



PROPAGAÇÃO DA INCERTEZA NA RECONCILIAÇÃO DE DADOS COM RESTRICÇÕES LINEARES

Leonardo Silva de Souza

Monografia de Especialização apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Especialista em Automação Industrial com Ênfase em Informática Industrial, Instrumentação, Controle e Otimização de Processos Contínuos.

Orientador: Prof. Ricardo de Araujo Kalid

Salvador

Março de 2011

PROPAGAÇÃO DA INCERTEZA NA RECONCILIAÇÃO DE DADOS COM
RESTRICÇÕES LINEARES

Leonardo Silva de Souza

MONOGRAFIA SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DA BAHIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ESPECIALISTA EM AUTOMAÇÃO IN-
DUSTRIAL COM ÊNFASE EM INFORMÁTICA INDUSTRIAL, INSTRUMEN-
TAÇÃO, CONTROLE E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS CONTÍNUOS.

Aprovada por:

Prof. Ricardo de Araujo Kalid, D.Sc.

SALVADOR, BA – BRASIL

MARÇO de 2011

S729 Souza, Leonardo Silva de

Propagação da incerteza na reconciliação de dados com restrições lineares/Leonardo Silva de Souza. – Salvador, 2011.

49 f. : il. color.

Orientador: Prof. Ricardo de Araujo Kalid.

Monografia (especialização) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2011.

1. Reconciliação de dados. 2. Incerteza. 3. Monte Carlo.
4. Qualidade de Informação. I. Kalid, Ricardo de Araujo.
II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

*A minha mãe pelo dom da vida e
pelo amparo ao longo desses
anos.*

*Às minhas tias e tios
Aos meus amigos que muito
esperam por esse dia.*

*A todas pessoas que torceram por
mim.*

Agradecimentos

Agradeço aos meus Orixás e guias.

A minha mãe e meu pai que muito se esforçaram para me ver aqui. As minhas tias que ajudaram na minha criação e formação.

A todos os meus amigos e amigas, vivos e mortos. Aos meus amigos conquistados ao longo da vida e que hoje me aplaudem.

Ao professor Ricardo Kalid pela sua orientação, paciência e conselhos.

As pessoas que me ajudaram no mestrado: Fábio, Rafael, Robson, Márcio, Marcos Narciso, Ricardo, Bárbara etc.

A todos que me ajudaram: funcionários, conhecidos, pessoal da xerox, namorada etc ...

Resumo da Monografia apresentada à UFBA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Especialista em Automação Industrial com Ênfase em Informática Industrial, Instrumentação, Controle e Otimização de Processos Contínuos(Esp.)

PROPAGAÇÃO DA INCERTEZA NA RECONCILIAÇÃO DE DADOS COM RESTRIÇÕES LINEARES

Leonardo Silva de Souza

Março de 2011

Orientador: Prof. Ricardo de Araujo Kalid

Programa: Engenharia Industrial

Essa pesquisa apresenta procedimentos para a avaliação da incerteza em problemas de reconciliação de dados, a partir de deduções matemáticas. Este trabalho tem como escopo a avaliação da incerteza e sua propagação em problemas de reconciliação de dados, particularmente em balanços hídricos, portanto em problemas com função objetivo quadrática e restrições lineares. Aplicamos a técnica da reconciliação de dados em alguns sistemas de diferentes complexidades e estudamos como se comporta a incerteza de cada variável após a reconciliação de dados. Também analisamos a técnica de Monte Carlo aplicado a reconciliação de dados. Ao final mostramos uma aplicação do método de reconciliação de dados sem redundância (RECLIM) de informações desenvolvido pela Rede Teclim da UFBA..

A inserção do computador na indústria possibilitou a aquisição de grande número de informações que podem ser usados para aperfeiçoar a precisão e a consistência dos dados de processo. Essa tecnologia quase que elimina o erro proveniente do registro manual, mas trás, em alguns casos, dados corrompidos por erros (de medida, processamento e transmissão do sinal). Existem diversas metodologias para eliminar

esses erros inerentes as técnicas de medição, como o uso de filtros digitais, teste de controle de qualidade através de técnicas estatísticas e a reconciliação de dados. As duas primeiras são muito importantes na análise individual dos dados, mais não garantem uma consistência inter-relacional entre as grandezas. A reconciliação de dados possibilita uma melhora na exatidão das medições, além de garantir que o resultado obtido seja fisicamente possível.

Os resultados mostram-nos que há uma melhora na incerteza da informação após a reconciliação de dados tanto na resolução via técnicas analíticas quanto via Monte Carlo. A aplicação do método RECLIM se mostrou um técnica eficiente pois possibilitou a reconciliação de dados com resultados satisfatórios.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xi
Lista de Símbolos	xiii
Lista de Acrônimos	xv
1 MATERIAIS E MÉTODOS	3
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA: AVALIAÇÃO DA INCERTEZA EM PROBLEMAS DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS	4
1.2 INCERTEZA GLOBAL EM BALANÇOS DE MASSA ANTES DA RECONCILIAÇÃO	5
1.3 INCERTEZA GLOBAL EM BALANÇOS DE MASSA DEPOIS DA RECONCILIAÇÃO	5
1.4 INCERTEZA DE CADA VARIÁVEL APÓS A RECONCILIAÇÃO DE DADOS	6
1.4.1 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS COM RESTRIÇÕES LINEARES	6
1.4.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DAS VARIÁVEIS RECONCILIADAS COM RESTRIÇÕES LINEARES	9
1.5 MÉTODO MONTE CARLO	10

1.6	ADAPTAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DESENVOLVIDOS PARA A METODOLOGIA TECLIM DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS	12
1.6.1	BALANÇO HÍDRICO	12
1.6.2	QUALIDADE DA INFORMAÇÃO	13
2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	16
2.1	RECONCILIAÇÃO DE DADOS E AVALIAÇÃO DA INCERTEZA PELO MÉTODO ANALÍTICO	16
2.2	AVALIAÇÃO DA INCERTEZA PELO MÉTODO DE MONTE CARLO	25
2.3	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA TECLIM DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS EM BALANÇO HÍDRICO	27
3	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	32
	Referências Bibliográficas	34

Lista de Figuras

1.1	Modelo ilustrativo entrada-saída da propagação de distribuição	10
1.2	Fluxograma com as etapas do cálculo da avaliação da incerteza via Monte Carlo	11
1.3	Exemplo de balanço hídrico em uma planilha Excel	13
1.4	Escala da qualidade da informação (QI).	15
2.1	Processo de separação com 3 correntes	17
2.2	Processo de separação com 5 correntes	20
2.3	Processo com 8 equipamentos e 13 correntes	22
2.4	Processo com 8 equipamentos e 13 correntes	28

Lista de Tabelas

2.1	Variáveis medidas e reconciliadas para o Exemplo 1 - Reconciliação de dados e incertezas num sistema com 3 variáveis de decisão	18
2.2	Incertezas das variáveis medidas e reconciliadas para o Exemplo 2: Avaliação das incertezas de variáveis reconciliadas num sistema com 3 variáveis de decisão	19
2.3	Variáveis medidas, incertezas e variáveis reconciliadas para o Exemplo 3: Reconciliação de dados e incertezas num sistema com 5 variáveis	21
2.4	Variável medida e reconciliada para o Exemplo 4: Reconciliação de dados e incertezas num sistema com 13 variáveis (unidade das variáveis: t/h)	24
2.5	Avaliação da incerteza antes e depois da reconciliação do Exemplo 4 (unidade das variáveis: t/h)	24
2.6	Comparação entre os resultados (variáveis medidas e incerteza) da reconciliação pelo método analítico e pelo método de Monte Carlo aplicado aos Exemplos 1 (unidade das variáveis: (t/h))	25
2.7	Comparação entre os resultados (variáveis) da reconciliação pelo método analítico e pelo método de Monte Carlo aplicado ao Exemplo 3 (unidade das variáveis: (t/h))	26
2.8	Comparação entre os resultados (incerteza) da reconciliação pelo método analítico e pelo método de Monte Carlo aplicado ao Exemplo 3	27
2.9	Tabela com o resultado da reconciliação de dados usando o método RECLIM (vazões em t/h).	29

2.10 Tabela com o resultado da reconciliação de dados usando a metodologia TECLIM.	30
--	----

Lista de Símbolos

K_i	Constante intrínseca do sistema [adimensional], p. 13
V_{m_i}	Vazão mapeada i $\left[\frac{t}{h}\right]$, p. 13
λ	Multiplicadores de Lagrange, p. 7
\mathbf{A}	Matriz incidência ($m \times n$) [adimensional], p. 6
\mathbf{S}_M	matriz sensibilidade[Adimensional], p. 7
\mathbf{U}_M^2	Matriz variância-covariância das vazões não reconciliadas ($n \times n$), p. 6
\mathbf{v}_M	Vetor da vazões medidas com dimensão ($n \times 1$) $\left[\frac{t}{h}\right]$, p. 6
\mathbf{v}_R	Vetor da vazões reconciliadas com dimensão ($n \times 1$) $\left[\frac{t}{h}\right]$, p. 6
k_i	Fator de abrangência [adimensional], p. 13
u_{G_M}	Incerteza padrão combinada global antes da reconciliação $\left[\frac{t}{h}\right]$, p. 5
u_{G_R}	Incerteza padrão combinada global após da reconciliação $\left[\frac{t}{h}\right]$, p. 5
u_{M_i}	Incerteza padrão combinada da corrente i não reconciliada $\left[\frac{t}{h}\right]$, p. 5
u_{R_i}	Incerteza padrão combinada da corrente i reconciliada $\left[\frac{t}{h}\right]$, p. 5
$E[\]$	Operador esperança, p. 8
n	Número total de correntes, p. 5

p() PDF conjunta, p. 8

Lista de Acrônimos

LPU	Lei de Propagação da Incerteza, p. 5
MC	Monte Carlo, p. 24
NLP	Programação Não Linear, p. 3
QI	Qualidade da Informação, p. 13
QP	Programação Quadrática, p. 3
RECLIM	Metodologia TECLIM de Reconciliação de Dados sem Medição, p. 1
TECLIM	Rede de Tecnologias Limpas e Minimização de Resíduos, p. 13

