

RECONCILIAÇÃO DE DADOS EM TEMPO REAL PARA MONITORAÇÃO
E DETECÇÃO DE FALHAS EM TERMINAL DE TRANSPORTE E
ARMAZENAMENTO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO

Rafael Noac Feldman

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

Aprovada por:

Prof. Enrique Luis Lima, D.Sc.

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

Prof. Príamo Albuquerque Melo Junior, D.Sc.

Dr. Mário César Mello Massa de Campos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2007

FELDMAN, RAFAEL NOAC

Reconciliação de Dados em Tempo Real
para Monitoração e Detecção de Falhas
em Terminal de Transporte e
Armazenamento de Derivados de Petróleo
[Rio de Janeiro] 2007

XV, 110 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Química, 2007)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Reconciliação de Dados
2. Sistemas de Tempo Real
3. Dados Industriais Reais
4. Terminal de Petróleo e Derivados

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

*À memória de
Guili Alexandre Feldman (Z"L),
meu pai*

AGRADECIMENTOS

À minha família e aos meus amigos, pelo apoio, compreensão e tudo o mais.

À Petrobras Transportes S.A., pelo apoio e incentivo e, em particular, ao coordenador de automação Luciano Macedo Josino da Costa, pela confiança neste e em tantos outros desenvolvimentos.

Aos professores Enrique e Zé Carlos, que me orientaram de forma brilhante, como já é de praxe.

Aos colegas do PEQ pelo apoio neste desenvolvimento, especialmente a Márcio Shwaab e Diego Prata.

À minha amiga, colega de mestrado e de trabalho Juliana Bregenski Schuhli pela amizade, papos-cabeça e pelo seu jeito de viver.

Aos meus surtos de loucura.

A todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

A todos, o meu muito obrigado.

*Já foi o tempo que eu pensava que mudaria o mundo
mas eu ainda tenho surtos de loucura e mudo um pouco, por um segundo.*

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

RECONCILIAÇÃO DE DADOS EM TEMPO REAL PARA MONITORAÇÃO
E DETECÇÃO DE FALHAS EM TERMINAL DE TRANSPORTE E
ARMAZENAMENTO DE DERIVADOS DE PETRÓLEO

Rafael Noac Feldman

Março/2007

Orientadores: Enrique Luis Lima

José Carlos Costa da Silva Pinto

Programa: Engenharia Química

A reconciliação de dados consiste em uma técnica de ajuste das variáveis medidas em uma determinada planta industrial, de modo a satisfazer um modelo matemático que descreva o processo. A técnica reduz os erros de medição, agregando qualidade aos dados que serão usados nos mais diversos procedimentos decisórios. Este trabalho tem como objetivo aplicar a técnica de reconciliação de dados em tempo real em um terminal de derivados de petróleo, através do desenvolvimento de um *software* que se comunica com o sistema de automação do terminal e resolve o problema de reconciliação de dados formulado. São apresentadas discussões sobre questões da implementação prática e utilização da técnica para monitoração da planta através da identificação de erros grosseiros, desvios sistemáticos ou outros padrões que possivelmente caracterizem falhas de instrumentação ou de processo. O *software* desenvolvido apresentou bom desempenho para operação em tempo real. Os dados obtidos demonstram que a técnica de reconciliação de dados pode contribuir para identificação de falhas e agregar qualidade às medições.

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

REAL-TIME DATA RECONCILIATION FOR MONITORING AND FAULT
DETECTION IN A PETROLEUM PRODUCTS TRANSPORTATION AND
STORAGE TERMINAL

Rafael Noac Feldman

March/2007

Advisors: Enrique Luis Lima
Jose Carlos Costa da Silva Pinto

Department: Chemical Engineering

Data reconciliation is a mathematic technique to adjust the measured variables in an industrial plant, satisfying a process model. It reduces the measurement errors, aggregating quality to data to be used in a sort of decision procedures. The present work objective is to apply the data reconciliation technique in real time, in a petroleum products transportation and storage terminal, through a software development that interfaces with the terminal's automation system and solves the proposed data reconciliation problem. The work also presents discussions on practical implementation issues and the use of the technique for monitoring the plant, identifying gross errors, bias and other pattern that possibly represent an instrumentation or process fault. The software presented good performance for real time application. The data obtained shows that data reconciliation has potential for application in fault detection and brings more quality to the measurement data.

ÍNDICE

1. Introdução	1
1.1. Estrutura	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1. Fundamentos de Reconciliação de Dados	4
2.1.1. Erros de Medição	4
2.1.2. Formulação do Problema de Reconciliação de Dados	5
2.1.3. Classificação de Variáveis	8
2.1.4. Detecção de Erros Grosseiros	10
2.1.5. Reconciliação de Dados em Sistemas Estacionários	11
2.1.6. Reconciliação de Dados em Sistemas Dinâmicos	14
2.2. Reconciliação de Dados em Sistemas Industriais Reais	16
2.3. Reconciliação de Dados em Tempo Real	19
2.4. Transporte e Armazenamento de Petróleo e Derivados	21
2.4.1. Terminais de Transporte e Armazenamento	22
2.4.2. Transferência de custódia	23
2.4.3. Reconciliação de Dados em Sistemas de Transporte e Armazenamento de Petróleo e Derivados	24
2.5. Sistemas de Automação Industrial	25
2.5.1. Os Níveis de um Sistema de Automação Industrial	25
2.5.2. Categorias de Sistemas de Automação Industrial	27
2.6. Conclusões	30
3. O Sistema Real	31
3.1. Descrição das Operações	33
3.2. Variáveis Medidas	34
3.2.1. Descrição da Instrumentação	35
3.3. Descrição do Sistema de Automação	37

3.4. Modelagem Matemática	38
3.4.1. Discretização do Modelo	46
3.4.2. Cálculo do Volume dos Tanques.....	47
3.4.3. Método de Cálculo do Fator de Correção.....	48
4. Desenvolvimento e Aplicação	52
4.1. Janela de Tempo	52
4.2. Formulação do Problema.....	53
4.3. Técnica de Minimização	55
4.4. O <i>Software</i> RDTR.....	56
4.5. Matriz de Variâncias e Covariâncias	59
4.6. Dimensionamento da Janela de Tempo: Dinâmica x Desempenho.....	61
4.6.1. Dinâmica	62
4.6.2. Desempenho.....	63
4.7. Limites de Confiança, Detecção de Erros Grosseiros e Falhas	65
5. Análise dos Dados.....	66
5.1. Caso 1 – Operação Normal.....	66
5.1.1. Características do Caso 1	66
5.1.2. Seqüência operacional do Caso 1	67
5.1.3. Resultados do Caso 1.....	67
5.2. Caso 2 – Instabilidade em Bomba de Envio.....	78
5.2.1. Características do Caso 2.....	78
5.2.2. Seqüência operacional do Caso 2.....	78
5.2.3. Resultados do Caso 2.....	78
5.3. Caso 3 – Desvio Sistemático de Instrumentação.....	86
5.3.1. Características do Caso 3.....	86
5.3.2. Seqüência operacional do Caso 3.....	86
5.3.3. Resultados do Caso 3.....	86
5.4. Caso 4 – Falha de Instrumentação de Nível (Erro de Saturação).....	90

5.4.1. Características do Caso 4.....	90
5.4.2. Seqüência operacional do Caso 4.....	91
5.4.3. Resultados do Caso 4.....	91
5.5. Caso 5 – Erro de Medição (Influência da Temperatura).....	95
5.5.1. Características do Caso 5.....	95
5.5.2. Seqüência operacional do Caso 5.....	95
5.5.3. Resultados do Caso 5.....	96
5.6. Caso 6 – Erro de Medição (Influência da Pressão).....	99
5.6.1. Características do Caso 6.....	99
5.6.2. Seqüência operacional do Caso 6.....	100
5.6.3. Resultados do Caso 6.....	100
6. Conclusões e Sugestões.....	102
6.1. Conclusões.....	102
6.2. Sugestões.....	102
7. Referências Bibliográficas.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – O papel do transporte e armazenamento na cadeia produtiva de petróleo e seus derivados.....	21
Figura 2 – Esquema de inter-relação dos terminais com as demais unidades operacionais da cadeia.....	22
Figura 3 – Exemplo de medição para transferência de custódia x medições operacionais.....	24
Figura 4 – Os níveis de um sistema de automação e controle.....	26
Figura 5 – SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído).....	28
Figura 6 – Arquitetura CLP + Sistema Supervisório.....	29
Figura 7 – Sistema SCADA.....	29
Figura 8 – Esquema simplificado das instalações físicas do terminal de Ribeirão Preto (SP).....	32
Figura 9 – Indicação dos locais com instrumentação instalada no terminal. (Temp. = temperatura, Pres. = pressão, Dens. = densidade).	35
Figura 10 – Arquitetura do sistema de automação do terminal escolhido.....	37
Figura 11 – Exemplo de Janela de Tempo com três amostras.	52
Figura 12 – Fluxo de dados para o algoritmo seqüencial de minimização.....	56
Figura 13 – Fluxo de execução do <i>software</i> RDTR (módulos RDTR.exe e MAXIMA.exe).....	58
Figura 14 – Esquema de inter-relação entre os componentes do <i>software</i> de reconciliação de dados em tempo real.....	59
Figura 15 – Exemplo de amostra de dados utilizada para caracterização da variância – Nível TQ02 (Linha grossa = período em estado estacionário, considerado para levantamento da variância / Linha fina = período em operação dinâmica, dados não utilizados).	60
Figura 16 – Resultado da avaliação de performance da minimização em função do número de amostras da janela de tempo.	63
Figura 17 – Caso 1: Perfil da vazão medida no local A.....	67
Figura 18 – Caso 1: Perfil do nível do tanque TQ04.....	68
Figura 19 – Caso 1: Vazão no local A (detalhe da Figura 17).....	69
Figura 20 – Caso 1: Nível no tanque TQ04 (detalhe da Figura 18).	69

Figura 21 – Caso 1: Resíduos da vazão no local A (os limites de confiança estão muito acima dos limites do gráfico)	70
Figura 22 – Caso 1: Resíduos do nível do tanque TQ04.....	70
Figura 23 – Caso 1: Detalhe do final do bombeio no tanque TQ02	71
Figura 24 – Caso 1: Perfil de vazão no local B.	72
Figura 25 – Caso 1: Perfil de vazão no local C.	72
Figura 26 – Caso 1: Detalhe do nível do tanque TQ03 enviando gasolina.....	73
Figura 27 – Caso 1: Vazão no local D	74
Figura 28 – Caso 1: Vazão no local E.....	74
Figura 29 – Caso 1: Resíduos da vazão no local D.	75
Figura 30 – Caso 1: Resíduos da vazão do local E.....	76
Figura 31 – Caso 1: Resíduos para a temperatura do tanque TQ03	77
Figura 32 – Caso 1: Resíduos para a temperatura do tanque TQ04	77
Figura 33 – Caso 2: Perfil da vazão no local A	79
Figura 34 – Caso 2: Detalhe do nível do tanque TQ02 durante o recebimento de diesel	79
Figura 35 – Caso 2: Perfil da vazão no local B	80
Figura 36 – Caso 2: Detalhe da vazão no local C, no momento em que ocorre um <i>outlier</i> devido à instabilidade do sistema.	81
Figura 37 – Caso 2: Detalhe do nível do tanque TQ01 no momento da interrupção do bombeio.....	81
Figura 38 – Caso 2: Resíduos do nível do tanque TQ01.....	82
Figura 39 – Caso 2: Vazão no local D	83
Figura 40 – Caso 2: Vazão no local E.....	83
Figura 41 – Caso 2: Resíduos do nível do tanque TQ03.....	84
Figura 42 – Caso 2: Resíduo para a vazão no local D	85
Figura 43 – Caso 2: Resíduos para a vazão no local E	85
Figura 44 – Caso 3: Vazão no local D com presença de erro sistemático a partir das 13h00min, aproximadamente.	87
Figura 45 – Caso 3: Vazão no local E.....	88
Figura 46 – Caso 3: Resíduos para a vazão do local D.....	88
Figura 47 – Caso 3: Resíduos para a vazão do local E.	89
Figura 48 – Caso 3: Resíduos para o nível do tanque TQ03.....	90

Figura 49 – Caso 4: Perfil do nível no tanque TQ02	92
Figura 50 – Caso 4: Vazão no local A	92
Figura 51 – Caso 4: Resíduos para o nível no tanque TQ02.....	93
Figura 52 – Caso 4: Resíduos para a vazão no local A.....	94
Figura 53 – Caso 4: Vazão do local A, a partir das 20h00min, quando estava operando com o tanque TQ01 (operação de recebimento).....	95
Figura 54 – Caso 5: Vazão no local B	97
Figura 55 – Caso 5: Vazão no local C	97
Figura 56 – Caso 5: Resíduos de vazão no local B.....	98
Figura 57 – Caso 5: Resíduos de vazão no local C.....	98
Figura 58 – Caso 5: Resíduos da temperatura do local C (os limites de confiança estão acima dos limites do gráfico).	99
Figura 59 – Caso 6: Resíduos da pressão do local B	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Índices de válvula para as operações do terminal	39
Tabela 2 – Exemplo de uma tabela de arqueação para tanque de armazenamento de petróleo ou derivados.	47
Tabela 3 – Constantes para cálculo de fator de correção, definidas pela faixa da densidade corrigida a 20° C.	49
Tabela 4 – Resultados do levantamento das variâncias dos erros das medidas dos tanques.....	61
Tabela 5 – Resultados do levantamento das variâncias dos erros das medidas dos locais de medição dos dutos (NA – não aplicável, pois não existe medição).	61
Tabela 6 – Exemplo de taxa de variação de nível de tanque a vazões baixas (em torno de 95 m ³ /h) para o tanque TQ04 do terminal.....	62

NOMENCLATURA

Símbolo	Descrição
CCF	fator de correção à condição padrão
CPL	fator de correção para pressão de 1 atm
CTL_{20}	fator de correção para temperatura de 20° C
D_L	densidade no local L
i_N	índice da válvula N
L_{TQ}	nível no tanque TQ
\dot{m}_L	vazão mássica no local L
M_{TQ}	massa no tanque TQ
n	número de variáveis medidas
N_{am}	número de amostras da janela
\mathbf{p}	vetor de parâmetros
\mathbf{p}^L	vetor de limites inferiores de parâmetros
\mathbf{p}^U	vetor de limites superiores de parâmetros
P_{am}	período de amostragem
P_L	pressão no local L
q_L	vazão volumétrica no local L
q_L^{corr}	vazão volumétrica corrigida à condição padrão no local L
t	tempo
T_{jan}	tempo total da janela
T_L	temperatura no local L
$TabArq_{TQ}$	tabela de arqueação do tanque TQ
\mathbf{u}	vetor de variáveis não-medida
\mathbf{u}^L	vetor de limites inferiores de variáveis não-medidas
\mathbf{u}^U	vetor de limites superiores de variáveis não-medidas

Símbolo	Descrição
\mathbf{V}	matriz de variâncias e covariâncias para amostra
V_{TQ}	volume no tanque TQ
V_{TQ}^{corr}	volume corrigido à condição padrão no tanque V
\mathbf{x}	vetor de variáveis de entrada reconciliadas
\mathbf{x}^M	vetor de variáveis de entrada medidas
\mathbf{y}	vetor de variáveis de saída reconciliadas
\mathbf{y}^M	vetor de variáveis de saída medidas
$\boldsymbol{\mu}$	vetor de médias
σ_i^2	variância da variável medida i
$\boldsymbol{\Sigma}$	matriz de variâncias e covariâncias

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas industriais modernos estão fortemente suportados em tecnologias de informação e automação industrial, que possibilitam acesso a uma enorme quantidade de variáveis em tempo real. Estas tecnologias hoje disponíveis permitem ainda uma gama de funcionalidades, tais como: gravação e recuperação de dados, atuação automática sobre o processo, capacidade de processamento para algoritmos cada vez mais complexos, além de permitir a integração dos sistemas de automação – também chamados de sistemas de chão-de-fábrica – com outros sistemas empresariais (SEBORG *et al.*, 1989, AMY, 1992 e FELDMAN, 2004).

Este cenário transforma a disponibilidade de informações em requisito essencial para uma operação eficiente e dinâmica. O uso destas tecnologias é, cada vez mais, um diferencial de competitividade para qualquer setor industrial. Porém, não só a implementação de tecnologias de automação e informação, mas também a forma de utilização destas tecnologias é determinante para definição da qualidade dos resultados obtidos em um processo industrial. Portanto, além da informação disponível, deve haver o bom uso desta informação (AMY, 1992, BOYER, 1999 e FELDMAN, 2004).

Dentre as aplicações já exploradas que fazem uso dos dados de tempo real gerados pelos sistemas de automação, pode-se citar: controle de processos, otimização, integração com área comercial e programação operacional. A grande maioria destes procedimentos é baseada em modelos matemáticos, sejam estes fenomenológicos ou empíricos.

Entretanto, os dados disponíveis são medidos por instrumentos e equipamentos que apresentam variabilidade, incertezas de medição e estão sujeitos a falhas. Além disto, também existem variabilidade e falhas inerentes ao próprio processo. Conseqüentemente, não deve ser esperado que todas as medições de uma planta respeitem o modelo matemático adotado para interpretação dos dados obtidos (PRATA, 2005, OLIVEIRA, 2006 e BAI *et al.*, 2007).

Desta forma, faz-se necessário que os dados sejam processados antes de passar por alguma análise ou processamento posterior. A reconciliação de dados é uma técnica desenvolvida para este fim (KUHEN e DAVIDSON, 1961, CROWE, 1996 e NARASIMHAN e JORDACHE, 2000).

A reconciliação de dados é uma técnica de ajuste das medições obtidas em um processo, de modo que estas atendam ao modelo matemático usado para descrever o processo. Esta técnica leva em conta a natureza estatística de cada medição e está fundamentada no fato de que as plantas industriais dispõem de instrumentação abundante e, conseqüentemente, redundância de informação. A formulação do problema de reconciliação de dados é baseada na minimização de uma função objetivo sujeita a restrições definidas pela natureza do processo.

Grande parte da literatura de reconciliação de dados está direcionada a estudos de definição de funções objetivos e proposição de metodologias numéricas para minimização dessas funções. Estes temas são importantes; entretanto, outras questões de ordem mais prática estão sendo pouco abordadas e negligenciadas na literatura.

Como existem vários problemas de reconciliação de dados em que as questões relacionadas à minimização da função objetivo já estão bem resolvidas, abre-se espaço para outros níveis de discussão e desenvolvimento, tais como: dificuldades de implementação em tempo real e em batelada no ambiente industrial; definição de critérios para discretização eficiente da dinâmica (janela de tempo, número de amostras por período); definição de critérios para caracterização da matriz de covariâncias; uso dos dados reconciliados para fins comerciais, dentre outros.

Em seu livro sobre reconciliação de dados, NARASIMHAM e JORDACHE (2000) abrem o Capítulo 9 afirmando que ainda não existiam aplicações industriais de reconciliação de dados em sistemas dinâmicos e que apenas algumas poucas tentativas foram feitas para detecção de erros grosseiros em sistemas dinâmicos. Naturalmente que, desde então, surgiram algumas novidades neste tipo de aplicação, embora os estudos na área sejam ainda muito incipientes. Ainda hoje, existem pouquíssimos registros de reconciliação de dados dinâmica em tempo real.

No contexto apresentado, o principal objetivo deste trabalho é abordar a questão da reconciliação de dados em tempo real para monitoração de um processo industrial real, com foco na aplicação prática, propondo soluções de implementação, avaliando resultados obtidos em uma planta real, analisando questões práticas e deixando algumas sugestões para futuras discussões e desenvolvimentos.

1.1. Estrutura

Este trabalho está dividido em sete capítulos, incluindo esta introdução. O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica sobre reconciliação de dados, aplicações da técnica em problemas industriais e em tempo real, além de uma breve descrição das operações de transporte e armazenamento de petróleo e derivados e sistemas típicos de automação industrial.

O Capítulo 3 traz a descrição do sistema real adotado para implementação da reconciliação de dados, incluindo o modelo matemático usado para este processo.

No Capítulo 4 é apresentado o desenvolvimento do *software* RDTR (acrônimo de Reconciliação de Dados em Tempo Real), incluindo a formulação do problema e questões de implementação tais como dimensionamento da janela de tempo e a caracterização da matriz de variâncias e covariâncias.

No Capítulo 5 apresentam-se os dados obtidos com a implantação da reconciliação de dados em tempo real e são feitas as análises destes resultados.

As principais conclusões e sugestões para discussão e desenvolvimentos futuros estão apresentadas no Capítulo 6.

Finalmente, o Capítulo 7 traz as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa e desenvolvimento deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fundamentos de Reconciliação de Dados

A reconciliação de dados é um método de ajuste das variáveis medidas em um determinado processo, de modo a satisfazer certas restrições – tipicamente balanços de massa ou energia –, respeitando-se a natureza estatística e metrológica de cada medição.

A natureza estatística das medições resulta do fato de que toda medição obtida em um processo real possui uma incerteza inerente, o que implica em erros e imprecisões. Sabendo-se que as plantas industriais modernas possuem um elevado grau de automação e que diversas variáveis são medidas a taxas de amostragem freqüentes, pode-se lançar mão desta abundância (e provável redundância) de informação para interpretar, identificar e reduzir os erros de medição.

Portanto, a técnica de reconciliação de dados pode ser definida como uma forma de aproximar as medições de seus valores verdadeiros, o que equivale a reduzir os erros de medição, valendo-se de redundâncias presentes no sistema.

2.1.1. Erros de Medição

Os erros apresentados por um sistema de medição podem ser de diversas naturezas. Vários autores (RAMAMURTHI *et al.*, 1993, NARASIMHAN e JORDACHE, 2000) costumam classificá-los em dois grupos, descritos a seguir.

Erros aleatórios: são erros pequenos, normalmente distribuídos e com média nula. Estes erros são inerentes ao processo de medição e estão diretamente relacionados à precisão da instrumentação utilizada.

Erros grosseiros: são erros grandes, usualmente gerados por problemas na instrumentação ou no próprio processo. Estes erros normalmente não têm relação com a precisão do equipamento nem possuem necessariamente média nula.

Os chamados **erros sistemáticos**, também conhecidos como desvios sistemáticos ou *bias*, podem ser considerados um caso específico de erros grosseiros (RAMAMURTHI *et al.*, 1993, NARASIMHAN e JORDACHE, 2000). Embora vários autores, como LIEBMAN *et al.* (1992), classifiquem este tipo de erro em uma terceira categoria. Os erros sistemáticos são caracterizados como medições continuamente altas ou baixas, e conseqüentemente com média não-nula. Esses erros resultam freqüentemente de problemas de calibração ou falhas consistentes de operação dos equipamentos.

A reconciliação de dados em um sistema que possui apenas erros aleatórios resulta em pequenos ajustes nas medições, dentro de um limite considerado aceitável. Quando erros grosseiros estão presentes em um sistema, os ajustes tornam-se expressivos, e as medições reconciliadas podem não representar a realidade do processo, já que possivelmente estão sob influência de falhas de instrumentos ou do próprio processo. Esses ajustes excessivos podem ser refletidos em várias outras medições do sistema, em um efeito conhecido como *smearing*, ou contaminação das medições. O tratamento dos erros grosseiros tem, portanto, um importante papel na reconciliação de dados.

2.1.2. Formulação do Problema de Reconciliação de Dados

A forma geral de um problema de reconciliação de dados pode ser representada como,

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}} \mathbb{F}(\mathbf{x}^M, \mathbf{x}) \quad (1)$$

sujeito a

$$h(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0$$

$$g(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p}) \leq 0$$

$$\mathbf{x}^L \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^U$$

$$\mathbf{p}^L \leq \mathbf{p} \leq \mathbf{p}^U$$

$$\mathbf{u}^L \leq \mathbf{u} \leq \mathbf{u}^U$$

onde \mathbb{F} é uma função objetivo a ser minimizada, \mathbf{x}^M é o vetor das variáveis medidas no processo e \mathbf{x} é o vetor dos valores reconciliados destas variáveis medidas. As variáveis não medidas (vetor \mathbf{u}) e os parâmetros (vetor \mathbf{p}) podem ser estimados. As restrições à minimização podem ser colocadas na forma de equações (h) ou inequações (g).

Tradicionalmente, e na grande maioria dos trabalhos publicados, a função objetivo \mathbb{F} , apresentada na Equação (1), é a função soma dos quadrados ponderados,

$$\mathbb{F} = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i^M - x_i)^2}{\sigma_i^2} \quad (2)$$

onde n representa o número de variáveis medidas e σ_i^2 representa a variância da i -ésima medição. Nesta formulação, todas as variáveis são consideradas medidas.

O caso mais geral, que também leva em consideração as covariâncias das medidas, pode ser apresentado na seguinte forma:

$$\mathbb{F} = (\mathbf{x}^M - \mathbf{x})^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{x}^M - \mathbf{x}) \quad (3)$$

onde \mathbf{V} representa a matriz de variâncias e covariâncias das medições.

A formulação apresentada para a função \mathbb{F} nas Equações (2) e (3) parte da observação de que frequentemente os erros aleatórios associados às medições se apresentam como distribuição normal com média zero.

Neste caso, admite-se que os erros de medição respeitem a distribuição normal multivariável, dada pela equação,

$$f(x_1, \dots, x_n) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma|^{n/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right) \quad (4)$$

onde Σ é a matriz de covariâncias real e desconhecida do processo e $\boldsymbol{\mu}$ representa o vetor das médias reais e desconhecidas das medições.

O princípio da máxima verossimilhança – originário da estatística bayesiana – admite que os eventos com as máximas probabilidades representam otimamente o comportamento de um sistema. A máxima probabilidade da equação normal multivariável equivale a minimizar o conteúdo da exponencial da Equação (4). Portanto,

$$\max \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\Sigma|^{n/2}} \exp\left(-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})\right) \quad (5)$$

equivale a

$$\min(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \Sigma^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}) \quad (6)$$

A Equação (6) é análoga à Equação (3), sendo a média equivalente ao valor estimado. Comparando-se as Equações (3) e (6), conclui-se que o procedimento de reconciliação de dados se propõe a estimar o valor médio real da medição ($\mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}$) a partir de uma estimativa das variabilidades de medição (\mathbf{V}, Σ), dado um modelo do processo.

Outras funções objetivo \mathbb{F} também já foram apresentadas e testadas em problemas de reconciliação de dados. Em particular, as funções baseadas em distribuições que sofrem pouca influência de erros grosseiros (*outliers*) no peso da minimização têm despertado interesse. Nestes casos, a reconciliação de dados é chamada de robusta. TJOA e BIEGLER (1991) propuseram o uso de uma função objetivo baseada na distribuição Normal Contaminada para a simultânea reconciliação de dados e detecção de erros grosseiros. Neste caso, os erros grosseiros são ignorados durante a minimização e as estimações são baseadas apenas em valores

definidos como bons pelo método. ÖZYURT e PIKE (2004) apresentam uma revisão e fazem uma análise das diversas distribuições utilizadas para simultânea reconciliação de dados e detecção de erros grosseiros, baseadas em estimadores robustos.

Do ponto de vista numérico e matemático, o problema de reconciliação de dados é um problema de otimização. Assim, a melhor forma de solucioná-lo depende da natureza das restrições do problema (equações lineares, não-lineares, dinâmicas, etc.), não sendo possível definir uma estratégia apropriada *a priori*, sem que seja conhecida a natureza do problema estudado.

2.1.3. Classificação de Variáveis

Um dado sistema possui um conjunto de variáveis medidas x e possivelmente outro conjunto de variáveis que não são medidas u . Estas variáveis não medidas podem ser estimadas com auxílio do modelo, dependendo da estrutura e da quantidade e natureza das variáveis que são medidas no sistema.

Também se pode ter no processo variáveis medidas que não possuem redundância, devido à falta de medições. Neste caso estas variáveis poderão não ser reconciliáveis.

De forma geral, em um dado sistema é possível propor a seguinte classificação das variáveis:

Variável Reconciliável (ou Redundante): é a variável medida, que pode ser calculada com o modelo (observável) mesmo que sua medição seja removida.

Variável Medida não-Reconciliável: é a variável medida, que não pode ser calculada com o modelo se sua medição for removida.

Variável Observável: é a variável não medida que pode ser estimada com o auxílio das medições e restrições de processo.

Variável não-Observável: é a variável que não é medida e não pode ser estimada com o auxílio das demais medições e com o modelo do processo.

Uma série de metodologias para classificação de variáveis foi proposta na literatura. VACLAVEK (1969) apresentou uma metodologia para classificação baseada em grafos, posteriormente desenvolvida por MAH *et al.* (1976).

Alguns métodos são baseados na definição de uma matriz de incidência das variáveis nas equações do modelo. A construção e análise desta matriz podem sofrer algumas variações, de acordo com a metodologia empregada. CROWE *et al.* (1983) propuseram a obtenção de uma matriz de projeção a partir da fatoração da matriz de incidência, de modo a separar as variáveis reconciliáveis, observáveis e não-observáveis.

Outros métodos foram propostos, como o apresentado por SANCHEZ e ROMAGNOLI (1996), baseados na transformação ortogonal da matriz de projeção e sua decomposição, podendo ser utilizados em problemas de restrições lineares e bilineares.

Em casos de problemas não-lineares, costuma-se realizar a linearização do modelo antes que se aplique o algoritmo de classificação de variáveis. Isto foi o que propuseram ALBUQUERQUE e BIEGLER (1996), cujo procedimento também é aplicável a modelos dinâmicos.

BAGAJEWICZ e CABRERA (2003) propuseram um método de classificação especialmente aplicado a sistemas com balanço de energia mecânica e medições de pressões e aplicaram-no em um sistema de gasodutos na Argentina.

Recentemente, OLIVEIRA (2006) desenvolveu e testou procedimentos de classificação de variáveis em problemas dinâmicos descritos por equações diferenciais ordinárias e equações algébrico-diferenciais. MARQUES (2006) desenvolveu um procedimento de classificação de variáveis para sistemas em estado estacionário e usou o procedimento para projetar e avaliar a instrumentação de uma planta de águas residuais na cidade de Laranjeiras, Sergipe.

2.1.4. Detecção de Erros Grosseiros

A técnica de reconciliação de dados está fundamentada no princípio de que apenas erros aleatórios estão presentes nos valores medidos em uma planta. A presença de erros grosseiros (incluindo os erros sistemáticos) deve ser detectada, a fim de identificar uma possível falha de instrumentação, de processo ou mesmo do próprio modelo matemático que descreve o processo. Estes erros poderão ainda introduzir ajustes expressivos nas variáveis reconciliadas afastando-as do valor verdadeiro da medida.

As primeiras metodologias de identificação de erros grosseiros foram baseadas em testes estatísticos e possuem efetividade apenas em sistemas estacionários. Este é o caso do Teste Global (REILLY e CARPANI, 1963), que traz apenas a informação de que existe pelo menos um erro grosseiro nos dados analisados sem apontar em que medição ele está. Outros testes estatísticos foram desenvolvidos, tais como o Teste Nodal (MAH *et al.*, 1976) e o Teste de Medição (MAH e TAMHANE, 1982, CROWE *et al.*, 1983).

Os testes estatísticos para detecção de erros grosseiros podem apresentar dois tipos de erro no resultado obtido (BAGAJEWICZ, 2000): Erro tipo I – o erro grosseiro é identificado, porém não é realmente um erro grosseiro; Erro tipo II – o erro grosseiro existe, mas não é identificado.

De um modo geral a detecção de erros grosseiros baseada em testes estatísticos é apontada como etapa anterior à própria reconciliação de dados (LIEBMAN, 1992).

Outros autores como TJOA e BIEGLER (1991) e ÖZYURT e PIKE (2004) propõem a detecção de erros grosseiros simultânea à detecção de falhas. Neste caso, se o valor reconciliado sofrer um ajuste expressivo, acima de um determinado limite de confiança, a medição correspondente será identificada como erro grosseiro. Este tipo de método permite a utilização de outras distribuições que não a distribuição Normal.

Alguns trabalhos focam especificamente a questão dos desvios sistemáticos. Este é o caso do trabalho de ROLLINS e DAVIS (1992) que desenvolveram um

equacionamento para identificar medições com desvios sistemáticos ou vazamentos no processo, chamado UBET (*unbiased estimation technique*). O método é baseado em teste de componentes (CT) e na construção de intervalos de confiança. ROLLINS e DAVIS (1993) ainda apresentaram um estudo sobre a aplicação do UBET, quando a matriz de variâncias e covariâncias não for conhecida. A técnica foi aplicada a sistemas lineares.

A detecção de erros grosseiros em sistemas dinâmicos é um problema especialmente desafiador e está intimamente relacionada aos estudos de detecção de falhas (NARASIMHAN e JORDACHE, 2000). BAGAJEWICZ e JIANG (1997, 1998) propuseram o Teste de Medida Dinâmico Integral (DIMT) que é essencialmente o Teste de Medição aplicado para estado estacionário adaptado para sistemas dinâmicos, envolvendo medições de vazão e nível de tanques. A técnica de análise de *cluster* foi explorada por CHEN e ROMAGNOLI (1998) e, posteriormente, por ABU-EL-ZEET *et al.* (2002). Nesta metodologia, cada nova medição é atribuída a um *cluster*, definido pelo grupo das medições anteriores. Os erros grosseiros são caracterizados pela distância entre a nova medição e o cluster.

Metodologias derivadas das técnicas de detecção de falhas também vêm sendo abordadas para detecção de erros grosseiros em sistemas dinâmicos. Uma promissora metodologia é a análise de componentes principais (PCA) (NARASIMHAN e JORDACHE, 2000). AMAND *et al.* (2001) aplicaram a técnica do PCA em conjunto à reconciliação de dados para monitoração de uma planta de síntese de amônia. Neste trabalho, o autor utiliza para detecção de falhas a análise dos componentes principais, baseando-se em uma região de confiança estabelecida a partir distribuição normal.

Outras técnicas de detecção de erros grosseiros foram desenvolvidas e estudadas. Revisões sobre o tema podem ser encontradas em CROWE (1996), NARASIMHAN e JORDACHE (2000), BAGAJEWICZ (2000) e PRATA (2005).

2.1.5. Reconciliação de Dados em Sistemas Estacionários

O primeiro problema de reconciliação de dados foi proposto por KUHEN e DAVIDSON (1961). Tratava-se de um problema de ajuste de medições em uma planta operando em estado estacionário e descrita por um modelo linear.

Nos casos em que o modelo do processo é composto simplesmente por um conjunto de equações lineares, é possível propor a seguinte formulação:

$$\min \left[\mathbb{F} = (\mathbf{x}^M - \mathbf{x})^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{x}^M - \mathbf{x}) \right] \quad (7)$$

sujeito a

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{0}$$

onde \mathbf{A} é uma matriz de dimensão $m \times n$, que corresponde ao modelo em estado estacionário com n variáveis e m equações.

Este é o caso mais simples e tradicional para formulação de um problema de reconciliação. KUHEN & DAVIDSON (1961) sugeriram a solução analítica do problema através do uso dos multiplicadores de Lagrange, tradicionalmente empregada em regressão linear.

Outra metodologia, proposta por CROWE *et al.* (1983), prevê o uso de uma matriz de projeção, a fim de separar o problema de obtenção das variáveis reconciliadas (reconciliação) do problema de inferência das variáveis observadas (chamado *coaptation*).

Grande parte dos processos químicos envolve restrições não-lineares para representação do estado estacionário. Equações de estado e de equilíbrio químico são exemplos de restrições não-lineares que podem ser aplicadas ao problema de reconciliação de dados. A presença de restrições na forma de inequações também caracteriza o problema como um problema não-linear.

A formulação do problema de reconciliação de dados para o caso não-linear, equivale à Equação (1) com restrições não lineares. No caso em que a função objetivo \mathbb{F} corresponde à Equação (3) (máxima verossimilhança da distribuição normal), temos a seguinte formulação:

$$\min(\mathbf{x}^M - \mathbf{x})^T \mathbf{V}^{-1}(\mathbf{x}^M - \mathbf{x}) \quad (8)$$

sujeito a

$$h(\mathbf{x}) = 0$$

$$g(\mathbf{x}) \leq 0$$

onde h e g são as restrições não-lineares do problema.

Para solução deste problema, diversas técnicas foram propostas. Algumas destas técnicas permitem aplicação apenas em problemas sem a presença de inequações nas restrições. Outras técnicas podem ser aplicadas em problemas com restrições compostas tanto de equações quanto por inequações.

BRITT e LUECKE (1973) propuseram um método numérico que faz uso dos multiplicadores de Lagrange aplicado ao problema não-linear. Este tipo de método possui uma desvantagem, já que a inclusão dos multiplicadores de Lagrange aumenta o tamanho do problema e pode torná-lo muito oneroso do ponto de vista computacional.

O método de linearização sucessiva (KNEPPER e GORMAN, 1980) propõe a aproximação linear das restrições do problema em torno das estimativas iniciais. O problema torna-se então de natureza linear para minimização da função objetivo. O resultado de cada iteração é utilizado como estimativa para a próxima, em torno da qual as equações são novamente linearizadas. Este método não permite a aplicação de restrições na forma de inequações.

