

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

**CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU  
MODELAGEM COMPUTACIONAL E TECNOLOGIA INDUSTRIAL**

**ADEMÁRIO LOPES FERREIRA DOS SANTOS**

**RECONCILIAÇÃO DE DADOS PARA MEDIÇÃO  
DE GÁS NATURAL EM MALHA DE DUTOS**

Salvador  
2021

**ADEMÁRIO LOPES FERREIRA DOS SANTOS**

**RECONCILIAÇÃO DE DADOS PARA MEDIÇÃO  
DE GÁS NATURAL EM MALHA DE DUTOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz  
Pellegrini Pessoa

Coorientador: Prof. Dr. Ewerton  
Emmanuel da Silva Calixto

Salvador  
2021

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Centro Universitário SENAI CIMATEC

S237r Santos, Ademário Lopes Ferreira dos

Reconciliação de dados para medição de gás natural em malha de dutos /  
Ademário Lopes Ferreira dos Santos. – Salvador, 2021.

107 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.

Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional e Tecnologia  
Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC,  
Salvador, 2021.

Inclui referências.

1. Reconciliação de dados. 2. Medição – Gás natural. 3. Gás natural. 4.  
Estatística. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Pessoa, Fernando Luiz  
Pellegrini. III. Título.

CDD 333.8233

## CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

### Mestrado Acadêmico em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada “**Reconciliação de Dados para Medição de Gás Natural em Malha de Dutos**” apresentada no dia 19 de julho de 2021, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial.

Orientador: **Prof. Dr. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa**  
SENAI CIMATEC

Coorientador: **Prof. Dr. Ewerton Emmanuel da Silva Calixto**  
FIEB

Membro Interno: **Prof. Dr. Ivan Costa da Cunha Lima**  
SENAI CIMATEC

Membro Externo: **Prof. Dr. Edson Córdão do Valle**  
UFRGS

Membro Externo: **Prof. Dr. André Luiz Hemerly Costa**  
UERJ

Membro Externo: **Prof. Dr. Jose Carlos Costa da Silva Pinto**  
UFRJ

Dedico este trabalho a toda a minha família – em especial, à minha mãe Marina Lopes e meu pai, José Ferreira, por terem me ensinado o amor e a busca incessante ao conhecimento.

À minha irmã, Juliane Lopes, à minha esposa Conceição e à minha filha Júlia – pelo apoio, carinho e compreensão durante minhas ausências.

Vocês têm sido para mim e tantas pessoas um exemplo de virtude, sabedoria e humanidade.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por seu amor incondicional.

Aos meus pais e irmã, porto seguro que me oferta abrigo e segurança.

À minha esposa e à minha filha, por acrescentarem alegria e motivação em minha vida.

Ao amigo Eduardo Gertrudes, pela sabedoria, pelos conhecimentos técnicos que têm do tema desta dissertação; pela humildade e proatividade.

Aos orientadores Fernando Pessoa e Ewerton Calixto, pela paciência, incentivo e conhecimentos técnicos do tema de dissertação;

Ao professor Edson Cordeiro do Valle, pela proatividade e conhecimentos técnicos do tema de dissertação;

Ao gerente de operações Lázaro Machado, pelo incentivo ímpar, pelo exemplo motivacional de como atingir os resultados, metas e desafios;

Ao consultor técnico Celestino Boente, pelo incentivo ao tema da reconciliação de dados.

## RESUMO

O impacto econômico associado à medição de Gás Natural exige uma otimização do controle do balanço de massa no sistema de entrega aos diversos pontos de consumo, sejam clientes residenciais, automotivos ou industriais. O objetivo deste trabalho é avaliar a medição de Gás Natural na concessionária de distribuição de Gás Natural da Bahia (Bahiagás) para malha de gasodutos, através da técnica da reconciliação de dados, além de analisar a base estatística da reconciliação de dados, ou seja, as premissas de aleatoriedade, média dos resíduos é igual a zero e função de densidade de probabilidade normal, para verificar se a reconciliação dos dados em pauta possui significado estatístico. A técnica em pauta é um instrumento eficiente para avaliação do balanço de massa em gasodutos. A reconciliação de dados leva em conta a redundância nas medições, aumenta a confiabilidade da medição e, assim, reduz a incerteza individual associada a cada grandeza física que possa interferir na medição. A aplicação da reconciliação de dados aos dados medidos levou à conclusão de que o balanço mássico da malha de dutos da Bahiagás não possui desvios significativos. Entre as contribuições deste trabalho, os resultados obtidos mostram que a técnica de reconciliação de dados colaborou para a identificação de falhas, como a possível falta de calibração no equipamento de medição, sujeira ou funcionamento indevido de sensores e transmissores em alguns pontos de medição, agregando redução de custos em possíveis medições errôneas, assim como qualidade às medições de Gás Natural. Além disso, a pesquisa indica que a técnica é útil para a avaliação do balanço mássico da malha de gasodutos.