INTRODUÇÃO

A inserção do computador na indústria possibilitou a aquisição de grande número de informações que podem ser usados para aperfeiçoar a precisão e a consistência dos dados de processo. Essa tecnologia quase que elimina o erro proveniente do registro manual, mas trás, em alguns casos, dados corrompidos por erros (de medida, processamento e transmissão do sinal). Existem diversas metodologias para eliminar esses erros inerentes as técnicas de medição, como o uso de filtros digitais, teste de controle de qualidade através de técnicas estatísticas e a reconciliação de dados. As duas primeiras são muito importantes na análise individual dos dados, mais não garantem uma consistência inter-relacional entre as grandezas. A reconciliação de dados possibilita uma melhora na exatidão das medições, além de garantir que o resultado obtido seja fisicamente possível. A expectativa dessa técnica é que os valores reconciliados sejam mais exatos do que os medidos.

Uma introdução à reconciliação de dados e seus fundamentos básicos serão apresentados. Alguns conceitos importantes que auxiliam na implementação da ferramenta da reconciliação de dados terão uma atenção maior, como é o caso da incerteza das variáveis reconciliadas. Também apresentaremos um estudo de caso onde implementou-se a reconciliação de dados fazendo uso da qualidade da informação, como é recomendado na metodologia TECLIM para reconciliação de dados sem medição (método RECLIM). As limitações, vantagens, desvantagens e aplicações do método RECLIM serão desenvolvidos aqui. O objetivo dessa monografia é (1) :

- Formular, a partir da revisão da literatura, um referencial teórico-prático de procedimentos para avaliação da incerteza associada a problemas de reconciliação de dados com restrições lineares;
- Desenvolver métrica para avaliação da incerteza global antes e depois da reconciliação;

- Desenvolver procedimento para avaliação da incerteza de variáveis reconciliadas de modelos lineares;
- Acrescentar a avaliação da incerteza ao método RECLIM;

Capítulo 1

MATERIAIS E MÉTODOS

Essa pesquisa apresenta procedimentos para a avaliação da incerteza em problemas de reconciliação de dados, a partir de deduções matemáticas. Conforme mencionado anteriormente, este trabalho tem como escopo a avaliação da incerteza e sua propagação em problemas de reconciliação de dados, particularmente em balanços hídricos, portanto em problemas com função objetivo quadrática e restrições lineares. Na linguagem de otimização este problema é classificado como de programação quadrática (QP) e tem solução analítica. As etapas desse trabalho estão apresentadas no Quadro 1 (2).

4.1	Definição do problema
4.2	Avaliação da Qualidade da Informação (QI) de cada corrente não medida, antes da reconciliação de dados
4.3	Avaliação da incerteza a partir da QI para as correntes não medidas
4.4	Avaliação da incerteza de medição a partir das medidas nas correntes que tem instrumentação
4.5	Conversão de incerteza para QI nas corrente medidas, antes da reconciliação de dados
4.6	Avaliação da incerteza global e da QI global antes da reconciliação de dados
4.7	Reconciliação de dados
4.8	Avaliação da incerteza de cada corrente após a reconciliação de dados
4.9	Conversão de incerteza para QI em cada corrente, após a reconciliação de dados
4.10	Avaliação da incerteza global e da QI global após a reconciliação de dados
4.11	Identificação de erros grosseiros na estimativa das variáveis

Quadro 1: Etapas para avaliação da incerteza em problemas de reconciliação de dados

Em trabalhos futuros, avaliaremos os problemas com restrições não lineares, que são obtidos quando estão envolvidos, além do balanço de massa global, balanços de massa por componente ou balanços de energia (6), sendo que nesses casos o problema de otimização é classificado como sendo de programação não linear (NLP). Os programas de computador utilizados nesse trabalho para o cálculo do Monte Carlo e da reconciliação de dados foram feitos em MATLAB (3)

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA: AVALIAÇÃO DA INCERTEZA EM PROBLEMAS DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS

Toda medição tem incerteza. No problema de reconciliação de dados essa incerteza deve ser considerada no momento da resolução do problema de otimização e deve ser propagada para as variáveis reconciliadas. Além disso, já que toda medição tem incerteza, é conveniente desenvolver uma medida do tamanho da incerteza global do sistema antes e depois da reconciliação, como veremos nas seções 1.2 e 1.3. Na seção 1.5 é discutida a técnica da avaliação da incerteza através do método Monte Carlo. Na seção 1.6 explicamos a método RECLIM de reconciliação de dados, adaptado a sistemas hídrico com medição precária. No capítulo 2 será apresentada a metodologia desenvolvida para estimar a incerteza após a reconciliação e aplicações das técnicas de reconciliação inicialmente citadas.

Inicialmente será apresentado o desenvolvimento através da incerteza padrão combinada, que doravante, apenas será denominada incerteza. Posteriormente, na seção 1.6, as equações demonstradas serão re-escritas no conceito de Qualidade da Informação (QI).

1.2 INCERTEZA GLOBAL EM BALANÇOS DE MASSA ANTES DA RECONCILIAÇÃO

Admitindo que todas as vazões fossem medidas e que suas incertezas são não correlacionadas e conhecidas, pode-se estimar uma incerteza global do balanço de massa do sistema através da norma euclidiana do vetor incerteza (equação 1.1)

$$u_{G_M} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{M_i}^2}, \quad (1.1)$$

onde:

- n - Número total de correntes,
- u_{G_M} - Incerteza padrão combinada global antes da reconciliação $\left[\frac{t}{h}\right]$,
- u_{M_i} - Incerteza padrão combinada da corrente i não reconciliada $\left[\frac{t}{h}\right]$.

Para que a equação 1.1 seja aplicável, as incertezas das correntes devem ser independentes, isto é, os procedimentos, instrumentos e técnicos que se envolveram para obtenção dessas informações não devem depender mutuamente entre si. Por outro lado, essa equação é válida qualquer que sejam as PDF's das vazões.

1.3 INCERTEZA GLOBAL EM BALANÇOS DE MASSA DEPOIS DA RECONCILIAÇÃO

Analogamente à incerteza antes da reconciliação, pode-se definir a incerteza após a reconciliação:

$$u_{G_R} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{u_{R_i}}^2}, \quad (1.2)$$

- u_{G_R} - Incerteza padrão combinada global após da reconciliação $\left[\frac{t}{h}\right]$,

- u_{R_i} - Incerteza padrão combinada da corrente i após a reconciliação $\begin{bmatrix} t \\ h \end{bmatrix}$.

Por enquanto admite-se que as incertezas das correntes após a reconciliação são não correlacionadas entre si. Em estudos futuros as expressões que consideram as covariâncias entre as grandezas reconciliadas serão levada em conta. Outras métricas podem ser definidas para a incerteza antes e depois da reconciliação, mas a métrica aqui apresentada tem a vantagem de manter um paralelo com a Lei de Propagação da Incerteza (LPU), largamente utilizada no meio metrológico e definida no Guia para Expressão da Incerteza de Medição (7).

1.4 INCERTEZA DE CADA VARIÁVEL APÓS A RECONCILIAÇÃO DE DADOS

Apresentaremos na seção 1.4.1 a solução analítica do problema de reconciliação. Depois na seção 1.4.2 será apresentado o procedimento para avaliação da incerteza das variáveis após a reconciliação.

1.4.1 SOLUÇÃO DO PROBLEMA DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS COM RESTRIÇÕES LINEARES

O problema de reconciliação de dados de balanços de massa globais pode ser definido conforme a equação 1.3 e 1.4:

$$\min \phi(\mathbf{v}_R, \mathbf{v}_M) = (\mathbf{v}_M - \mathbf{v}_R)^T (\mathbf{U}_M^2)^{-1} (\mathbf{v}_M - \mathbf{v}_R) \quad (1.3)$$

$$\text{sujeito a: } f(\mathbf{v}_R | \mathbf{A}) = \mathbf{A} \mathbf{v}_R = 0, \quad (1.4)$$

onde:

- \mathbf{v}_R - Vetor da vazões reconciliadas com dimensão $(n \times 1) \begin{bmatrix} t \\ h \end{bmatrix}$,
- \mathbf{v}_M - Vetor da vazões medidas com dimensão $(n \times 1) \begin{bmatrix} t \\ h \end{bmatrix}$,
- \mathbf{U}_M^2 - Matriz variância e covariância das vazões não reconciliadas $(n \times n)$,

- **A**- Matriz de incidência.