Os métodos de programação não-linear admitem a utilização de inequações nas restrições do problema de minimização. Existem diversas técnicas de programação não-linear descritas na literatura (ver EDGAR e HIMMELBLAU, 1988), sendo que duas aparecem com maior destaque em problemas de reconciliação de dados: programação quadrática seqüencial (SQP) e os métodos de gradiente. As técnicas de SQP resolvem o problema não-linear de forma iterativa, fazendo-se aproximações quadráticas sucessivas de função objetivo a partir de uma estimativa

inicial da solução. As técnicas de gradiente resolvem o problema não-linear fazendo buscas sucessivas ao longo da direção do gradiente de \mathbb{F} .

Revisões sobre reconciliação de dados em sistemas estacionários podem ser encontradas em CROWE (1996), NARASIMHAN e JORDACHE (2000) e BAGAJEWICZ (2000).

2.1.6. Reconciliação de Dados em Sistemas Dinâmicos

Quando o modelo do processo possui comportamento dinâmico – acúmulos, tempos mortos, entre outros – o problema de reconciliação de dados passa a ser tratado como reconciliação de dados dinâmica. A formulação geral deste problema é a mesma apresentada na Equação (1), com a particularidade de que as restrições apresentam natureza dinâmica. Assim como no caso estacionário, a função objetivo pode ter a forma quadrática apresentada na Equação (3), quando derivada do princípio da máxima verossimilhança da distribuição normal.

Uma das primeiras soluções propostas para estimação e reconciliação de dados dinâmica em sistemas lineares foi baseada no filtro de Kalman (KALMAN, 1960). STANLEY e MAH (1977) aplicaram-no em uma unidade de refinaria para estimação de correntes (vazões e composições) e temperaturas do processo.

Para sistemas dinâmicos não-lineares foi desenvolvido o filtro de Kalman estendido (EKF), utilizado e adaptado em diversos trabalhos para descrever diferentes problemas, como apresentam MUSKE e EDGAR (1997). Uma das principais vantagens do filtro de Kalman estendido (EKF) e suas variantes é o seu desempenho computacional, muito importante para aplicações em tempo real. Infelizmente, conforme reportaram LIEBMAN *et al.* (1992) e VACHHANI *et al.* (2005), o EKF também apresenta algumas desvantagens, tais como: não permitir o uso de restrições descritas por inequações; difícil sintonia; e aplicação restrita a funções objetivos quadráticas.

Assim, alguns autores propuseram alternativas baseadas em programação não-linear (NLP) aplicada a sistemas dinâmicos. LIEBMAN *et al.* (1992) apresentaram o método NDDR (acrônimo em inglês para “reconciliação de dados dinâmica não-

linear”). Dados simulados foram utilizados para demonstração da técnica e avaliação de desempenho dos procedimentos numéricos.

JANG *et al.* (1986) apresentaram uma comparação entre os desempenhos do filtro de Kalman estendido (EKF) e de uma abordagem de programação não-linear, concluindo que esta última é mais robusta e gera resultados melhores. Entretanto, os métodos baseados em programação não-linear, inclusive o já citado NDDR de LIEBMAN *et al.* (1992), possuem a desvantagem de serem muito custosos computacionalmente, o que pode comprometer o desempenho em tempo real. É verdade, no entanto, que o desenvolvimento das plataformas computacionais vem removendo de forma paulatina essa restrição.

Foram propostas varias técnicas alternativas para solução do problema de reconciliação de dados dinâmica, com o objetivo de conciliar a robustez dos métodos NLP e o desempenho computacional do EKF. RAMMAMURTHI *et al.* (1993) apresentaram o estimador baseado em linearizações sucessivas (SLHE). Seu desempenho foi testado com sucesso em um conjunto de dados simulados. VACHHANI *et al.* (2005) propuseram uma adaptação do filtro de Kalman estendido para permitir que este possa lidar com restrições de inequações, sem perder a natureza recursiva e de baixo custo computacional inerente da técnica. As técnicas apresentadas neste trabalho foram denominadas RNDDR (reconciliação de dados dinâmica não-linear recursiva) e CPCO (otimização preditor-corretor combinados). As técnicas foram empregadas apenas a dados simulados.

BAI *et al.* (2007) apresentam uma avaliação da importância do modelo do processo para a reconciliação de dados em sistemas dinâmicos. Os autores apontam alguns problemas que podem ser enfrentados neste tipo de sistema. Um dos problemas é o fato de que o modelo dificilmente descreve a dinâmica do processo real de modo fidedigno. Além disso, para implementação em tempo real, os modelos dinâmicos podem se tornar problemáticos, na medida em que se tornam onerosos computacionalmente. Existem algumas soluções alternativas que podem ser usadas nesse caso, tais como a utilização de uma aproximação linear ou a linearização em torno do ponto de operação da planta. BAI *et al.* (2007) apresentam um sistema dinâmico onde são aplicadas diferentes abordagens de reconciliação de dados: linear, linear adaptativa e não-linear. Estas abordagens são comparadas, sendo demonstrado que a abordagem não-linear permite a obtenção de melhores resultados, embora os

modelos lineares também sejam capazes de lidar com o sistema estudado, com um custo computacional baixo. Cabe, portanto, aos especialistas do processo julgar a relevância de lançar mão de complexidades de modelagem em possível detrimento do desempenho computacional.

Revisões sobre reconciliação de dados em sistemas dinâmicos podem ser encontradas em LIEBMAN *et al.* (1992), NARASIMHAN e JORDACHE (2005) e PRATA (2005).

2.2. Reconciliação de Dados em Sistemas Industriais Reais

Apesar da reconciliação de dados trazer benefícios óbvios para os sistemas de medição de plantas industriais (maior consistência de dados, menor conteúdo de erros, identificação de falhas), existem poucos exemplos publicados que utilizam dados de processos reais. Considerando aplicações em sistemas dinâmicos reais, as aplicações reportadas são ainda mais escassas.

O uso de reconciliação de dados em ambientes industriais reais torna-se mais importante à medida que algoritmos de controle avançado, de otimização em linha e em tempo real e de controle de inventário são cada vez mais aplicados. Estas técnicas incrementam a eficiência da planta, porém demandam dados confiáveis e coerentes, o que pode ser conseguido através da técnica de reconciliação de dados.

ISLAM *et al.* (1994), WEISS *et al.* (1996) e SANCHEZ *et al.* (1996) apresentaram um pacote de reconciliação de dados aplicado em um reator de pirólise para produção de etileno, utilizando métodos de linearização sucessivas e programação quadrática para solucionar a otimização sujeita aos modelos de balanço de massa e energia da planta. Esta aplicação foi utilizada para fins de controle.

Aplicações de otimização são as maiores impulsionadoras do uso de técnicas de reconciliação de dados em ambientes industriais. Esse é o caso do trabalho de BUSSANI *et al.* (1995), que aplicaram a reconciliação de dados para otimização em linha em uma planta de hidrogênio na refinaria da AGIP localizada em Sannazaro de'Burgondi, Itália. O trabalho apresenta um pacote que utiliza a abordagem modular seqüencial para resolver o modelo do processo e um método caixa-preta para

executar a otimização. Os algoritmos de otimização (reconciliação de dados e otimização do processo) são baseados em programação quadrática seqüencial (SQP). CHIARI *et al.* (1997) publicaram novos desenvolvimentos sobre este pacote de reconciliação e otimização, com aplicações na mesma planta de hidrogênio. Neste artigo, a técnica proposta é recomendada, mas não aplicada, para operação em linha e em tempo real.

A otimização em linha também foi o objetivo de CHEN *et al.* (1998), quando aplicaram a metodologia de reconciliação de dados proposta por TJOA e BIEGLER (1991), baseada na distribuição normal contaminada, a medições de uma planta de ácido sulfúrico da Monsanto. Os autores reportaram a eficiência da técnica proposta.

Outro trabalho de reconciliação de dados voltada para aplicação em otimização em linha que utilizou dados de plantas reais foi apresentado por LEE *et al.* (1998). Os autores propuseram uma metodologia de reconciliação de dados e otimização em linha para minimização dos custos de energia de uma planta de utilidades. Em um estudo de caso, a metodologia foi apresentada fora de linha para dados de uma planta da Hyundai na Coréia. Os autores propuseram uma abordagem de decomposição hierárquica (HDA) para resolver o problema de reconciliação, e realizaram comparações com o método de programação quadrática seqüencial (SQP).

Alguns produtos de mercado voltados para otimização de processo em linha incluem procedimentos de reconciliação de dados embutidos (NARASIMHAN e JORDACHE, 2000).

PLÁCIDO e LOUREIRO (1998) apresentaram uma aplicação da técnica de reconciliação de dados a medições obtidas de uma planta de amônia na Bahia. Foi usado um modelo estacionário de balanço de massa como restrição, linearizado através da metodologia da matriz de projeção (CROWE *et al.*, 1983). O trabalho apresenta também uma estimativa de redução da variância dos dados reconciliados e sugere a instalação de novos instrumentos, como forma melhorar os resultados de estimação e reconciliação.

BOUROUIS *et al.* (1998) apresentaram uma aplicação da técnica de reconciliação de dados a medições reais coletadas de uma planta de dessalinização, constituída por múltiplos estágios localizada nos Emirados Árabes Unidos. Foi

implementada uma estratégia simultânea de detecção de erros grosseiros e reconciliação de dados. O modelo foi usado para descrever a operação em estado estacionário, com função objetivo baseada na distribuição normal contaminada e solução numérica obtida através de programação não-linear (NLP).

ÖZYURT e PIKE (2004) utilizaram os dados reais de uma planta de ácido sulfúrico apresentados por CHEN (1998), e dados de uma planta de alquilação da refinaria Motiva, nos Estados Unidos, para comparar diferentes funções objetivos – estimadores robustos – usados para detecção de erros grosseiros simultânea à reconciliação de dados.

Atualmente existem vários produtos disponíveis no mercado voltados para aplicações industriais que envolvam especificamente a reconciliação de dados, tais como SIGMAFINE (BASCUR e LINARES, 2006), ASPEN ADVISOR (ASPENTECH, 2003) e DATACON (BAGAJEWICK e MULLICK, 1995). Entretanto, a maior parte destes *softwares* está baseada em balanços de massa e energia no estado estacionário e poucos tratam da questão da detecção de erros grosseiros (NARASIMHAN e JORDACHE, 2000).

A aplicação de técnicas de reconciliação de dados a sistemas dinâmicos na indústria ainda é muito pouco relatada. SODERSTROM *et al.* (2000) afirmam que, até aquela data, este tipo de aplicação não existia. Neste trabalho, é apresentada uma aplicação de reconciliação de dados dinâmica em uma planta da ExxonMobil. Foi usada a técnica de colocação ortogonal para transformar as equações diferenciais ordinárias em equações algébricas. O problema de minimização da função objetivo, com restrições não-lineares, foi solucionado com o uso do *software* proprietário NOVA, sistema otimizador baseado em programação quadrática sucessiva.

PRATA *et al.* (2006) apresentaram uma implementação de reconciliação de dados dinâmica, com estimação de parâmetros simultânea, aplicada a dados reais de uma planta de polimerização de propileno. O problema de minimização, com restrições de balanços de massa e energia, foi solucionado através de uma abordagem seqüencial, atualizando uma janela de tempo para cada instante de amostragem. Foi utilizado o método de Gauss-Newton – um tipo de programação quadrática seqüencial (SQP) – com convergência controlada (LAW e BAILEY, 1963) para minimizar a função objetivo. O sistema de equações diferenciais foi resolvido numericamente. O trabalho

concluiu que a implementação deste tipo de algoritmo para sistemas industriais em tempo real é possível.

2.3. Reconciliação de Dados em Tempo Real

A implementação da reconciliação de dados em tempo real em uma planta industrial tem um grande potencial de trazer benefícios à operação, uma vez que as medições ajustadas podem servir como entrada para inúmeros processos decisórios, tanto automáticos (controle) quanto humanos (supervisão).

O conceito de tempo real para controle de processos pode ser definido como execução de um processamento de dados durante o tempo em que um determinado processo físico ocorre (BOYER, 1999). Portanto, diferentes processos físicos podem ter diferentes requisitos para um bom desempenho em tempo real, mas é certo que um sistema dito de tempo real deve garantir um tempo de execução mínimo para um dado processo.

A evolução dos recursos computacionais usados na automação industrial permite a execução cada vez mais rápida de algoritmos e outros processamentos, o que viabiliza uma série de implementações em tempo real.

O desenvolvimento das técnicas de reconciliação de dados em sistemas dinâmicos é importante para que as implementações em sistemas industriais sejam possíveis em tempo real, uma vez que os sistemas reais possuem ciclos de operação e sofrem inúmeras perturbações que caracterizam o processo como dinâmico.

Poucos são os trabalhos publicados com implementações de reconciliação de dados em tempo real. Alguns trabalhos já citados nesta revisão utilizam dados reais de sistemas dinâmicos e avaliam sua aplicabilidade em sistemas industriais em tempo real (SODERSTROM *et al.*, 2000, PRATA *et al.*, 2005).

Alguns trabalhos de reconciliação de dados ditos em tempo real para otimização em linha têm sua aplicabilidade focada em grandes períodos de execução, da ordem de algumas horas. Isto pode descaracterizar a definição de tempo real

descrita anteriormente, pois não permite uma resposta de controle ou supervisão no tempo do processo.

FABER *et al.* (2006) aplicaram uma metodologia de reconciliação de dados em tempo real em uma planta piloto. Foi utilizada estimação robusta, com o problema de minimização baseado na função *Fair*. Para obtenção de dados em tempo real, a comunicação de dados entre o sistema de controle de processos e o algoritmo implementado em FORTRAN foi feita através do padrão DDE, desenvolvido pela Microsoft. Este tipo de solução possui algumas limitações técnicas – congelamento de valores em caso de perda de comunicação, falta de diagnóstico sobre a qualidade da informação que chega ao *software* que faz a leitura, além de ser um padrão antigo e cada vez menos suportado por novos sistemas – e pode não ser adequado para implantação em uma planta verdadeira.

Algumas questões de implementação de sistemas de tempo real em plantas industriais merecem atenção e são pouco abordadas nos trabalhos de reconciliação de dados, tais como:

a) Definição de critérios para pré-tratamento de dados e montagem das janelas de tempo. (O que fazer quando o sistema de automação envia informações incorretas em um determinado instante?)

b) Dimensionamento adequado da janela de tempo e do período de amostragem, à luz da dinâmica do processo e do tempo computacional exigido. (Quantos dados usar? Que período de tempo cobrir?)

c) A variância das medições pode ser variável no tempo, o que implica em eventualmente rever as ponderações na função objetivo (Como definir a matriz \mathbf{V} ? Quando se deve atualizar a matriz \mathbf{V} ?). Para este problema, BRAUWERE *et al.* (2007) propõem uma metodologia de estimação das variâncias de medidas heterocedásticas, isto é, que variam ao longo do período de medição. O método proposto pelos autores admite que o modelo que descreve o processo seja imperfeito e, conseqüentemente, os resíduos de medição possuem mais do que simples informação estocástica. BRAUWERE *et al.* (2007) testaram o procedimento com sucesso em dois conjuntos de dados simulados e um conjunto de dados reais.

Portanto, a técnica de reconciliação de dados em tempo real possui uma série de questões ainda em aberto para desenvolvimento futuro e poderá se tornar uma implementação importante em plantas industriais, com cada vez mais aplicações em potencial.

2.4. Transporte e Armazenamento de Petróleo e Derivados

Na cadeia produtiva do petróleo e seus derivados faz-se necessário o transporte e armazenamento, uma vez que as áreas de produção, as unidades de transformação e o mercado consumidor estão dispersos geograficamente. Como mostrado na Figura 1, as operações de transporte e armazenamento permeiam todas as etapas da cadeia produtiva e envolvem os mais diversos produtos.

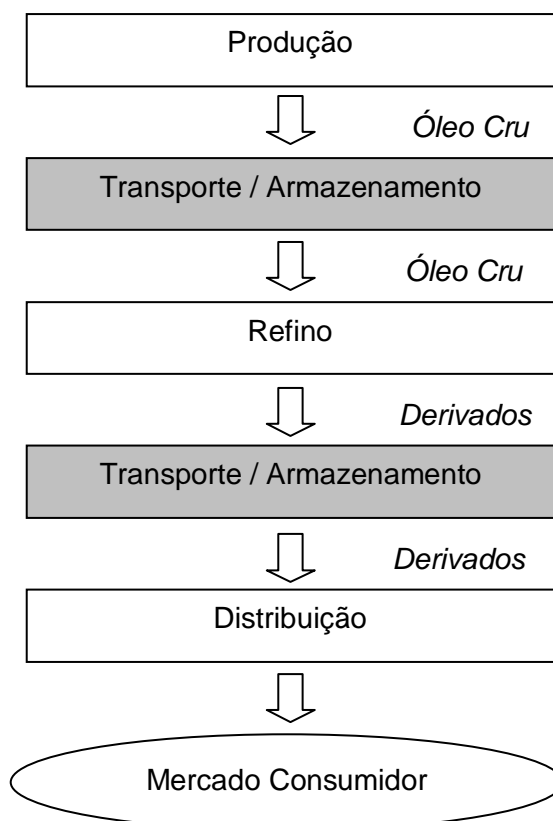


Figura 1 – O papel do transporte e armazenamento na cadeia produtiva de petróleo e seus derivados.

CARDOSO (2004) descreve de forma abrangente as características dos sistemas de transporte e armazenamento de petróleo e derivados. Apresentam-se aqui apenas os conceitos fundamentais necessários para a compreensão deste trabalho.

2.4.1. Terminais de Transporte e Armazenamento

O transporte e o armazenamento de petróleo e seus derivados são realizados por diversas formas possíveis, chamados modais. Alguns exemplos de modais são os transportes por navios, dutos, trens e caminhões.

O transporte através de dutos envolve unidades industriais conhecidas como terminais. Estas unidades são responsáveis por receber, armazenar e enviar os produtos manipulados. A Figura 2 mostra a inter-relação dos terminais com as demais unidades da cadeia de petróleo e derivados. Os terminais representam os nós da cadeia, de onde chegam e partem os dutos de transporte.

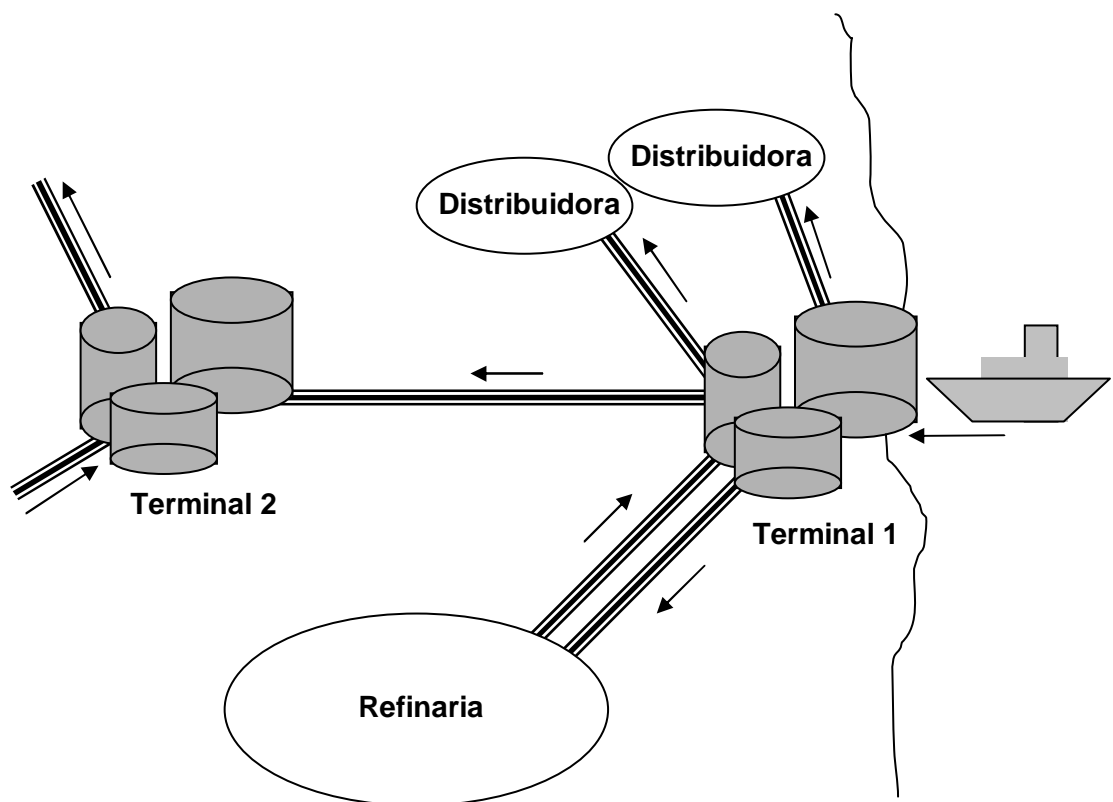


Figura 2 – Esquema de inter-relação dos terminais com as demais unidades operacionais da cadeia.

O projeto, construção, operação, manutenção e inspeção de terminais de petróleo são abordados no padrão da *American Petroleum Institute (API)*, número 2610 (API, 2005).

2.4.2. Transferência de custódia

Quando uma companhia recebe ou envia um determinado produto (petróleo ou derivados) para outra, ocorre um procedimento denominado transferência de custódia. Nesta transferência, a responsabilidade sobre as quantidades movimentadas passam a ser formalmente da empresa que recebe o produto. A transferência de custódia também é o momento em que se faz a medição oficial dos volumes envolvidos na transação comercial (BOYER, 1999). Portanto esta medição tem um impacto econômico direto para a empresa transportadora.

Um exemplo de transferência de custódia ocorre quando um terminal envia uma quantidade de derivados para uma companhia distribuidora. Neste caso, um sistema de medição específico é utilizado para mensurar o volume de produto transferido. A partir desta quantidade, a empresa detentora do terminal calcula o valor a faturar pelos serviços de transporte e armazenamento. A Figura 3 apresenta um diagrama com exemplos de medição para transferência de custódia e medição para fins puramente operacionais. O sistema de medição para transferência de custódia é, portanto, de extrema importância para a sobrevivência de uma empresa transportadora. Por isso, estes sistemas possuem legislação específica no Brasil (ANP, 2000 e INMETRO, 2003).

É importante salientar que no problema usual de transferência de custódia há quase sempre ao menos dois conjuntos de dados disponíveis: as medições do cliente e as medições do fornecedor. Por causa das incertezas inerentes ao processo de medição, os conjuntos de dados disponíveis nunca são exatamente iguais. Como consequência, cliente e fornecedor têm que estabelecer regras para avaliação das diferenças e para arbitragem de eventuais conflitos resultantes dos desvios observados entre os conjuntos de dados. Nesse cenário, a aplicação da reconciliação de dados em um terminal para fins de monitoramento do sistema e do processo pode trazer vantagens para as medições de transferência de custódia da mesma forma que

beneficia uma medição puramente operacional. Portanto, a técnica possui um enorme potencial econômico para as companhias transportadoras de petróleo e derivados.

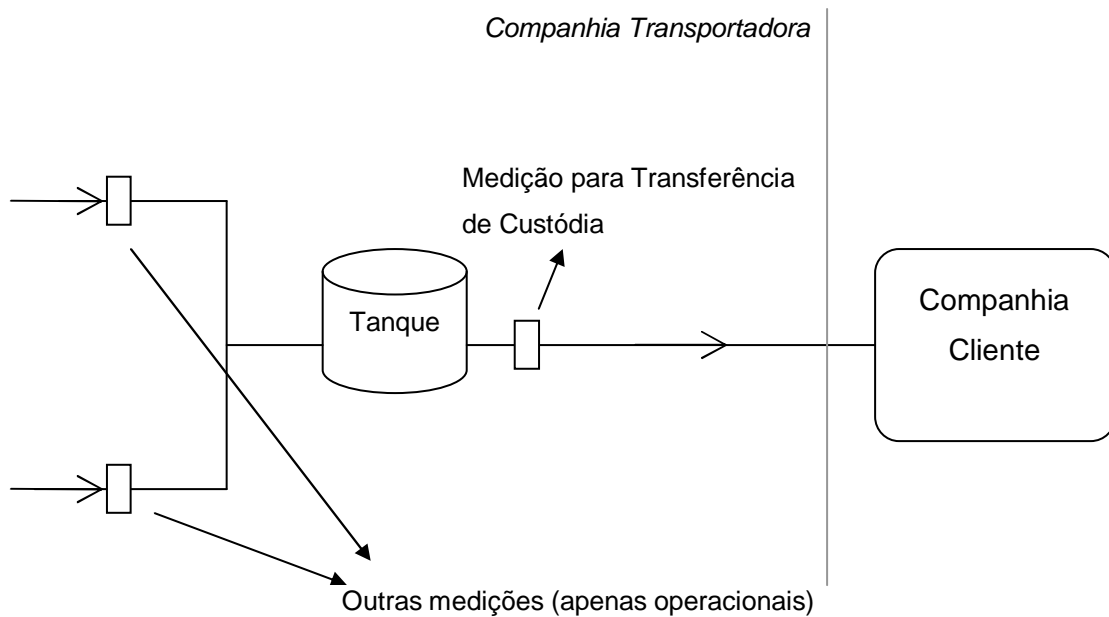


Figura 3 – Exemplo de medição para transferência de custódia x medições operacionais.

2.4.3. Reconciliação de Dados em Sistemas de Transporte e Armazenamento de Petróleo e Derivados

Existem alguns estudos sobre a aplicação da técnica de reconciliação de dados em refinarias de petróleo (STANLEY e MAH, 1977, BAGAJEWICZ e MULLICK, 1995, CHARPENTIER *et al.*, 1991). Entretanto, relatos da aplicação da técnica em sistemas de transporte de petróleo e derivados, incluindo oleodutos, gasodutos e terminais são bem mais escassos.

BAGAJEWICZ e CABRERA (2003) apresentaram um trabalho de reconciliação de dados em um sistema de gasodutos do campo de produção de Cerro Fortunoso, na província de Mendoza, Argentina. Os autores destacam a relevância da reconciliação de dados para a obtenção dos valores corretos de quantidades transportadas e do inventário nos dutos. Neste trabalho é feita uma avaliação do uso de equações de balanço de energia mecânica para a reconciliação de dados. Normalmente apenas os balanços de massa e energia são empregados como restrições do problema. O uso

destas equações aumenta o número de variáveis redundantes e observáveis do processo. Também é proposta uma nova metodologia de classificação de variáveis. O artigo ainda apresenta uma análise sobre a influência causada pelos erros presentes nas medições de temperatura sobre o processo de reconciliação de dados.

COELHO e MEDEIROS (1999) apresentaram uma aplicação da técnica de reconciliação de dados a redes de dutos, incluindo oleodutos de transporte de petróleo e derivados. A técnica foi aplicada para fins de detecção de vazamentos em um modelo estacionário e não-linear. Os autores concluem que é possível realizar a detecção de vazamentos utilizando reconciliação de dados, complementada por algumas regras heurísticas.

2.5. Sistemas de Automação Industrial

Os sistemas de automação são parte fundamental de uma planta industrial, pois permitem sua operação de modo eficiente, confiável e seguro. Os modernos sistemas de automação são cada vez mais baseados em tecnologias computacionais, utilizando padrões abertos e flexíveis. Paralelamente a isto, o número de instrumentos instalados em uma planta industrial típica também tem crescido constantemente. Com isso, a abundância de informação disponível potencializa o desenvolvimento de uma série de aplicações de alto nível, entre as quais se insere a reconciliação de dados.

Aqui estão apresentados alguns conceitos sobre sistemas de automação industrial. Mais informações e detalhes sobre estes sistemas, suas características e classificações podem ser encontrados em livros específicos sobre o tema (AMY, 1992, BOYER, 1999, COGGAN, 2005, TREVATHAN, 2006).

2.5.1. Os Níveis de um Sistema de Automação Industrial

Um sistema de automação pode ser dividido tipicamente em três níveis:

- a) Nível de Instrumentação
- b) Nível de Controle
- c) Nível de Supervisão

Cada um destes níveis exerce funções específicas no processo, sendo projetados conforme o papel desempenhado no sistema. A Figura 4 apresenta uma representação esquemática dos três níveis citados. O fluxo de informações pode ser de baixo para cima (leitura de medições) ou de cima para baixo (comandos a equipamentos). Uma importante característica de um dado sistema de automação é o modo como estes níveis estão integrados.

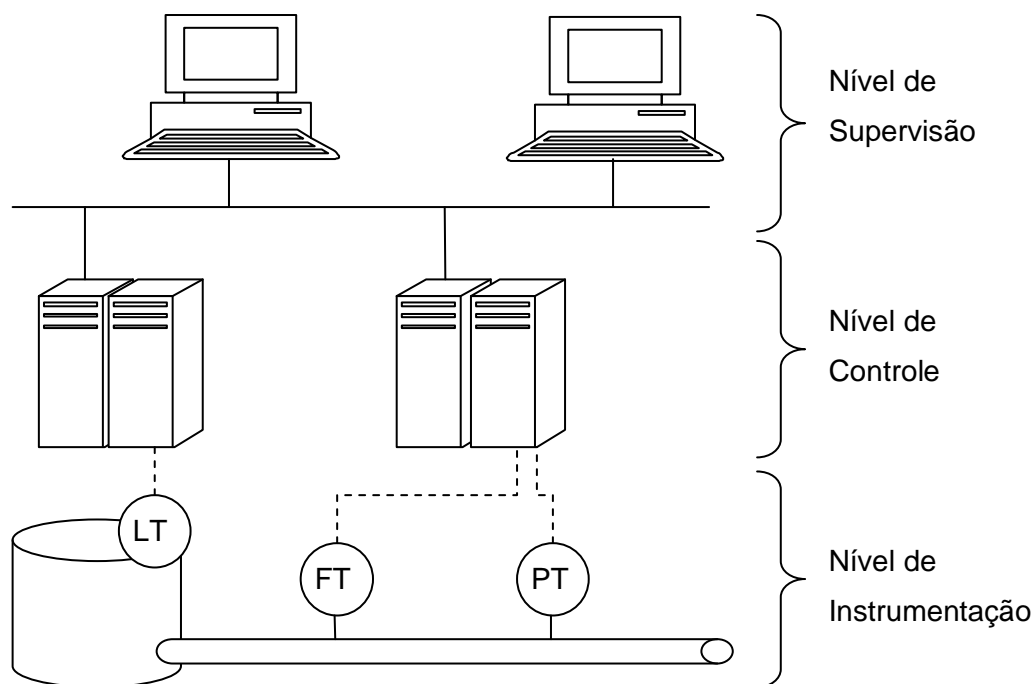


Figura 4 – Os níveis de um sistema de automação e controle

O **Nível de Instrumentação** é responsável por realizar a transdução das variáveis físicas para sinais elétricos ou eletrônicos. Os sinais que estes elementos geram devem atender a padrões da indústria, de modo que os demais níveis dos sistemas de automação possam recebê-los corretamente. A instrumentação também realiza a atuação sobre o processo através dos chamados elementos finais de controle (válvula, motores de rotação, etc.)

O **Nível de Controle** é responsável pelo chamado controle automático, isto é, toda ação que independe de intervenção humana é realizada e decidida neste nível. Tipicamente, as ações automáticas estão relacionadas ao controle do processo, segurança operacional e proteção de equipamentos.

O **Nível de Supervisão** é responsável pela interface com os operadores da planta. Nos sistemas modernos de automação, o nível de supervisão é composto por *softwares* que permitem a elaboração de telas sinóticas, relatórios, geração de alarmes e outras funcionalidades, para atender a operação através de *displays* de computadores.

2.5.2. Categorias de Sistemas de Automação Industrial

Historicamente, os sistemas de automação evoluíram de forma diferenciada nos diversos segmentos da indústria, atendendo a necessidades específicas de cada um destes segmentos. Os sistemas de automação de uma fábrica de automóveis possuem características diferentes daqueles de uma refinaria que, por sua vez, possuem características diferentes dos sistemas de automação de uma usina siderúrgica.

Assim, foram surgindo diferentes soluções e configurações para cada um dos três níveis apresentados na seção anterior, visando atender as demandas dos diferentes segmentos da indústria. Podem ser então identificadas algumas categorias de sistemas de automação industrial, classificadas de acordo com suas características específicas.

Cabe ressaltar que estas categorias não são incompatíveis entre si. Pelo contrário, as soluções se assemelham cada vez mais, de forma que, a cada nova geração de sistemas, esta classificação vem perdendo o sentido. Em todo caso, serão apresentadas aqui algumas categorias que podem ser consideradas de maior relevância.

a) Sistemas Digitais de Controle Distribuído (SDCD)

Os sistemas desta categoria são compostos de pacotes completos de *software* e *hardware* que abrangem pelo menos os níveis de controle e supervisão apresentados na Figura 4. Neste caso, um único fabricante é responsável pela maior parte da solução.

Este tipo de sistema é empregado principalmente em refinarias e indústrias petroquímicas e foi concebido originalmente para ter bom desempenho na execução de malhas de controle de processos. A Figura 5 apresenta um exemplo de SDCD, onde o pacote de sistema está destacado.

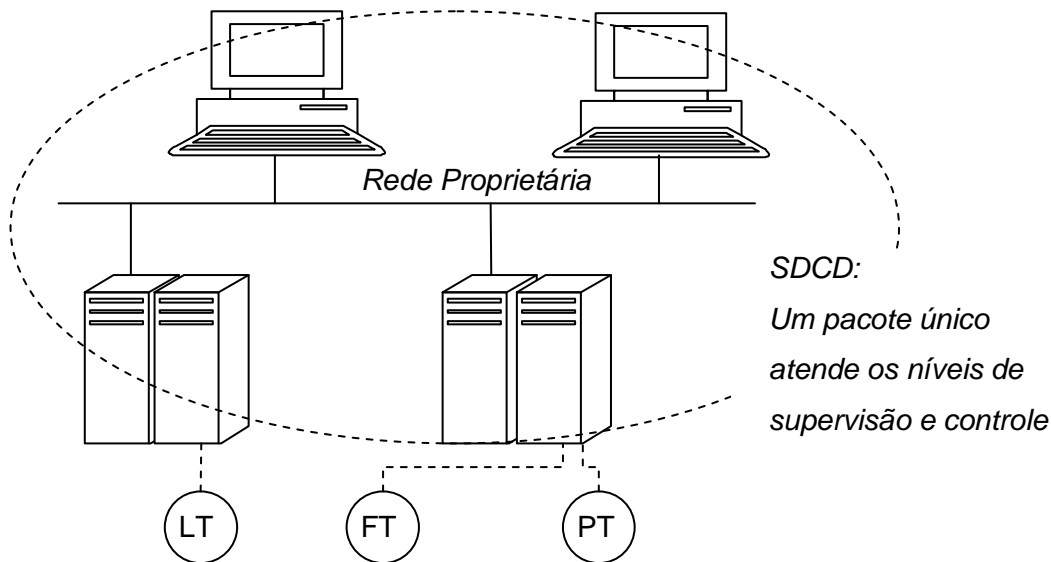


Figura 5 – SDCD (Sistema Digital de Controle Distribuído).

b) Controlador Lógico Programável (CLP) + Sistema Supervisório

Esta solução é caracterizada pela utilização de equipamentos chamados CLPs (Controlador Lógico Programável), usados para realização do controle automático (nível de controle), e de *softwares*, geralmente baseados em computadores tipo PC, para atender o nível de supervisão. Estes *softwares* são chamados sistemas supervisórios.

Este é um dos modelos mais difundidos na indústria, por suas características modulares e custo mais baixo, em comparação ao SDCD. Sua utilização abrange desde fábricas de automóveis a plataformas de petróleo. A Figura 6 apresenta a arquitetura típica de uma rede de automação formada por CLPs e sistemas supervisórios.

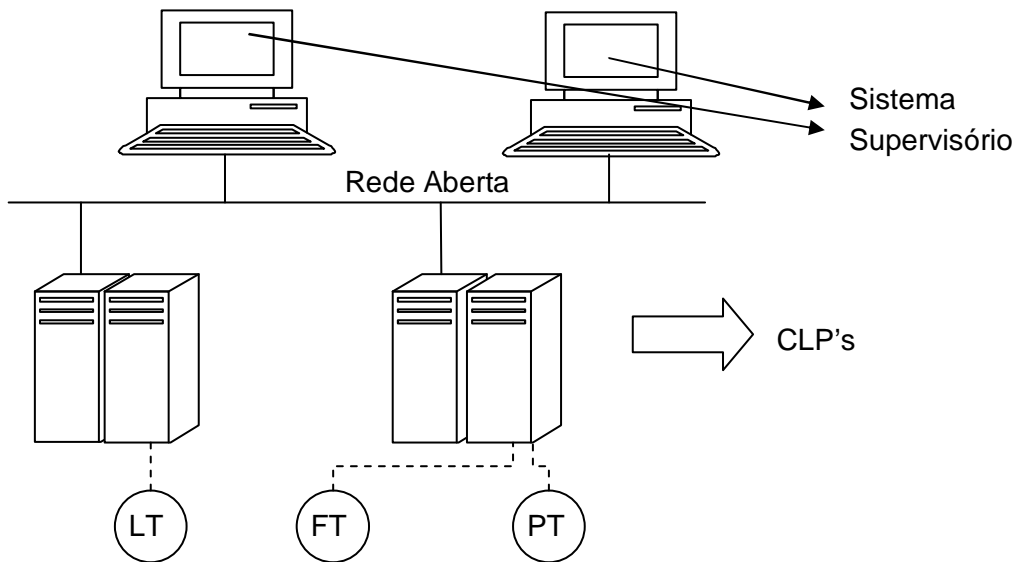


Figura 6 – Arquitetura CLP + Sistema Supervisório

c) Sistemas de Supervisão, Controle e Aquisição de Dados (SCADA)

Os sistemas SCADA têm configuração muito semelhante à solução CLP+Supervisório, com a única característica de que os CLP's são colocados a grandes distâncias do sistema supervisório e são comumente chamados de remotas.

