + \int_{t_T}^{t_l} C_B(t)Q(t)dt}{V_B^T(t_o) + \int_{t_T}^{t_l} Q(t)dt} \quad (1.13)$$

e os traços do k -ésimo elemento na composição química dos produtos nos tanques *A* e *B* num instante t_* logo após a realização do corte valem:

$$T_{A,k}^T(t_*; t_H) = \frac{T_{A,k}^T(t_o)V_A^T(t_o) + T_{A,k}V_L + T_{A,k} \int_{t_o}^{t_H} C_A(t)Q(t)dt + T_{B,k} \int_{t_o}^{t_H} C_B(t)Q(t)dt}{V_A^T(t_o) + V_L + \int_{t_o}^{t_H} Q(t)dt} \quad (1.14)$$

$$T_{B,k}^T(t_*; t_T) = \frac{T_{B,k}^T(t_o)V_B^T(t_o) + T_{B,k} \int_{t_T}^{t_l} C_B(t)Q(t)dt + T_{A,k} \int_{t_T}^{t_l} C_A(t)Q(t)dt}{V_B^T(t_o) + \int_{t_T}^{t_l} Q(t)dt} \quad (1.15)$$

Com base nas equações (1.13), (1.14) e (1.15), as condições necessárias e suficientes para assegurar que logo após o corte os produtos nos tanques *A* e *B* permanecerão dentro de suas especificações técnicas podem ser expressas como:

$$C_A^T(t_*; t_H) \geq C_A^{min}, \quad C_B^T(t_*; t_T) \geq C_B^{min}, \quad T_{A,k}^T(t_*; t_H) \leq T_{A,k}^{max}, \quad T_{B,k}^T(t_*; t_T) \leq T_{B,k}^{max}, \quad \text{com } k \in \{1, \dots, M\} \quad (1.16)$$

Do ponto de vista matemático, o problema de identificar os instantes de tempo que resultarão no ponto ótimo de corte pode ser reformulado como:

Encontrar $t_H \in [t_o, t_l]$ e $t_T \in [t_o, t_l]$ tais que:

$$t_H \in \min\{C_A^T(t_*; t_H) = C_A^{min}, T_{A,k}^T(t_*; t_H) = T_{A,k}^{max}, t_l\} \quad \text{com } k \in \{1, \dots, M\} \quad (1.17)$$

$$t_T \in \max\{t_o, C_B^T(t_*; t_T) = C_B^{min}, T_{B,k}^T(t_*; t_T) = T_{B,k}^{max}\} \quad \text{com } k \in \{1, \dots, M\} \quad (1.18)$$

É possível verificar que o problema formulado anteriormente terá sempre solução podendo fornecer, entretanto, resultados que impliquem na prática na existência de mais de uma possibilidade de se efetuar o corte. Além disso, a solução do problema anterior indica automaticamente que tipo de corte (se direcionado ou segregado) deva ser realizado. Se $t_H < t_T$, então o corte necessariamente deverá ser do tipo segregado uma vez que o volume de mistura V_m encerrado pelos instantes de tempo t_H e t_T ($V_m = \int_{t_H}^{t_T} Q(t)dt$) não pode ser direcionado nem ao tanque A e nem ao tanque B sem retirar os produtos lá acondicionados de suas especificações técnicas. Por outro lado, se $t_H \geq t_T$, então o corte deverá ser do tipo direcionado uma vez que há mais de uma possibilidade de acomodar parcela do volume de mistura tanto no tanque A quanto no tanque B. Neste caso, o critério de decisão deixa de ser meramente técnico e passa a ser de natureza econômica. Se o produto A for o produto de maior valor agregado, então a mistura é majoritariamente direcionada para o tanque A e $t_U = t_H$. Por outro lado, se o produto B for o produto de maior valor agregado, então $t_U = t_T$ e a mistura é preponderantemente direcionada para o tanque B. Nestes casos, é possível degradar o produto de maior valor agregado sem retirá-lo de suas especificações.