Neste trabalho será considerada a independência entre as variáveis não reconciliadas, sendo assim a matriz de variância-covariância é diagonal e dada pela matriz 1.5:

$$(\mathbf{U}_M^2)_{n,n} = \begin{bmatrix} u_{M_1}^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & u_{M_2}^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & u_{M_n}^2 \end{bmatrix}. \quad (1.5)$$

onde n é o número de correntes (variáveis). Para resolver o problema definido pelas equações 1.3 e 1.4 pode-se utilizar o método de Lagrange. Define-se a função lagrangeana somando à função objetivo as funções de restrições, multiplicadas pelo vetor dos multiplicadores de Lagrange, conforme a Equação 1.6.

$$\phi(\mathbf{v}_R, \lambda | \mathbf{v}_M, \mathbf{U}_M^2, \mathbf{A}) = (\mathbf{v}_M - \mathbf{v}_R)^T (\mathbf{U}_M^2)^{-1} (\mathbf{v}_M - \mathbf{v}_R) + 2(\mathbf{A}\mathbf{v}_R)^T \lambda. \quad (1.6)$$

Para encontrar a solução do problema de otimização deve-se derivar a Equação 1.6 em relação as variáveis de decisão (variáveis reconciliadas) e aos multiplicadores de Lagrange e igualar a zero, conforme a Equação 1.7 e equação 1.8:

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{v}_R, \lambda)}{\partial \mathbf{v}_R} = 2(\mathbf{U}_M^2)^{-1} (\mathbf{v}_M - \mathbf{v}_R) + 2\mathbf{A}^T \lambda = 0, \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial \phi(\mathbf{v}_R, \lambda)}{\partial \lambda} = 2\mathbf{A}^T \mathbf{v}_R = 0, \quad (1.8)$$

da Equação 1.7 se obtém a equação 1.9:

$$(\mathbf{U}_M^2)^{-1} \mathbf{v}_R = (\mathbf{U}_M^2)^{-1} \mathbf{v}_M + \mathbf{A}^T \lambda. \quad (1.9)$$

Pré-multiplicando a equação 1.9 pela matriz de variância-covariância das variáveis medidas, o vetor das variáveis reconciliadas é obtido, equação 1.10:

$$\mathbf{v}_R = \mathbf{v}_M + (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T \lambda. \quad (1.10)$$

Substituindo a equação 1.10 na equação 1.8 obtém:

$$\mathbf{A}(\mathbf{v}_M + (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T \lambda) = 0. \quad (1.11)$$

Resolvendo a equação 1.11 para os multiplicadores de Lagrange obtém-se a equação 1.12:

$$\lambda = -(\mathbf{A}(\mathbf{U}_M^2)\mathbf{A}^T)^{-1}\mathbf{A}\mathbf{v}_M. \quad (1.12)$$

Substituindo a equação 1.12 na equação 1.10 obtém-se a equação 1.13:

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_R &= \mathbf{v}_M - (\mathbf{U}^2)\mathbf{A}^T(\mathbf{A}(\mathbf{U}_M^2)\mathbf{A}^T)^{-1}\mathbf{A}\mathbf{v}_M, \\ \mathbf{v}_R &= (\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2)\mathbf{A}^T(\mathbf{A}(\mathbf{U}_M^2)\mathbf{A}^T)^{-1}\mathbf{A})\mathbf{v}_M, \end{aligned} \quad (1.13)$$

onde a equação \mathbf{I} é a matriz identidade. Da equação 1.13 pode-se definir a matriz sensibilidade das variáveis reconciliadas em relação as variáveis medidas, equação 1.14:

$$\mathbf{S}_M^T = \left(\frac{\partial \mathbf{v}_R}{\partial \mathbf{v}_M} \right)^T = [(\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2)\mathbf{A}^T(\mathbf{A}(\mathbf{U}_M^2)\mathbf{A}^T)^{-1}\mathbf{A})]. \quad (1.14)$$

Então, substituindo equação 1.14 na equação 1.13, obtém-se equação 1.15:

$$\mathbf{v}_R = \mathbf{S}_M^T \mathbf{v}_M, \quad (1.15)$$

onde v_R é o vetor das vazões reconciliadas e que agora podem fechar ou obedecer o balanço de massa. Vale ressaltar que cabe ao engenheiro decidir qual o balanço de massa é mais fidedigno à realidade, baseado-se nas variáveis medidas (\mathbf{v}_M) ou baseado-se nas variáveis reconciliadas (\mathbf{v}_R). A reconciliação é apenas mais uma ferramenta de trabalho do engenheiro, assim como a estatística, a simulação, etc. O engenheiro deve saber usar as ferramentas disponíveis adequadamente, assim como o marceneiro deve utilizar corretamente o martelo, senão machucará o dedo. Com os balanços baseados nas variáveis medidas (\mathbf{v}_M) e nas variáveis reconciliadas (\mathbf{v}_R) o engenheiro, a partir do seu conhecimento difuso, intuitivo, experimental, deve escolher qual o balanço mais representativo. Se ainda assim o engenheiro não estiver satisfeito com os números, deve intervir e melhorar as incertezas das medidas. No exemplo 1 do capítulo 2 é aplicado a equação 1.15 num processo com 1 entrada e 2 saídas.

1.4.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DAS VARIÁVEIS RECONCILIADAS COM RESTRIÇÕES LINEARES

Por definição a incerteza padrão é a raiz quadrada positiva da variância de uma variável, enquanto que a variância é, por definição, uma integral (Equação 1.16):

$$\mathbf{U}_R^2 := \int_{-\infty}^{+\infty} (\mathbf{v}_R - E[\mathbf{v}_R])(\mathbf{v}_R - E[\mathbf{v}_R])^T p(\mathbf{v}_R) d\mathbf{v}_R = E[(\mathbf{v}_R - E[\mathbf{v}_R])(\mathbf{v}_R - E[\mathbf{v}_R])^T], \quad (1.16)$$

onde $E[\cdot]$ é o operador esperança dos elementos da matriz e $p(\cdot)$ é o PDF da variável. Aplicando o operador esperança na equação 1.13:

$$\begin{aligned} E[\mathbf{v}_R] &= E[\mathbf{v}_M - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A} \mathbf{v}_M], \\ E[\mathbf{v}_R] &= E[\mathbf{v}_M] - E[(\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A} \mathbf{v}_M], \\ E[\mathbf{v}_R] &= E[\mathbf{v}_M] - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A} E[\mathbf{v}_M], \\ E[\mathbf{v}_R] &= (\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}) E[\mathbf{v}_M] = \mathbf{S}_M^T \cdot E[\mathbf{v}_M]. \end{aligned} \quad (1.17)$$

Substituindo a equação 1.13 e a equação 1.17 na equação 1.16, obtém-se a equação 1.18:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_R^2 &= E\{[(\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}) \mathbf{v}_M - (\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}) E[\mathbf{v}_M]] \\ &\quad [(\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}) \mathbf{v}_M - (\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}) E[\mathbf{v}_M]]^T\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_R^2 &= E\{[(\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}) (\mathbf{v}_M - E[\mathbf{v}_M])] \\ &\quad E[(\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}) (\mathbf{v}_M - E[\mathbf{v}_M])]^T \mathbf{S}_R^2 \\ \mathbf{U}_R^2 &= (\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}) E[(\mathbf{v}_M - E[\mathbf{v}_M])] \\ &\quad E[(\mathbf{v}_M - E[\mathbf{v}_M])]^T (\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}), \end{aligned} \quad (1.18)$$

a variância é dada pela equação 1.16, então a equação 1.18 pode ser re-escrita conforme a equação 1.19:

$$\mathbf{U}_R^2 = [\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}] \mathbf{U}_M^2 [\mathbf{I} - (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T (\mathbf{A} (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{A}]^T. \quad (1.19)$$

Onde, a matriz de variância-covariância das variáveis medidas é dada pela equação 1.20:

$$\mathbf{U}_M^2 = E[(\mathbf{v}_M - E[\mathbf{v}_M])(\mathbf{v}_M - E[\mathbf{v}_M])^T]. \quad (1.20)$$

Substituindo a matriz sensibilidade, equação 1.14, na equação 1.19, obtém-se a matriz de variância-covariância das variáveis reconciliadas, equação 1.21:

$$\mathbf{U}_R^2 = \mathbf{S}_M^T (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{S}_M. \quad (1.21)$$

A incerteza é, por definição, a raiz quadrada positiva da variância. Portanto a incerteza de cada variável reconciliada é definida através da diagonal principal da matriz de variância-covariância, Equação 1.22.

$$\mathbf{u}_R := +\sqrt{\text{diag}(\mathbf{S}_M^T (\mathbf{U}_M^2) \mathbf{S}_M)}. \quad (1.22)$$

1.5 MÉTODO MONTE CARLO

O método Monte Carlo é uma ferramenta utilizada em fenômenos estocásticos existentes em diversas áreas do conhecimento. Associada a ferramentas estatísticas, ela tornou-se nos últimos anos uma importante ferramenta na estimação de parâmetros, principalmente parâmetros estatísticos. Esse método é usado principalmente em sistemas onde o modelo matemático é muito complexo e suas derivadas no caso analítico são muito complicadas (5).