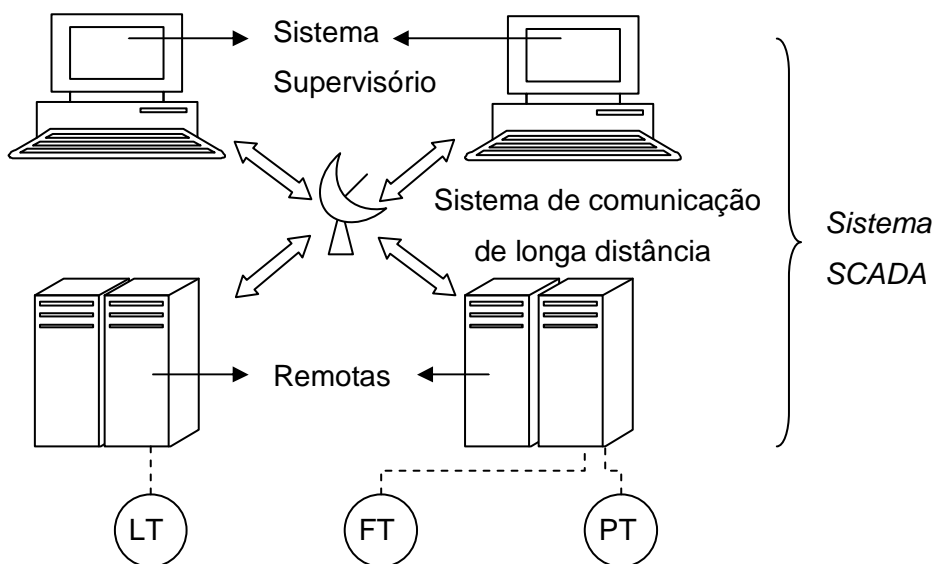


Figura 7 – Sistema SCADA

Esta solução é adotada em companhias de transmissão de energia elétrica, operadoras de dutos e outras empresas que necessitem de supervisão em grandes

distâncias. A Figura 7 apresenta um diagrama representando a arquitetura de um sistema SCADA.

FELDMAN (2004) apresentou as características particulares de sistemas de automação industrial aplicados em dutos em terminais, destacando as vantagens do acesso às informações disponíveis nas salas de controle e da integração de sistemas. O autor ainda apresenta aspectos de monitoração de dutos em tempo real e questões de segurança na integração de sistemas.

2.6. Conclusões

A aplicação da técnica de reconciliação de dados tem um enorme potencial econômico nos sistemas de transporte e armazenamento, principalmente na monitoração dos volumes e vazões, para fins de controle de estoque, transferência de custódia, programação operacional, otimização e detecção de falhas (incluindo vazamentos e passagens indevidas de produtos). Apesar disso, não há relatos de companhias transportadoras de petróleo e derivados que tenham implementado a técnica.

Observa-se que existem poucas implementações da técnica de reconciliação de dados para sistemas dinâmicos em tempo real em plantas industriais reais. Este tipo de aplicação pode ter um grande potencial para detecção de falhas de instrumentação ou de processo.

Nesse sentido, este trabalho contribui com o desenvolvimento da técnica de reconciliação de dados, uma vez que apresenta sua implementação e resultados obtidos em tempo real em um sistema de automação industrial de uma planta real de transporte e armazenamento de derivados de petróleo. Apresentam-se ainda, algumas questões práticas de implementação e de possíveis aplicações para detecção de falhas associadas à técnica de reconciliação de dados.

3. O SISTEMA REAL

Para aplicar a técnica de reconciliação de dados em tempo real, foi escolhido um terminal de transporte e armazenamento. Para a seleção do terminal foram adotadas as seguintes premissas:

- a) Redundância de medições, caracterizada por uma técnica de classificação de variáveis.
- b) Elevado grau de automação, isto é, boa instrumentação, sistemas de controle e de supervisão operando perfeitamente.
- c) Possibilidade de acesso aos dados em tempo real.

Após a avaliação de algumas unidades, foi escolhido para implementação deste trabalho um Terminal localizado na cidade de Ribeirão Preto – SP. O Terminal de Ribeirão Preto é responsável pelo recebimento de derivados de petróleo (diesel e gasolina) da refinaria REPLAN através de um poliduto (oleoduto que transporta múltiplos produtos). A gasolina e o diesel recebidos são armazenados em tanques específicos e, posteriormente, enviados para as companhias distribuidoras locais.

Alguns benefícios que justificam o uso da técnica de reconciliação de dados neste tipo de terminal são:

- a) Melhorar a qualidade das medições e assim efetuar um controle de estoque mais efetivo.
- b) Aplicar algoritmos de otimização em linha (para as bombas, por exemplo).
- c) Detecção de falhas de instrumentação (perda de calibração, precisão, problemas de incrustação próximos aos sensores, etc.).
- d) Detecção de falhas de processo como vazamentos ou válvulas que dêem passagem indevidamente – este último problema é especialmente crítico em terminais envolvidos com operação de polidutos, pois pode causar a contaminação de um tanque inteiro, implicando em sérias perdas econômicas.
- e) As medições de transferência de custódia serão beneficiadas direta ou indiretamente pelos motivos apresentados.

A Figura 8 apresenta um fluxograma simplificado das instalações físicas do Terminal de Ribeirão Preto. Os *tags* – mnemônicos para identificação de equipamentos e instrumentos – aparecem na figura para tanques e válvulas.

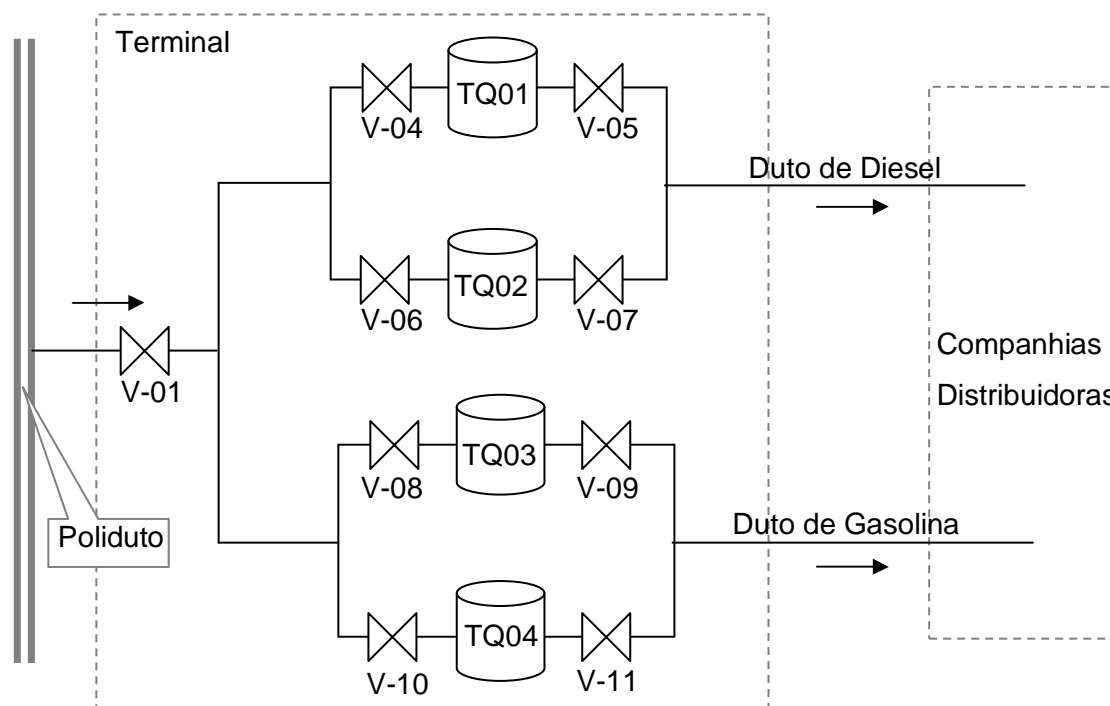


Figura 8 – Esquema simplificado das instalações físicas do terminal de Ribeirão Preto (SP).

No esquema da Figura 8, os tanques TQ01 e TQ02 são responsáveis pelo recebimento, armazenamento e envio de óleo diesel, enquanto que os tanques TQ03 e TQ04 são responsáveis pelas mesmas operações com gasolina. As setas indicam a direção e sentido do fluxo de produtos. As válvulas V-01 a V-11 são os equipamentos que realizam o alinhamento, isto é, direcionam os produtos para os destinos desejados. Outros equipamentos como bombas, tanques de alívio e auxiliares não foram representados neste esquema por simplicidade.

As válvulas do sistema são elementos essenciais para o reconhecimento de qual operação está ocorrendo e, portanto, fazem parte do modelo. Todas as válvulas representadas na Figura 8 possuem instrumentação para indicação de sua posição em tempo real.

3.1. Descrição das Operações

O terminal realiza basicamente três procedimentos operacionais descritos a seguir.

a) Operação de Recebimento – Neste tipo de operação o produto chega através do poliduto para o tanque correspondente. Exemplo: Recebimento de diesel no tanque TQ02. Neste caso, as válvulas V-01 e V-06 deverão permanecer abertas e as válvulas V-04, V-08, V10 deverão permanecer fechadas, para que o produto não seja enviado para outros tanques. A válvula V-07 também deverá estar fechada para o produto não escoar para as companhias distribuidoras (a não ser no caso de operação pulmão, descrita a seguir).

b) Operação de Envio – Operação em que um determinado tanque envia seu produto para uma companhia distribuidora. Exemplo: O tanque TQ04 envia gasolina para uma companhia. Neste caso, a válvula V-11 deverá permanecer aberta. Deverão permanecer fechadas as válvulas V-09, para impedir escoamento do produto do TQ03 na mesma direção, e a válvula V-10, para impedir entrada de produto no tanque (a não ser no caso de operação pulmão, descrita a seguir).

c) Operação Pulmão – Este tipo de operação é pouco comum e, sempre que possível, deve ser evitada. Neste caso, o tanque recebe e envia o produto ao mesmo tempo. Exemplo: O tanque TQ03 fazendo pulmão. Para esta operação, as válvulas V-01, V-04 e V-05 abertas. Válvulas V-07 (não permitir escoamento de outro tanque na mesma direção), V-06, V-08 e V-10 (não permitir a entrada do produto em outros tanques) fechadas.

Existem alguns cuidados operacionais que são levados em conta para que o transporte e armazenamento dos produtos sejam feitos de modo que as bateladas – volumes de produtos destinados a um cliente específico – sejam identificadas, medidas e rastreadas da melhor forma possível. Para melhor entendimento destes cuidados operacionais, foram definidas quatro regras que devem ser observadas, descritas a seguir.

Regra operacional 1 – Deve ser evitada a operação pulmão. Um determinado tanque só deve enviar produto depois de a qualidade do produto que ele está armazenando seja caracterizada, e assim observar se ele atende às especificações contratuais estabelecida com o cliente. Portanto, o procedimento mais adequado é encher o tanque completamente, caracterizar a qualidade do produto e, quando necessário, enviá-lo para uma companhia distribuidora.

Regra operacional 2 – Dois tanques não podem enviar o mesmo produto para a mesma companhia, ao mesmo tempo. Este procedimento evita que tanques com produtos de diferentes especificações misturem seus conteúdos no cliente. Além disso, permite melhor controle de volumes enviados. Se for necessário o envio de mais de um tanque, deve-se aguardar o esvaziamento completo do primeiro, para então iniciar o envio pelo segundo.

Regra operacional 3 – Dois ou mais tanques não podem receber produto ao mesmo tempo. Cada batelada de produto possui suas próprias especificações, assim evita-se misturar produtos com diferentes qualidades. Além de permitir rastrear alguma batelada recebida fora de especificação, proveniente da refinaria.

Regra operacional 4 – Os tanques não podem operar com produtos que não aqueles para os quais foram designados.

Operacionalmente, também é possível realizar uma transferência entre dois tanques com o mesmo produto, através de dutos não representados na Figura 8. Este tipo de operação, porém, é muito rara e não será considerada neste trabalho.

3.2. Variáveis Medidas

O terminal utilizado para esta implementação possui instrumentação com medições de diversas variáveis operacionais. A Figura 9 indica os locais onde existem instrumentos instalados.

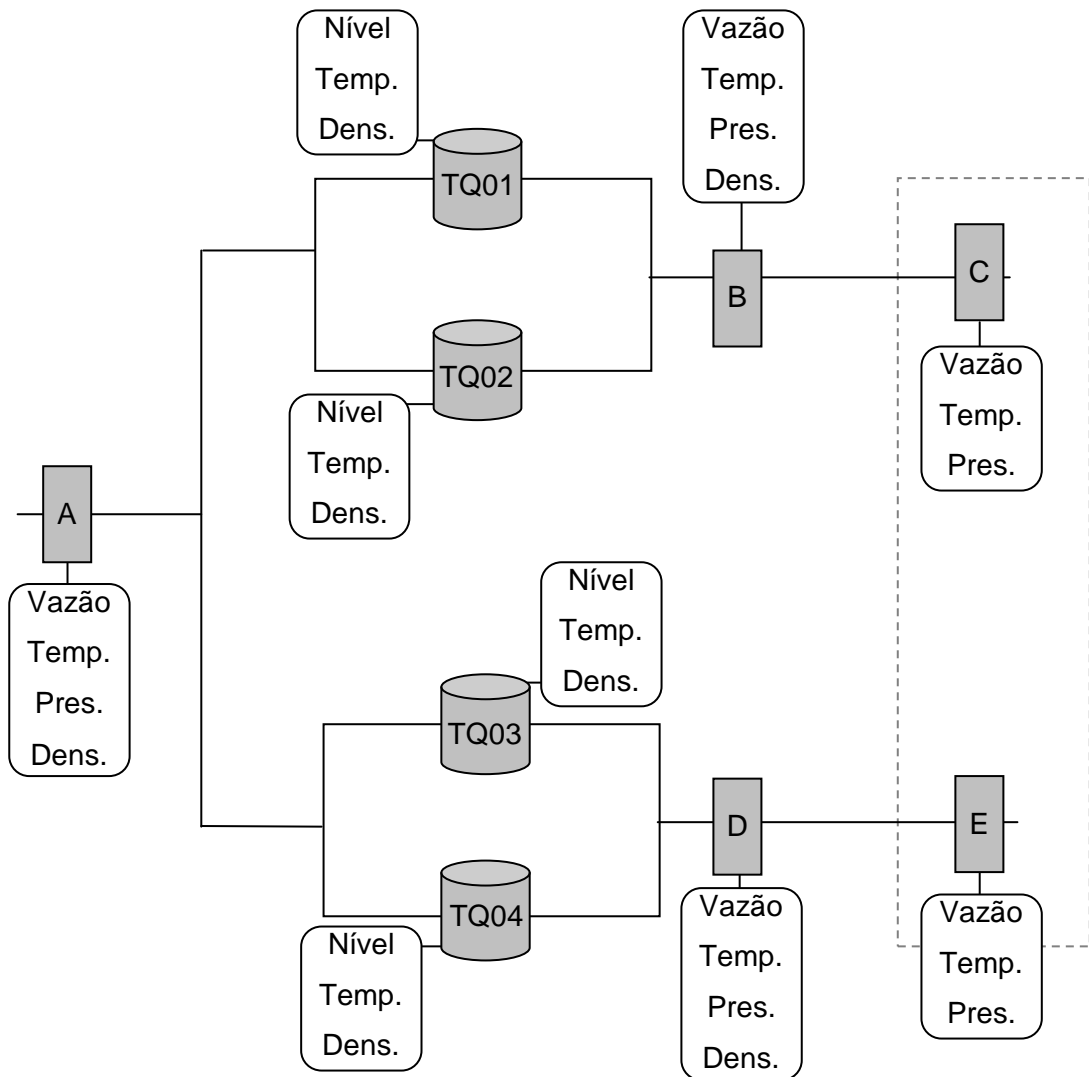


Figura 9 – Indicação dos locais com instrumentação instalada no terminal. (Temp. = temperatura, Pres. = pressão, Dens. = densidade).

Conforme a Figura 9, temos 9 locais com instrumentação instalada, sendo 4 locais em tanques (TQ01 a TQ04) e 5 locais em dutos (indicados com as letras A até E), totalizando 30 (trinta) variáveis medidas.

3.2.1. Descrição da Instrumentação

A descrição aqui presente é sucinta, apenas para conhecimento básico dos elementos sensores do sistema. Livros específicos sobre instrumentação contêm maiores detalhes sobre os instrumentos citados (ver LIPTÁK, 2003).

Medições nos Tanques (TQ01, TQ02, TQ03 e TQ04):

- a) Nível: sensor servo-deslocador
- b) Temperatura: sensor Pt100
- c) Densidade: sensor tipo flutuador

Medições no Duto de Entrada (local A):

- a) Vazão volumétrica: sensor tipo ultrassônico
- b) Temperatura: sensor resistivo Pt100
- c) Pressão: sensor capacitivo
- a) Densidade: sensor tipo tubo vibrante

Medições na saída do Duto de Diesel (local B):

- a) Vazão volumétrica: sensor tipo turbina
- b) Temperatura: sensor resistivo Pt100
- c) Pressão: sensor capacitivo
- a) Densidade: sensor tipo tubo vibrante

Medições na chegada do Duto de Diesel (local C):

- a) Vazão volumétrica: sensor tipo ultrassônico
- b) Temperatura: sensor resistivo Pt100
- c) Pressão: sensor de diafragma

Medições na saída do Duto de Gasolina (local D):

- a) Vazão volumétrica: sensor tipo turbina
- b) Temperatura: sensor resistivo Pt100
- c) Pressão: sensor capacitivo
- a) Densidade: sensor tipo tubo vibrante

Medições na chegada do Duto de Gasolina (local E):

- a) Vazão volumétrica: sensor tipo ultrassônico
- b) Temperatura: sensor resistivo Pt100
- c) Pressão: sensor capacitivo

Instrumentação nas Válvulas:

As válvulas do sistema possuem instrumentos atuadores que permitem a operação remota e a indicação de estado (aberta, fechada, transição, falha).

3.3. Descrição do Sistema de Automação

O sistema de automação real do terminal escolhido para a aplicação da reconciliação de dados possui a arquitetura apresentada na Figura 10:

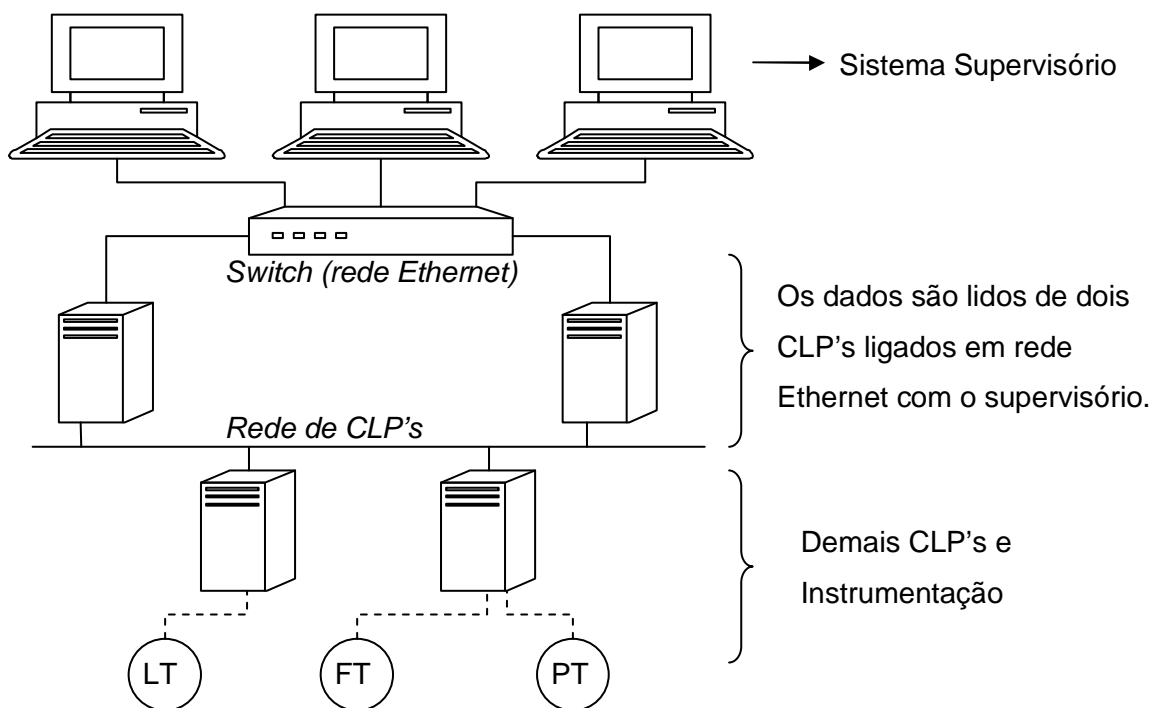


Figura 10 – Arquitetura do sistema de automação do terminal escolhido

Conforme apresentado na Figura 10, o Terminal de Ribeirão Preto possui uma rede de CLPs que concentra as informações provenientes da instrumentação em dois CLPs centralizadores. Estes CLPs centralizadores possuem uma conexão de rede Ethernet que os interliga ao Sistema Supervisório. O Sistema Supervisório, por sua vez, lê os dados dos dois CLPs centralizadores pela rede Ethernet. Através de três computadores tipo PC, os operadores do terminal são capazes de ler as variáveis do processo, enviar comandos para o campo, ajustar *set-points*, visualizar gráficos, etc. Apresenta-se, abaixo, um resumo das especificações dos componentes do sistema:

- a) CLP's: GE Fanuc 90-30
- b) Rede de CLP's: Genius
- c) Sistema Supervisório: iFIX 3.0

d) Rede de supervisão: Ethernet 10/100 Mbps

O sistema de reconciliação de dados foi implementado nos computadores tipo PC que compõem o Sistema Supervisório. O *software* iFIX (sistema supervisório utilizado neste terminal) é, portanto, a fonte direta de informação para o algoritmo.

3.4. Modelagem Matemática

O sistema de transporte e armazenamento apresentado foi modelado para formulação do problema de reconciliação de dados. Foram consideradas as características físicas e operacionais já descritas para elaboração deste modelo.

Conforme as premissas operacionais apresentadas, dois tanques não podem enviar/receber produtos de uma mesma origem/destino. Assim, o modelo utilizado apresenta o balanço de massa em torno de cada um dos tanques, considerando que eles têm operações independentes e que as quantidades movimentadas por cada um deles não influenciam as operações dos demais tanques.

Para que o modelo agregue a informação de qual tanque está enviando ou recebendo, foram consideradas as posições das válvulas. Assim, foi criado o conceito de índice de válvula (i_N), um elemento binário cujo valor é igual a 1 se a operação ocorre e 0 se ela não ocorre. O valor do índice de válvula é definido pelas válvulas que estão abertas no momento da operação, pois, conforme já apresentado, estas definirão a operação corrente (ver Figura 8). A Tabela 1 apresenta os índices de válvulas adotados para o terminal.

Por exemplo: O tanque TQ02 está recebendo produto. Neste momento, as válvulas V-01 e V-06 devem estar abertas simultaneamente (Figura 8). O sistema possui esta informação em tempo real, pois as válvulas possuem instrumentos que indicam suas posições, e atribui o valor 1 para o índice i_3 .

No exemplo dado, os demais tanques não podem estar recebendo, conforme as regras operacionais apresentadas. Portanto é esperado que as válvulas V-04, V-08 e V-10 estejam fechadas. Os índices i_1 , i_5 e i_7 receberão valor 0. Consequentemente,

o conjunto de índices i_1 , i_3 , i_5 e i_7 só poderá apresentar um elemento igual a 1 em um dado instante, com os demais assumindo o valor 0. Da mesma forma, considerando as regras operacionais, os índices i_2 e i_4 não podem apresentar o valor 1 simultaneamente, assim como os índices i_6 e i_8 . As operações pulmão são raras, mas podem acontecer. No caso de uma operação pulmão no TQ03, por exemplo, os índices i_5 e i_6 devem assumir o valor 1 simultaneamente. Cabe ressaltar que as posições das válvulas mudam dinamicamente, conforme conveniência operacional. Portanto, os índices de válvulas têm seus valores variáveis no tempo.

Tabela 1 – Índices de válvula para as operações do terminal

Operação	Válvulas Abertas	Índice
TQ01 recebendo	V-01 e V-04	i_1
TQ01 enviando	V-05	i_2
TQ02 recebendo	V-01 e V-06	i_3
TQ02 enviando	V-07	i_4
TQ03 recebendo	V-01 e V-08	i_5
TQ03 enviando	V-09	i_6
TQ04 recebendo	V-01 e V-10	i_7
TQ04 enviando	V-11	i_8

A seguir estão apresentados os modelos de balanço de massa para os quatro tanques e para os dutos de envio de diesel e gasolina. Os locais de medição representados na Figura 9 (de A até E) foram utilizados para identificação das medidas.

Balanço de massa para o Tanque TQ01:

$$\frac{dM_{TQ01}}{dt} = i_1 \cdot \dot{m}_A - i_2 \cdot \dot{m}_B \quad (9)$$

onde:

M_{TQ01} : massa no tanque TQ01

\dot{m}_A : vazão mássica no local A

\dot{m}_B : vazão mássica no local B

i_1 : índice de válvula 1

i_2 : índice de válvula 2

Balanco de massa para o Tanque TQ02:

$$\frac{dM_{TQ02}}{dt} = i_3 \cdot \dot{m}_A - i_4 \cdot \dot{m}_B \quad (10)$$

onde:

M_{TQ02} : massa no tanque TQ02

\dot{m}_A : vazão mássica no local A

\dot{m}_B : vazão mássica no local B

i_3 : índice de válvula 3

i_4 : índice de válvula 4

Balanco de massa para o Tanque TQ03:

$$\frac{dM_{TQ03}}{dt} = i_5 \cdot \dot{m}_A - i_6 \cdot \dot{m}_D \quad (11)$$

onde:

M_{TQ03} : massa no tanque TQ03

\dot{m}_A : vazão mássica no local A

\dot{m}_D : vazão mássica no local D

i_5 : índice de válvula 5

i_6 : índice de válvula 6

Balanço de massa para o Tanque TQ04:

$$\frac{dM_{TQ04}}{dt} = i_7 \cdot \dot{m}_A - i_8 \cdot \dot{m}_D \quad (12)$$

onde:

M_{TQ04} : massa no tanque TQ04

\dot{m}_A : vazão mássica no local A

\dot{m}_D : vazão mássica no local D

i_7 : índice de válvula 7

i_8 : índice de válvula 8

Balanço de massa no duto de envio de diesel:

$$\dot{m}_B = \dot{m}_C \quad (13)$$

onde:

\dot{m}_B : vazão mássica no local B

\dot{m}_C : vazão mássica no local C

Balanço de massa no duto de envio de gasolina:

$$\dot{m}_D = \dot{m}_E \quad (14)$$

onde:

\dot{m}_D : vazão mássica no local D

\dot{m}_E : vazão mássica no local E

As seis equações de balanço de massa apresentadas – Equações (9) a (14) – requerem medições de massa e vazão mássica. Entretanto, a instrumentação do terminal permite apenas medições de volume e vazão volumétrica. Portanto, para tornar possível a comparação dos resultados calculados com o modelo com os dados obtidos, as equações apresentadas foram modificadas para utilizarem volumes e vazões volumétricas. Para realizar esta transformação, todas as vazões volumétricas e volumes foram corrigidos para condições de referência: temperatura de 20°C e pressão de 1 atm.

Sabendo que a densidade no tanque D_{TQ} é dada por:

$$D_{TQ} = \frac{m_{TQ}}{V_{TQ}} \quad (15)$$

onde V_{TQ} representa o volume no tanque TQ.

Temos que, para uma condição de referência, a seguinte equação é válida:

$$D_{TQ}^{corr} = \frac{m_{TQ}}{V_{TQ}^{corr}} \quad (16)$$

onde:

V_{TQ}^{corr} : volume corrigido no tanque TQ

D_{TQ}^{corr} : densidade corrigida no tanque TQ

De forma análoga, temos para as vazões:

$$D_L^{corr} = \frac{\dot{m}_L}{q_L^{corr}} \quad (17)$$

onde:

\dot{m}_L^{corr} : vazão mássica no local L

q_L^{corr} : vazão volumétrica corrigida no local L

Substituindo as massas e vazões mássicas nas Equações (9) a (14), temos a seguinte equação geral:

$$\frac{d(D_{TQ}^{corr} \cdot V_{TQ}^{corr})}{dt} = i_{N1} \cdot D_{L1}^{corr} \cdot q_{L1}^{corr} - i_{N2} \cdot D_{L2}^{corr} \cdot q_{L2}^{corr} \quad (18)$$

onde os subscritos representam os tanques e os locais de medição de forma geral.

Considerando que, para uma mesma operação, as densidades corrigidas são constantes ao longo e iguais em todos os locais de medição, uma vez que o produto movimentado é o mesmo, podemos reescrever a equação (18) da seguinte forma:

$$\frac{D^{corr} \cdot d(V_{TQ}^{corr})}{dt} = i_{N1} \cdot D^{corr} \cdot q_{L1}^{corr} - i_{N2} \cdot D^{corr} \cdot q_{L2}^{corr} \quad (19)$$

onde D^{corr} é a densidade corrigida do produto movimentado, que pode ser cortada da equação.

As Equações (9) a (14) transformam-se então nas equações a (20) a (25):

$$\frac{dV_{TQ01}^{corr}}{dt} = i_1 \cdot q_A^{corr} - i_2 \cdot q_B^{corr} \quad (20)$$

$$\frac{dV_{TQ02}^{corr}}{dt} = i_3 \cdot q_A^{corr} - i_4 \cdot q_B^{corr} \quad (21)$$

$$\frac{dV_{TQ02}^{corr}}{dt} = i_5 \cdot q_A^{corr} - i_6 \cdot q_D^{corr} \quad (22)$$

$$\frac{dV_{TQ04}^{corr}}{dt} = i_7 \cdot q_A^{corr} - i_8 \cdot q_B^{corr} \quad (23)$$

$$q_B^{corr} = q_C^{corr} \quad (24)$$

$$q_D^{corr} = q_E^{corr} \quad (25)$$

Para realizar a correção dos volumes e vazões volumétricas para temperatura de 20° C e pressão de 1 atm, é utilizada a metodologia aplicada oficialmente para comercialização de derivados de petróleo desde 1970, quando o então Conselho Nacional de Petróleo aprovou as tabelas publicadas pelo *Institute of Petroleum* em 1963. Estas tabelas, por sua vez, são baseadas na edição API (*American Petroleum Institute*) de 1952, também conhecida como edição histórica.

Esta metodologia de correção utiliza o fator de correção *CCF*, conforme as equações apresentadas a seguir. O cálculo do fator de correção está descrito na Seção 3.4.3.

$$V_{TQ}^{corr} = V_{TQ} \cdot CCF(T_{TQ}, 1 \text{ atm}, D_{TQ}) \quad (26)$$

$$q_L^{corr} = q_L \cdot CCF(T_L, P_L, D_L) \quad (27)$$

onde:

V_{TQ}^{corr} : volume corrigido no tanque TQ

V_{TQ} : volume no tanque TQ

q_L^{corr} : vazão corrigida no local L

q_L : vazão no local L

CCF : fator de correção (temperatura 20° C e pressão 1 atm)

T_{TQ} : temperatura no tanque TQ

D_{TQ} : densidade no tanque TQ

T_L : temperatura no local L

P_L : pressão no local L

D_L : densidade no local L

O fator de correção CCF é calculado em função dos valores de temperatura, pressão e densidade no local medido. Os tanques do terminal operam a pressão atmosférica; portanto, é feita a consideração de que sua pressão é de 1 atm.

Assim, todas as variáveis necessárias para as equações de balanço, medidas nos tanques e nos dutos, estão disponíveis. Com exceção dos locais C e E, que não possuem medida de densidade.

Nestes casos, considera-se que a densidade a 20° C e 1 atm no local B é igual à do local C. Da mesma forma, considera-se que a densidade a 20° C e 1 atm no local D é igual à do local E, uma vez que os produtos escoados são comuns para estes locais. As densidades corrigidas nos locais B e D, por sua vez, são obtidas utilizando o mesmo fator de correção:

$$D_L^{corr} = D_L / CCF(T_L, P_L, D_L) \quad (28)$$

Os locais C e E têm, portanto, as seguintes densidades corrigidas:

$$D_C^{corr} = D_B / CCF(T_B, P_B, D_B) \quad (29)$$

$$D_E^{corr} = D_D / CCF(T_D, P_D, D_D) \quad (30)$$

O cálculo da vazão corrigida nos locais C e E é feito então com as densidades corrigidas apresentadas nas Equações (29) e (30), uma vez que o algoritmo para obtenção do fator CCF também admite uso de densidade corrigida. Cabe observar que as equações usadas para correção dos volumes e cálculo do fator CCF conferem uma natureza não-linear ao modelo do processo.

3.4.1. Discretização do Modelo

Em função da dinâmica presente nas equações de acúmulo de produto nos tanque e de sua característica não-linear, o modelo foi discretizado. Aplicando-se o método de Euler explícito para as Equações (20) a (25) é possível escrever:

$$V_{TQ01,k}^{corr} = V_{TQ01,k-1}^{corr} + i_{1,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{A,k}^{corr} + q_{A,k-1}^{corr})}{2} - i_{2,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{B,k}^{corr} + q_{B,k-1}^{corr})}{2} \quad (31)$$

$$V_{TQ02,k}^{corr} = V_{TQ02,k-1}^{corr} + i_{3,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{A,k}^{corr} + q_{A,k-1}^{corr})}{2} - i_{4,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{B,k}^{corr} + q_{B,k-1}^{corr})}{2} \quad (32)$$

$$V_{TQ03,k}^{corr} = V_{TQ03,k-1}^{corr} + i_{5,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{A,k}^{corr} + q_{A,k-1}^{corr})}{2} - i_{6,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{D,k}^{corr} + q_{D,k-1}^{corr})}{2} \quad (33)$$

$$V_{TQ04,k}^{corr} = V_{TQ04,k-1}^{corr} + i_{7,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{A,k}^{corr} + q_{A,k-1}^{corr})}{2} - i_{8,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{D,k}^{corr} + q_{D,k-1}^{corr})}{2} \quad (34)$$

$$q_{B,k}^{corr} = q_{C,k}^{corr} \quad (35)$$

$$q_{D,k}^{corr} = q_{E,k}^{corr} \quad (36)$$

onde t_k representa o valor do tempo na medição k ; portanto, $t_k - t_{k-1}$ representa o período de tempo de amostragem.

Nas Equações (31) a (36), o subscrito k representa a medição da variável na posição k da janela de tempo. Cabe ressaltar que os índices de válvulas também são variáveis no tempo e, portanto, também receberam o subscrito. O modelo proposto admite implicitamente que a posição da válvula se comporta na forma de pulsos de duração $(t_k - t_{k-1})$ e valor i_k .

3.4.2. Cálculo do Volume dos Tanques

A modelagem matemática apresentada é baseada no volume dos tanques. Entretanto, a instrumentação instalada (vide Seção 3.2) permite apenas a medição do nível dos tanques. Portanto, deve ser utilizada uma tabela de arqueação para determinado tanque TQ ($TabArq_{TQ}$), que permite o cálculo do volume a partir do nível, conforme a equação

$$V_{TQ,k} = TabArq_{TQ}(L_{TQ,k}) \quad (37)$$

onde $V_{TQ,k}$ é o volume do tanque TQ na amostra k , $L_{TQ,k}$ representa o nível do tanque TQ na amostra k .

Tabela 2 – Exemplo de uma tabela de arqueação para tanque de armazenamento de petróleo ou derivados.