5. Resultados

Para ilustrar a aplicação da metodologia proposta nos parágrafos precedentes, dados reais dos sinais de vazão e de um sensor de interface com medida de velocidade sônica referentes a uma transferência de diesel (produto B) - gasolina (produto A) num oleoduto de 10 in de diâmetro são utilizados. As massas específicas dos produtos valem $\rho_B = 860 \text{ kg/m}^3$ e $\rho_A = 760 \text{ kg/m}^3$. Os sinais de vazão e velocidade sônica foram monitorados após os produtos terem percorrido 200 km, com frequência de aquisição de dados de 0.2 Hz (Couto et alli, 1998). O sinal de velocidade sônica $c(t)$ (em conjunto com sua conversão em concentração do produto B $C_B(t)$ via Eq. (1.12)) é apresentado na Figura 1, onde os instantes de tempo t_o e t_l forma identificados (com base no método apresentado na seção 2) como sendo $t_o = 09:02:20 \text{ h:m:s}$ e $t_l = 09:28:55 \text{ h:m:s}$ e as velocidades sônicas dos produtos com teor de pureza igual 100% $c_B = 1360 \text{ m/s}$ e $c_A = 1200 \text{ m/s}$. Admite-se, para fins de ilustração, que a estação de medição está posicionada a 1.3 km à montante do *manifold* de corte, resultando $V_L = 70 \text{ m}^3$.

Assumem-se, como especificações técnicas do diesel (produto B) e da gasolina (produto A), que as concentrações mínimas admissíveis desses produtos valem $C_A^{\min} = C_B^{\min} = 0.98$ e que o teor de enxofre dos produtos é o único componente em consideração, i.e. $k=1$. Os teores de enxofre máximos no diesel e na gasolina valem $T_{B,1}^{\max} = 2000 \text{ ppm}$ e $T_{B,1}^{\max} = 500 \text{ ppm}$, respectivamente, e que os teores de enxofre dos produtos em movimentação são $T_{B,1} = 1990 \text{ ppm}$ e $T_{B,1} = 490 \text{ ppm}$. Admite-se, também, que as concentrações dos produtos nos tanques no instante $t_o = 09:02:20 \text{ h:m:s}$ são iguais a $C_A^T(t_o) = C_B^T(t_o) = 0.99$. Na seqüência, os instantes de tempo t_H e t_T são calculados com base em (1.17) e (1.18), variando-se os volumes dos tanques $V^T = V_A^T(t_o) = V_B^T(t_o)$ de 1000 a 13000 m^3 . Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3 onde são plotados os gráficos de t_H e t_T em função dos volumes dos produtos nos tanques $V^T = V_A^T(t_o) = V_B^T(t_o)$.

A considerar como especificações técnicas apenas a concentração dos produtos e o teor de enxofre, o resultado da simulação mostrado na Figura 3 indica que o corte deve ser do tipo direcionado uma vez que $t_H > t_T$ qualquer que seja o volume $V^T \in [1000, 13000] \text{ m}^3$. Como $t_T = t_o = 09:02:20 \text{ h:m:s}$ para $V^T \geq 1500 \text{ m}^3$, a mistura poderia ser completamente acondicionada no tanque de diesel (produto B) sem no entanto retirar o produto lá existente de suas especificações. Como o teor de enxofre da gasolina é menor do que o do diesel, a restrição em $t_T > t_o = 09:02:20 \text{ h:m:s}$ para $V^T < 1500 \text{ m}^3$ surge de forma a não violar a condição associada à concentração mínima $C_A^{\min} = C_B^{\min} = 0.98$ do diesel no tanque.

Por outro lado, a curva de t_H em função de V^T mostra que à medida que o volume de gasolina no tanque aumenta maior quantidade de mistura pode ser direcionada para o tanque de gasolina sem retirá-lo de suas especificações. No caso em consideração, a restrição que impera na seleção de t_H é, ao contrário daquela associada a t_T , o teor de enxofre. Finalmente, se a gasolina fosse considerada o produto de maior volume agregado, então o instante de tempo associado ao corte direcionado seria $t_U = t_H$ para $V^T \in [1000, 13000] \text{ m}^3$. A curva de t_H em função de V^T mostra que a partir de $V^T = 11000 \text{ m}^3$, $t_H = t_l = 09:28:55 \text{ h:m:s}$ e, por conseguinte, toda a mistura poderia ser direcionada ao tanque de gasolina sem prejuízo da qualidade do produto.