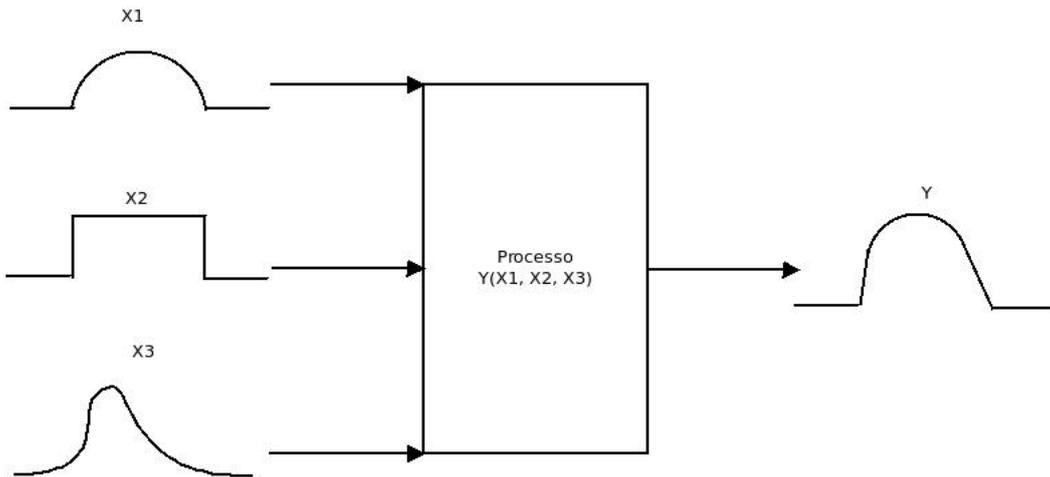


Figura 1.1: Modelo ilustrativo entrada-saída da propagação de distribuição

Esse método consiste na geração de números aleatórios das grandezas de entrada, cálculo das grandezas de saída e tratamento estatístico das mesmas. Segundo (7), o método de Monte Carlo parte da consideração que o valor esperança da variável

de saída Y é obtido avaliando-se os resultados do modelo a partir das grandezas de entrada x_1, x_2, \dots, x_n , representadas por PDF's (figura 1.1). O resultado do cálculo é uma PDF das variáveis de saída de onde é possível retirar informações de media e desvio padrão.

Na figura 1.2 vemos um fluxograma com as principais etapas do cálculo da avaliação da incerteza via Monte Carlo.

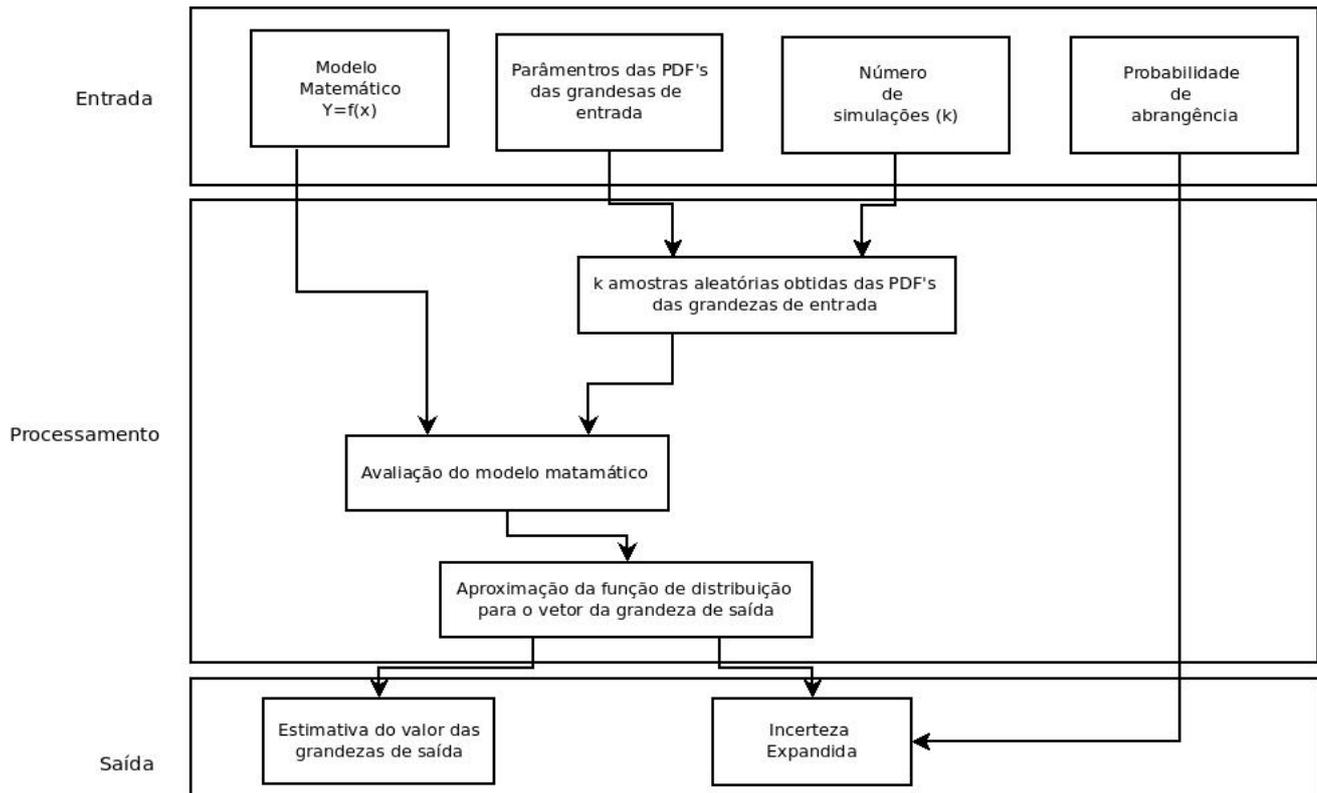


Figura 1.2: Fluxograma com as etapas do cálculo da avaliação da incerteza via Monte Carlo com base em (7)

1.6 ADAPTAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DESENVOLVIDOS PARA A METODOLOGIA RECLIM DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS

A metodologia RECLIM de reconciliação de dados permite a caracterização e gestão de fluxos de massa e de energia sem redundância de medidas em indústrias químicas e petroquímicas. As etapas são as seguintes:

1. Identificação das fontes e consumidores de água e efluentes aquosos da unidade estudada.
2. Construção do fluxograma da unidade em uma planilha eletrônica.
3. Atribuição da qualidade da informação (QI) para cada ponto de fornecimento ou consumo de água do sistema.
4. Detalhamento das restrições operacionais.
5. Executar a reconciliação de dados aos balanços de massa dos sistemas de transferência de água internas, fazendo uso das correntes mapeadas e da QI .

1.6.1 BALANÇO HÍDRICO

O balanço hídrico é usado no mapeamento das correntes aquosas na indústria química e petroquímica e é usado como ferramenta para a gestão e uso da água no processo produtivo. Existem diversos tipos de correntes no balanço hídrico: água clarificada, destilada, corrente com diferentes temperaturas e pressão, água condensada assim como efluentes líquidos. O balanço hídrico é construído em uma planilha eletrônica representada por diagrama de blocos conforme a Figura 1.3. Cada bloco representa uma unidade produtiva, área ou um equipamento e as linhas que as conectam os blocos são as entradas e saídas das mesmas. Todas as correntes do balanço hídrico são descritas com seus respectivos valores de vazão e qualidade da informação (QI). A reconciliação de dados é utilizada no melhoramento das medidas e na detecção de erros grosseiros no sistema de medição.

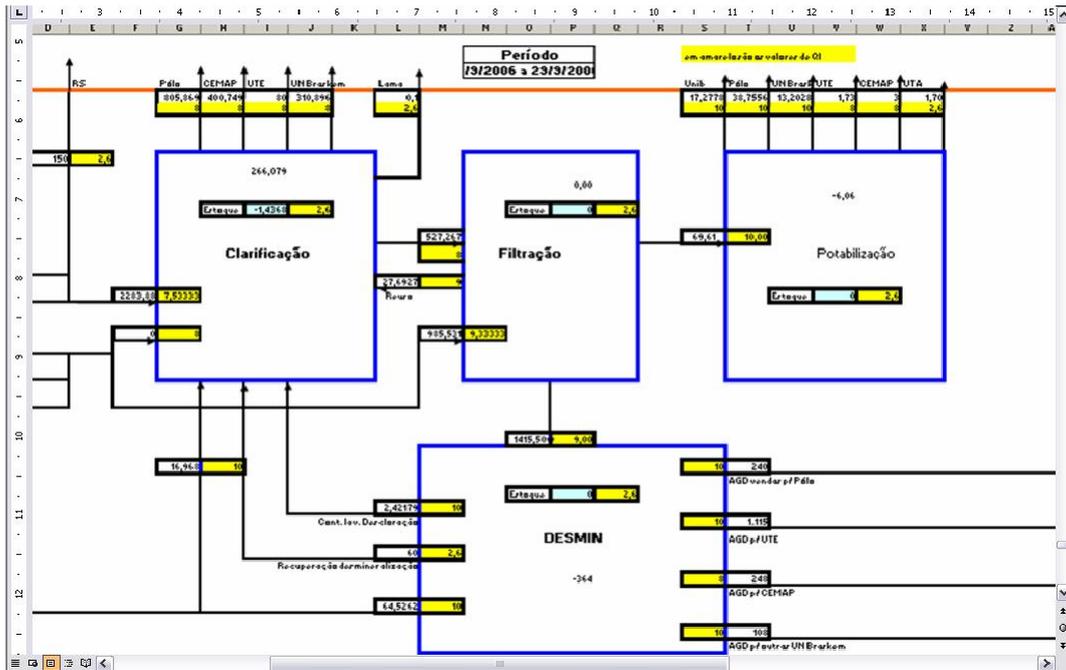


Figura 1.3: Exemplo de balanço hídrico em uma planilha Excel

1.6.2 QUALIDADE DA INFORMAÇÃO

A grande ausência de medidores para a água na indústria gera dados que contribui com que os balanços hídricos construídos para a gestão da água com essas informações sejam inconsistentes, possibilitando equívocos nas decisões. Devido à grande ausência de medidores nos sistemas, a avaliação da incerteza pelo método tradicional é impossível, já que o método tradicional é frequencista. Então, o método RECLIM (4, 8) possibilita associar a vazão presumida de uma corrente, que deve ser qualificada conforme a confiança depositada na fonte da informação. Tal valor chama-se de Qualidade da Informação (QI) e consiste em fazer um conjunto de avaliações e a cada um das mesmas atribuir um valor de acordo com a fonte da medida, o tipo de medidor e a outras informações que possam caracterizar a qualidade da informação. Em outras palavras, a 'Qualidade da Informação' representa o nível de certeza relacionado com o valor da vazão. A qualidade da informação é relacionada com a incerteza pela equação 1.23:

$$QI_{mi} = K_i \frac{V_{mi}}{U_i}, \quad (1.23)$$

onde V_{m_i} é a vazão mapeada i , U_i é a incerteza expandida da medida i e QI_i é a qualidade da informação da vazão mapeada i . A constante K_i é uma constante intrínseca do sistema estudado e k_i é o fator de abrangência. Em (8) temos um estudo mais aprofundado do parâmetro K_i . Rearranjando a equação 1.3 com a equação 1.23 temos:

$$\min \phi(V_{R_i}) = \sum_{i=1}^N \left[(V_{m_i} - V_{R_i}) \frac{QI_{m_i}^2}{(K_i V_{m_i})^2} \right]. \quad (1.24)$$