Tabela de Arqueação – $TabArq_{TQ}$				
Nível (centímetros)	Volume (litros)		Nível (centímetros)	Volume (litros)
0	169.280		195	2.184.989
175	1.978.247		196	2.195.324
176	1.988.584		197	2.205.661
177	1.998.921		198	2.215.998
178	2.009.258		199	2.226.335
179	2.019.595		200	2.236.671
180	2.029.932		201	2.247.008
181	2.040.269		202	2.257.345
182	2.050.606		203	2.267.682
183	2.060.943		204	2.278.019
184	2.071.280		205	2.288.356
185	2.081.617		206	2.298.693
186	2.091.954		207	2.309.030
187	2.102.291		208	2.319.367
188	2.112.628		209	2.329.704
189	2.122.965		210	2.340.041
190	2.133.302		294	3.208.346
191	2.143.639		592	6.290.486
192	2.153.976		890	9.374.357
193	2.164.313		1188	12.460.463
194	2.174.650		1458	15.258.022

A tabela de arqueação de um tanque é levantada periodicamente, normalmente durante alguma manutenção deste equipamento. Neste momento, o tanque recebe o chamado *certificado de arqueação* das entidades competentes de metrologia legal. Estas tabelas de arqueação são individuais para cada tanque e são constituídas por uma série de entradas de níveis com seus volumes correspondentes. Para níveis medidos em valores intermediários, o volume deve ser obtido por interpolação linear. A Tabela 2 apresenta um exemplo de tabela de arqueação para um tanque de armazenamento.

3.4.3. Método de Cálculo do Fator de Correção

O cálculo do fator *CCF* equivale a uma equação de estado empírica desenvolvida para hidrocarbonetos, a partir de uma amostra representativa definida pela API (*American Petroleum Institute*). O fator *CCF* relaciona o volume de um hidrocarboneto com a temperatura e a pressão, tomando por base o volume medido em uma condição padrão. O fator *CCF* é calculado pelo produto de dois outros fatores: o fator de correção de temperatura CTL_{20} e o fator de correção de pressão *CPL*.

Cálculo do Fator de Correção de Temperatura

O cálculo do Fator de Correção de Temperatura (CTL_{20}) é realizado utilizando a metodologia apresentada na resolução N° 6 do extinto Conselho Nacional de Petróleo (CNP, 1970).

Inicialmente é calculado o valor da densidade corrigida a 20° C, a partir dos valores de temperatura e densidade na temperatura observada, utilizando a seguinte equação:

$$D_{20} = \frac{D_T - P_1 \cdot (T - 20) - P_3 \cdot (T - 20)^2}{1 + P_2 \cdot (T - 20) + P_4 \cdot (T - 20)^2} \quad (38)$$

onde:

D_{20} : Densidade a 20° C

D_T : Densidade a temperatura T

T : Temperatura

P_1, P_2, P_3 e P_4 : Parâmetros do algoritmo

Os parâmetros do algoritmo (P_1, P_2, P_3 e P_4) são calculados a partir de constantes (a_1, a_2, b_1 e b_2) definidas conforme a faixa de densidade corrigida a 20° C, o que torna o cálculo iterativo. A Tabela 3 apresenta os valores das constantes para cada faixa de densidade corrigida.

Tabela 3 – Constantes para cálculo de fator de correção, definidas pela faixa da densidade corrigida a 20° C.

D_{20}		a_1	a_2	b_1	b_2
Mín	Máx				
0,635	0,655	-0,001077	0,00085	-0,00000049	0,0000006
0,655	0,675	-0,001011	0,00075	-0,00000049	0,0000006
0,675	0,695	-0,000977	0,0007	-0,00000049	0,0000006
0,695	0,746	-0,001005	0,00074	-0,00000049	0,0000006
0,746	0,766	-0,001238	0,00105	-0,00000049	0,0000006
0,766	0,786	-0,001084	0,00085	-0,00000049	0,0000006
0,786	0,806	-0,000965	0,0007	-0,00000049	0,0000006
0,806	0,826	-0,0008435	0,00055	-0,00000049	0,0000006
0,826	0,846	-0,000719	0,0004	-0,00000049	0,0000006
0,846	0,871	-0,000617	0,00028	-0,00000049	0,0000006
0,871	0,896	-0,000512	0,00016	-0,00000049	0,0000006
0,896	0,996	-0,0003948	0,00003	-0,00000049	0,0000006
0,996	1,000	-0,0005426	0,0001778	0,00000231	-0,0000022

As Equações (39) a (42) apresentam as expressões para obtenção dos parâmetros P_1, P_2, P_3 e P_4 , a partir das constantes a_1, a_2, b_1 e b_2 .

$$P_1 = \frac{9}{5} \cdot 0,9990420 \cdot \left[a_1 + 16 \cdot b_1 - \frac{(a_2 + 16 \cdot b_2) \cdot (8 \cdot a_1 + 64 \cdot b_1)}{1 + 8 \cdot a_2 + 64 \cdot b_2} \right] \quad (39)$$

$$P_2 = \frac{9}{5} \cdot \frac{a_2 + 16 \cdot b_2}{1 + 8 \cdot a_2 + 64 \cdot b_2} \quad (40)$$

$$P_3 = \frac{81}{25} \cdot 0,9990420 \cdot \left[b_1 - \frac{b_2 \cdot (8 \cdot a_1 + 64 \cdot b_1)}{1 + 8 \cdot a_2 + 64 \cdot b_2} \right] \quad (41)$$

$$P_4 = \frac{81}{25} \cdot \frac{b_2}{1 + 8 \cdot a_2 + 64 \cdot b_2} \quad (42)$$

Uma vez obtida a densidade corrigida a 20° C (D_{20}), o cálculo do fator de correção da temperatura a 20° C (CTL_{20}) é dado pela seguinte equação:

$$CTL_{20} = 1 + P_2 \cdot (T - 20) + P_4 \cdot (T - 20)^2 + \frac{P_1 \cdot (T - 20) - P_3 \cdot (T - 20)^2}{D_{20}} \quad (43)$$

Os parâmetros P_1 , P_2 , P_3 e P_4 são os mesmos utilizados para obtenção da densidade corrigida.

Cálculo do Fator de Correção de Pressão

O cálculo do Fator de Correção de Pressão (CPL) é baseado na metodologia apresentada no Capítulo 11.2.1M da norma API 2540 (1984). Inicialmente deve ser obtida a densidade corrigida 15° C (D_{15}), através da equação apresentada a seguir:

$$D_{15} = \frac{D_{20} + 5 \cdot P_{1,P} + 25 \cdot P_{3,P}}{1 + 5 \cdot P_{2,P} + 25 \cdot P_{4,P}} \quad (44)$$

Os novos parâmetros $P_{1,P}$, $P_{2,P}$, $P_{3,P}$ e $P_{4,P}$ são calculados com base nas mesmas constantes da Tabela 3.

$$P_{1,P} = \frac{9}{5} \cdot 0,9990420 \cdot \left[\frac{(a_2 - 2 \cdot b_2) \cdot (-a_1 + b_1)}{1 - a_2 + b_2} - (a_1 - 2 \cdot b_1) \right] \quad (45)$$

$$P_{2,P} = \frac{9}{5} \cdot \frac{a_2 - 2 \cdot b_2}{1 - a_2 + b_2} \quad (46)$$

$$P_{3,P} = \frac{81}{25} \cdot 0,9990420 \cdot \left[\frac{b_2 \cdot (-a_1 + b_1)}{1 - a_2 + b_2} - b_1 \right] \quad (47)$$

$$P_{4,P} = \frac{81}{25} \cdot \frac{b_2}{1 - a_2 + b_2} \quad (48)$$

Após a obtenção da densidade corrigida a 15° C (D_{15}), e utilizando a temperatura medida em ° C (T), calcula-se o fator de compressibilidade:

$$F = e^{\left(-1,62080 + 0,00021592 \cdot T + \frac{0,87096}{D_{15}^2} + \frac{0,0042092 \cdot T}{D_{15}^2} \right)} \quad (49)$$

Com o fator de compressibilidade e a pressão manométrica (P_m), medida em kPa, é obtido o fator de correção de pressão:

$$CPL = \frac{1}{1 - \frac{F}{10^6} \cdot P_m} \quad (50)$$

Finalmente, o fator de correção CCF é calculado:

$$CCF = CTL_{20} \cdot CPL \quad (51)$$

4. DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO

4.1. Janela de Tempo

A implementação da técnica de reconciliação de dados em tempo real foi realizada utilizando-se a abordagem de janela de tempo, também chamada de janela móvel ou horizonte móvel (JANG *et al.*, 1986, LIEBMAN *et al.*, 1992 e RAO e RAWLINGS, 2002). A janela de tempo é um recurso muito empregado em sistemas computacionais e consiste na amostragem das variáveis de um processo em períodos regulares e no armazenamento desses dados na forma de uma fila, também conhecida por FIFO (*first in, first out*). Esta fila caracteriza-se pela eliminação do registro mais antigo a cada vez que um novo registro é obtido. Desta forma, o tamanho da janela permanece sempre o mesmo.

Esta abordagem é comumente aplicada em problemas de reconciliação de dados de natureza dinâmica ou não-linear, além de ser particularmente útil em aplicações de tempo real, uma vez que reduz o tamanho do problema e limita os resultados obtidos aos eventos mais recentes.

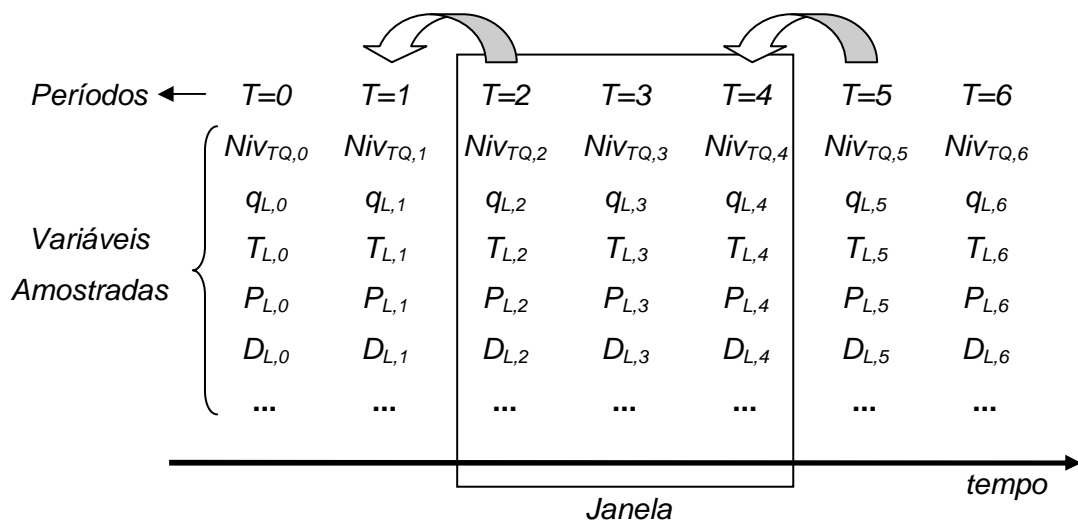


Figura 11 – Exemplo de Janela de Tempo com três amostras.

A Figura 11 apresenta um exemplo de janela de tempo para o caso de três amostras por janela. No exemplo, o número de variáveis presentes na janela de tempo é igual a três vezes o número de variáveis amostradas. Ainda para o exemplo de três amostras por janela, o tamanho total da janela (tempo total) é igual a três vezes o período de amostragem. Questões de dimensionamento da janela de tempo serão apresentadas na Secção 4.6.

4.2. Formulação do Problema

O problema de reconciliação de dados em tempo real para o Terminal de Ribeirão Preto foi formulado utilizando-se a função objetivo baseada na máxima verossimilhança e distribuição normal, conforme Equação (8), sujeita ao modelo do processo como restrição.

São reconciliadas todas as 30 variáveis medidas apresentadas na Figura 9. Considerando que o número de amostras por variável em cada período de amostragem é igual a 12 (vide Secção 4.6, sobre o dimensionamento da janela), então o sistema trabalha com 360 medições por janela de tempo. Estas medições foram divididas em entradas e saídas.

a) Entradas:

- Níveis iniciais dos quatro tanques (4 medições)
- Temperaturas dos quatro tanques (48 medições)
- Densidades dos quatro tanques (48 medições)
- Vazões nos locais A, B e D (36 medições)
- Temperatura no local A, B, C, D e E (60 medições)
- Pressões nos locais A, B, C, D e E (60 medições)
- Densidades no local A, B e C (36 medições)

Total: 292 medições

Desta forma temos um vetor de entradas representado por

$$\mathbf{x}^M = \begin{bmatrix} L_{TQ01,1} \cdots L_{TQ04,1} & T_{TQ01,1} \cdots T_{TQ04,12} & P_{TQ01,1} \cdots P_{TQ04,12} \\ q_{A,1} \cdots q_{A,12} & q_{B,1} \cdots q_{B,12} & q_{D,1} \cdots q_{D,12} \\ T_{A,1} \cdots T_{E,12} & P_{A,1} \cdots P_{E,12} & D_{A,1} \cdots D_{E,12} \end{bmatrix}_{1 \times 292}^T \quad (52)$$

b) Saídas:

- Níveis dos quatro tanques, exceto os iniciais (44 medições)

- Vazões nos locais C e E (24 medições)

Total: 68 medições

O vetor de saídas pode ser representado por

$$\mathbf{y}^M = \begin{bmatrix} L_{TQ01,2} \cdots L_{TQ01,12} & L_{TQ02,2} \cdots L_{TQ02,12} & L_{TQ03,2} \cdots L_{TQ03,12} \\ L_{TQ04,2} \cdots L_{TQ04,12} & q_{C,1} \cdots q_{C,12} & q_{E,1} \cdots q_{E,12} \end{bmatrix}_{1 \times 68}^T \quad (53)$$

A formulação do problema de reconciliação de dados para as entradas e saídas dadas pode ser representada como

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{y}} \mathbb{F} = (\mathbf{x}^M - \mathbf{x})^T \mathbf{V}_x^{-1} (\mathbf{x}^M - \mathbf{x}) + (\mathbf{y}^M - \mathbf{y})^T \mathbf{V}_y^{-1} (\mathbf{y}^M - \mathbf{y}) \quad (54)$$

sujeito a

$$q_B^{corr} = q_B \cdot CCF(T_B, P_B, D_B)$$

$$q_{C,k}^{corr} = q_{B,k}^{corr}$$

$$D_C^{corr} = D_B / CCF(T_B, P_B, D_B)$$

$$q_C = q_C^{corr} / CCF(T_C, P_C, D_C^{corr})$$

$$q_D^{corr} = q_D \cdot CCF(T_D, P_D, D_D)$$

$$q_{E,k}^{corr} = q_{D,k}^{corr}$$

$$D_E^{corr} = D_D / CCF(T_D, P_D, D_D)$$

$$q_E = q_E^{corr} / CCF(T_E, P_E, D_E^{corr})$$

$$q_A^{corr} = q_A \cdot CCF(T_A, P_A, D_A)$$

$$V_{TQ,1} = TabArq_{TQ}(L_{TQ,1})$$

$$V_{TQ}^{corr} = V_{TQ} \cdot CCF(T_{TQ}, 1 \text{ atm}, D_{TQ})$$

$$V_{TQ01,k}^{corr} = V_{TQ01,k-1}^{corr} + i_{1,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{A,k}^{corr} + q_{A,k-1}^{corr})}{2} - i_{2,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{B,k}^{corr} + q_{B,k-1}^{corr})}{2}$$

$$V_{TQ02,k}^{corr} = V_{TQ02,k-1}^{corr} + i_{3,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{A,k}^{corr} + q_{A,k-1}^{corr})}{2} - i_{4,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{B,k}^{corr} + q_{B,k-1}^{corr})}{2}$$

$$V_{TQ03,k}^{corr} = V_{TQ03,k-1}^{corr} + i_{5,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{A,k}^{corr} + q_{A,k-1}^{corr})}{2} - i_{6,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{D,k}^{corr} + q_{D,k-1}^{corr})}{2}$$

$$V_{TQ04,k}^{corr} = V_{TQ04,k-1}^{corr} + i_{7,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{A,k}^{corr} + q_{A,k-1}^{corr})}{2} - i_{8,k} \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdot \frac{(q_{D,k}^{corr} + q_{D,k-1}^{corr})}{2}$$

$$V_{TQ} = V_{TQ}^{corr} / CCF(T_{TQ}, 1 \text{ atm}, D_{TQ})$$

$$L_{TQ,k} = TabArq_{TQ}(V_{TQ,k})$$

que são as equações que descrevem o modelo do processo.

4.3. Técnica de Minimização

A técnica de minimização usada está baseada no método Gauss-Newton, como descrito por ANDERSON *et al.* (1978). Este método é bem adequado para funções quadráticas e utiliza a aproximação de Gauss para obtenção da matriz *Hessiana*, a matriz de derivadas segundas que caracteriza a concavidade do sistema. Para o cálculo de derivadas, o método numérico proposto utiliza a técnica das diferenças finitas centrais.

A resolução do problema é feita de forma seqüencial, isto é, o cálculo das saídas a partir das entradas e do modelo e ocorre em uma etapa diferente à solução da função objetivo, conforme está representado no fluxo de dados da minimização na Figura 12.

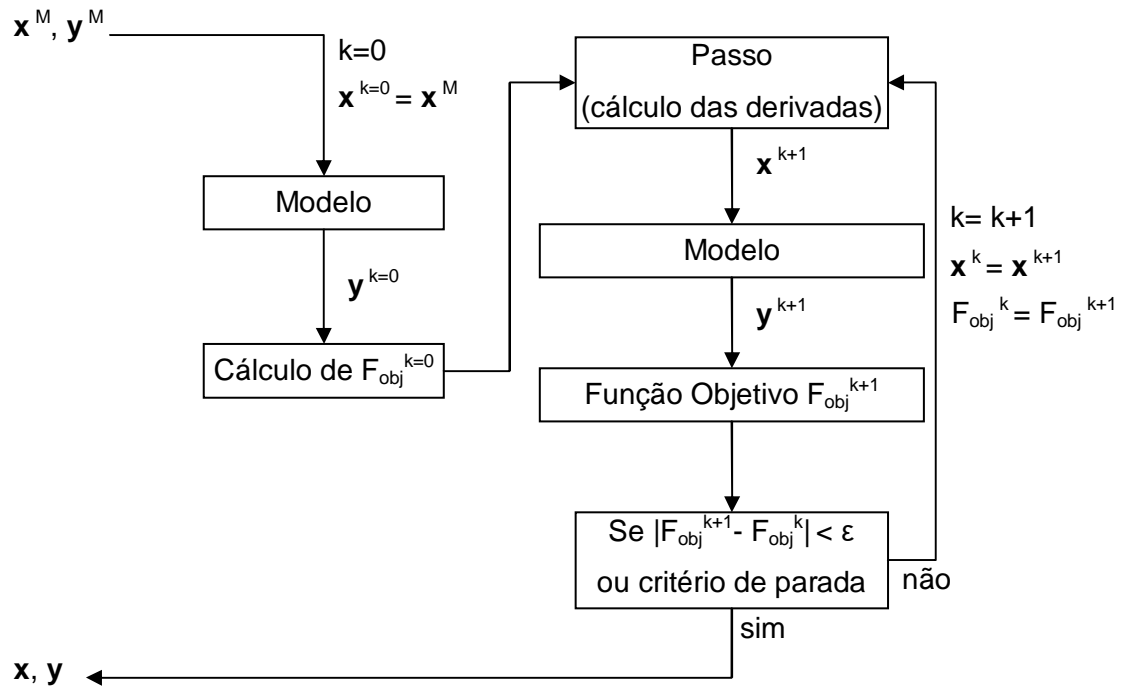


Figura 12 – Fluxo de dados para o algoritmo seqüencial de minimização.

Uma vez definidos o modelo do processo e a metodologia de otimização da função objetivo, foi desenvolvido um *software* para execução da reconciliação de dados em tempo real.

4.4. O *Software* RDTR

O *software* desenvolvido, chamado de RDTR (acrônimo de Reconciliação de Dados em Tempo Real), foi projetado para realizar as seguintes funções básicas:

- a) Ler as medições do sistema de automação do terminal
- b) Verificar as medições
- c) Atualizar a janela de tempo com as medições
- d) Realizar a minimização da função objetivo da reconciliação de dados
- e) Retornar os valores reconciliados para o sistema de automação

O sistema de automação do Terminal de Ribeirão Preto utiliza o *software* iFIX da empresa norte-americana GE-Fanuc como sistema supervisor. O iFIX possui uma biblioteca de programação para acesso aos dados em tempo real, disponível para a

linguagem C. Esta biblioteca foi utilizada para leitura das medições e retorno dos valores reconciliados para o sistema de automação.

Para a solução do problema de reconciliação, foi utilizado o pacote computacional MAXIMA, baseado no algoritmo apresentado por NORONHA *et al.* (1993). Este pacote computacional implementa o método Gauss-Newton conforme descrito anteriormente e representado na Figura 12 e está implementado na linguagem de programação FORTRAN.

O *software* RDTR apresenta, portanto, dois módulos:

a) RDTR.exe: desenvolvido em linguagem C, que realiza a leituras das variáveis, a verificação destas, a atualização da janela de tempo e o retorno dos valores reconciliados para o sistema de automação;

b) MAXIMA.exe: desenvolvido em FORTRAN, realiza a minimização da função objetivo (conforme Figura 12), calculando as variáveis reconciliadas.

Ambos os módulos são compilados em arquivos executáveis binários. Cabe ressaltar que o uso de linguagens de compilação – como é o caso da linguagem C e do FORTRAN – é muito importante para aplicação em tempo real, uma vez que apresentam desempenho computacional bem superior às linguagens baseadas em interpretadores.

A Figura 13 apresenta o fluxo de execução de cada um desses módulos. Conforme o esquema apresentado, o módulo RDTR.exe executa as funções de leitura de dados, verificação das medições (elimina caracteres espúrios, verifica se as medições estão dentro de limites aceitáveis), atualização da janela de tempo, escrita dos valores reconciliados no sistema supervisor e controle do período de amostragem, enquanto que o módulo MAXIMA.exe realiza a minimização do problema de reconciliação de dados proposto. Os dois módulos se comunicam para que os dados medidos e reconciliados sejam transmitidos entre eles.

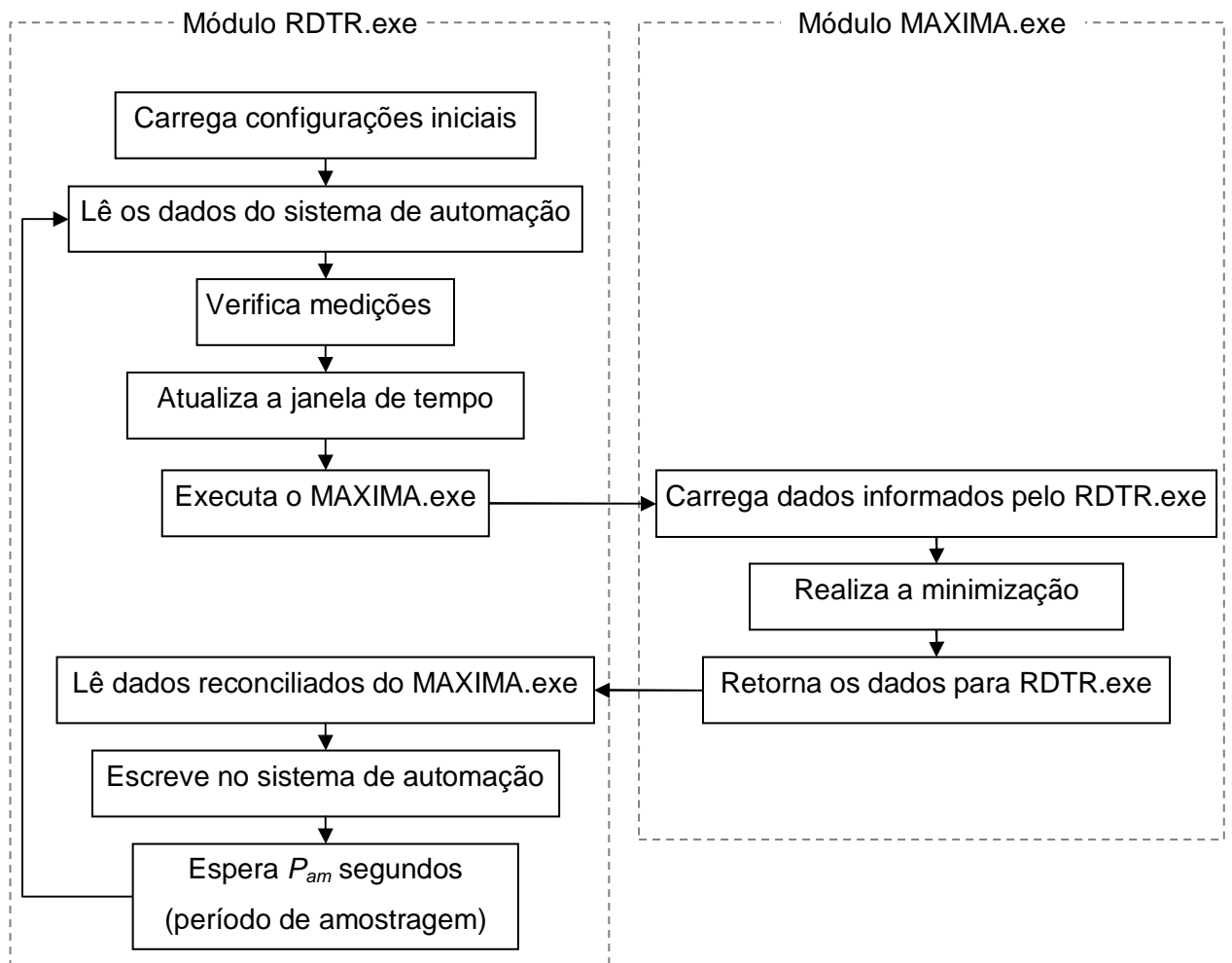


Figura 13 – Fluxo de execução do software RDTR (módulos RDTR.exe e MAXIMA.exe)

As configurações iniciais do *software* (tamanho da janela de tempo, período de amostragem, nomes dos *tags* no sistema de automação, etc.) são colocadas em um arquivo do tipo texto (RDTR.ini), que o módulo RDTR.exe lê no início de sua execução. Também são lidos, na inicialização, arquivos do tipo texto com informações de variâncias das medições e com as tabelas de arqueação dos tanques.

O *software* RDTR foi projetado para operar no mesmo ambiente do sistema supervisor (de onde lê e onde escreve os dados). A Figura 14 apresenta a inter-relação dos módulos do RDTR e o sistema supervisor iFIX.

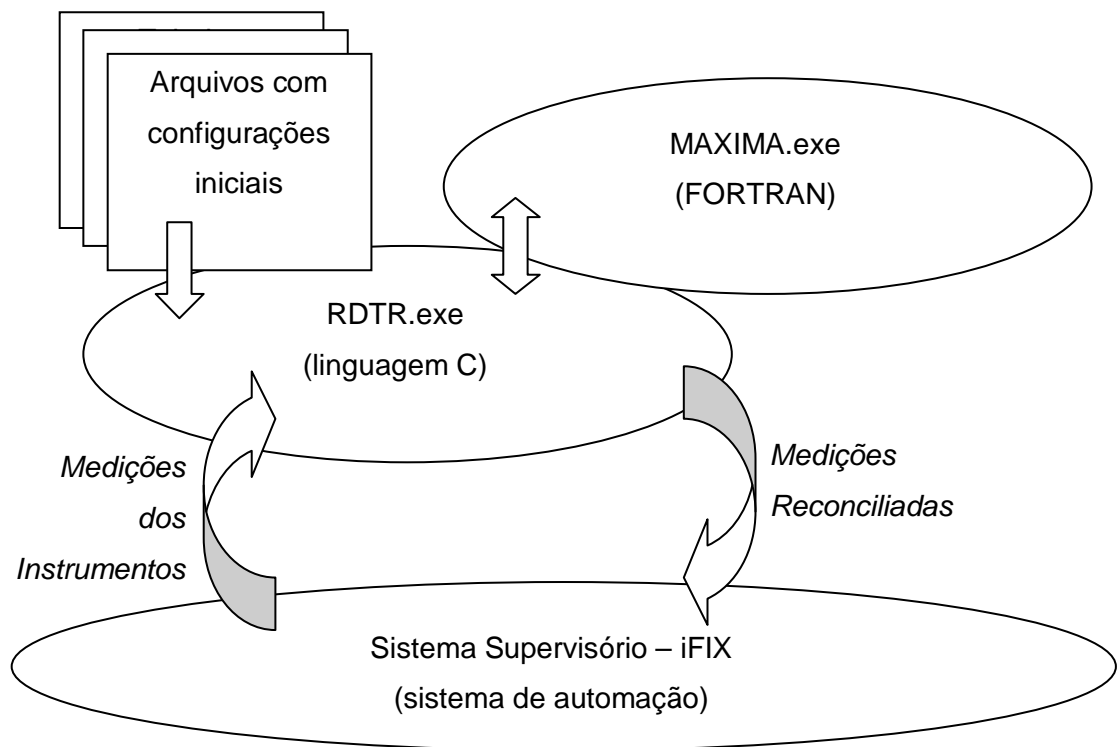


Figura 14 – Esquema de inter-relação entre os componentes do *software* de reconciliação de dados em tempo real

O *software* RDTR foi implementado em uma das estações que operam o sistema supervisório iFIX, apresentadas na Figura 10.

4.5. Matriz de Variâncias e Covariâncias

Uma questão essencial para implementação da reconciliação de dados é o levantamento da matriz V empregada na Equação (8). Conforme as bases estatísticas do princípio de máxima verossimilhança aplicado à distribuição normal, esta matriz deve ser formada pelas variâncias e covariâncias das medidas correspondentes. O levantamento destas variâncias e covariâncias é, no entanto, um problema ainda não totalmente resolvido e até mesmo pouco abordado na literatura de reconciliação de dados.

Para implementação do *software* de reconciliação de dados em tempo real, as variâncias das medições envolvidas foram caracterizadas. A metodologia consiste em selecionar um período de operação em estado estacionário onde não tenham

acontecido ocorrências operacionais que introduzam variações espúrias (parada inesperada de bombeio, falha de medidores, etc.).

A Figura 15 apresenta como exemplo, a amostra de dados utilizada para caracterização da variância da medição de nível do tanque TQ02. Foi identificado um período estacionário de aproximadamente 08h15min de duração (durante o qual o tanque permaneceu em repouso). Os dados relativos à medição do tanque durante o período identificado foram extraídos para um ambiente computacional externo ao sistema de automação industrial (fora de linha), com um intervalo de leitura de 10 segundos, portanto a amostra corresponde a aproximadamente 3000 medidas. Cabe ressaltar que este intervalo de leitura é utilizado apenas para os cálculos de variâncias e obtidos fora de linha, e não para operação em tempo real, que possui um período de amostragem maior.

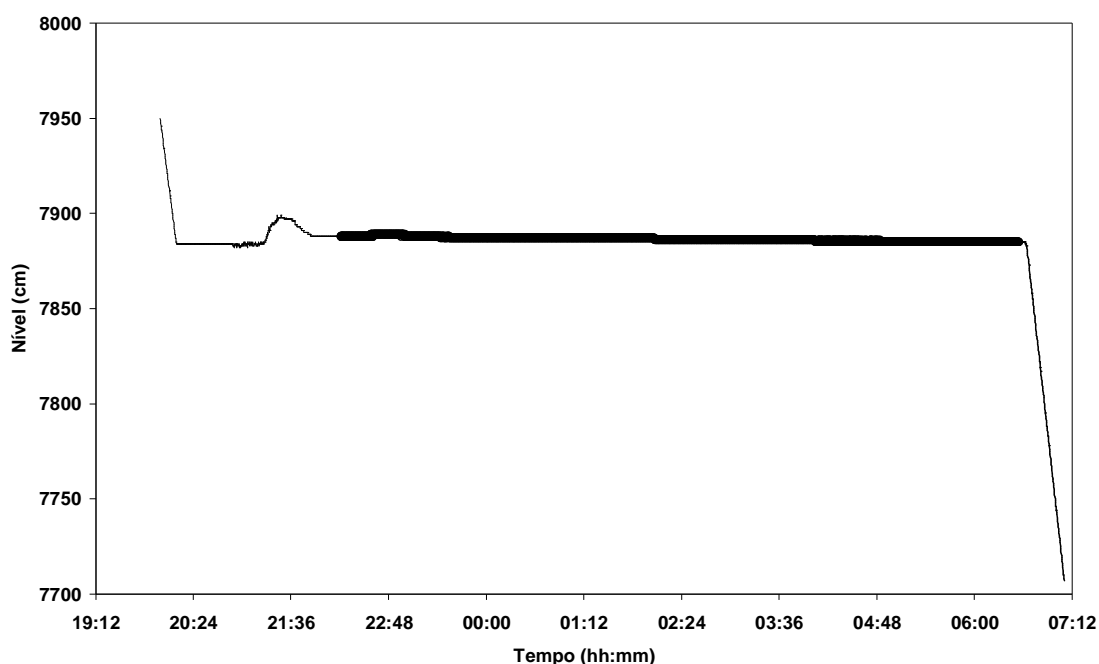


Figura 15 – Exemplo de amostra de dados utilizada para caracterização da variância – Nível TQ02 (Linha grossa = período em estado estacionário, considerado para levantamento da variância / Linha fina = período em operação dinâmica, dados não utilizados).

A partir de amostras de dados, similares à apresentada na Figura 15, foi feito o levantamento da variância para cada medição. Os resultados estão apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5.

Tabela 4 – Resultados do levantamento das variâncias dos erros das medidas dos tanques.

Variável	Variâncias – Tanque (conforme Figura 9)			
	TQ01	TQ02	TQ03	TQ04
Nível [cm]	1,1018E+01	5,2689E+00	1,0767E+01	2,6383E+01
Temperatura [°C]	2,0279E-02	1,2483E-02	2,1845E-02	9,0356E-02
Densidade [g/cm ³]	1,0020E-08	1,0001E-08	1,0003E-08	1,0010E-08

Tabela 5 – Resultados do levantamento das variâncias dos erros das medidas dos locais de medição dos dutos (NA – não aplicável, pois não existe medição).

Variável	Variâncias – Local de Medição em Duto (conforme Figura 9)				
	A	B	C	D	E
Vazão [m ³ /h]	1,2347E+00	1,0635E+00	1,8232E+00	5,4404E-01	1,7509E+00
Temperatura [°C]	8,2956E-01	5,5669E-01	3,1790E-02	3,3188E-01	4,8989E-02
Pressão [Kgf/cm ²]	3,8062E-02	8,1330E-03	6,6310E-03	4,6460E-03	6,7390E-03
Densidade [g/cm ³]	1,9400E-06	1,0500E-06	NA	6,1100E-07	NA

4.6. Dimensionamento da Janela de Tempo: Dinâmica x Desempenho

O desempenho computacional de execução do *software* RDTR é uma questão importante para a implementação em tempo real. Conforme a modelagem matemática apresentada, a dinâmica e não-linearidade presentes nas equações de balanço implica em discretização da equação diferencial em períodos de amostragem (os valores amostrados formam uma janela de tempo) e, conseqüentemente, ocorre o aumento de equações algébricas aplicadas como restrições à função de minimização.

A janela de tempo possui dois parâmetros básicos para serem definidos:

- a) Período de Amostragem (P_{am}), em segundos
- b) Número de Amostras (N_{am})

Uma vez definidos estes parâmetros, o tempo total da janela (T_{jan}) pode ser dado como:

$$T_{jan} = P_{am} \cdot N_{am} \quad (55)$$

Infelizmente a importante questão de dimensionamento das janelas de tempo para reconciliação de dados em tempo real não foi ainda abordada na literatura. Assim, foi realizada uma avaliação da dinâmica do processo e do desempenho da minimização, para encontrar um dimensionamento satisfatório da janela de tempo.

4.6.1. Dinâmica

A dinâmica do processo está relacionada ao enchimento e esvaziamento dos tanques, onde estão instalados medidores de nível de produto. Estes medidores possuem resolução de 1 centímetro. A variação de nível nos tanque depende da vazão de escoamento. Em vazões baixas, esta variação fica em torno de 2 (dois) centímetros por minuto, conforme mostra a Tabela 6, que possui um extrato real da variação de nível de um dos tanques do terminal.

Tabela 6 – Exemplo de taxa de variação de nível de tanque a vazões baixas (em torno de 95 m³/h) para o tanque TQ04 do terminal.

Hora	Nível (cm) no TQ04
09:08:00	9389
09:09:00	9387
09:10:00	9384
09:11:00	9382
09:12:00	9380
09:13:00	9378
09:14:00	9375
09:15:00	9373
09:16:00	9371
09:17:00	9369
09:18:00	9367
09:19:00	9365
09:20:00	9362
09:21:00	9360
09:22:00	9358
09:23:00	9356

Assim, não é necessário que o período de amostragem seja inferior a 1 minuto, uma vez que não será percebida a dinâmica do tanque para o caso de escoamento em vazões baixas.

4.6.2. Desempenho

O número de amostras presentes na janela de tempo é um fator fundamental para a operação em tempo real, uma vez que o aumento da dimensão do problema implica em maior tempo necessário para o processamento. Para o modelo proposto, o número de variáveis envolvidas é igual a 30 vezes o número de amostras.