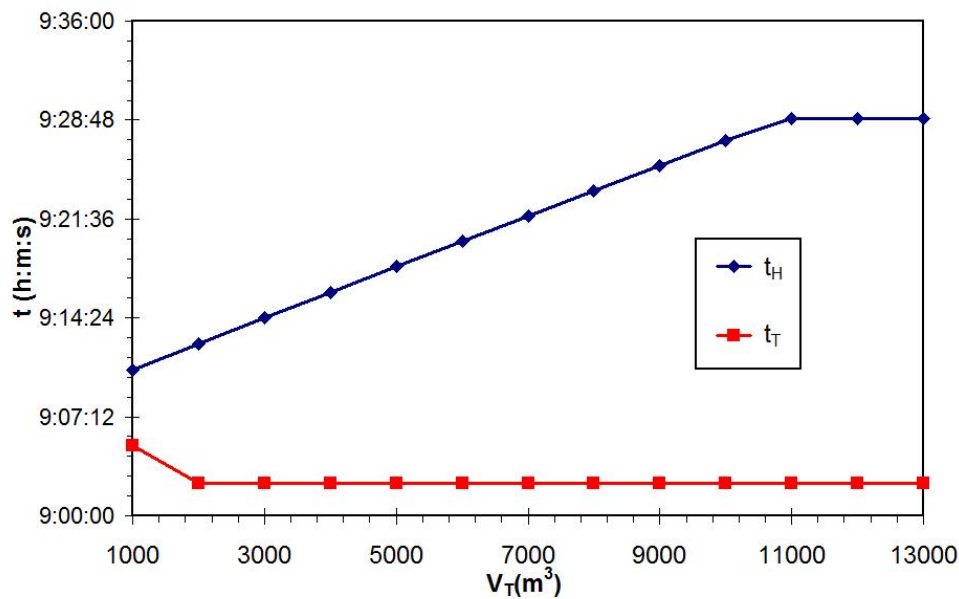


Figura 3. Tempos de corte t_H e t_T versus volume dos produtos nos tanques $V^T = V_A^T(t_o) = V_B^T(t_o)$ no instante $t_o = 09:02:20$ h:m:s.

6. Considerações Finais

Este trabalho apresentou uma metodologia sistematizando a determinação do ponto ótimo de corte assim como o tipo de corte (segregado ou direcionado) em transferências em batelada por oleoduto. Na metodologia considerada, as especificações dos produtos podem ser caracterizadas em termos de pureza e em função da concentração de mais de um elemento químico (como por exemplo, teor de enxofre) que integra a composição dos produtos. A adoção de procedimentos objetivos e uniformes para a realização de cortes de interface gera em resultados econômicos de grande significação, pois reduz a degradação de produtos existente em processos não sistematizados e não otimizados, que muitas vezes incluem princípios subjetivos e grande variância. A consolidação desta metodologia possibilita automatizar a determinação do ponto de corte, melhorando a confiabilidade e a economicidade do processo de transporte..

7. Agradecimentos

É com satisfação que o registramos à Petrobras e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

8. Referências

- COUTO, N.C. et alli. Separação de produtos em Polidutos Utilizando Pig-Espuma de Baixa Densidade. Relatório Interno CENPES/SUSEP/DILOT/SEPROT. Porjeto 02.05.07. PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A., 1998.
- FREITAS RACHID, F.B., CARNEIRO DE ARAUJO, J.H., BAPTISTA, R.M. Predicting mixing volumes in serial transport in pipelines. *ASME Journal of Fluids Engineering*, v. 124, p. 528–534, 2002.
- YARBOROUGH, V. Colonial Pipeline tests interface-detector methods. *Oil & Gas Journal*, Aug., n.6, p. 54-56, 2001.
- MOFFAT, R. J.; Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1:3–17, 1988.
- ZACHARIAS, E.M. Sonic detectors see gasoline interfaces, *Oil & Gas Journal*, Aug., n. 21, p. 79-81, 1972.