Considerando o termo K_i uma constante, a solução do problema definido pela equação 1.24 é igual a solução do problema definido pela expressão 1.3:

$$\min \phi(V_{R_i}) = \sum_{i=1}^N \left[(V_{m_i} - V_{R_i}) \frac{QI_{m_i}^2}{(V_{m_i})^2} \right]. \quad (1.25)$$

A equação 1.25, agora, é a função objetivo sujeito as mesmas restrições de balanço já citadas nos exemplos iniciais. As restrições de balanço são as restrições de não negatividade, isso nos casos em que o sentido do fluxo é único, as restrições operacionais, que limitam os valores das vazões entre alguma faixa pré-estabelecida pelo projeto do processo e/ou alguma outra restrição que seja necessária para tornar o modelo matemático o mais próximo possível da realidade. Para construir uma escala de QI, devemos considerar todas as possibilidades de se obter certas informações: medições instantâneas, medições totalizadas, balanço de massa, fluxograma da planta e informações oriundas dos operadores e engenheiros. Para cada dessas possibilidades, atribuímos um valor. A escala vai de um valor máximo, que é atribuído a melhor informação a um valor mínimo, não nulo, que é atribuído a pior fonte de informação. No exemplo abaixo, Figura 1.4, que é baseado no estudo de caso do artigo (8), determinou-se que o maior valor deve receber nota 10, supondo ser essa informação obtida com uma base mais segura (IS – informação segura) e 0,4 à informação com menos segurança, que no caso seria obtido no palpite dos operadores das áreas (PO – palpite do operador). A informação de nível 6,0 é fruto de um balanço de massa ou outra fonte de informação com um nível de certeza intermediário (BM – Balanço de massa), veja a figura 1.4.

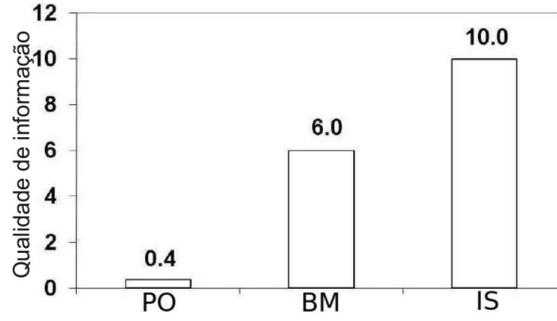


Figura 1.4: Escala da qualidade da informação (QI).

Podemos definir um QI_{R_i} como função das vazões reconciliadas.

$$QI_{R_i} = K_i \frac{V_{R_i}}{U_{R_i}}. \quad (1.26)$$

A forma que utilizaremos para medir o quanto a reconciliação influenciou de forma global nos valores reconciliados é a qualidade de informação global (QI_{G_R}).

$$QI_{G_R} = \frac{\sum V_{R_i} QI_{R_i}}{\sum V_{R_i}}, \quad (1.27)$$

que por consequência podemos definir a qualidade de informação antes da reconciliação,

$$QI_{G_m} = \frac{\sum V_{m_i} QI_{m_i}}{\sum V_{m_i}}. \quad (1.28)$$

Capítulo 2

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Mostraremos algumas aplicações das equações desenvolvidas no capítulo de metodologia em casos de balanços mássicos. Será apresentada aqui uma aplicação do método de reconciliação de dados desenvolvido no TECLIM. Discutiremos também os resultados da reconciliação e da propagação de incerteza obtidos através do método Monte Carlo e do método analítico.

2.1 RECONCILIAÇÃO DE DADOS E AVALIAÇÃO DA INCERTEZA PELO MÉTODO ANALÍTICO

Exemplo 1: Reconciliação de dados e incertezas num sistema com 3 correntes

Nesse problema será admitido que todas as vazões são medidas e suas incertezas padrão combinada conhecidas; o exemplo da subseção 2.3 é um problemas típico nos qual os valores de vazões e suas incertezas padrão vem do conceito de vazão mapeada e de qualidade da informação, respectivamente.

Na figura 2.1 pode ser observado um sistema com uma corrente de alimentação e duas de descargas.

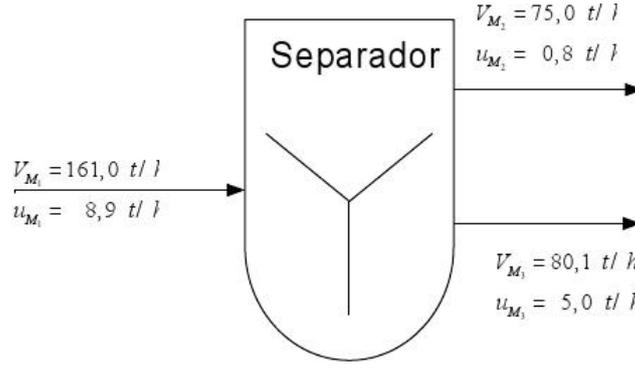


Figura 2.1: Processo de separação com 3 correntes

Definindo os vetores das variáveis medidas (\mathbf{v}_M), variáveis de decisão (\mathbf{v}_R), matrizes de incidência (A) e matriz de variância-covariância das variáveis medidas (\mathbf{U}_M) obtêm-se:

$$\mathbf{v}_M = \begin{bmatrix} V_{M_1} \\ V_{M_2} \\ V_{M_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 161,0 \\ 75,0 \\ 80,1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_M = \begin{bmatrix} u_{M_1} \\ u_{M_2} \\ u_{M_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,9 \\ 0,8 \\ 5,0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}_R = \begin{bmatrix} V_{R_1} \\ V_{R_2} \\ V_{R_3} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}_R = \begin{bmatrix} u_{R_1} \\ u_{R_2} \\ u_{R_3} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{U}_M^2 = \begin{bmatrix} u_{M_1}^2 & 0 & 0 \\ 0 & u_{M_2}^2 & 0 \\ 0 & 0 & u_{M_3}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,9^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0,8^2 & 0 \\ 0 & 0 & 5,0^2 \end{bmatrix}.$$

Substituindo os valores apresentados na equação 2.1 e na 1.13 obtêm-se o vetor das variáveis reconciliadas. Na Tabela 2.1 é apresentado os valores das variáveis reconciliadas e dos desvios em relação às variáveis manipuladas.

Tabela 2.1: Variáveis medidas e reconciliadas para o Exemplo 1 - Reconciliação de dados e incertezas num sistema com 3 variáveis de decisão

Ponto	V_M (t/h)	u_M (t/h)	$\frac{u_M}{V_M}$ (%)	V_R (t/h)	Desvio ($V_M - V_R$) (t/h)	Desvio relativo (%) $\frac{V_M - V_R}{V_M}$
1	161,0	8,9	5,5	156,5	4,5	2,8
2	75,0	0,8	1,1	75,0	-0,0	-0,1
3	80,1	5,0	6,2	81,5	-1,4	-1,8
Imbalanço: $V_1 - V_2 - V_3 =$	5,9	NA	NA	-0,0	NA	NA

Dados resultantes das simulações feitas nesse trabalho

V_M - Vazão medida

u_M - Incerteza padrão da vazão medida

V_R - Vazão reconciliada

NA - Não se Aplica

Na Tabela 2.1 é observado que a variável que teve a menor variação é a V_2 , pois é a com menor incerteza relativa. Enquanto que as demais variáveis, V_1 e V_3 , tiveram seus valores modificados com maior intensidade, pois apresentam maiores incertezas relativas. Este comportamento é esperado, visto que, a reconciliação deve modificar com maior amplitude as variáveis com maior incerteza e com menor amplitude as com menor incerteza. Também na Tabela 2.1 são observados os imbalanços (grau de não-fechamento dos balanços de massa). Para as variáveis medidas (V_M) o imbalanço é grande, pois são dados obtidos de fontes sujeita a grandes incertezas. Por outro lado, para as variáveis reconciliadas (V_R) o imbalanço é desprezível, pois no seu cálculo é forçado o fechamento dos balanços.

Exemplo 2: Avaliação das incertezas de variáveis reconciliadas num sistema com 3 variáveis de decisão

Considere o sistema da figura 2.1 e os vetores definidos na equação 2.1. Substituindo os valores apresentados na equação 1.22 obtém-se o vetor das incertezas das variáveis reconciliadas. Na tabela 2.1 é apresentado o vetor das variáveis reconciliadas e dos desvios em relação às variáveis manipuladas.