Foi realizado um estudo com três diferentes conjuntos de dados, representando situações distintas de operação do terminal. Para cada um destes conjuntos de dados, foram realizadas minimizações com tamanhos crescentes de janelas (de 2 até 29 amostras). O tempo necessário para processamento de cada conjunto de medidas foi então avaliado. A Figura 16 apresenta os resultados obtidos.

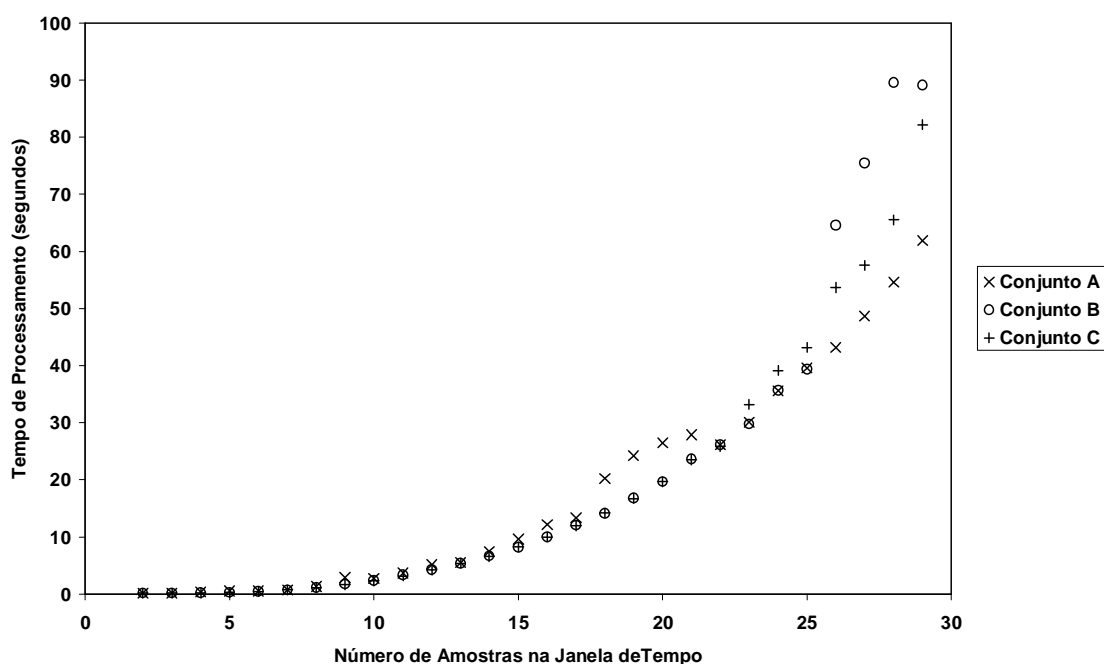


Figura 16 – Resultado da avaliação de performance da minimização em função do número de amostras da janela de tempo.

Observa-se que o tempo de processamento das janelas cresce exponencialmente em função do número de amostras. Dependendo do período de amostragem escolhido, o número de amostras pode inviabilizar a execução do algoritmo em tempo real. Na Figura 16 pode ser visto, por exemplo, que um período de amostragem (P_{am}) de 1 minuto não permite um tamanho de janela (T_{jan}) superior a 25 minutos, pois a partir de um número de amostras (N_{am}) superior a 25, o tempo de processamento poderá exceder o tamanho da janela. Além disso, deve ser observado que o valor utilizado para dimensionamento não deve ser próximo deste limite de tempo, pois deve ser considerada uma sobrecarga de processamento em função de operações de leitura e escrita de memória e em disco, atualização da janela a cada amostragem, outros processamentos concorrentes, etc.

Convém ressaltar que o *software* RDTR opera em paralelo ao sistema supervisor, na mesma máquina que este. Neste caso, ambos os *softwares* estão compartilhando recursos *hardware*. Não é interessante, portanto, que o RDTR ocupe muito tempo de processamento da máquina, a fim de não prejudicar o desempenho do sistema de automação, que deve ter prioridade de execução. Esta questão poderia ser contornada com a instalação de um *hardware* dedicado para o reconciliador e independente do processamento do sistema supervisor.

Também é importante considerar que se os valores reconciliados forem utilizados para algum tipo de controle automático em tempo real, estes deverão estar disponíveis sem grandes atrasos com relação ao tempo em que foram medidos.

Diante do exposto, e após vários testes com diferentes configurações, foi dimensionada a janela de tempo com os seguintes parâmetros:

Período de Amostragem (P_{am}) = 300 segundos (5 minutos)

Número de Amostras (N_{am}) = 12

Tempo Total da Janela (T_{jan}) = 1 hora

Para este número de amostras, o tempo de processamento da minimização é de aproximadamente 5 segundos, o que atende ao período de amostragem, disponibiliza os dados com pouco atraso em relação ao momento em que foram

medidos e não prejudica o desempenho do sistema supervisor iFIX, que opera em paralelo ao RDTR. Convém ressaltar que, durante os testes com diferentes tamanhos de janelas, observou-se que os ajustes dos dados eram muito semelhantes; porém, as maiores janelas implicavam em limites de confiança mais estreitos.

4.7. Limites de Confiança, Detecção de Erros Grosseiros e Falhas

Uma vez implementada a técnica de reconciliação de dados, deve ser feita uma análise dos resultados, a fim de avaliar a qualidade dos dados reconciliados, identificar potenciais erros grosseiros (incluindo desvios sistemáticos) e, conseqüentemente, caracterizar falhas de instrumentação e de processo.

Para realizar esta análise o *software* RDTR calcula, além do valor reconciliado para cada medição, o limite de confiança correspondente a esse valor. A determinação do limite de confiança é baseada no teste t de Student para um nível de confiança de 95%. O valor medido pode, então, ser comparado aos limites de confiança do valor reconciliado e assim caracterizar se este é ou não um erro grosseiro.

Não foi implementada uma rotina de eliminação de erros grosseiros no *software* RDTR. A proposta deste trabalho é analisar os dados obtidos e verificar possíveis abordagens para este tema, à luz de eventos como: ocorrência de falhas, mudanças de *set-point* e dinâmica do processo.

Portanto, a abordagem de detecção de erros grosseiros simultânea à reconciliação de dados é um dos objetivos desta análise. A vantagem desta metodologia é que o modelo do processo e a redundância de instrumentação são considerados na detecção dos erros grosseiros. Conseqüentemente, as mudanças em determinadas medições relativas a alterações de *set-point* ou ao comportamento dinâmico do processo influenciam nos resultados da reconciliação de outras medições. Deste modo, pode-se caracterizar se uma mudança brusca em um valor medido trata-se de uma ocorrência normal ou uma falha.

5. ANÁLISE DOS DADOS

O *software* RDTR encontra-se atualmente em operação no Terminal de Ribeirão Preto. A seguir serão analisados alguns casos observados durante o período de operação.

Os resultados apresentados a seguir estão representados em forma gráfica. A notação utilizada nos gráficos é a seguinte:

- (●) Bola cheia = valor medido
- (○) Bola vazia = valor reconciliado
- (—) Linha contínua = limites de confiança dos valores reconciliados
- (+) Sinal de soma = resíduo (valor reconciliado - valor medido)
- (- -) Linha Tracejada = limites de confiança dos resíduos

A cada período de amostragem, são calculados 12 valores reconciliados (número de amostras). O valor que é escrito no sistema supervisorio corresponde ao mais recente, que é o resultado em tempo real para a reconciliação de dados. Os gráficos apresentam, portanto, apenas o valor mais recente em cada janela, apesar de serem calculados 12 valores para cada instante de amostragem.

5.1. Caso 1 – Operação Normal

5.1.1. Características do Caso 1

- a) 24 horas (um dia) de operação
- b) A vazão de entrada (local A) apresentou variação freqüente de *set-point* durante todo o período.
- c) Sem anormalidades relevantes.

5.1.2. Seqüência operacional do Caso 1

a) 00h00min às 22h30min: Recebimento de gasolina pelo tanque TQ04, com diferentes *set-points* de vazão ao longo do dia e interrupção entre 17h20min e 19h20min.

b) 06h40min às 20h20min: Envio de diesel pelo tanque TQ02, a uma vazão de aproximadamente 390m³/h, com redução para 340m³/h no final do bombeio.

c) 06h40min às 20h20min: Envio de gasolina pelo tanque TQ03, a uma vazão de aproximadamente 95m³/h.

5.1.3. Resultados do Caso 1

Recebimento de Gasolina pelo Tanque TQ04 (Caso 1)

A Figura 17 e a Figura 18 apresentam o perfil geral de recebimento de gasolina pelo tanque TQ04. Não ocorreram maiores problemas nesta operação e a reconciliação de dados realizou apenas alguns ajustes em ambos os medidores.

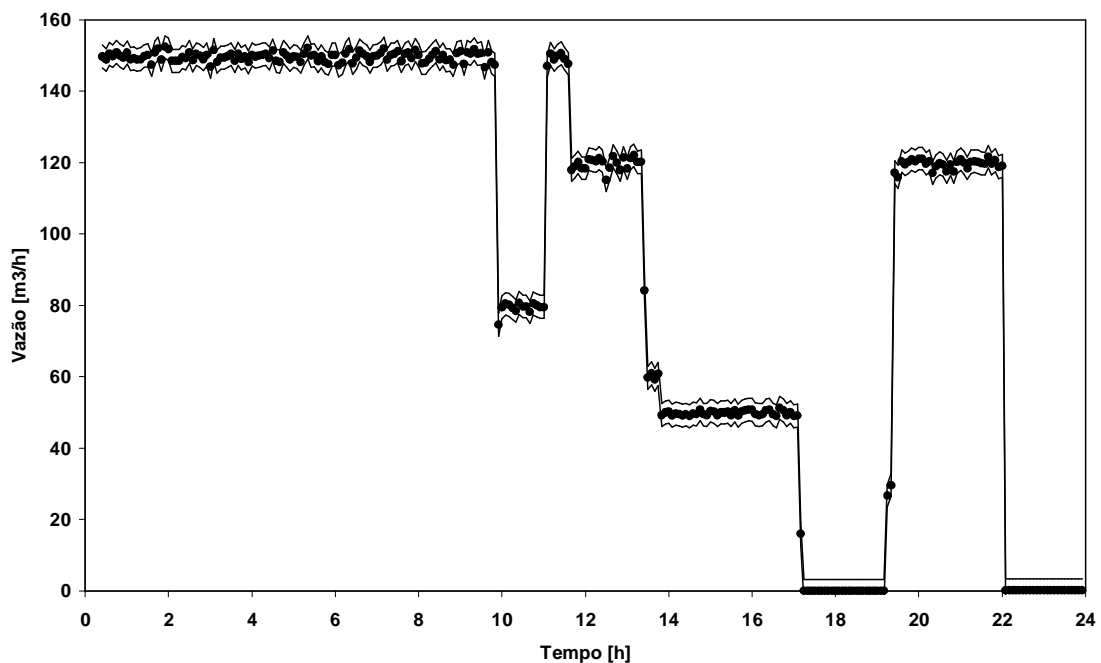


Figura 17 – Caso 1: Perfil da vazão medida no local A.

Cabe observar que as bolas vazias, que representam os valores reconciliados, estão presentes em todos os gráficos. Pode ocorrer que os ajustes sejam tão pequenos que estas podem ficar sobrepostas com as bolas cheias como no caso da Figura 17 e da Figura 18.

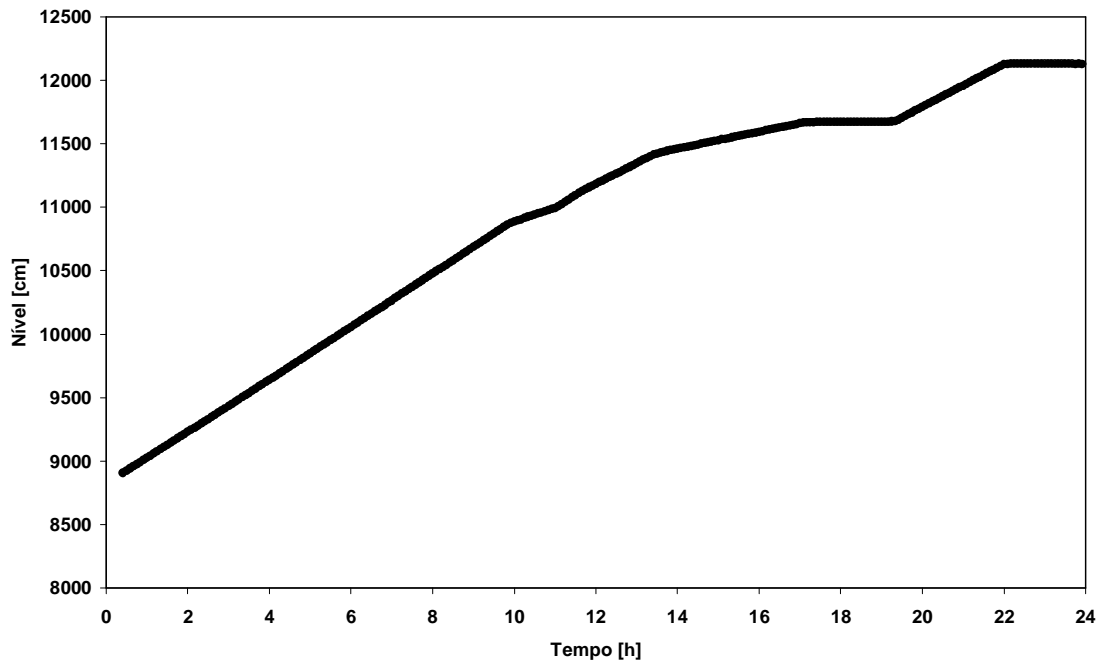


Figura 18 – Caso 1: Perfil do nível do tanque TQ04.

Apesar das variações de *set-point* na vazão, não ocorreram problemas na reconciliação. A Figura 19 mostra um detalhe da vazão medida para esta operação e observa-se que os ajustes aplicados foram bem pequenos. O mesmo pode ser observado no detalhe do nível mostrado na Figura 20.

Estes resultados mostram que a técnica de reconciliação de dados apresentada é capaz de lidar com dinâmicas e mudanças de *set-point* em tempo real, uma vez que todas as medições concordam com o modelo do processo.

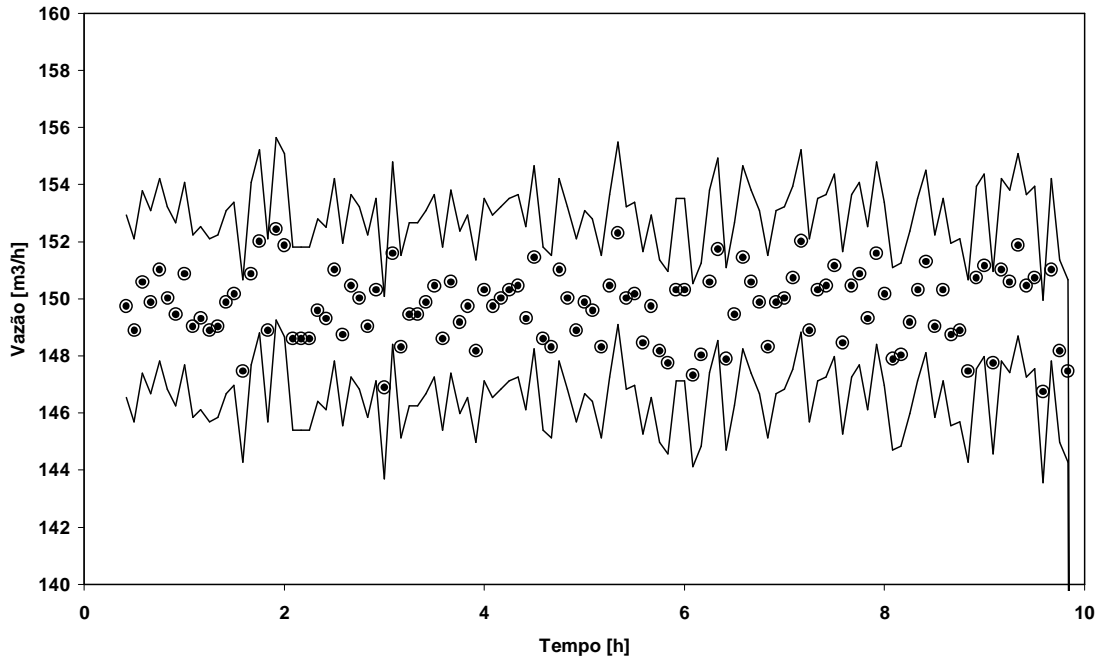


Figura 19 – Caso 1: Vazão no local A (detalhe da Figura 17)

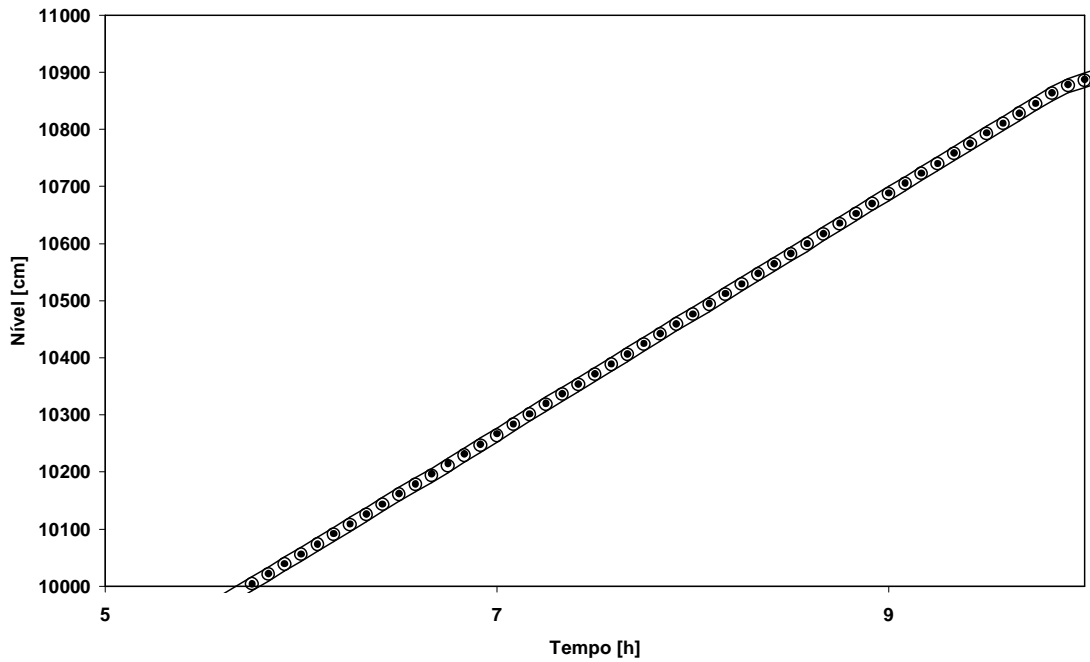


Figura 20 – Caso 1: Nível no tanque TQ04 (detalhe da Figura 18).

A Figura 21 apresenta os resíduos da medição de vazão, ilustrando os pequenos ajustes (inferiores a $0,05 \text{ m}^3/\text{h}$), muito abaixo dos limites de confiança. A Figura 22 ilustra os resíduos da medição de nível no tanque TQ04, confirmando que

não ocorreram maiores anormalidades, apesar das diversas mudanças de *set-point* e da natureza dinâmica do nível do tanque.

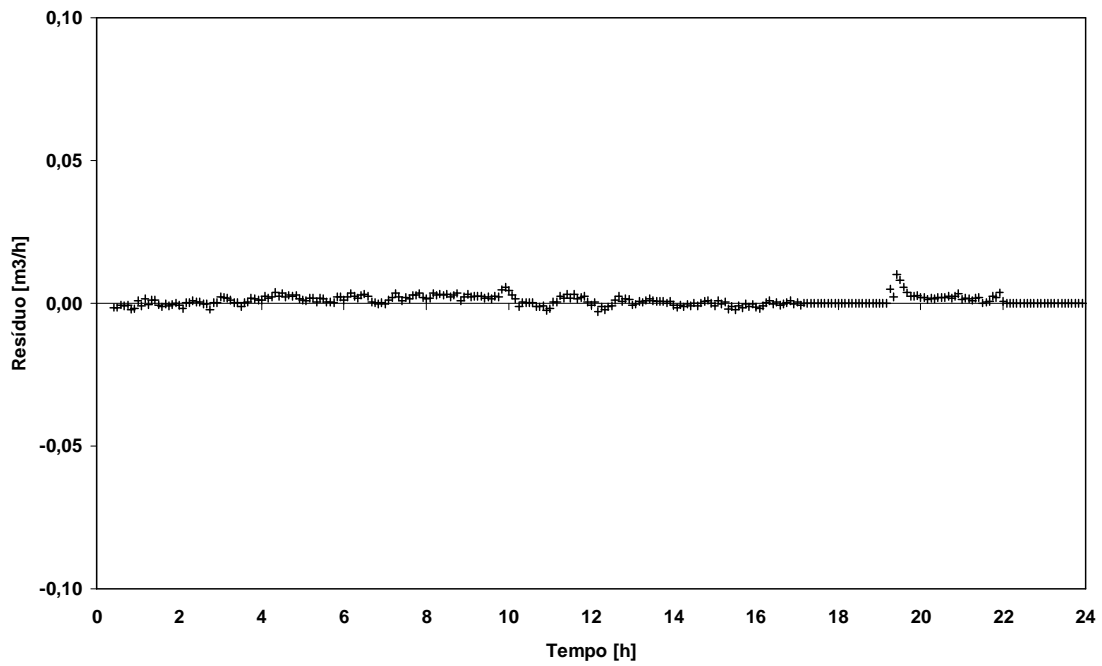


Figura 21 – Caso 1: Resíduos da vazão no local A (os limites de confiança estão muito acima dos limites do gráfico)

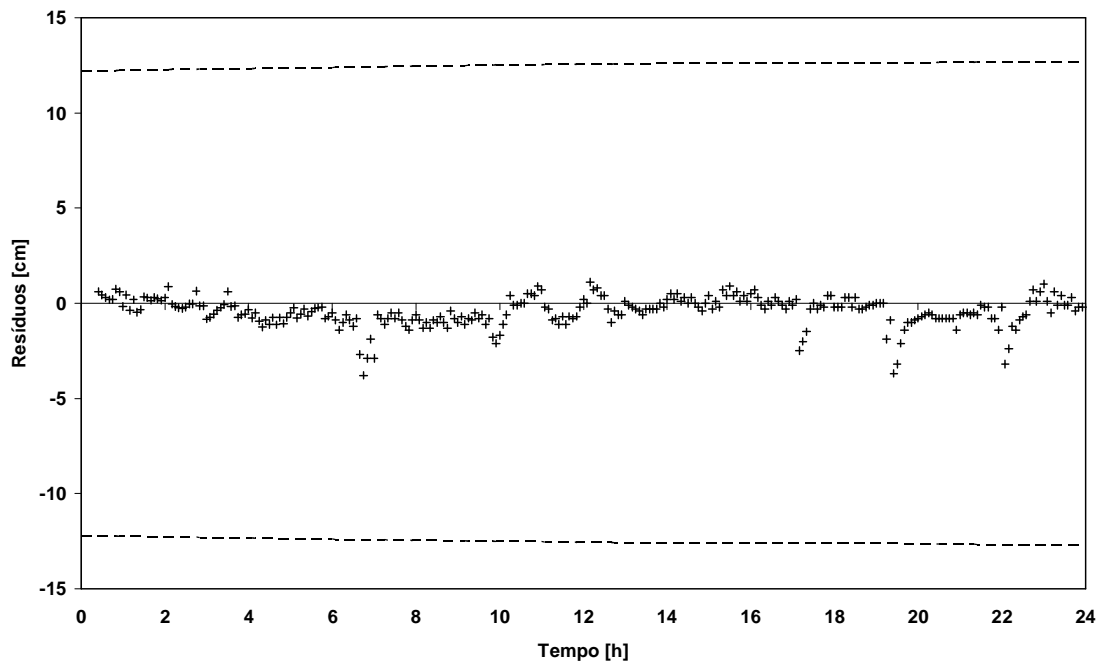


Figura 22 – Caso 1: Resíduos do nível do tanque TQ04

Envio de Diesel pelo Tanque TQ02 (Caso 1)

A operação de envio de diesel do tanque TQ02 para companhias distribuidoras ocorreu também sem problemas notáveis. A Figura 23 mostra o detalhe do perfil do nível do tanque no final do bombeio. Neste momento, os valores medidos aparecem fora dos limites de confiança. Esta ocorrência deve-se ao transiente do sistema que nem sempre atende perfeitamente ao modelo desenvolvido e utilizado e é momentânea. Uma ou duas amostras depois os valores medidos retornam à região compreendida entre os limites de confiança.

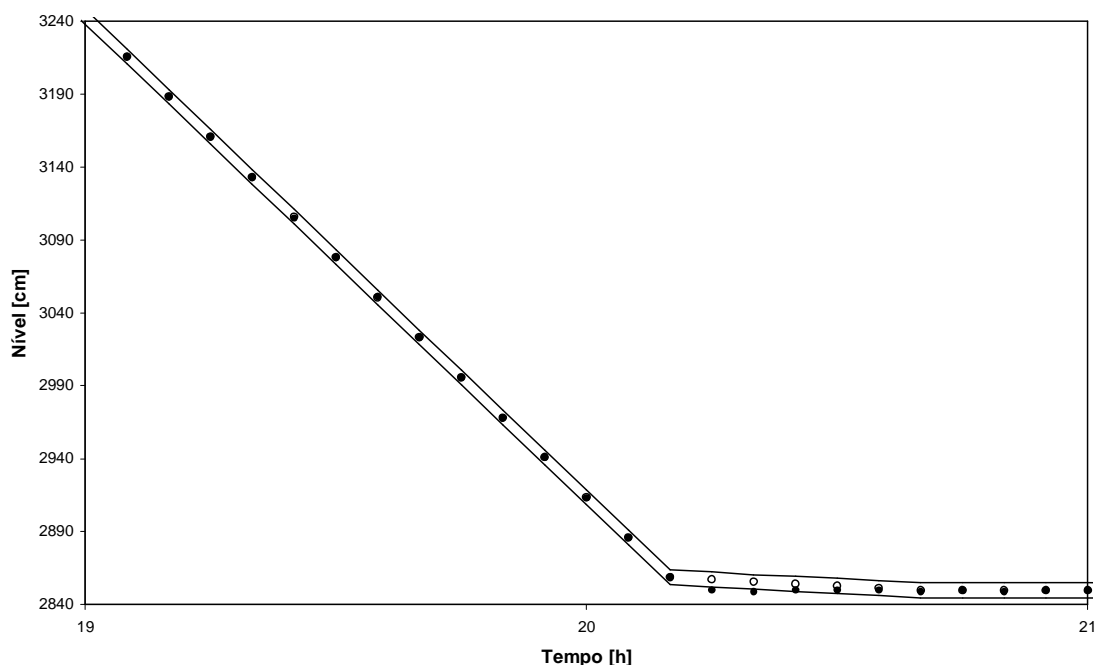


Figura 23 – Caso 1: Detalhe do final do bombeio no tanque TQ02

Os perfis de vazão nos dois medidores localizados no duto de diesel (locais B e C) estão apresentados na Figura 24 e na Figura 25. Nestas figuras, observa-se que a reconciliação de dados também exerce um papel de filtro, reduzindo a variabilidade das medições. Esta é uma característica positiva e desejada da reconciliação de dados, que fornece então medidas mais precisas do processo analisado.

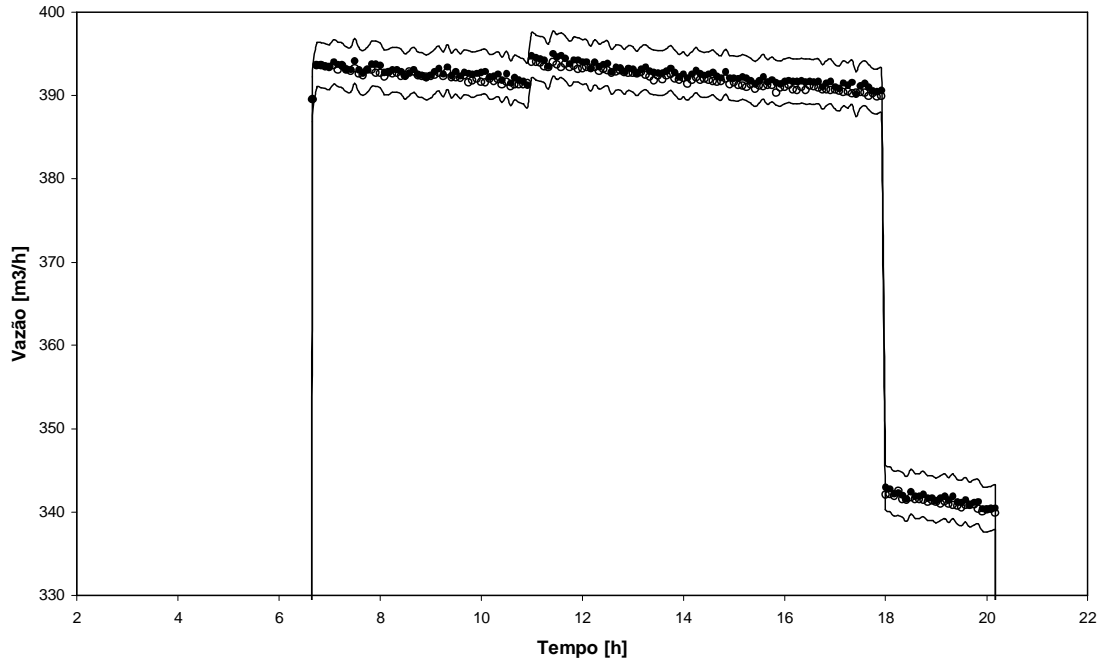


Figura 24 – Caso 1: Perfil de vazão no local B.

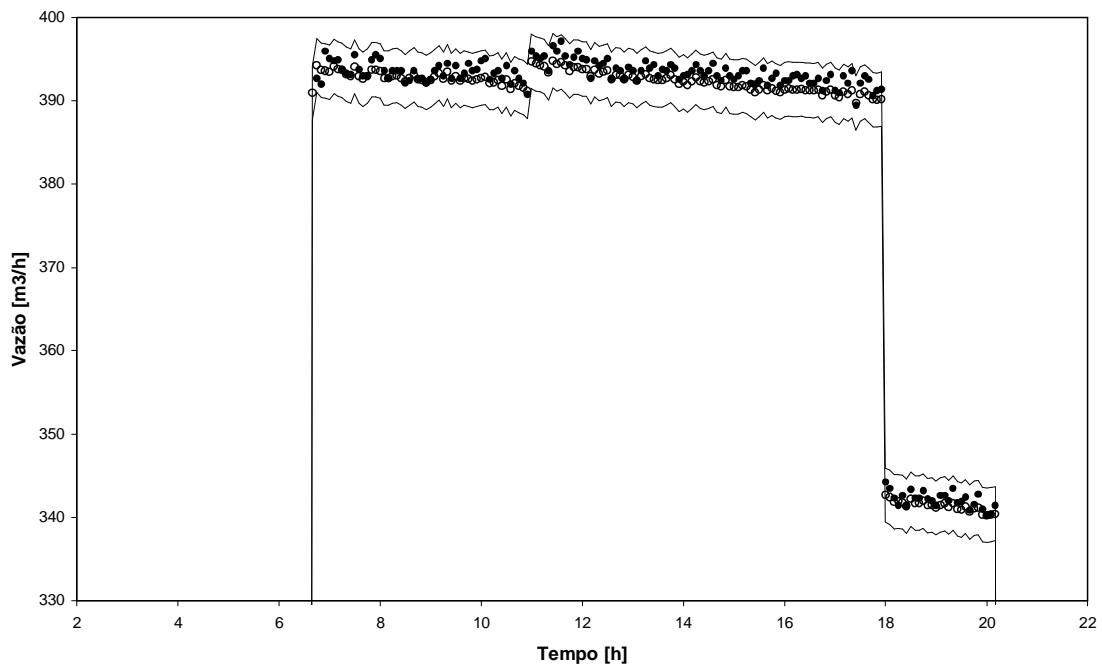


Figura 25 – Caso 1: Perfil de vazão no local C.

Como pode ser observado na Figura 23, Figura 24 e Figura 25 (três medidores relacionados com a operação de envio de diesel) a mudança de *set-point* não causa maiores problemas à reconciliação, a não ser pelo surgimento momentâneo de um ou dois pontos que poderiam ser classificados como erros grosseiros.

Envio de Gasolina pelo Tanque TQ03 (Caso 1)

A Figura 26 apresenta o detalhe da variação de nível do tanque TQ03 no momento em que é iniciado o envio de gasolina (06h40min). Apesar da mudança de estado estacionário para dinâmico, e um eventual transiente, não ocorrem valores medidos fora dos limites de confiança para o nível (o comportamento das vazões correspondentes a esta operação – locais D e E – será analisado a seguir).

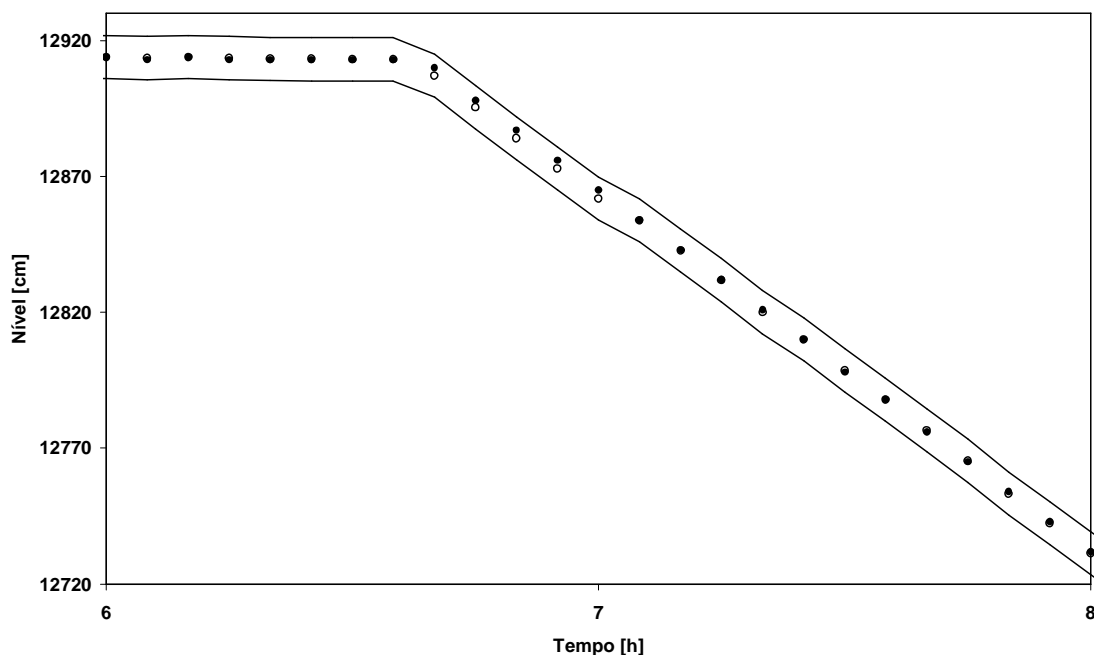


Figura 26 – Caso 1: Detalhe do nível do tanque TQ03 enviando gasolina.

A Figura 27 mostra o comportamento da vazão no local D, enquanto que a Figura 28 apresenta a vazão no local E. Nota-se, novamente, o papel da reconciliação de dados na melhoria da qualidade dos valores medidos. Em particular para a vazão no local E, o valor reconciliado apresenta uma variabilidade bem inferior.