**Palavras-chave:** Reconciliação de dados. Medição. Gás Natural. Estatística.

## ABSTRACT

The economic impact associated with the measurement of natural gas requires an optimization of the control of the mass balance in the delivery system to the various points of consumption, whether residential, automotive or industrial customers. The objective of this work was to evaluate the measurement of natural gas at the natural gas distribution concessionaire in Bahia (BAHIAGAS), for the gas pipeline network, using the data reconciliation technique, in addition to the analysis of the statistical base of the data reconciliation, that is, , of the assumptions of randomness, mean of the residuals equal to zero and normal probability density function, to verify if the reconciliation of the data in question has statistical significance. The technique in question is an efficient instrument for assessing the mass balance in gas pipelines. Data Reconciliation takes redundancy into account, increases the measurement reliability and thus reduces the individual uncertainty associated with each physical quantity that may interfere with the measurement. The application of data reconciliation to measured data led to the conclusion that the mass balance of BAHAGAS 'pipeline network does not have significant deviations. Among the contributions of this work, the results obtained show that the data reconciliation technique collaborated to the identification of failures, such as the possible lack of calibration in the measurement equipment, dirt or improper functioning of sensors and transmitters at some measurement points, aggregating cost reduction in possible erroneous measurements, as well as quality in Natural Gas measurements. In addition, it is useful for assessing the mass balance of the gas pipeline network.

**Keywords:** Data Reconciliation, Measurement, Natural Gas, Statistics.



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Categorização para os valores do coeficiente de correlação paramétrica .....	32
<b>Tabela 2</b> - Comparação entre ETC e somatório de clientes antes da reconciliação .....	53
<b>Tabela 3</b> – Indicativo percentual: diferença entre dados medidos e reconciliados .....	54
<b>Tabela 4</b> – Teste global da reconciliação de dados .....	55
<b>Tabela 5</b> – Resultado de detecção de erros grosseiros através do teste da medida .....	56
<b>Tabela 6</b> – Medição não reconciliada dos clientes.....	74
<b>Tabela 7</b> – Resultados das reconciliações da dados: Comparação das medições de vazão entre ETC e soma dos clientes.....	75
<b>Tabela 8</b> – Dados reconciliados das vazões dos clientes .....	76
<b>Tabela 9</b> – Incerteza expandida dos medidores de vazão .....	77

## LISTAS DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Unidade de Processamento de Gás Natural .....	14
<b>Figura 2</b> – Fluxograma ETC x clientes .....	16
<b>Figura 3</b> – Diagrama de blocos – ETC e Clientes.....	17
<b>Figura 4</b> – Responsabilidades da distribuição do Gás Natural .....	19
<b>Figura 5</b> – Exemplo de execução do algoritmo K-Média .....	23
<b>Figura 6</b> – Cálculo de K pelo método silhueta .....	24
<b>Figura 7</b> - Gráfico para ilustração de desvio padrão.....	25
<b>Figura 8</b> – Análise de autocorrelação gráfica .....	38
<b>Figura 9</b> - Classificação de variáveis .....	40
<b>Figura 10</b> – Esquema para detecção de erros grosseiros através do teste global ...	42
<b>Figura 11</b> – Esquema para detecção de erros grosseiros através do teste da medida.....	44
<b>Figura 12</b> – Etapas da pesquisa .....	45
<b>Figura 13</b> – Resíduos relativos com base na reconciliação .....	59
<b>Figura 14</b> – Verificação de autocorrelação .....	60
<b>Figura 15</b> – Comparação das medições de vazão mássica entre ETC e a soma dos clientes (dados não reconciliados).....	66
<b>Figura 16</b> – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 28 de junho de 2019.....	77
<b>Figura 17</b> – Representação dos resíduos da reconciliação - Dia 1º de junho de 2019 .....	78
<b>Figura 18</b> – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 4 de junho de 2019 .....	79
<b>Figura 19</b> – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 20 de junho de 2019 .....	80
<b>Figura 20</b> – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 25 de junho de 2019 .....	81
<b>Figura 21</b> – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 28 de junho de 2019 .....	82
<b>Figura 22</b> – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 29 de junho de 2019 .....	83
<b>Figura 23</b> – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 30 de junho de 2019 .....	84
<b>Figura 24</b> – Script no software R – pacotes cluster, FactoMineR e factoextra .....	85
<b>Figura 25</b> – Script no software R – LDOF. Utilização do algoritmo LDOF. ....	85

## LISTAS DE SIGLAS

AGERBA	Agência Estadual de Regulação dos Serviços Públicos de Energia, Transportes e Comunicação
ANP	Agência Nacional do Petróleo
BAHIAGÁS	Companhia de Gás da Bahia
CNP	Conselho Nacional do Petróleo (CNP).
COFINS	Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
ERPM	Estações de Regulagem de Pressão e Medição
ETC	Estações de Transferência de Custódia
GN	Gás Natural
GRG	Gradiente Reduzido Generalizado
IBP	Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás
L/s	Litros por segundo
LGN	Líquidos de Gás Natural
LP	<i>Linear Programming</i>
MCTI	Modelagem Computacional e Tecnologia Industrial
PDF	Função de densidade de probabilidade
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S. A.
PIS	Programas de Integração Social
PO	Pesquisa Operacional
PPGETEC	Pós-graduação em Gestão e Tecnologia Industrial
RD	Reconciliação de Dados
SFR	Sistema Físico Real
UPGN	Unidades de Processamento de Gás Natural
WWW	<i>World Wide Web</i>