Tabela 2.2: Incertezas das variáveis medidas e reconciliadas para o Exemplo 2: Avaliação das incertezas de variáveis reconciliadas num sistema com 3 variáveis de decisão

Ponto	u_M (t/h)	u_R (t/h)	Desvio (t/h) ($u_M - u_R$)	Desvio Relativo % ($u_M - u_R$)/ u_M
1	8,9	4,4	4,5	50
2	0,8	0,8	0,0	0
3	5,0	4,4	0,6	13
u_G	10,2	6,2	4,0	39

Dados resultantes das simulações feitas nesse trabalho

u_M - Incerteza da vazão medida antes da reconciliação

u_R - Incerteza da vazão reconciliada Equação 1.2

u_G - Incerteza global das vazões reconciliadas Equação 1.22

Na tabela 2.2 pode ser observado que a incerteza global diminui cerca de 40%, ou seja, a reconciliação de dados de fato agregou mais informação aos dados experimentais. A reconciliação faz uma distribuição das incertezas, as maiores são significativamente diminuídas e as menores um pouco aumentadas, neste caso insignificativamente incrementada. Esse comportamento é vantajoso, pois no novo conjunto de dados, as variáveis reconciliadas fecham o balanço e como dito antes a incerteza final é significativamente menor.

Exemplo 3: Reconciliação de dados e incertezas num sistema com 5 variáveis

Na Figura 2.2: Processo de separação com 5 correntes pode ser observado um sistema com uma corrente de alimentação e quatro correntes de descargas.

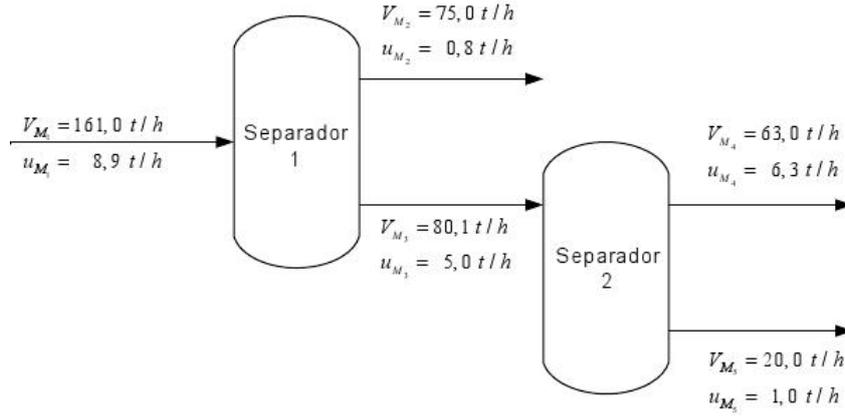


Figura 2.2: Processo de separação com 5 correntes

Definindo os vetores das variáveis medidas (\mathbf{v}_M), variáveis reconciliadas (\mathbf{v}_R), e as matrizes de incidência (\mathbf{A}), matriz de variância-covariância das variáveis medidas (\mathbf{U}_M^2) obtém-se as matrizes da Equação 2.2. Substituindo os valores das matrizes 2.2, 2.3, 2.4 na equação 1.19 obtém-se o vetor das incertezas das variáveis reconciliadas. Na tabela 2.3 são apresentados os vetores das variáveis medidas, reconciliadas, das incertezas antes e depois da reconciliação e os desvios em relação às variáveis e incertezas medidas. Observa-se na tabela 2.3 a significativa diminuição da incerteza na maioria das vazões e em particular a redução de quase 50% da incerteza global. Portanto, assim como no exemplo 2, a reconciliação trouxe mais certeza às informações sobre o balanço de massa do sistema.

$$\mathbf{V}_M = \begin{bmatrix} V_{M_1} \\ V_{M_2} \\ V_{M_3} \\ V_{M_4} \\ V_{M_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 161,0 \\ 75,0 \\ 80,1 \\ 63,0 \\ 20,0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{u}_M = \begin{bmatrix} u_{M_1} \\ u_{M_2} \\ u_{M_3} \\ u_{M_4} \\ u_{M_5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,9 \\ 0,8 \\ 5,0 \\ 6,3 \\ 1,0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{V}_R = \begin{bmatrix} V_{R_1} \\ V_{R_2} \\ V_{R_3} \\ V_{R_4} \\ V_{R_5} \end{bmatrix} \quad \mathbf{u}_R = \begin{bmatrix} u_{R_1} \\ u_{R_2} \\ u_{R_3} \\ u_{R_4} \\ u_{R_5} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{U}_M^2 = \begin{bmatrix} u_{M_1}^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & u_{M_2}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & u_{M_3}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & u_{M_4}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & u_{M_5}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8,9^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0,8^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 5,0^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6,3^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1,0^2 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Tabela 2.3: Variáveis medidas, incertezas e variáveis reconciliadas para o Exemplo 3:
Reconciliação de dados e incertezas num sistema com 5 variáveis

Ponto	V_M (t/h)	u_M (t/h)	u_M/V_M %	V_R (t/h)	u_R (t/h)	Desvio $(u_M - u_R)$ (t/h)	Desvio Relativo % $(u_M - u_r)/u_M$
1	161,0	8,9	5,5	157,0	3,7	5,2	59
2	75,0	0,8	1,1	75,0	0,8	0,0	0
3	80,1	5,0	6,2	82,0	3,6	1,4	28
4	63,0	6,3	10,0	62,0	3,6	2,7	42
5	20,0	1,0	5,0	20,0	1,0	0,0	1
u_G	NA	12,1	NA	NA	6,4	5,6	47
Imbalanços							
$V_1 - V_2 - V_3 =$	+5,9	NA	NA	0,0	NA	NA	NA
$V_3 - V_4 - V_5 =$	-2,9			0,0			

Dados resultantes das simulações feitas nesse trabalho

V_M - Vazão medida

u_M - Incerteza da vazão medida

V_R - Vazão reconciliada

u_R - Incerteza da vazão reconciliada Equação 1.2

u_G - Incerteza global das vazões reconciliadas Equação 1.22

Na tabela 2.3 é observado os imbalanços (grau de não-fechamento dos balanços de massa). Para as variáveis medidas (\mathbf{v}_M) o imbalanço é grande, pois os dados são obtidos de fontes sujeitas a grandes incertezas e que não consideram os balanços de massa do sistema. Por outro lado, para as variáveis reconciliadas (\mathbf{v}_R) o imbalanço é pequeno, pois no seu cálculo é forçado o fechamento dos balanços.

Exemplo 4: Reconciliação de dados e incertezas num sistema com 13 variáveis

Na figura 2.3 pode ser observado um sistema com 8 equipamentos e 13 correntes. Em 2.5 são mostradas as matrizes que representam o sistema desse exemplo.

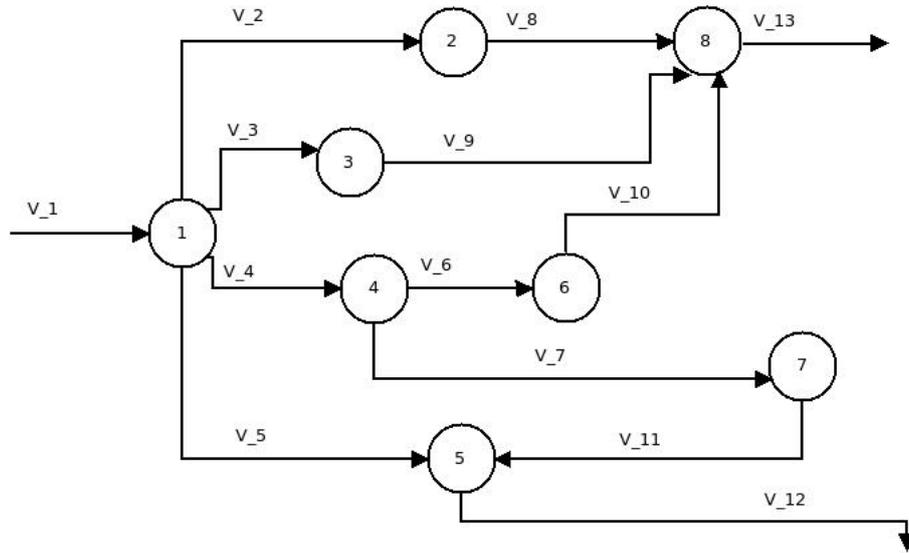


Figura 2.3: Processo com 8 equipamentos e 13 correntes

$$\begin{array}{l}
 \begin{array}{l}
 V_{M_1} \\
 V_{M_2} \\
 V_{M_3} \\
 V_{M_4} \\
 V_{M_5} \\
 V_{M_6} \\
 V_{M_7} \\
 V_{M_8} \\
 V_{M_9} \\
 V_{M_{10}} \\
 V_{M_{11}} \\
 V_{M_{12}} \\
 V_{M_{13}}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 101,0 \\
 11,0 \\
 19,0 \\
 32,0 \\
 41,0 \\
 14,0 \\
 15,0 \\
 10,0 \\
 21,0 \\
 16,0 \\
 15,0 \\
 54,0 \\
 48,0
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 u_{M_1} \\
 u_{M_2} \\
 u_{M_3} \\
 u_{M_4} \\
 u_{M_5} \\
 u_{M_6} \\
 u_{M_7} \\
 u_{M_8} \\
 u_{M_9} \\
 u_{M_{10}} \\
 u_{M_{11}} \\
 u_{M_{12}} \\
 u_{M_{13}}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 1,0 \\
 0,5 \\
 0,9 \\
 1,6 \\
 2,0 \\
 0,7 \\
 0,7 \\
 0,5 \\
 1,0 \\
 0,8 \\
 0,7 \\
 0,5 \\
 0,5
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 V_{R_1} \\
 V_{R_2} \\
 V_{R_3} \\
 V_{R_4} \\
 V_{R_5} \\
 V_{R_6} \\
 V_{R_7} \\
 V_{R_8} \\
 V_{R_9} \\
 V_{R_{10}} \\
 V_{R_{11}} \\
 V_{R_{12}} \\
 V_{R_{13}}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{l}
 u_{R_1} \\
 u_{R_2} \\
 u_{R_3} \\
 u_{R_4} \\
 u_{R_5} \\
 u_{R_6} \\
 u_{R_7} \\
 u_{R_8} \\
 u_{R_9} \\
 u_{R_{10}} \\
 u_{R_{11}} \\
 u_{R_{12}} \\
 u_{R_{13}}
 \end{array}
 \end{array}$$