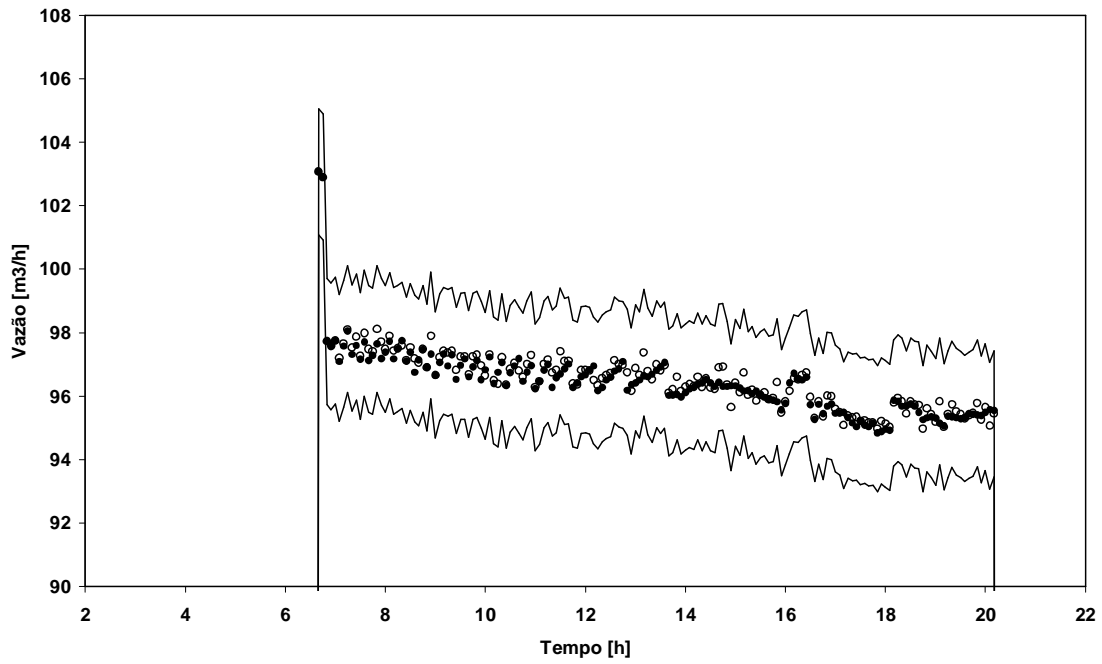


Figura 27 – Caso 1: Vazão no local D

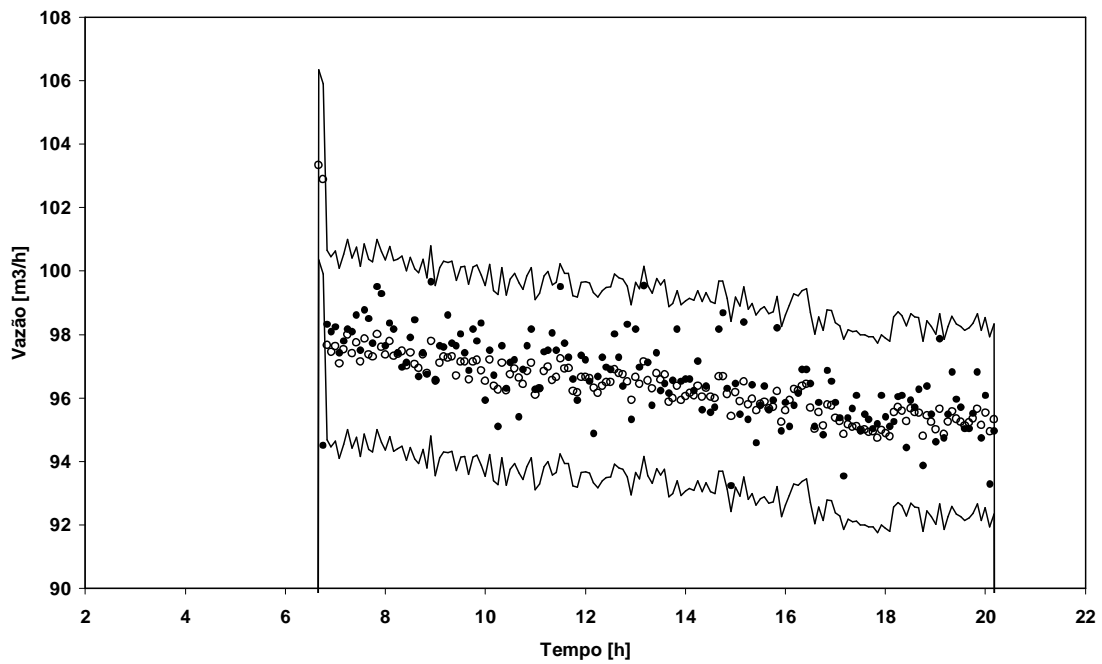


Figura 28 – Caso 1: Vazão no local E

Observa-se que, ao contrário do nível no TQ03, as vazões sentem o transiente do início de bombeio (em torno das 06h30min). Neste momento ocorre para a vazão

do local E uma medição fora do intervalo de confiança (durante apenas um intervalo de amostragem).

Para fins de monitoração e detecção de falhas, estas mudanças são esperadas e não consistem em problemas operacionais. Devido ao caráter transitório e rápido destas ocorrências (duram poucas janelas), elas não prejudicam a análise da condição de operação de sistema.

O gráfico de resíduo da vazão no local D está ilustrado na Figura 29. Observe-se um comportamento normal e dentro dos limites de confiança.

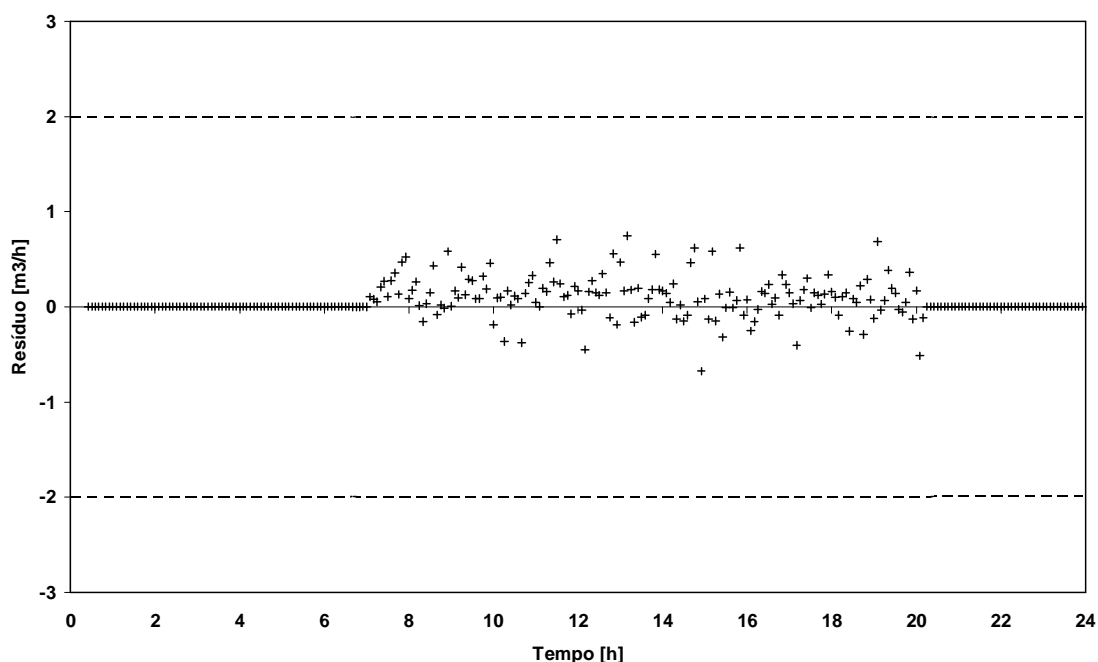


Figura 29 – Caso 1: Resíduos da vazão no local D.

A Figura 30 apresenta os resíduos para a vazão no local E. Neste caso, o gráfico mostra que o medidor sofre o impacto do início do bombeio, gerando dois pontos de erros grosseiros por volta das 6h40min. Estes erros grosseiros são causados pelo pico de vazão em função de movimentação de válvulas nas companhias distribuidoras – fenômenos como enchimento de espaços vazios deixados pela última operação, deslocamento de produto causando indicação de vazão, etc. Portanto, durante alguns segundos (ou minutos), o modelo que descreve o processo deixa de ser fidedigno.

A presença destes dois pontos de erros grosseiros no medidor de vazão do local E claramente não representa nenhum estado de falha, pois logo na medição seguinte o sistema volta ao seu comportamento usual.

Para este caso, um critério de detecção e eliminação de erros grosseiros poderia ser empregado: os pontos seriam eliminados e o *software* RDTR poderia fazer uma nova minimização sem a presença deles. Não seria caracterizada falha, pois são ocorrências isoladas e momentâneas.

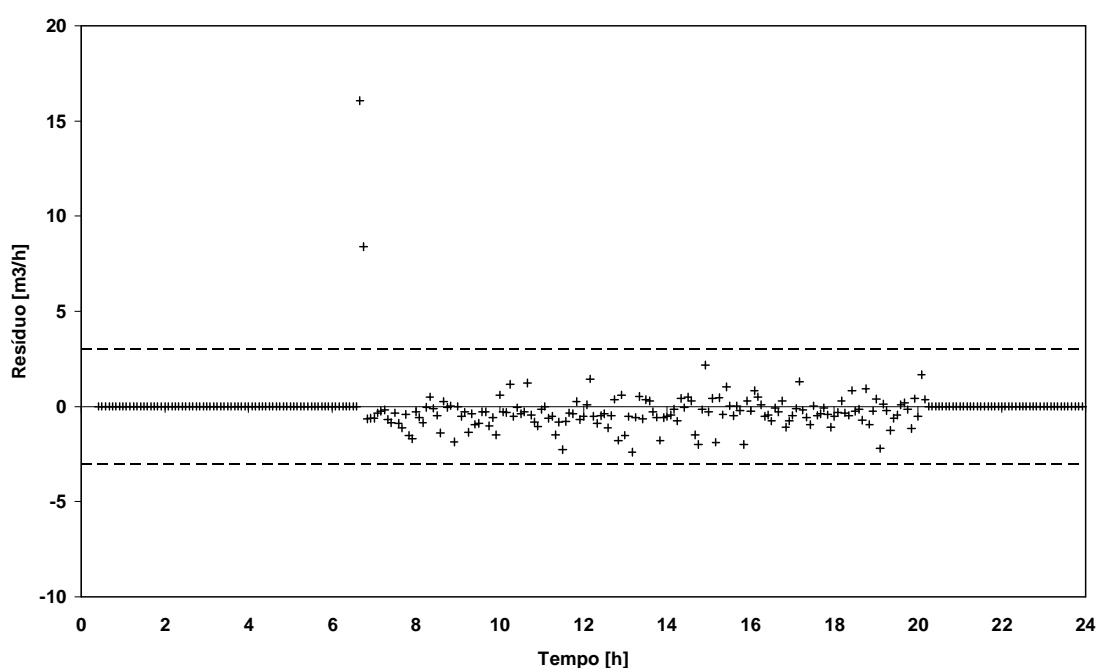


Figura 30 – Caso 1: Resíduos da vazão do local E.

Demais Variáveis do Caso 1

As demais variáveis apresentaram pequenos ajustes dentro da normalidade. Como exemplos, temos a Figura 31, que apresenta os resíduos de temperatura do tanque TQ03 e a Figura 32, que apresenta os resíduos de temperatura do tanque TQ03.

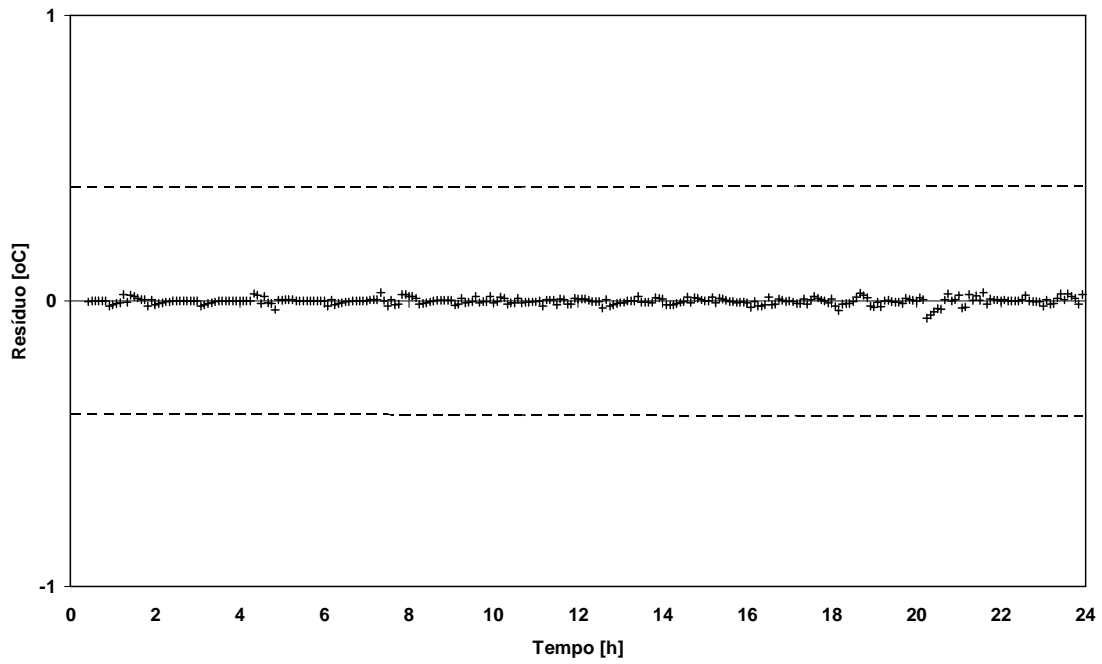


Figura 31 – Caso 1: Resíduos para a temperatura do tanque TQ03

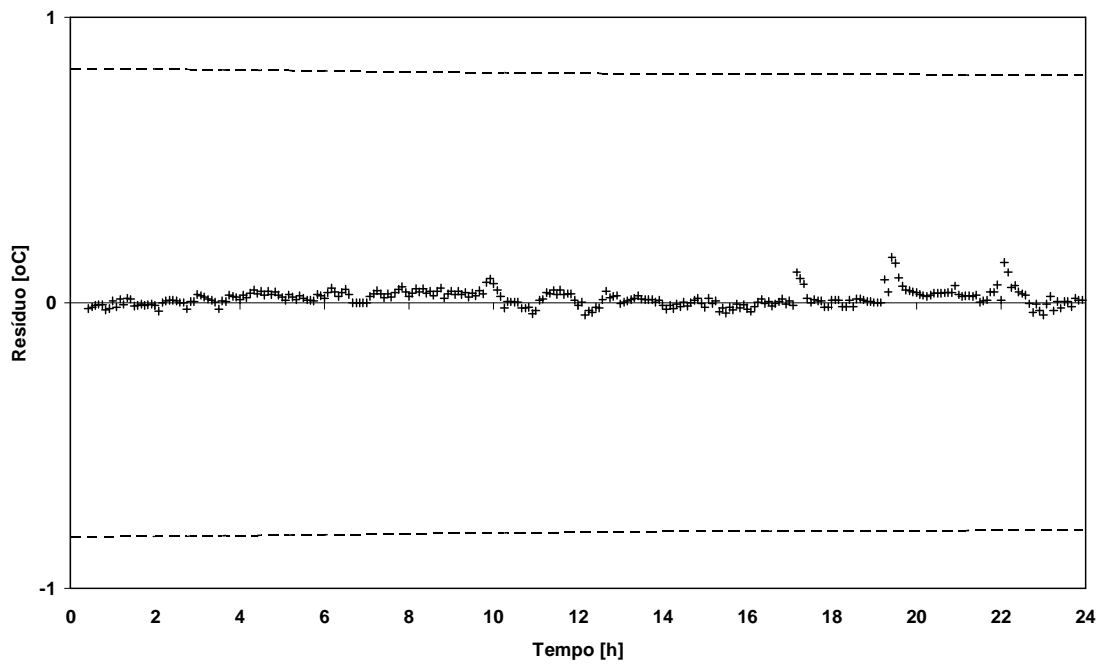


Figura 32 – Caso 1: Resíduos para a temperatura do tanque TQ04

5.2. Caso 2 – Instabilidade em Bomba de Envio

5.2.1. Características do Caso 2

- a) 24 horas (um dia) de operação
- b) Instabilidade na bomba de envio de diesel

5.2.2. Seqüência operacional do Caso 2

a) 00h00min às 22h55min: Recebimento de diesel pelo tanque TQ02, com algumas mudanças de *set-points* de vazão.

b) 06h40min às 20h05min: Envio de diesel pelo tanque TQ01, a uma vazão de aproximadamente 400m³/h. Ocorreu a queda da bomba durante a operação, causando breve interrupção da operação, além de apresentar alguma irregularidade na vazão em função de instabilidade nos equipamentos de bombeio.

c) 06h45min às 20h20min: Envio de gasolina pelo tanque TQ03, a uma vazão de aproximadamente 95m³/h.

5.2.3. Resultados do Caso 2

Recebimento de Diesel pelo Tanque TQ02 (Caso 2)

O recebimento de diesel pelo tanque TQ02 apresentou resultados satisfatórios, sem a presença de eventos anormais. A Figura 33 apresenta o resultado para a vazão do local A. A Figura 34 apresenta os resultados obtidos para o nível do tanque.

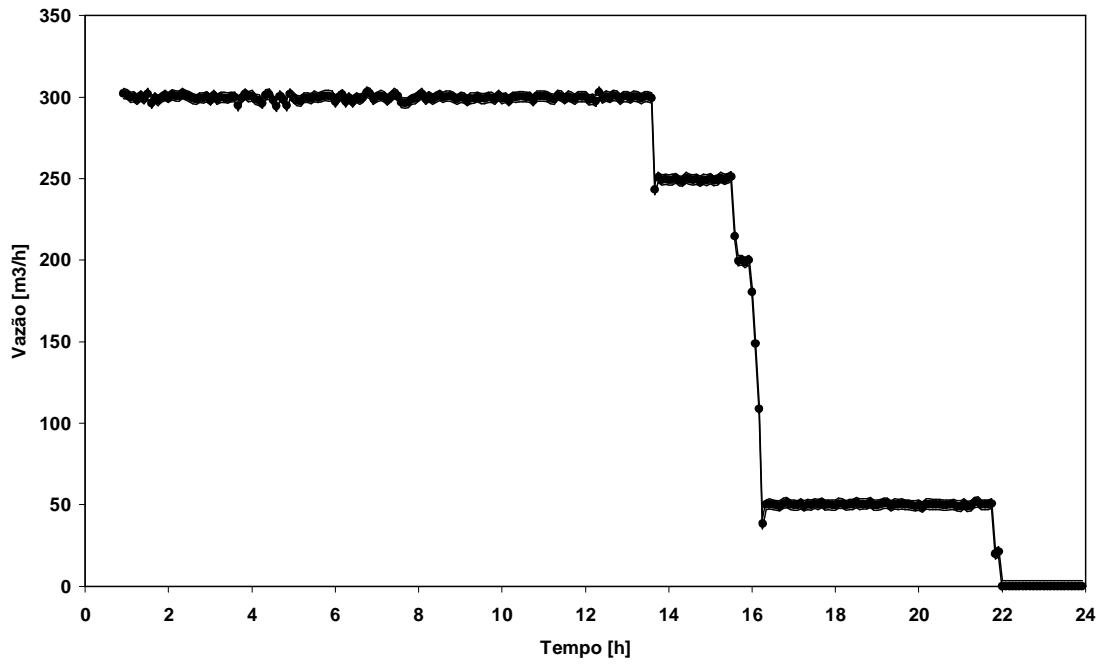


Figura 33 – Caso 2: Perfil da vazão no local A

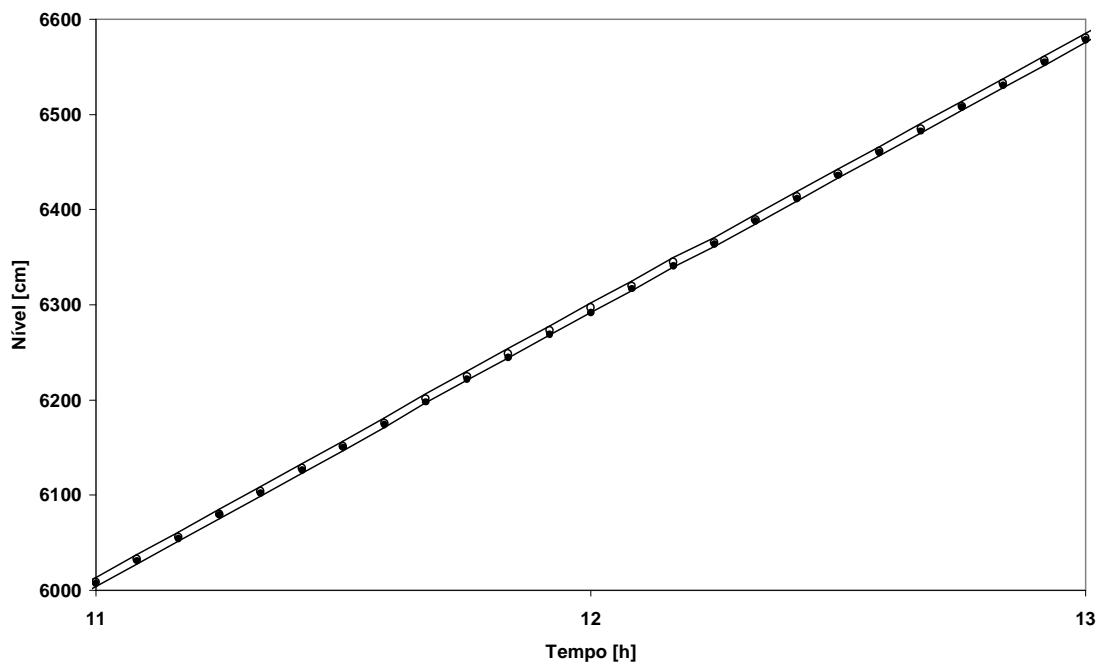


Figura 34 – Caso 2: Detalhe do nível do tanque TQ02 durante o recebimento de diesel

Envio de Diesel pelo Tanque TQ01

Nesta operação, o envio de diesel caracterizou-se por problemas no bombeio deste produto. Houve uma interrupção momentânea do bombeio e uma instabilidade na vazão. A Figura 35 apresenta o perfil da vazão no local B, do duto de diesel. Observa-se a interrupção do bombeio por volta das 11h30min, e alguma instabilidade mais notável em torno das 15h00min.

A Figura 36 mostra um detalhe do medidor no local C, exatamente no momento da instabilidade. Como consequência, ocorre o aparecimento de um *outlier*.

O nível do tanque sofreu alguns ajustes maiores nos pontos de instabilidade. A Figura 37 mostra o resultado obtido para o nível no momento em que o bombeio é interrompido e retomado por volta de 12h00min.

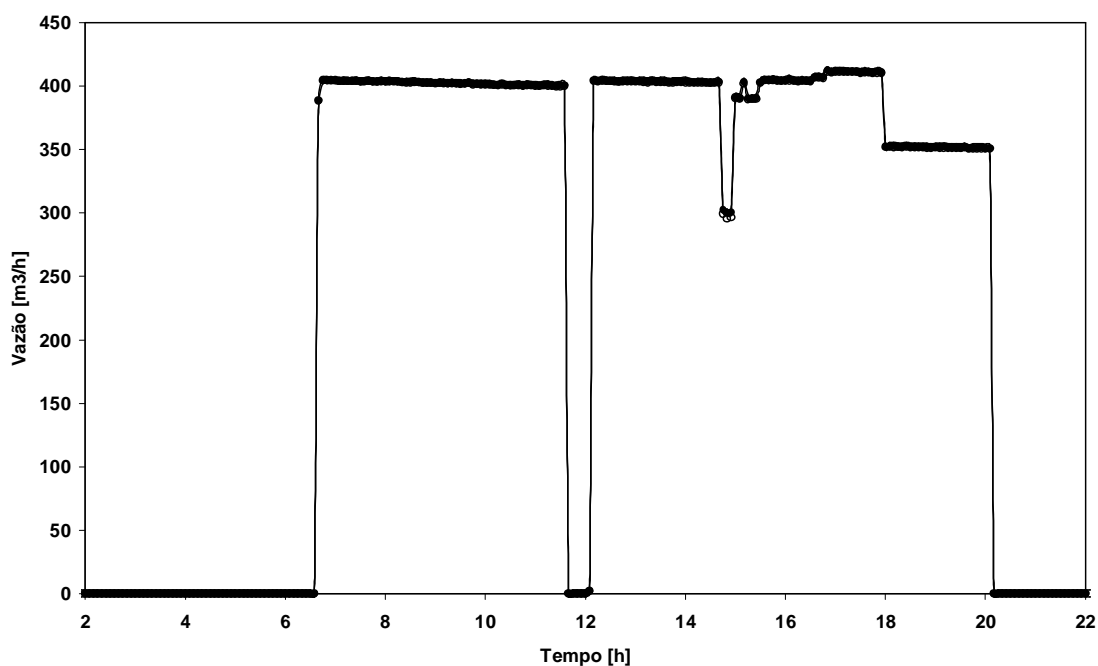


Figura 35 – Caso 2: Perfil da vazão no local B

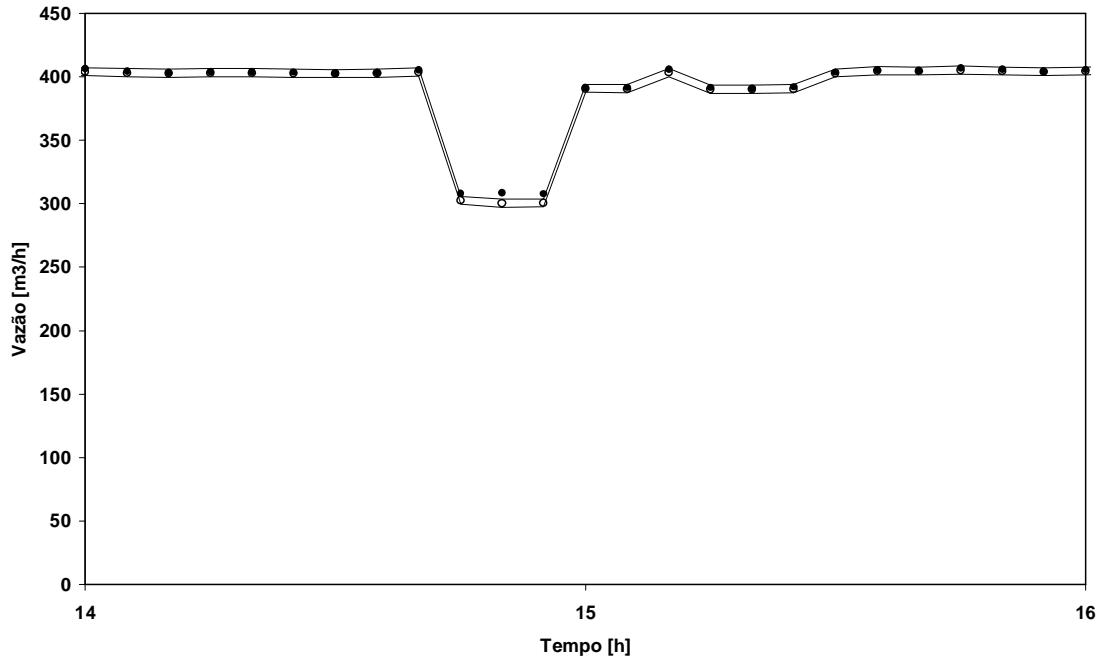


Figura 36 – Caso 2: Detalhe da vazão no local C, no momento em que ocorre um outlier devido à instabilidade do sistema.

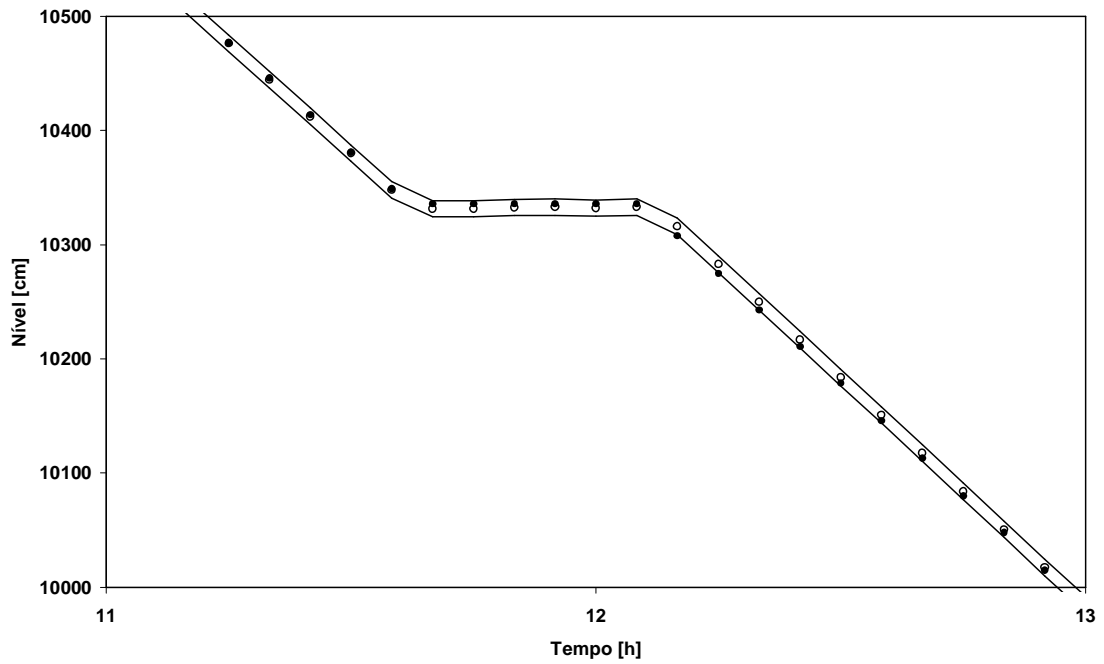


Figura 37 – Caso 2: Detalhe do nível do tanque TQ01 no momento da interrupção do bombeio.

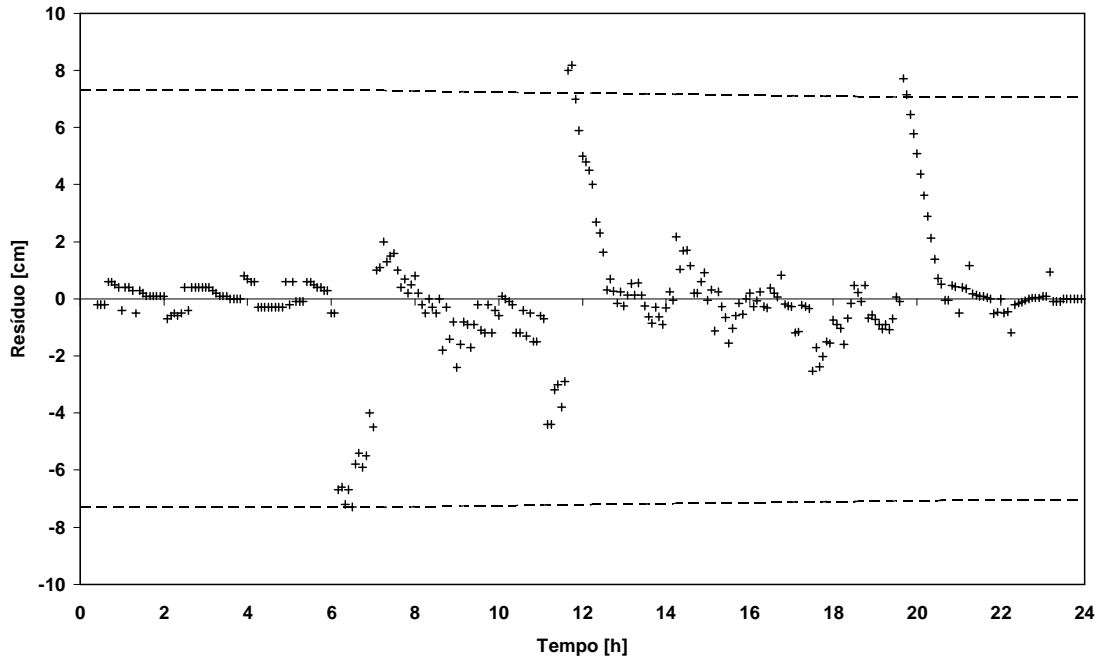


Figura 38 – Caso 2: Resíduos do nível do tanque TQ01

A Figura 38 mostra o resíduo para o nível do tanque. Os ajustes para a correção dos valores nos transientes do sistema ou momentos de instabilidade são observados em torno de 06h40min (início do bombeio), 12h00min (interrupção) e 20h30min (término do bombeio).

Envio de Gasolina pelo Tanque TQ03 (Caso 2)

A operação de envio de gasolina pelo tanque TQ03 ocorreu sem os problemas da operação de diesel deste mesmo dia.

As variáveis medidas no tanque TQ03 não sofreram nenhum ajuste relevante nesta operação, portanto serão omitidos os gráficos das medições e dos valores reconciliados deste local (apresentaremos apenas os resíduos do nível a seguir).

A Figura 39 apresenta o perfil da vazão para o local D, enquanto que a Figura 40 apresenta o perfil da vazão para o local E. Observa-se que o comportamento destas variáveis é bastante semelhante ao apresentado no Caso 1 (outro dia de

operação). No início do bombeio ocorre um rápido pico de vazão que logo se estabiliza.

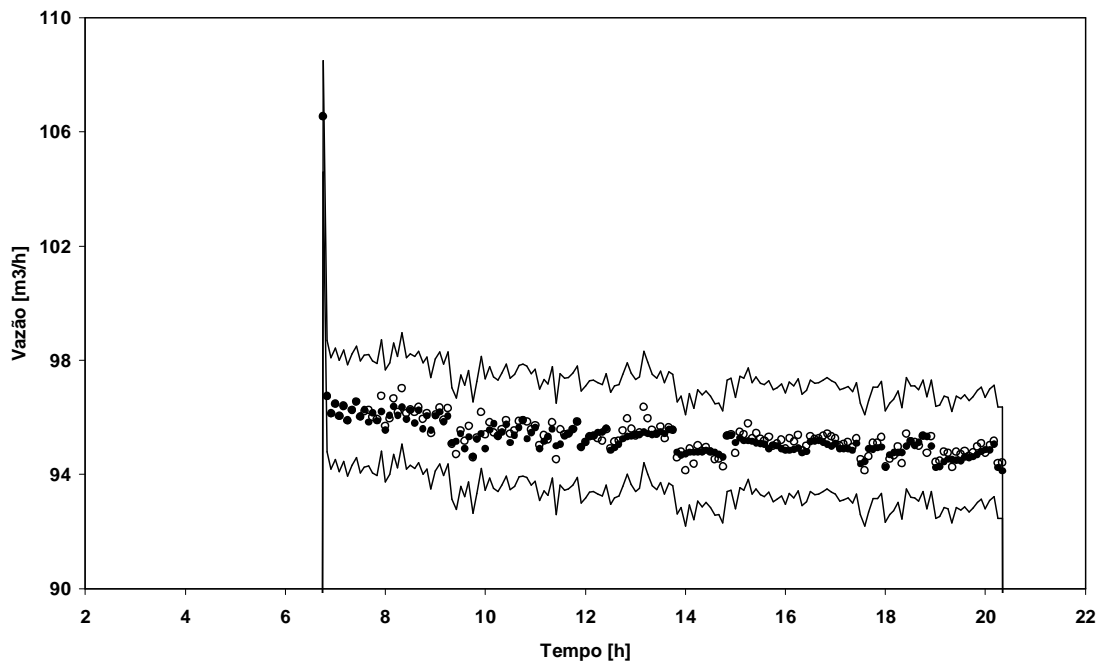


Figura 39 – Caso 2: Vazão no local D

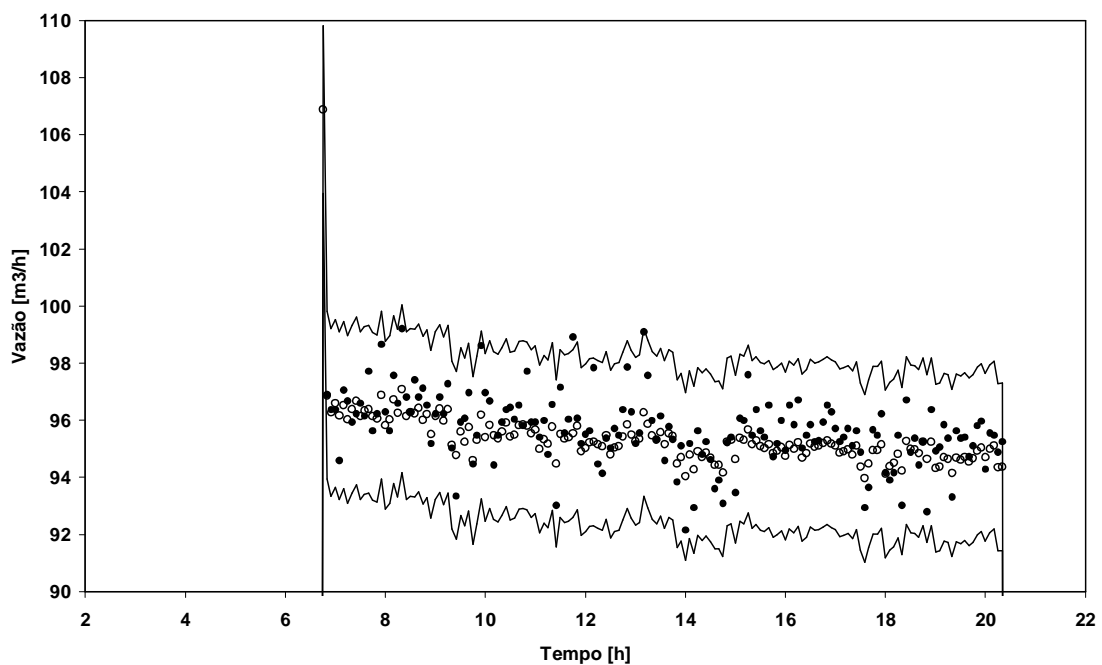


Figura 40 – Caso 2: Vazão no local E

Também é importante observar que a instabilidade e os erros grosseiros que apareceram no envio de diesel não influenciam nos resultados da operação de envio de gasolina, uma vez que as operações são independentes e o modelo descreve esta independência.