(2.5)

$$\mathbf{U}_M^2 = \begin{bmatrix} u_{M_1}^2 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & u_{M_2}^2 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & u_{M_3}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & u_{M_{13}}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0,5 & \ddots & 0 & \vdots \\ \vdots & 0 & 0,9 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0,5 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & +1 & +1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Na tabela 2.4 e na tabela 2.5 são apresentados os resultados do cálculo das variáveis reconciliadas (Equação 1.13) e da avaliação da incerteza após a reconciliação (equação 1.19) deste exemplo. Na tabela 2.5 pode ser observado que a incerteza global reduziu de 3,6 t/h para 1,8 t/h, ou seja, uma redução de cerca de 50%, o que significa uma melhora significativa na confiança na informação.

Tabela 2.4: Variável medida e reconciliada para o Exemplo 4: Reconciliação de dados e incertezas num sistema com 13 variáveis (unidade das variáveis: t/h)

Variáveis	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_7	V_8	V_9	V_{10}	V_{11}	V_{12}	V_{13}
V_M antes da reconciliação	101,0	11,0	19,0	32,0	41,0	14,0	15,0	10,0	21,0	16,0	15,0	54,0	48,0
V_R depois da reconciliação	101,4	10,8	21,0	30,7	39,0	15,6	15,0	10,8	21,0	15,6	15,0	54,0	47,4
Desvio $\left(\frac{t}{h}\right)$ ($V_M - V_R$)	-0,4	0,2	-2,0	1,4	2,0	-1,6	0,0	-0,8	0,0	0,4	0,0	0,0	0,6
Desvio (%) $\left(\frac{V_M - V_R}{V_M}\right)$	0	2	10	4	5	-12	0	-8	0	2	0	0	1

Dados resultantes das simulações feitas nesse trabalho

Tabela 2.5: Avaliação da incerteza antes e depois da reconciliação do Exemplo 4 (unidade das variáveis: t/h)

Variáveis	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8	u_9	u_{10}	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_G
u_M antes	1,0	0,6	1,0	1,6	2,1	0,7	0,8	0,5	1,1	0,8	0,8	0,5	0,5	3,6
u_R depois da reconciliação	0,6	0,4	0,5	0,6	0,7	0,4	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4	1,8
Desvio $\left(\frac{t}{h}\right)$ ($u_M - u_R$)	0,5	0,2	0,4	1,0	1,4	0,3	0,3	0,2	0,5	0,4	0,3	0,1	0,1	1,8
Desvio (%) $\left(\frac{u_M - u_R}{u_M}\right)$	44	36	45	61	68	37	35	30	50	45	35	13	17	51

Dados resultantes das simulações feitas nesse trabalho

2.2 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA PELO MÉTODO DE MONTE CARLO

Com o intuito de testar as soluções encontradas e preparar o terreno para a avaliação da incerteza em reconciliação com problemas não lineares, serão comparados os resultados obtidos no tratamento analítico, na seção 2.1, com o tratamento via método de Monte Carlo, descrito na seção 1.5. Na Tabela 2.6 é apresentada as variáveis reconciliadas e a incerteza antes e depois da reconciliação pelo método analítico e pelo método de Monte Carlo. Pode-se observar que após 1000 apresentações o método de converge para o método analítico.

Tabela 2.6: Comparação entre os resultados (variáveis medidas e incerteza) da reconciliação pelo método analítico e pelo método de Monte Carlo aplicado aos Exemplos 1 (unidade das variáveis: (t/h))

Item	V_1	V_2	V_3	u_1	u_2	u_3	u_G	Imbalanço
Antes da reconciliação	161,0	75,0	80,1	8,9	0,8	5,0	10,2	5,9
Reconciliação pelo método analítico	156,5	75,0	81,5	4,4	0,8	4,4	6,3	0,0
Reconciliação pelo MC com 100	156,0	75,1	80,9	4,7	0,7	4,6	6,6	0,0
Reconciliação pelo MC com 1000	156,6	75,1	81,5	4,4	0,8	4,4	6,3	0,0
Reconciliação pelo MC com 10000	156,6	75,0	81,6	4,4	0,8	4,4	6,3	0,0
Reconciliação pelo MC com 100000	156,5	75,0	81,5	4,4	0,8	4,4	6,2	0,0
Reconciliação pelo MC com 200000	156,6	75,0	81,5	4,4	0,8	4,4	6,3	0,0
Reconciliação pelo MC com 400000	156,6	75,0	81,5	4,4	0,8	4,4	6,2	0,0

Dados resultantes das simulações feitas nesse trabalho

Na Tabela 2.7 são mostradas as variáveis antes e depois da reconciliação pelo método analítico e pelo método de Monte Carlo, assim como o resultado (imbalanço) para os dois balanços de massa do exemplo 3. Pode-se observar a reconciliação de dados pelos métodos de Monte Carlo e analítico fecham os balanços de massa.

Tabela 2.7: Comparação entre os resultados (variáveis) da reconciliação pelo método analítico e pelo método de Monte Carlo aplicado ao Exemplo 3 (unidade das variáveis: (t/h))

Item	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	Imbalanço 1	Imbalanço 2
Antes da reconciliação	161,0	75,0	80,1	63,0	20,0	5,9	-2,9
Reconciliação pelo método analítico	157,0	75,0	82,0	62,0	20,0	0,0	0,0
Reconciliação pelo MC com 100	157,1	75,0	82,0	62,1	20,0	0,0	0,0
Reconciliação pelo MC com 1000	157,0	75,0	82,0	62,1	19,9	0,0	0,0
Reconciliação pelo MC com 10000	157,0	75,0	82,0	62,0	20,0	0,0	0,0
Reconciliação pelo MC com 100000	157,0	75,0	82,0	62,0	20,0	0,0	0,0
Reconciliação pelo MC com 200000	157,0	75,0	82,0	62,0	20,0	0,0	0,0
Reconciliação pelo MC com 400000	161,0	75,0	80,1	63,0	20,0	0,0	0,0

Dados resultantes das simulações feitas nesse trabalho

Na Tabela 2.8 são mostradas as incertezas antes e depois da reconciliação pelo método analítico e pelo método de Monte Carlo. Para o exemplo 3, pode-se observar que após 1000 apresentações o método de Monte Carlo converge para o método analítico.

Tabela 2.8: Comparação entre os resultados (incerteza) da reconciliação pelo método analítico e pelo método de Monte Carlo aplicado ao Exemplo 3

Item	u_1 (t/h)	u_2 (t/h)	u_3 (t/h)	u_4 (t/h)	u_5 (t/h)	u_G (t/h)
Antes da reconciliação	8,9	0,8	5,0	6,3	1,0	12,1
Reconciliação pelo método analítico	3,7	0,8	3,6	3,7	1,0	6,4
Reconciliação pelo MC com 100	3,9	0,8	3,8	3,8	1,0	6,8
Reconciliação pelo MC com 1000	3,6	0,8	3,5	3,6	1,0	6,3
Reconciliação pelo MC com 10000	3,6	0,8	3,5	3,6	1,0	6,3
Reconciliação pelo MC com 100000	3,7	0,8	3,6	3,7	1,0	6,4
Reconciliação pelo MC com 200000	3,7	0,8	3,6	3,7	1,0	6,4

Dados resultantes das simulações feitas nesse trabalho

Nas tabelas 2.6, 2.7 e 2.8, observa-se que os valores da incerteza padrão e da vazão calculadas pelo método de Monte Carlo convergem para o valor calculado pelo método analítico com o aumento do número de pontos no método Monte Carlo. Isso indica que o método Monte Carlo pode ser utilizado nos caso em que a solução analítica não é factível e o custo computacional é aceitável.

2.3 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA TECLIM DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS EM BALANÇO HÍDRICO

Um caso exemplo será mostrado aqui, reportado em (8). A matriz incidência é a mesma usada no exemplo 3. Tem-se um sistema com 8 nós e 13 correntes, como mostrado na figura 2.4.

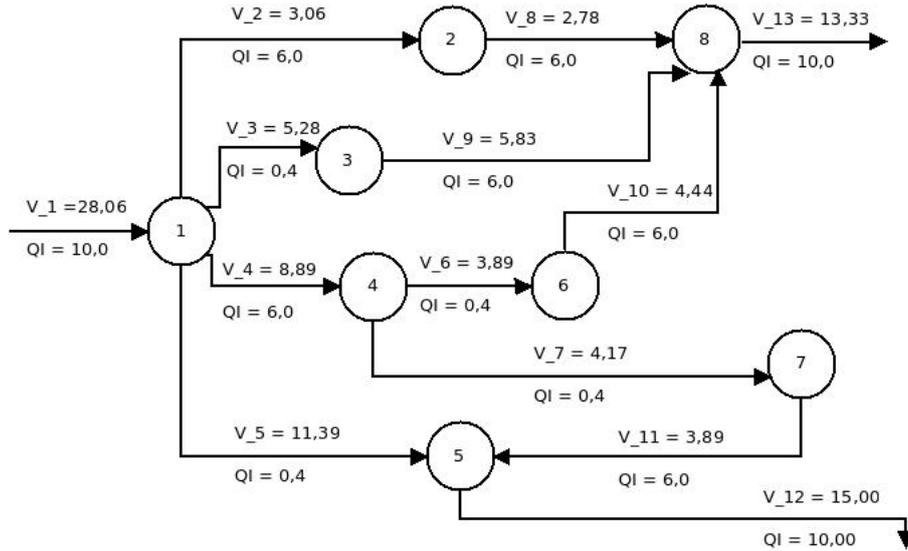


Figura 2.4: Processo com 8 equipamentos e 13 correntes

Como visto na figura, temos as informações de vazão mapeada e sua qualidade da informação. Em (8) tem uma demonstração da analogia entre qualidade da informação e incerteza da medida. Aplicamos a função objetivo definida pela equação 1.25 e todos os passos para a reconciliação pelo método RECLIM, citados no subcapítulo 1.6. Nesse caso, consideramos que as distribuições das vazões são retangulares. Temos que para determinar o fator de abrangência para uma faixa de 90% dos valores, calculamos a amplitude da distribuição, $\mathbf{Amp} = \frac{\mathbf{incerteza\ expandida}}{0,9}$, a incerteza padrão combinada, $u_M = \frac{\mathbf{Amp}/2}{\sqrt{3}}$, e depois o fator de abrangência, $k_i = \frac{\mathbf{incerteza\ expandida}}{\mathbf{incerteza\ padrão\ combinada}}$. Como recomendado em (8), o K_i utilizado foi de 0,1 e obtemos um fator de abrangência de 3,12. Temos o resultado dos cálculos apresentado na tabela 2.9:

Tabela 2.9: Tabela com o resultado da reconciliação de dados usando o método RECLIM (vazões em t/h).

Corrente	V_m mapeada (t/h)	V_R reconciliada método analítico (t/h)	V_{MC} Monte Carlo (t/h)	Desvio absoluto ($V_m - V_R$) (t/h)	Desvio percentual (%) $(\frac{V_m - V_R}{V_m})$
1	28,1	28,2	28,2	-0,2	0
2	3,1	2,9	2,9	0,2	-5
3	5,3	5,8	5,8	-0,6	-10
4	8,9	8,5	8,5	0,4	4
5	11,4	11,0	11,0	0,4	4
6	3,4	4,5	4,5	-1,2	-34
7	4,2	4,0	4,0	0,2	5
8	2,8	2,9	2,9	-0,1	-5
9	5,8	5,8	5,8	-0,0	0
10	4,4	4,5	4,5	-0,0	-2
11	4,0	4,0	4,0	-0,1	-2
12	15,0	14,9	14,9	-0,1	0
13	13,3	13,3	13,3	0,1	0

V_m - Vazão mapeada

V_R - Vazão reconciliada

V_{MC} - Vazão reconciliada pelo método Monte Carlo

Obs: Dados resultantes das simulações feitas nesse trabalho

É possível identificar que houve uma mudança nos valores de vazão e que agora ele zera os balanços no nosso balanço hídrico. Com os dados da tabela 2.9, fez-se a propagação da qualidade da informação (QI) através da metodologia de propagação de incerteza, usando as equações 1.24 e 1.25. Os resultados estão na tabela 2.10.

Tabela 2.10: Tabela com o resultado da reconciliação de dados usando a metodologia TECLIM.

Corrente	QI_m mapeada	QI_R reconciliada	QI_{MC} Monte Carlo	Desvio absoluto $(QI_R - QI_m)$	Desvio percentual (%) $\left(\frac{QI_R - QI_m}{QI_m}\right)$	u_M $\left(\frac{t}{h}\right)$	u_R $\left(\frac{t}{h}\right)$
1	10,0	19,0	18,9	9,0	90	0,09	0,05
2	6,0	8,6	8,6	2,6	44	0,02	0,01
3	0,4	7,3	7,2	6,9	1714	0,42	0,03
4	6,0	10,8	10,7	4,9	80	0,05	0,03
5	0,4	7,5	7,5	7,1	1783	0,91	0,05
6	0,4	7,3	7,3	6,9	1732	0,27	0,02
7	0,4	6,6	6,6	6,2	1549	0,33	0,02
8	6,0	8,6	8,6	2,6	44	0,01	0,01
9	6,0	7,3	7,2	1,3	21	0,03	0,03
10	6,0	7,3	7,3	1,3	22	0,02	0,02
11	6,0	6,6	6,6	0,6	10	0,02	0,02
12	10,0	11,2	11,1	1,2	12	0,05	0,04
13	10,0	15,3	15,2	5,3	53	0,04	0,03
QI_G	6,8	12,1	12,1	5,3	77	1,10	0,1

QI_m - Qualidade de informação mapeada

QI_R - Qualidade de informação reconciliada

QI_{MC} - Qualidade de informação das vazões reconciliada pelo método Monte Carlo

u_m - Incerteza das vazões mapeadas

u_R - Incerteza das vazões reconciliadas

Obs: Dados resultantes das simulações feitas nesse trabalho

Na tabela 2.10 observa-se que as qualidades de informação individuais tenderam a aumentar. Isso é possível, pois um agregamento de informações (topologia dos fluxo hídrico, ou balanço de massa do sistema) ao sistema influencia positivamente no resultado final. Na metodologia TECLIM, é possível que certos valores de QI fiquem acima do limite máximo inicial, veja a tabela 2.10.

A qualidade de informação global do sistema variou depois da reconciliação

de dados. O QI aumentou significativamente, levando-se a concluir que a técnica melhora a informação sobre o modelo usado. Como antes dito, a escala de QI mudou; o maior valor 19,0 e o menor é 6,6. A re-escala levaria a uma faixa maior de valores de QI. Antes a diferença entre o pior valor e o melhor valor era de 10, após a reconciliação passou para 12. Uma re-classificação da qualidade de informação pode resolver problemas onde certos valores de vazão reconciliadas mudam para valores que não são realizáveis. Esse processo de dialogo técnico é um momento de forte iteração homem-técnica e de grande oportunidade para conhecer e melhorar o processo. Faz parte do processo de reconciliação está sempre revendo os pontos de medições utilizados no cálculo e, se possível, melhorar aqueles que suscitarem dúvidas. Essa etapa permite identificar erros no sistema de medição, pontos onde o consumo está acima do recomendado e pontos do sistema que necessitem de um investimento para melhorar a qualidade da informação.

Capítulo 3

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Concluímos-se que a reconciliação de dados melhorou (diminuiu) a incerteza global do sistema. Cada incerteza reconciliada é influenciada individualmente pelas outras incertezas e vazões antes da reconciliação dos dados do sistema, estabelecendo uma relação entre as incertezas e vazões antes e depois da reconciliação. A tendência da reconciliação é de uma melhora nas incertezas individuais, ou seja, as incertezas maiores tendem a diminuir, embora algumas incertezas possam aumentar de valor; contudo a incerteza global após a reconciliação é menor que antes da mesma, o que mostra que a reconciliação traz benefícios para a confiança nas informações sobre o sistema.

Na metodologia TECLIM de reconciliação de dados, observa-se que as Qualidades das Informações das vazões tendem a melhorar, ou seja, aumentar, embora aqui também identificamos que as piores (menores) Qualidades das informações podem diminuir. Essa metodologia foi e continua sendo aplicada com certo êxito em diversas empresas, mas deve ser melhorada em alguns itens:

- Levantamento da qualidade da informação - Nesse item vem sendo desenvolvido uma metodologia que usa lógica Fuzzy na estimação da qualidade da informação.
- Desenvolvimento para o caso não-linear
- O uso de inteligência artificial para a resolução do problema da reconciliação, principalmente no caso da onde o sistema é muito não linear.

- Uma análise na melhor métrica para quantificar a qualidade de informação global.
- Aplicação da inferência bayesiana na reconciliação de dados e na determinação do QI

Referências Bibliográficas

- 1 BELLO, J. L. P.. Metodologia Científica: manual para elaboração de textos acadêmicos, monografias, dissertações e teses, Rio de Janeiro – 2005.
- 2 CASSANDRA, R. O.; SILVA. Metodologia e organização do projeto de pesquisa (guia prático). Ceará: 2004.
- 3 CHAPMAN, S. J.. Programa em MATLAB para engenheiros. São Paulo, Thomson Learning, 2006.
- 4 FONTANA, D.; KALID, R. A.; SILVA, M. M.. 2005. Methodology for Wastewater Minimization in Industries in the Petrochemical Complex; 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering e 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering - ENPROMER: Anais do ENPROMER.
- 5 DONATELLI, G. D.; KONRATH, A. C.. Simulação de Monte Carlo na avaliação de incertezas de medição, REVISTA DE CIÊNCIA & TECNOLOGIA V. 13, No 25/26 – pp. 5-15
- 6 HIMMELBLAU, D. M.. Process Analysis by Statistical Methods. John Wiley & Sons, 1970.
- 7 INMETRO. GUIA para expressão da incerteza de medição - *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* - ISO GUM- Rio de Janeiro: 2005.
- 8 MARTINS, M. A. F.; AMARO, C. A.; SOUZA, L. S.; KALID, R. A.; KIPERSTOK, A.. New objective function for data reconciliation in water balance from industry processes, Journal of Cleaner Production, v18, p-1184-1189, 2010.