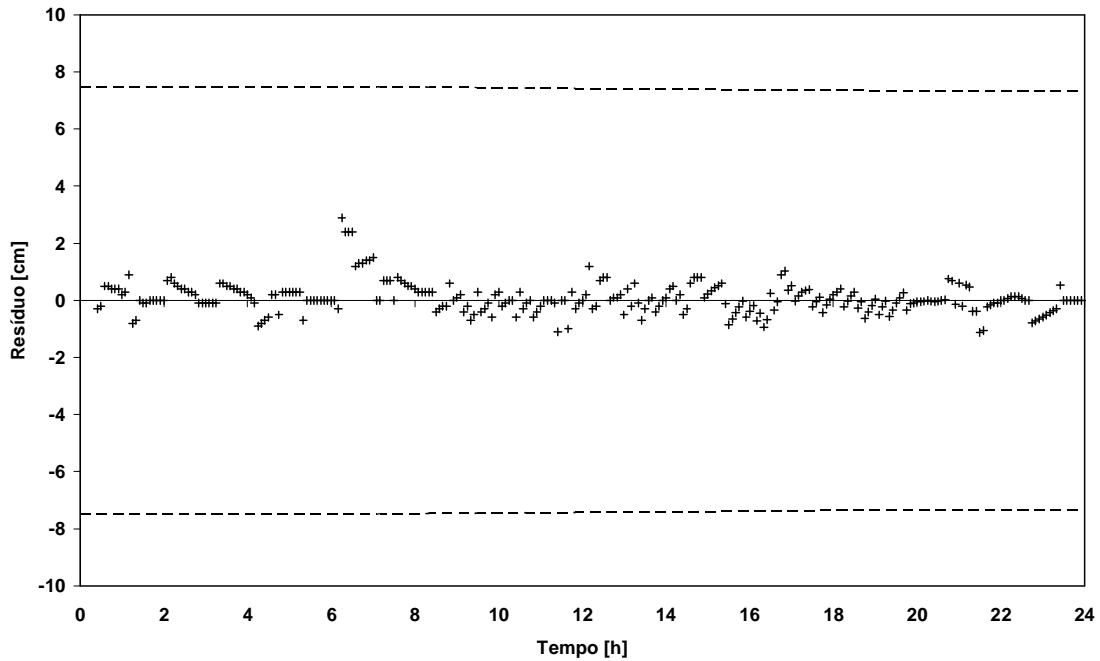


Figura 41 – Caso 2: Resíduos do nível do tanque TQ03

A Figura 41 mostra os resíduos para o nível do tanque TQ03. Uma observação interessante é comparar os resíduos deste tanque com os do tanque TQ01, neste mesmo Caso 2, onde ocorreram problemas de instabilidade no bombeio.

Os gráficos de resíduos das vazões nos locais D e E apresentados na Figura 42 e Figura 43 são bastante similares àqueles obtidos no Caso 1. Pode-se observar um padrão de comportamento para estas medições, independente do tanque em operação.

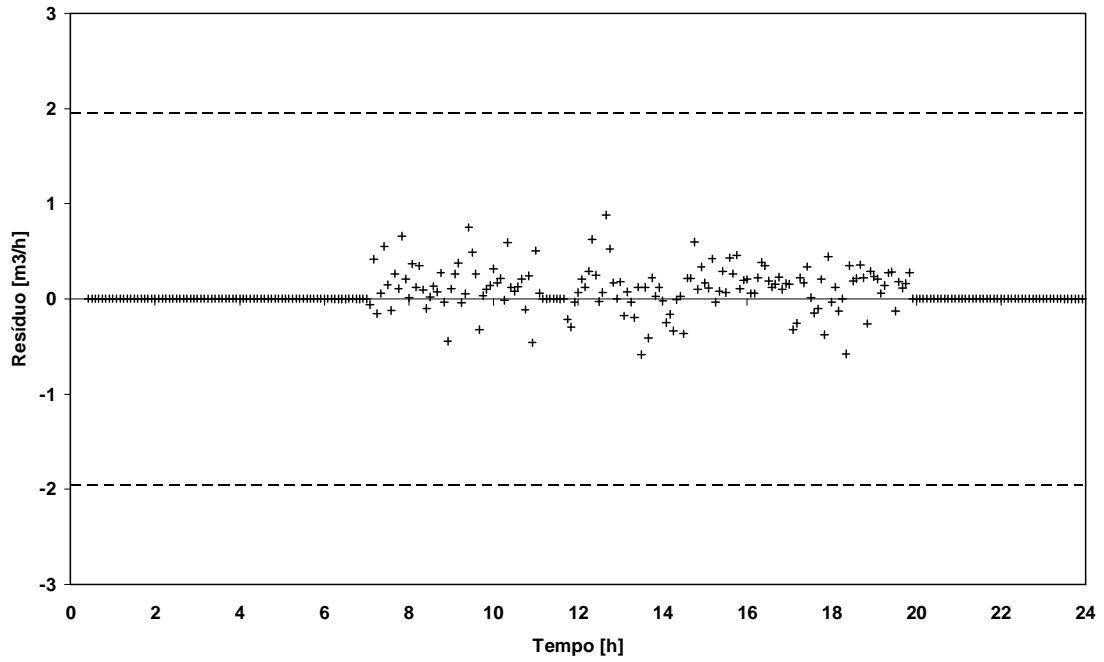


Figura 42 – Caso 2: Resíduo para a vazão no local D

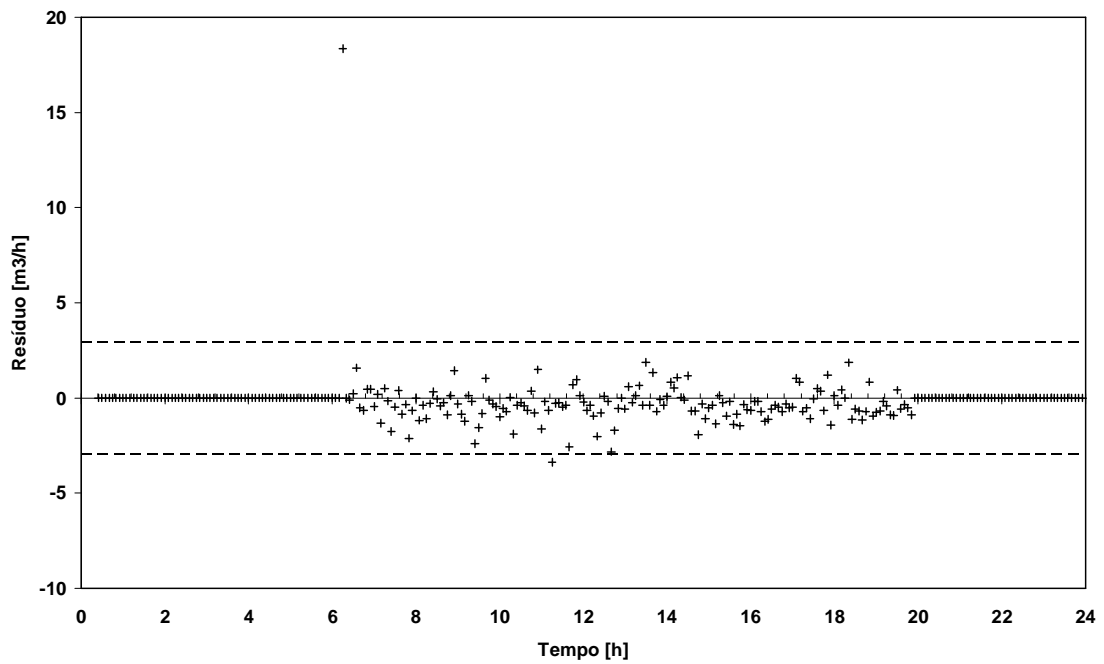


Figura 43 – Caso 2: Resíduos para a vazão no local E

5.3. Caso 3 – Desvio Sistemático de Instrumentação

5.3.1. Características do Caso 3

- a) 24 horas (um dia) de operação
- b) Introduzido um erro sistemático (*bias*) em uma das medições de vazões.

5.3.2. Seqüência operacional do Caso 3

a) 00h00min às 23h59min: Recebimento de diesel pelo tanque TQ01, com algumas mudanças de *set-point* de vazão e uma interrupção em torno de 10h30min até as 12h00min.

b) 06h40min às 16h45min: Envio de diesel pelo tanque TQ02, a uma vazão de aproximadamente 400m³/h.

c) 06h45min às 19h25min: Envio de gasolina pelo tanque TQ03, a uma vazão de aproximadamente 95m³/h até que, às 13h10min, foi introduzido um erro sistemático (fator de 0,93) na medição da vazão no local D. Este erro sistemático é acentuado às 13h55min (fator de 0,87).

5.3.3. Resultados do Caso 3

Recebimento de Diesel pelo Tanque TQ01 (Caso 3)

Os ajustes da reconciliação de dados para as variáveis envolvidas nesta operação estão dentro dos limites de confiança. Com este resultado é interessante observar que o erro sistemático introduzido nos medidores envolvidos em outra operação não influencia estes aqui, indicando que falhas pontuais no sistema não comprometem todos os resultados. Estes resultados não serão apresentados por não contribuírem com mais informações além daquelas já mostradas nos exemplos anteriores.

Envio de Diesel pelo Tanque TQ02 (Caso 3)

Os resultados da operação de envio de diesel pelo Tanque TQ02 não sofreram influência do erro sistemático introduzido em outra operação, reforçando a colocação anterior.

Estes resultados também foram muito similares aos anteriores e não serão explorados.

Envio de Gasolina pelo Tanque TQ03 (Caso 3)

Neste caso, o erro sistemático introduzido durante a operação do sistema causou influência sobre os resultados obtidos.

Os resultados para a vazão do local D estão apresentados na Figura 44. Para o local E, os resultados estão apresentados na Figura 45. Observa-se, claramente, que as medições encontram-se fora dos intervalos de confiança da reconciliação.

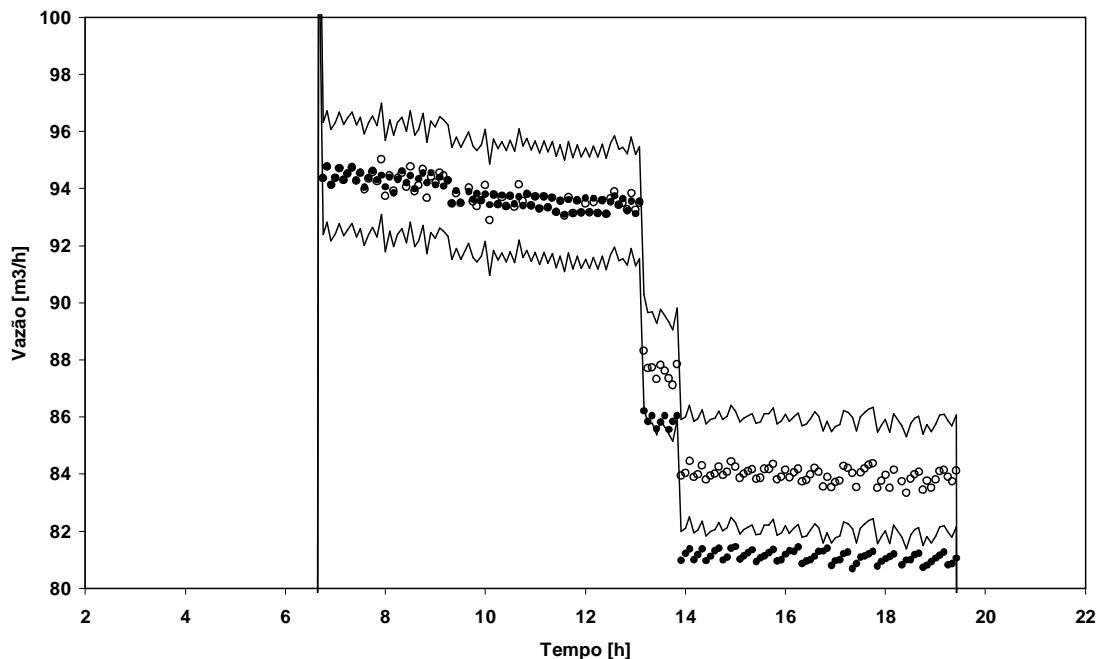


Figura 44 – Caso 3: Vazão no local D com presença de erro sistemático a partir das 13h00min, aproximadamente.

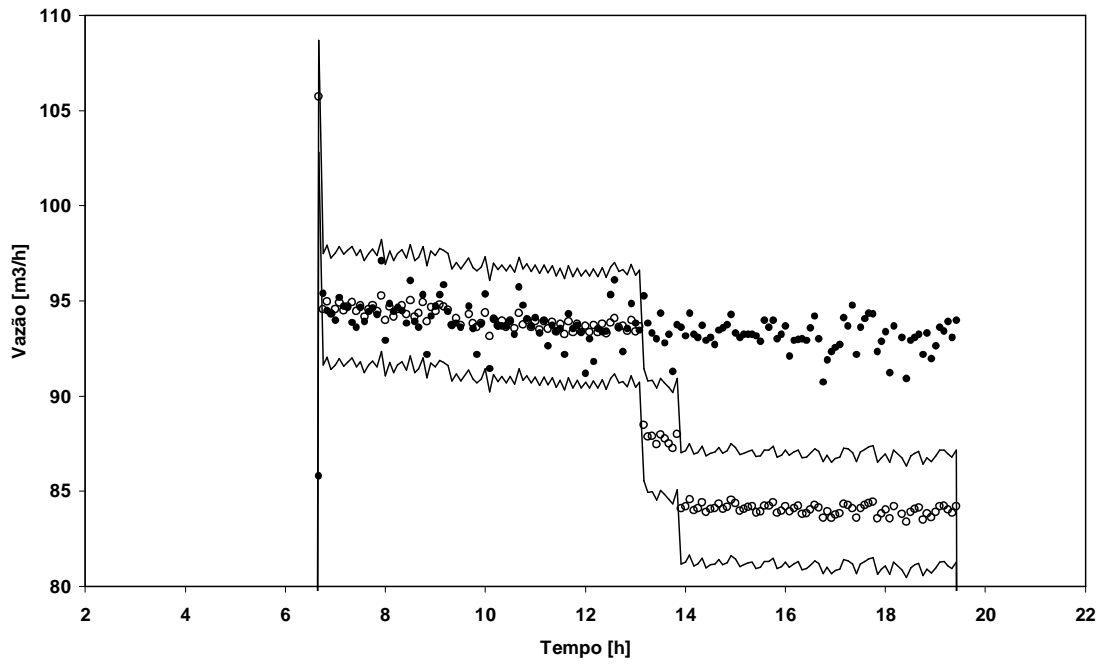


Figura 45 – Caso 3: Vazão no local E.

Percebe-se que as variáveis dos diferentes medidores envolvidos nesta operação de envio sofrem a influência do erro sistemático (ao contrário das medições de outras operações). A falha fica clara com a observação dos gráficos de resíduos.

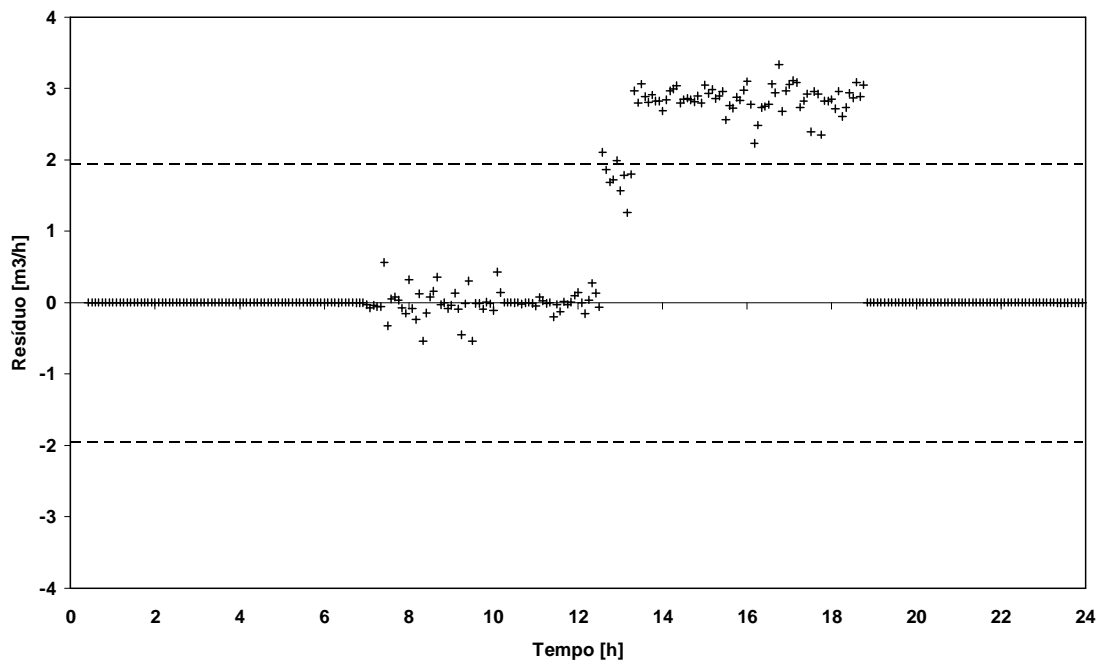


Figura 46 – Caso 3: Resíduos para a vazão do local D.

A Figura 46 apresenta os resultados para os resíduos do medidor de vazão do local D. O erro sistemático fica bem claro. Também se pode observar que o erro extrapola os limites de confiança. O mesmo pode ser observado na Figura 47, que mostra os resíduos do medidor de vazão do local E.

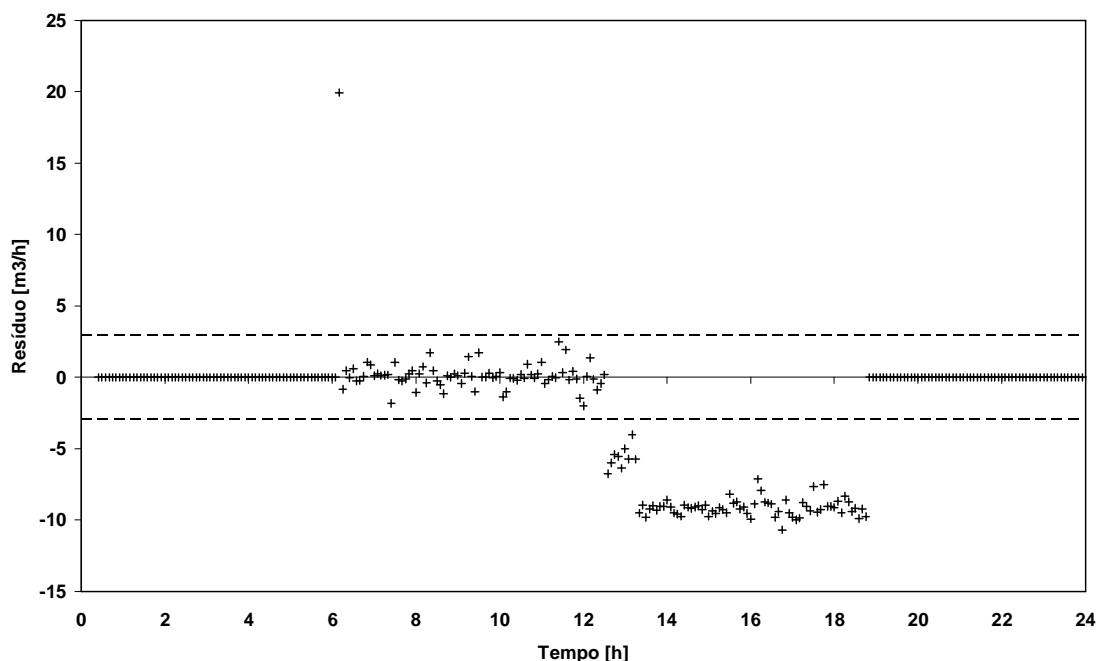


Figura 47 – Caso 3: Resíduos para a vazão do local E.

A Figura 48 apresenta os resíduos para o medidor de nível do tanque TQ03, envolvido nesta operação de envio. Observa-se também o claro aparecimento da falha após as 12h00min. Apesar de que os valores não ultrapassaram os limites de confiança, o padrão de comportamento dos resíduos pode ser uma interessante fonte de informação, independente da avaliação de erros grosseiros.

Os gráficos de resíduos mostram, portanto, que é possível a identificação deste tipo de falha com a técnica da reconciliação de dados. Ao contrário dos picos causados por mudanças de *set-point* exibidos em outros exemplos, estas falhas acarretam em fugas consistentes da média residual zero. O sistema é, portanto, capaz de diagnosticar possíveis falhas e sugerir que alguns instrumentos precisam ter a calibração verificada.

Estas observações provam que a reconciliação de dados também é capaz de distinguir entre uma mudança de *set-point* ou dinâmica de processo de um erro sistemático. Nos dois primeiros casos, os instrumentos “concordam” entre si (através do modelo), já no último caso – erro sistemático – é como se os instrumentos “discordassem” uns dos outros, gerando grandes resíduos.

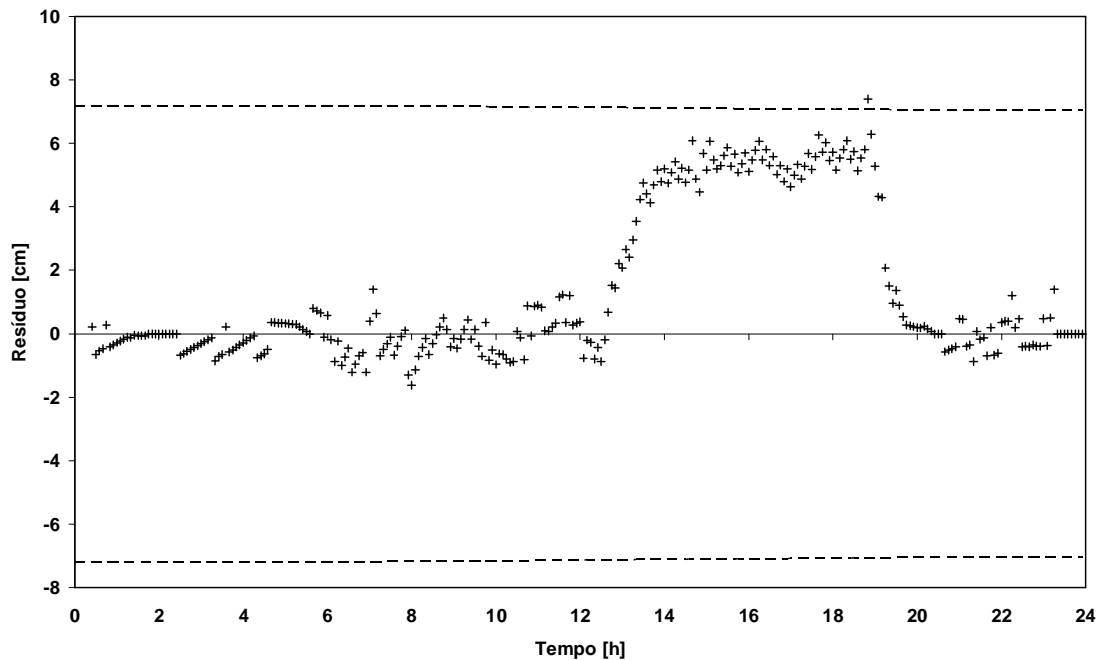


Figura 48 – Caso 3: Resíduos para o nível do tanque TQ03.

5.4. Caso 4 – Falha de Instrumentação de Nível (Erro de Saturação)

5.4.1. Características do Caso 4

- a) 24 horas (um dia) de operação
- b) Introduzido um erro de medição de nível em um dos tanques do terminal.

5.4.2. Seqüência operacional do Caso 4

a) 03h35min às 18h10min: Recebimento de diesel pelo tanque TQ02, com algumas mudanças de *set-point* de vazão. A medição do nível do tanque TQ02, que deve subir em função do recebimento, foi manualmente congelada no sistema de automação do terminal às 08h00min, voltou a indicar aumento de produto às 13h00min e foi novamente congelada às 16h25min.

b) 06h30min às 15h50min: Envio de diesel pelo tanque TQ01, a uma vazão de aproximadamente 400m³/h.

c) 06h35min às 20h15min: Envio de gasolina pelo tanque TQ03, a uma vazão de aproximadamente 95m³/h.

d) 18h15min às 23h59min: Recebimento de diesel pelo tanque TQ01.

5.4.3. Resultados do Caso 4

Recebimento de Diesel pelo tanque TQ02

Nesta operação foi introduzida uma falha no medidor de nível. Esta falha consiste em manter o nível congelado durante algumas horas, durante o recebimento de Diesel (neste período o nível deveria estar subindo). Em seguida, o nível realiza a trajetória ascendente que deveria ter feito anteriormente. Isto é, foi introduzido um atraso no medidor. A Figura 49 apresenta o perfil da variação de nível (e seu valor reconciliado).

Pela Figura 49, observa-se o congelamento do nível entre 08h00min e 13h00min. O valor reconciliado, por sua vez, continua inicialmente sua trajetória ascendente (influenciado pela vazão de recebimento, no local A). Esta trajetória ascendente é reduzida, até permanecer em valor constante, porém com boa diferença do nível medido.

Este comportamento se deve à janela de tempo. Enquanto existe influência de valores ascendentes de nível, a reconciliação de dados resulta em trajetória ascendente, quando a janela passa a ser ocupada totalmente por valores constantes de medição de nível, a técnica encontra um limitador para continuar o movimento de

ascensão. Nesse momento, a função objetivo da formulação de reconciliação apresenta um mínimo maior do que o usual.

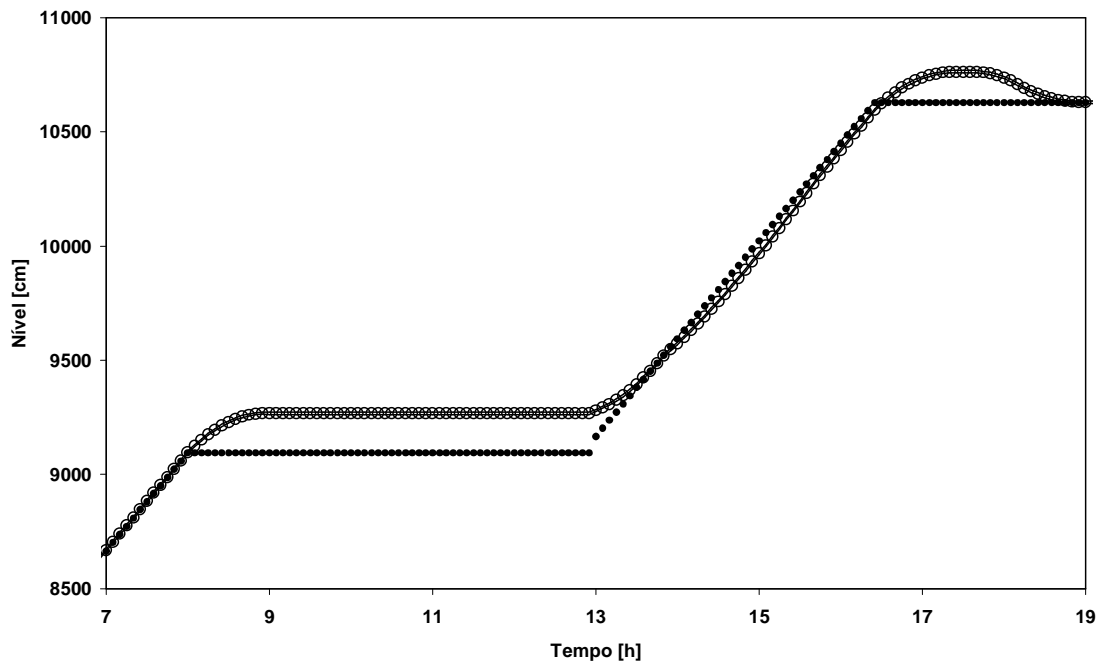


Figura 49 – Caso 4: Perfil do nível no tanque TQ02

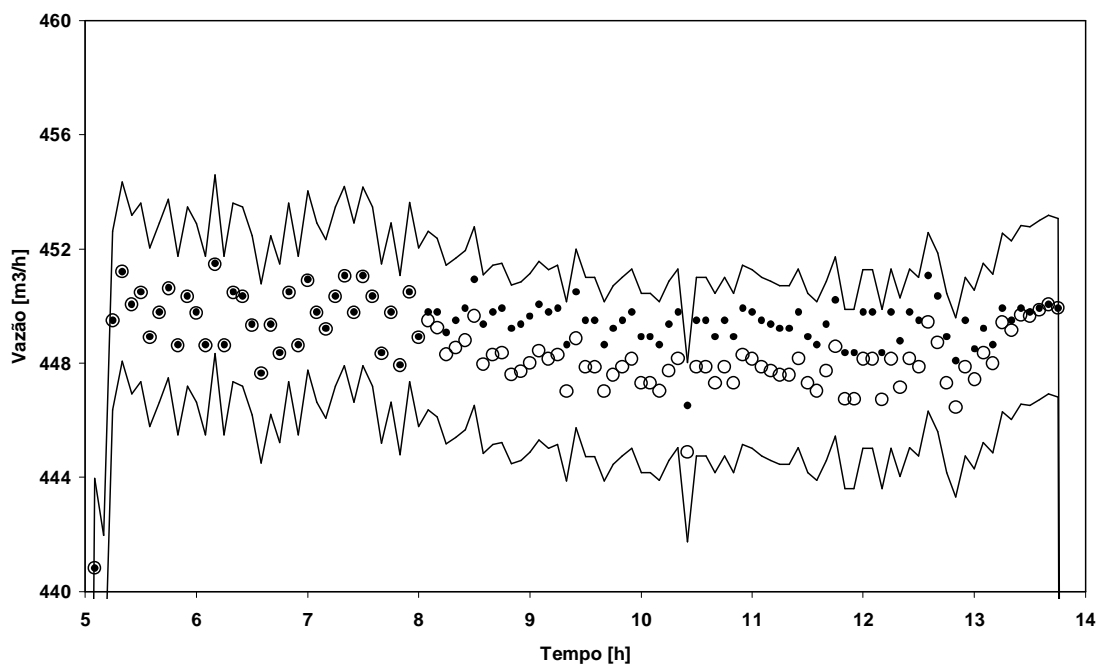


Figura 50 – Caso 4: Vazão no local A

A vazão envolvida nesta operação é aquela medida no local A do terminal. A Figura 50 mostra o comportamento desta variável e seu valor reconciliado. Observa-se que até o momento da falha (08h00min), os valores medidos e reconciliados estão muito próximos – fenômeno já identificado em outros exemplos anteriores para esta vazão – mas a partir do congelamento do nível, os valores reconciliados são apresentados bem abaixo dos medidos. Apesar disto, os valores permanecem dentro do limite de confiança estabelecido.

A Figura 51 e a Figura 52 mostram os resíduos dos medidores de nível do TQ02 e de vazão do local A, respectivamente. Novamente, pode ser claramente identificado um padrão de comportamento anormal e diferente dos exemplos com ausência de falhas.

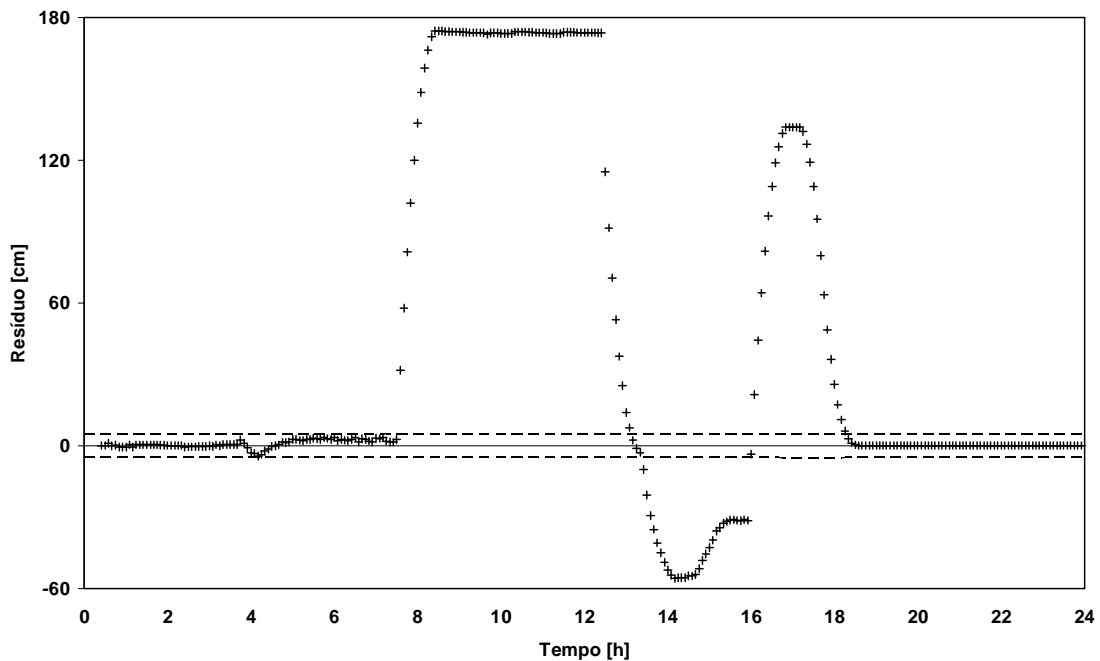


Figura 51 – Caso 4: Resíduos para o nível no tanque TQ02

Observa-se que no caso do nível do tanque (Figura 51), há um ajuste muito expressivo, com forte fuga dos limites de confiança. Já no medidor de vazão do local A (Figura 52) os resíduos permanecem dentro dos limites de confiança, apesar do padrão de comportamento anormal.

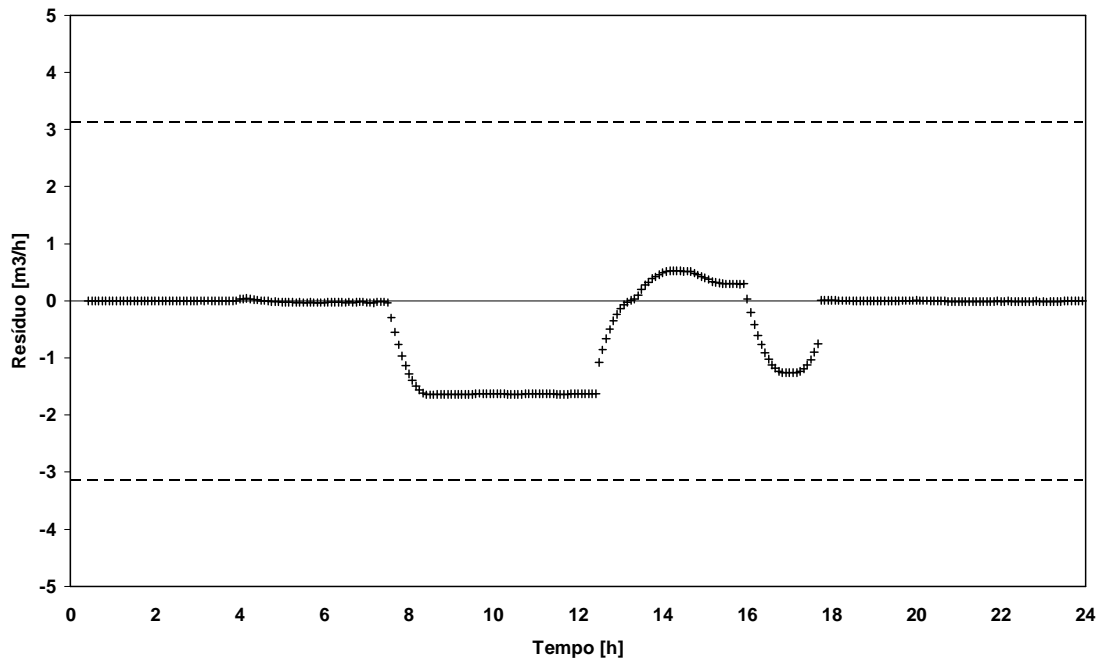


Figura 52 – Caso 4: Resíduos para a vazão no local A

Envio de Diesel pelo tanque TQ01, Recebimento de Diesel pelo Tanque TQ01 e Envio de Gasolina pelo Tanque TQ03

As demais operações ocorreram sem problemas e não foram influenciadas pelas falhas do medidor de nível do tanque TQ02.

O medidor do local A, por exemplo, que apresentou diferenças entre valores medidos e reconciliados enquanto operava com o tanque TQ02, quando passou a operar com o TQ01 – a partir das 18h15min conforme seqüência operacional apresentada – não apresentou mais estas diferenças. Isto pode ser observado no gráfico de resíduos da Figura 52 e no gráfico da vazão apresentado na Figura 53, que mostra apenas o trecho entre 20h00min e 24h00min.

Portanto o sistema de reconciliação de dados pode ser capaz de identificar o erro e até sugerir a fonte de erro.

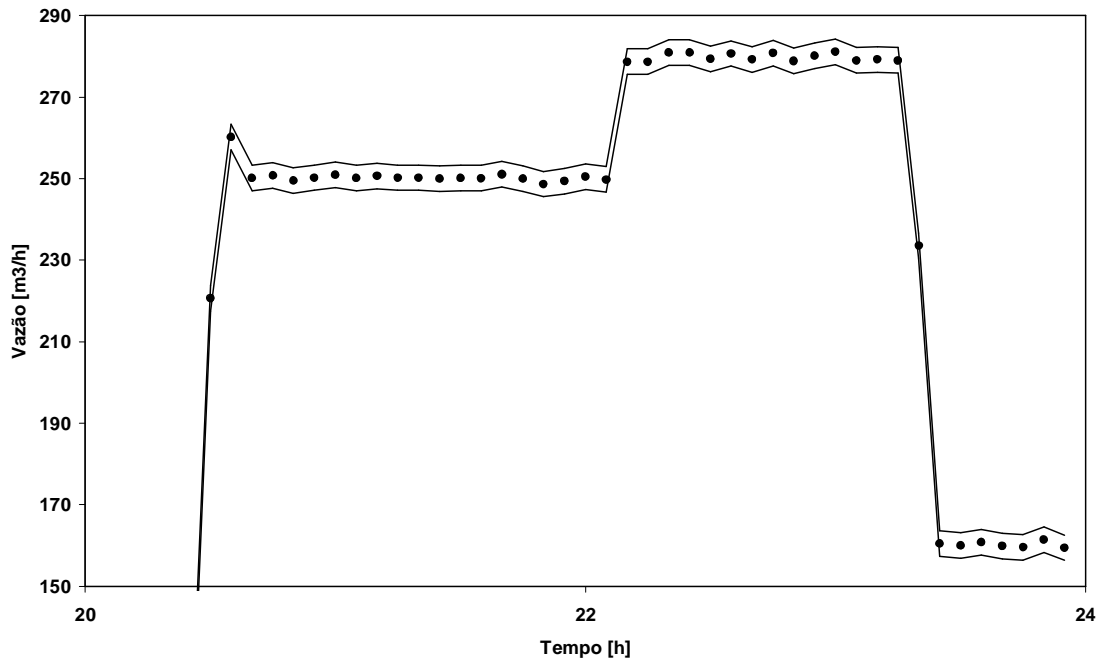


Figura 53 – Caso 4: Vazão do local A, a partir das 20h00min, quando estava operando com o tanque TQ01 (operação de recebimento).

5.5. Caso 5 – Erro de Medição (Influência da Temperatura)

5.5.1. Características do Caso 5

- a) 24 horas (um dia) de operação
- b) Introduzido erro de medição na temperatura do local C

5.5.2. Seqüência operacional do Caso 5

- a) 00h00min às 16h55min: Recebimento de gasolina pelo tanque TQ03.
- b) 06h40min às 20h05min: Envio de diesel pelo tanque TQ2. Foram introduzidos erros de medição de temperatura no local C (duto de diesel): a partir das 13h15min este medidor, que marcava em torno de 27° C, passou a marcar 15° C; às 19h40min, passou a marcar 20° C; e às 21h50min, passou a marcar 0° C.
- d) 06h40min às 20h20min: Envio de gasolina pelo tanque TQ04.

d) 20h40min às 23h59min: Recebimento de gasolina pelo tanque TQ04.

5.5.3. Resultados do Caso 5

O objetivo deste caso é identificar a influência da temperatura na reconciliação de dados. As medições de vazão e nível foram as mais exploradas nos casos anteriores, pois têm influência direta no resultado econômico e operacional do terminal.

Além disto, observou-se que as variáveis de temperatura, pressão e densidade sofrem pouca influência das falhas dos medidores de vazão e nível explorados nos casos anteriores. Isto se deve ao fato de que a operação do terminal ocorre em condições de temperatura e pressão muito próximas dos valores de referência – 20° C e 1 atm – e estas variáveis participam do modelo para o cálculo do fator de correção.

Envio de Diesel pelo Tanque TQ02

Apesar da influência aparentemente limitada, quando a falha ocorreu no próprio medidor de temperatura, foi observado que os valores reconciliados sofrem ajustes expressivos e grandes resíduos são gerados.

A Figura 54 mostra os resultados para a vazão no local B. Esta variável sofreu influência da temperatura, apesar de ter mantido as medições dentro dos limites de confiança da reconciliação de dados.

A vazão no local C, apresentada na Figura 55, sofre influência mais direta da temperatura – provavelmente pelo fato de serem do mesmo local de medição, o local C –, apresentando os valores medidos, após a ocorrência da falha, fora dos limites de confiança.

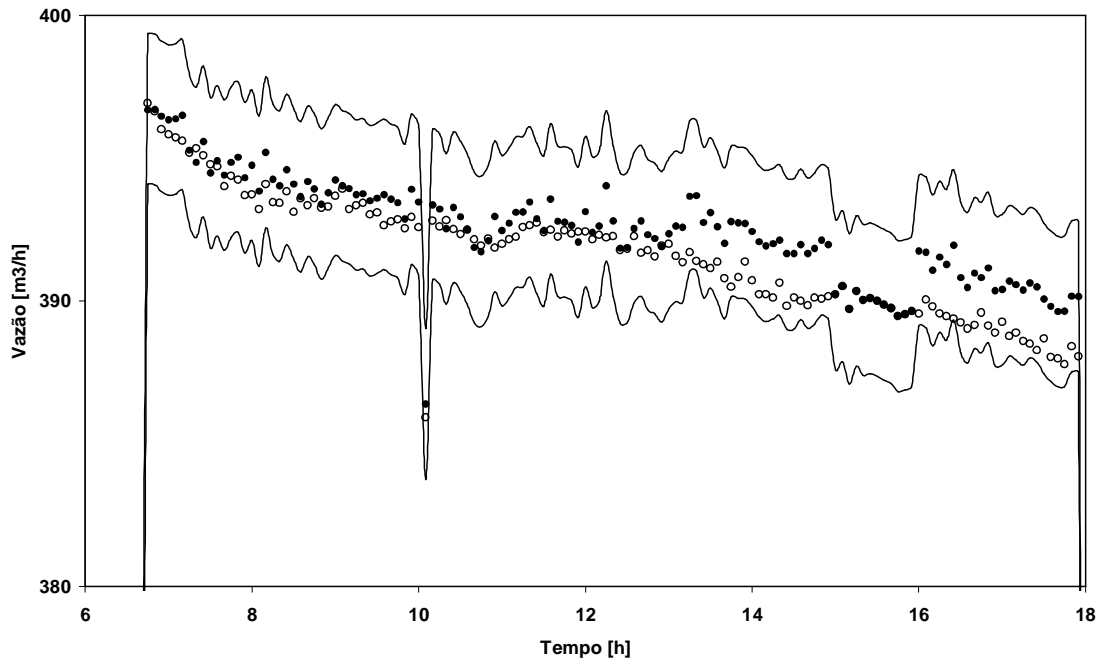


Figura 54 – Caso 5: Vazão no local B

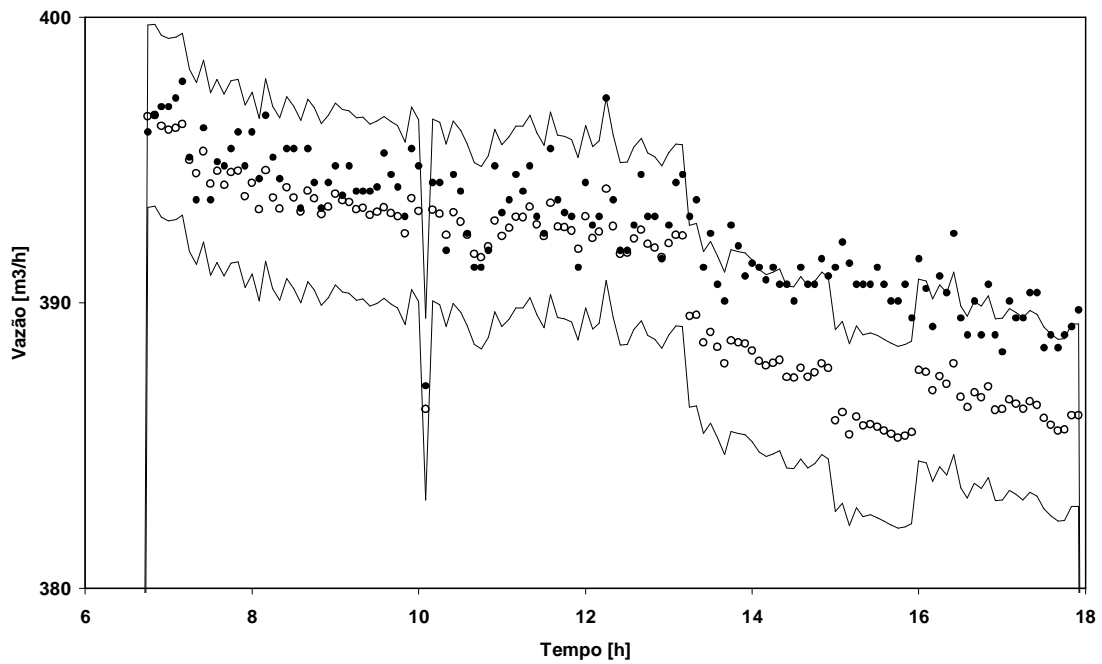


Figura 55 – Caso 5: Vazão no local C

Nos gráfico de resíduos, a influência da falha de medição da temperatura na vazão do local C também é explicitada. A Figura 56 mostra os resíduos para a vazão no local B, e a Figura 57, no local C. Observa-se que, a partir das 13h00min

aproximadamente – horário do início da falha – ocorre um desvio que vai se acentuando conforme o erro da medição também é acentuado.

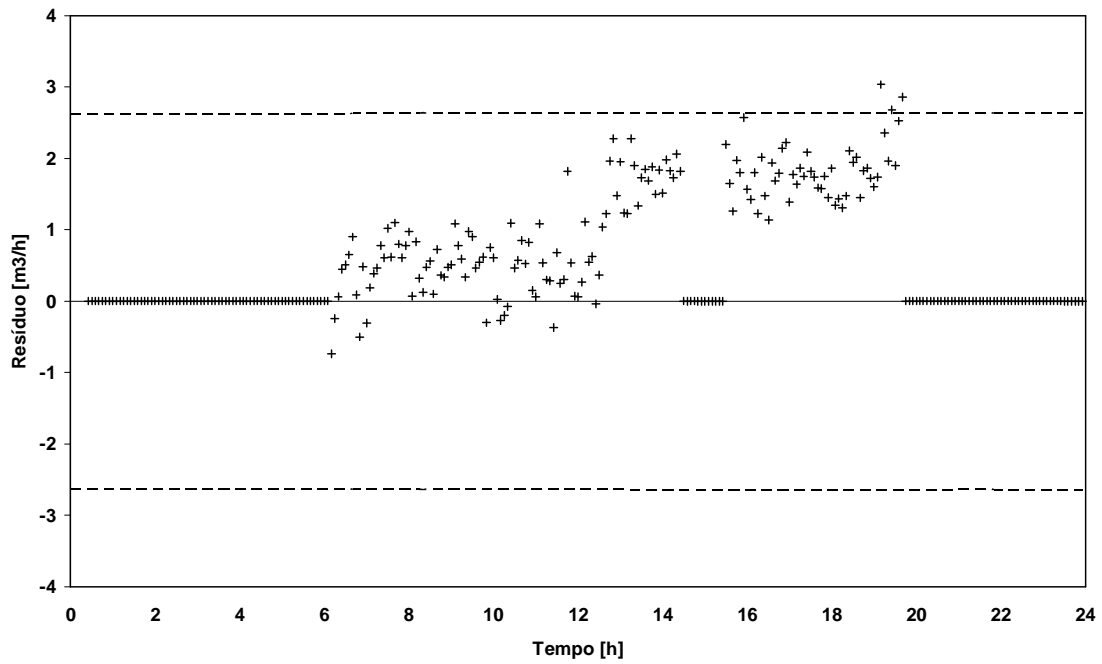


Figura 56 – Caso 5: Resíduos de vazão no local B

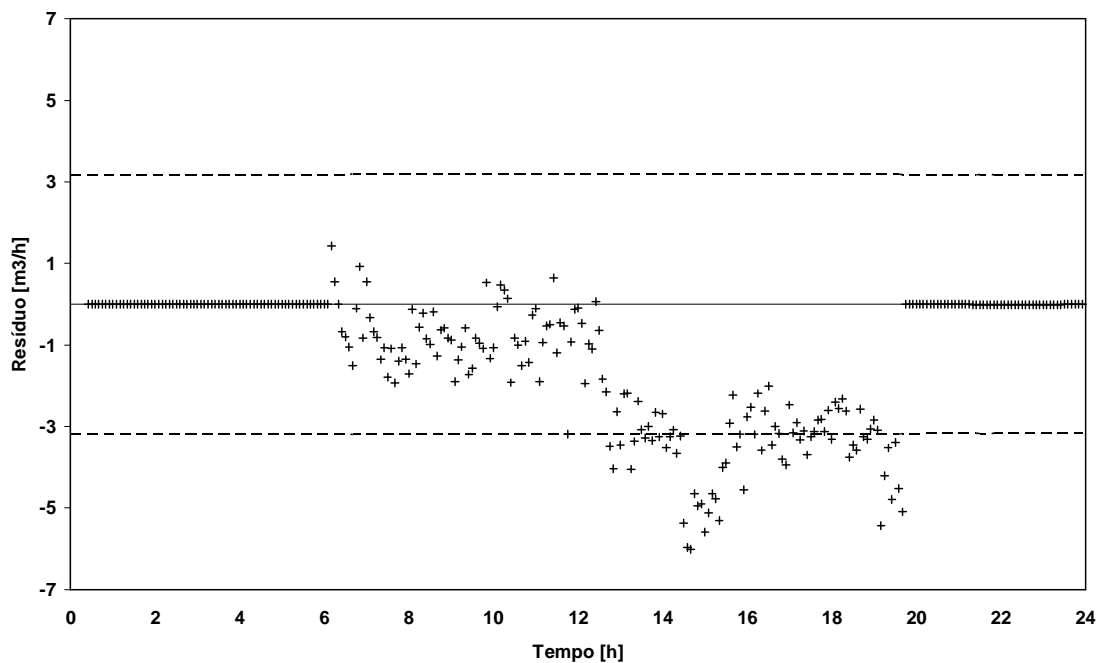


Figura 57 – Caso 5: Resíduos de vazão no local C

A Figura 58 apresenta os resíduos da própria medição de temperatura no local C. Apesar de gerar resíduos expressivos nas vazões, os resíduos na temperatura são pequenos e estão abaixo dos limites de confiança (na Figura 58 os limites de confiança estão fora da escala). Mas ainda assim é possível observar o padrão de comportamento de um erro sistemático.

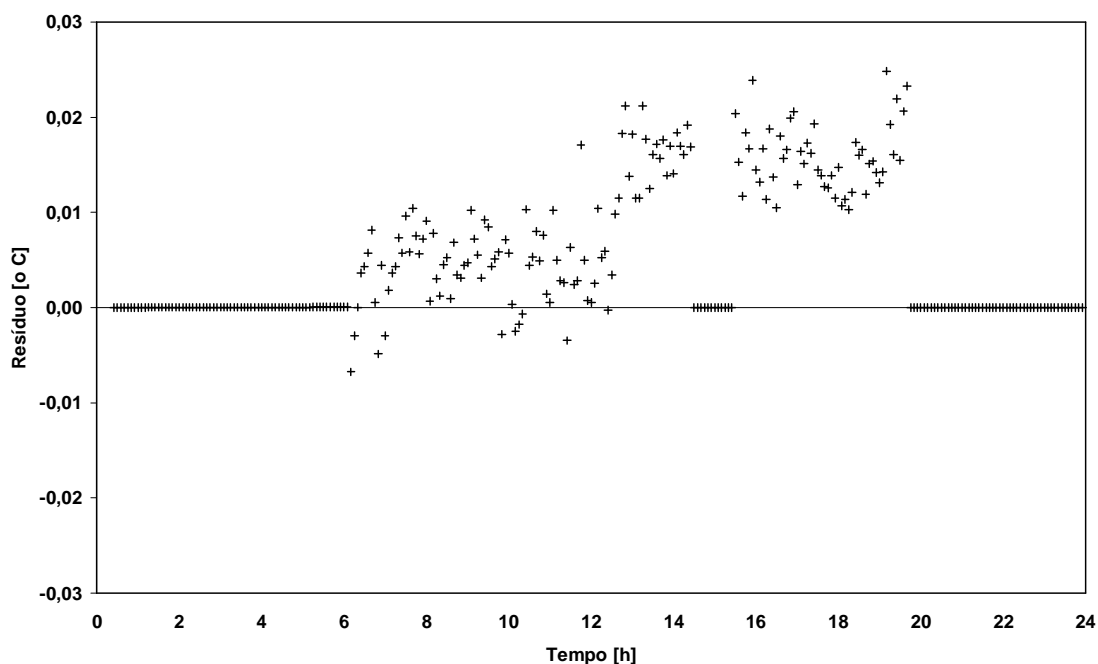


Figura 58 – Caso 5: Resíduos da temperatura do local C (os limites de confiança estão acima dos limites do gráfico).

5.6. Caso 6 – Erro de Medição (Influência da Pressão)

5.6.1. Características do Caso 6

- a) 24 horas (um dia) de operação
- b) Introduzido erro de medição na pressão do local B

5.6.2. Seqüência operacional do Caso 6

a) 00h00min às 22h30min: Recebimento de gasolina pelo tanque TQ04.

b) 06h40min às 20h20min: Envio de diesel pelo tanque TQ02, a uma vazão de aproximadamente $390\text{m}^3/\text{h}$. Foi introduzido um erro de medição de pressão do local B (duto de diesel). A partir das 16h30min, o medidor de pressão que marcava em torno de $8,1\text{ kgf/cm}^2$ passou a marcar $0,1\text{ kgf/cm}^2$.

c) 06h40min às 20h20min: Envio de gasolina pelo tanque TQ03, a uma vazão de aproximadamente $95\text{m}^3/\text{h}$.

5.6.3. Resultados do Caso 6

O objetivo deste caso é identificar a influência da pressão na reconciliação de dados. Os resultados obtidos indicam que os valores reconciliados não sofreram ajustes em função do erro de medição de pressão. A Figura 59 apresenta os resíduos para a pressão do local B cujo medidor foi sujeito ao erro de medição. Observa-se que esta variável sofre ajuste praticamente nulo. Não serão apresentados outros gráficos, pois não trazem nenhuma nova contribuição para a discussão do trabalho.

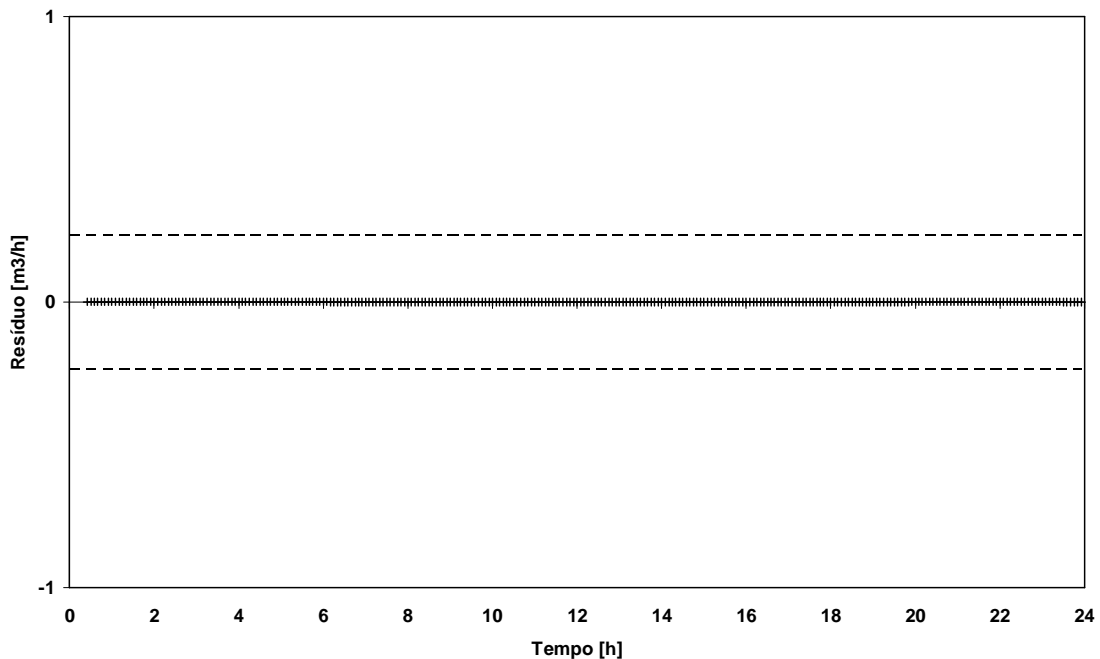


Figura 59 – Caso 6: Resíduos da pressão do local B

Este resultado se deve à baixa influência da correção de pressão no modelo apresentado. Deve ser observado que os fluidos transportados (gasolina e diesel) estão em estado líquido e têm baixa compressibilidade. Também cabe observar que as pressões operacionais do sistema normalmente não ultrapassam 9 kgf/cm^2 . Este caso demonstra que para a formulação proposta, a reconciliação de dados não é capaz de diagnosticar falhas relativas à medição de pressão.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1. Conclusões

Este trabalho apresentou a aplicação da técnica de reconciliação de dados em tempo real, em um terminal de transporte e armazenamento de petróleo, através do desenvolvimento do *software* RDTR.

O modelo engloba um total de 30 variáveis reconciliáveis, incluindo 4 variáveis dinâmicas integradas no tempo (nível de quatro tanques).

O *software* RDTR encontra-se em operação no sistema de automação do terminal e apresenta um desempenho satisfatório para operação em tempo real. Assim, conclui-se que as técnicas de minimização da função objetivo, o procedimento numérico adotado e a estratégia de implementação em *software* são adequados.

A introdução de falhas no sistema de automação implicou em alterações nos valores reconciliados, provando que esta técnica pode ser útil para diagnóstico de falhas e da qualidade do processo ou da instrumentação.

A observação dos resíduos gerados após a reconciliação (diferença entre os valores reconciliados e os valores medidos) provou ser uma boa fonte de informação para monitoração e identificação de falhas.

6.2. Sugestões

Diversas questões abordadas ao longo do trabalho merecem ser estudadas e consolidadas no âmbito da reconciliação de dados. Dentre estas, destacam-se duas:

- a) Definição de critérios para escolha da matriz de erros.
- b) Dimensionamento da janela de tempo.

No que diz respeito à implementação da reconciliação de dados como ferramenta de diagnóstico, merecem atenção os seguintes desenvolvimentos:

a) Estudos para análise dos resíduos e estabelecimento de critérios de caracterização de falhas.

b) Explorar o uso das técnicas estabelecidas de Detecção de Falhas em conjunto com a reconciliação de dados.

c) Avaliação do uso da reconciliação de dados como ferramenta única para identificação de erros, detecção de falhas e ajuste de medições.

Finalmente, uma questão de forte impacto econômico e extremamente relevante para companhias transportadoras de petróleo e derivados deve ser abordada e consolidada: utilização da reconciliação de dados para determinação de volumes transportados para fins comerciais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABU-EL-ZEET, Z. H., BECERRA, V. M., ROBERTS, P. D., 2002, "Combined Bias and Outlier Identification in Dynamic Data Reconciliation", *Computers and Chemical Engineering*, v. 26, pp. 921-935.
- ALBUQUERQUE, J. S., BIEGLER, L. T., 1996, "Data Reconciliation and Gross-Error Detection for Dynamic Systems", *AIChE Journal*, v. 42, pp. 2841-2856.
- AMAND, Th., HEYEN, G, KALITVENTZEFF, B., 2001, "Plant Monitoring and Fault Detection – Synergy Between Data Reconciliation and Principal Component Analysis", *Computers and Chemical Engineering*, v. 25, pp. 501-507.
- AMY, L. T., 1992, *Automation Systems for Control and Data Acquisition*, 2 ed., North Carolina, ISA.
- ANDERSON, T.F., ABRAMS, D.S., GRENS II, E.A., 1978, "Evaluation of Parameters for Nonlinear Thermodynamic Models", *AIChE Journal*, v. 24, pp. 20-29.
- ANP, 2000, *Portaria Conjunta ANP / MME número 1 de 19/06/2000*, Diário Oficial da União.
- API, 1984, *API STANDARD 2540 – Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 11.2.1M – Compressibility Factors for Hydrocarbons: 638-1074 Kilograms per Cubic Meter Range*, 1 ed., Washington, API Publishing Services.
- API, 2005, *API STANDARD 2610 – Design, Construction, Operation, Maintenance, and Inspection of Terminals & Tank Facilities*, 2 ed., Washington, API Publishing Services.
- ASPENTECH, 2003, *Aspen Advisor Brochure*, AspenTech.
- BAGAJEWICZ, M. J., 2000, "A Brief Review of Recent Developments in Data Reconciliation and Gross Error Detection", *Latin America Applied Research*, v. 30, 335-342.
- BAGAJEWICZ, M. J., CABRERA, E., 2003, "Data Reconciliation in Gas Pipeline Systems", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 42, pp. 5596-5606.

- BAGAJEWICZ, M. J., JIANG, Q., 1997, "Integral Approach To Plant Linear Dynamic Reconciliation", *AICHE Journal*, v. 43, pp. 2546-2558.
- BAGAJEWICZ, M. J., JIANG, Q., 1998, "Gross Error Modeling and Detection in Plant Linear Dynamics Reconciliation", *Computers and Chemical Engineering*, v. 42, pp. 1789-1809.
- BAGAJEWICZ, M. J., MULLICK, S. L., 1995, "Reconciliation of Plant Data. Applications and Future Trends", In: *AICHE Spring National Meeting*, Houston, Texas, 1995.
- BAI, S., MCLEAN, D. D., THINBAULT, J., 2007, "Impact of Model Structure on the Performance of Dynamic Data Reconciliation", *Computers and Chemical Engineering*, v. 31, pp. 127-135.
- BASCUR, O. A., LINARES, R., 2006, "Grade Recovery Optimization Using Data Unification and Real Time Gross Error Detection", *Minerals Engineering*, v. 19, pp. 696-702.
- BOUROUIS, M., PIBOULEAU, L., FLOQUET, P., *et al.*, 1998, "Simulation and Data Validation in Multistage Flash Desalinization Plants", *Desalinization*, v. 115, pp. 1-14.
- BOYER, S. A., 1999, *SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition*, 2 ed, North Carolina, ISA – Instrumentation Systems and Automation Society.
- BRAUWERE, A., PINTELON, R., RIDDER, F. D., *et al.*, 2007, "Estimation of Heterocedastic Measurement Noise Variances", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 86, pp. 130-138.
- BRITT, H. I., LUCKE, R. H., 1973, "The Estimation of Parameters in Nonlinear Implicit Models", *Technometrics*, v. 15, no. 2, pp. 233-247.
- BUSSANI, G., CHIARI, M., GROTTORI, M. G. *et al.*, 1995, "Application of Data Reconciliation and Optimization Procedure to Hydrogen Plant", *Computers and Chemical Engineering*, v. 19, pp. 299-304.
- CARDOSO, L. C. S., 2004, *Logística do Petróleo: Transporte e Armazenamento*, 1 ed. São Paulo, Editora Interciência.

- CHARPENTIER, V., CHANG, L. J., SCHWENZER, G. M., BARDIN, M. C., 1991, "An On-Line Data Reconciliation System for Crude and Vacuum Units", In: *NPRA Computer Conference*, Houston, Texas.
- CHEN, J., ROMAGNOLI, J. A., 1998, "A Strategy for Simultaneous Dynamic Data Reconciliation and Outlier Detection", *Computers and Chemical Engineering*, v. 22, pp. 559-562.
- CHEN, X., PIKE, R. W., HERTWIG, T. A., HOPPER, J. R., 1998, "Optimal Implementation of On-line Optimization", *Computers and Chemical Engineering*, v. 22, pp. S435-S442.
- CHIARI, M. BUSSANI, G., GROTTOLI, M. G., PIERUCCI, S., 1997, "On-line Data Reconciliation and Optimization: Refinery Applications", *Computers and Chemical Engineering*, v. 21, pp. 1185-1190.
- CNP, 1970, *Resolução CNP Nº de 25 de junho de 1970-1521a Seção Ordinária*, Diário Oficial da União, 13/07/1970.
- COELHO, R. M. L., MEDEIROS, J. L., 1999, "Reconciliação de Dados e Detecção de Vazamentos em Redes Estacionárias de Escoamento Incompressível", In: *Empromer 99 – II Congresso de Engenharia de Processo do Mercosul*, Florianópolis, Brasil, Ago/Set.
- COGGAN, D. A., 2005, *Fundamentals of Industrial Control*, 2 ed., North Carolina, ISA.
- CROWE, C. M., 1996, "Data Reconciliation – Progress and Challenges", *Journal of Process Control*, v. 6, pp. 89-98.
- CROWE, C.M., CAMPOS, Y.A.G., HRYMAK, A, 1983, "Reconciliation of Process Flow Rates by Matrix Projection I: Linear Case", *AIChE Journal*, v. 29, pp. 881-888.
- EDGAR, T. F., HIMMELBLAU, D. M., 1988, *Optimization of Chemical Processes*, New York, McGraw-Hill.
- FABER, R., LI, B., LI, P., WOZNY, G., 2006, "Data Reconciliation for real-time Optimization of an Industrial Coke-oven-gas Purification Process", *Simulation Modeling Practice and Theory*, v. 14, pp. 1121-1134.

- FELDMAN, R. N., 2004, "Distributed Automation Systems Provide Information and Support to Decision", In: *Proceedings of IPC 2004 – International Pipeline Conference*, Calgary, Alberta, Canada, Out.
- INMETRO, 2003, *Portaria INMETRO / MDIC número 64*, Diário Oficial da União.
- ISLAM, K. A., WEISS, G. H., ROMAGNOLI, J. A., 1994, "Nonlinear Data Reconciliation for an Industrial Pyrolysis Reactor", *Computers and Chemical Engineering*, v. 18, pp. 217-221.
- JANG, S., JOSEPH, B., MUKAI, H., 1986, "Comparison of two approaches to on-line parameter estimation of nonlinear systems", *Industrial Engineering and Chemical Process Design Development*, v. 25, pp. 809-814.
- KALMAN, R. E., 1960, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems", *Trans. ASME J. Basic Eng.*, v. 82D, pp. 35-45.
- KNEPER, J. C., GORMAN, J. W., 1980, "Statistical Analysis of Constrained Data Sets", *AIChE Journal*, v. 26, pp. 260-264.
- KUHEN, D.R., DAVIDSON, H., 1961, "Computer control. II. Mathematics for control", *Chemical Engineering Progress*, v. 57, pp. 44-47.
- LAW, V. J., BAILEY, R. V., 1963, "A Method for the Determination of Approximate Systems Transfer Functions", *Chemical Engineering Science*, v. 18, pp. 189-202.
- LEE, M. H., LEE, S. J., HAN, C., *et al.*, 1998, "Hierarchical on-line reconciliation and Optimization for and Industrial Utility Plant", *Computers and Chemical Engineering*, v. 22, pp. 247-254.
- LIEBMAN, M. J., EDGAR, T. F., LASDON, L. S., 1992, "Efficient Data Reconciliation and Estimation dos Dynamics Processes Using Nonlinear Programming Techniques", *Computers and Chemical Engineering*, v. 16, pp. 963-986.
- LIPTÁK, B., 2003, *Instrument Engineer's Handbook*, 4 ed., North Carolina, ISA - Instrumentation Systems and Automation Society.
- MAH, R. S. H., STANLEY, G. M., DOWNING, D. M., 1976, "Reconciliation and Rectification of Process Flow and Inventory Data", *Industrial Engineering and Chemical Process Design Development*, v. 15, pp. 175-183.

- MAH, R. S. H., TAMHANE, A. C., 1982, "Detection of Gross Error in Process Data", *AIChE Journal*, v. 28, pp. 828-830.
- MARQUES, J. A., 2006, *Reconciliação de Dados na Identificação e Caracterização de Balanços Hídricos em Plantas Industriais*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MUSKE, K. R., EDGAR, T. F., 1997, "Nonlinear state estimation", In: Henson, M. A., Seborg, D. E. (eds), *Nonlinear Process Control*, pp. 311-370, NJ, Prentice Hall.
- NARASIMHAN, S., JORDACHE, C., 2000, *Data reconciliation and gross error detection: an intelligent use of process data*. 1 ed. Houston, Gulf Publishing Company.
- NORONHA, F. B., PINTO, J. C., MONTEIRO, J. L., LOBÃO, M. W., SANTOS, T. J., 1993, *Um Pacote Computacional para Estimação de Parâmetros e Projeto de Experimentos*, Relatório Técnico COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- OLIVEIRA JR, A. M., 2006, *Estimação de Parâmetros em Modelos de Processo Usando Dados Industriais e Técnicas de Reconciliação de Dados*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ÖZYURT, D.B., PIKE, R.W., 2004, "Theory and practice of simultaneous data reconciliation and gross error detection for chemical process", *Computers and Chemical Engineering*, v. 28, pp. 381-402.
- PLACIDO, J., LOUREIRO, L. V., 1998, "Industrial Application of Data Reconciliation", *Computers and Chemical Engineering*, v. 22, pp. 1035-1038.
- PRATA, D. M., 2005, *Reconciliação de Dados em um Reator de Polimerização*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PRATA, D. M., LIMA, E. L., PINTO, J. C., 2006, "Simultaneous Data Reconciliation and Parameter Estimation in Bulk Polypropylene Polymerizations in Real Time", *Macromolecular Symposium*, v. 243, pp. 91-103.
- RAMAMURTHI, Y. SISTU, P.B., BEQUETTE, W., 1993, "Control-relevant dynamic data reconciliation and parameter estimation", *Computers and Chemical Engineering*, v.17. pp. 41-59.

- RAO, C. V., RAWLINGS, J. B., 2002, "Constrained Process Monitoring: Moving-Horizon Approach", *AIChE Journal*, v. 48, pp.97-107.
- REILLY, P., CARPANI, R., 1963, "Application of statistical theory of adjustment to material balances", In: *Proceedings of the 13th Canadian Chemical Engineering Conference*, Montreal, Quebec.
- ROLLIN D. K., DAVIS J. F., 1992, "Unbiased Estimation of Gross Errors in Process Measurements", *AIChE Journal*, v. 38, pp. 1514-1521.
- ROLLIN D. K., DAVIS J. F., 1993, "Gross Error Detection When Variance-Covariance Matrices are Unknown", *AIChE Journal*, v. 39, pp. 1335-1341.
- SANCHEZ, M., ROMAGNOLI, J., 1996, "Use of Orthogonal Transformations in Data Classification-Reconciliation", *Computers and Chemical Engineering*, v. 20, pp. 483-493.
- SANCHEZ, M., SEITONI, G., SCHHIB, S., ROMAGNOLI, J., 1996, "Gross Measurements Error Detection / Identification for an Industrial Ethylene Reactor", *Computers and Chemical Engineering*, v. 20, pp. 1559-1564.
- SEBORG, D. E., EDGAR, T. F., MELLICHAMP, D. A., 1989, *Process Dynamics and Control*, 1 ed., John Wiley and Sons.
- SODERSTROM, T. A., EDGAR, T. F., RUSSO, L. P., YOUNG, R. E., 2000, "Industrial Application of a Large-Scale Dynamic Data Reconciliation Strategy", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, v. 39, pp. 1686-1693.
- STANLEY, G. M., MAH, R. S. H., 1977, "Estimation of Flows and Temperatures in Process Networks", *AIChE Journal*, v. 23, pp. 642-650.
- TJOA, I. B., BIEGLER, L. T., 1991, "Simultaneous Strategies for Data Reconciliation and Gross Error Detection of Nonlinear Systems", *Computers and Chemical Engineering*, v. 15, pp. 679-690.
- TREVATHAN, V. L., 2006, *A Guide to the Automation Body of Knowledge*, 2 ed., North Carolina, ISA.

- VACHHANI, P., RENGASWAMY. R, GANGWAL, V., NARASIMHAN, S., 2005, "Recursive Estimation in Constrained Nonlinear Dynamical Systems", *AIChE Journal*, v. 51, pp. 946-959.
- VACLAVEK, V., 1969, "Studies on System Engineering III – Optimal Choice of the Balance Measurements in Complicated Chemical Engineering Systems", *Chemical Engineering Science*, v. 24, pp. 947-955.
- WEISS, G. H., ROMAGNOLI, J. A., ISLAM, K. A., 1996, "Data Reconciliation – An Industrial Case Study", *Computers and Chemical Engineering* – v. 20, pp. 1441-1449.