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 DEFINIÇÕES DO PROBLEMA .....	16
1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA .....	17
<b>1.2.1 Objetivo geral:</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos:</b> .....	<b>18</b>
1.3 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA .....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 ASPECTOS REGULATÓRIOS – GÁS NATURAL .....	19
2.2 DISTRIBUIÇÃO DO GÁS NATURAL .....	20
2.3 COMERCIALIZAÇÃO DO GÁS NATURAL .....	20
2.4 ERRO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO .....	21
<b>2.4.1 Detecção de Outliers</b> .....	<b>21</b>
2.4.1.1 Critério de agrupamento de dados .....	22
2.5 INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE GÁS .....	24
<b>2.5.1 Incerteza-padrão de medição</b> .....	<b>24</b>
<b>2.5.2 Incerteza padrão da medição combinada</b> .....	<b>26</b>
<b>2.5.3 Incerteza padrão da medição expandida</b> .....	<b>26</b>
2.6 PREMISSAS DA FUNÇÃO OBJETIVO.....	27
2.7 CÁLCULO DA MATRIZ DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	32
<b>2.7.1 Teste de autocorrelação dos resíduos</b> .....	<b>37</b>
2.8 FUNDAMENTOS DA RECONCILIAÇÃO DE DADOS.....	38
2.8.1 Teste global – Reconciliação de Dados .....	41
2.8 .2 Teste de Medida – Reconciliação de Dados.....	43
<b>3.0 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>45</b>
3.1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO .....	45
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS .....	49
3.3 LIMITES E LIMITAÇÕES .....	49
3.4 TRABALHOS RELEVANTES EM RECONCILIAÇÃO DE DADOS PARA CONSTRUÇÃO DESTA PESQUISA .....	50
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>52</b>
4.1 INVESTIGAÇÃO DAS MEDIÇÕES A PARTIR DO PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÕES DA BAHIA GAS – CAUSAS DOS ERROS GROSSEIROS.....	62

<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>65</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	65
5.2 CONTRIBUIÇÕES E SUGESTÕES/PONTO DE MELHORIA.....	67
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>69</b>
<b>APÊNDICES</b> .....	<b>74</b>
APÊNDICE A – TABULAÇÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA.....	74
APÊNDICE B – DIAGRAMA DE DISPERSÃO DAS GRANDEZAS OBSERVADAS E RECONCILIADAS .....	78
APÊNDICE C – TESTE GLOBAL DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS .....	86
APÊNDICE D – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS: RECONCILIAÇÃO DE DADOS GRG E MULTIPLICADORES DE LAGRANGE .....	89
APÊNDICE E – RESULTADO: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS MEDIDAS E RECONCILIADAS NO BALANÇO MÁSSICO POR DIA.....	90
APÊNDICE F – RESULTADOS DE TESTES DA MEDIDA – RECONCILIADOS DE DADOS: .....	91
APÊNDICE G – RESULTADO TESTE DE DETECÇÃO DE OUTLIERS (K-MEANS). .....	106

## 1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento do consumo de energia no planeta em detrimento da diminuição das reservas petrolíferas e dos problemas ambientais agregados, o investimento em energias renováveis aumentou consideravelmente. Por outro lado, frente ao aumento populacional nos últimos anos, as ações que envolvem o uso de fontes de energias renováveis são insuficientes. Nesse contexto, embora seja uma fonte de energia não renovável, o Gás Natural tem sido utilizado cada vez mais, tendo em vista que seus reservatórios são abundantes e sua queima polui menos que outros combustíveis fósseis (TEIXEIRA, 2015).

Entre os setores que fazem uso do Gás Natural, estão:

a) **Industrial:** emprega-se em indústrias de variados segmentos como ferro e aço, mineração, papel e celulose, química, têxtil, alimentos e bebidas. Na área petroquímica, o Gás Natural também é utilizado como matéria-prima para síntese de metanol, amônia e ureia.

b) **Domiciliar e comercial:** nas residências e nos estabelecimentos comerciais, o Gás Natural pode ser utilizado principalmente para cocção de alimentos, aquecimento de água e climatização de ambientes, em substituição à energia elétrica e ao GLP (Gás Liquefeito do Petróleo).

c) **Transporte:** o Gás Natural pode ser utilizado como combustível para os veículos em substituição ao etanol e à gasolina nos veículos leves, e ao óleo diesel em veículos pesados ou embarcações através do GNV (Gás Natural Veicular).

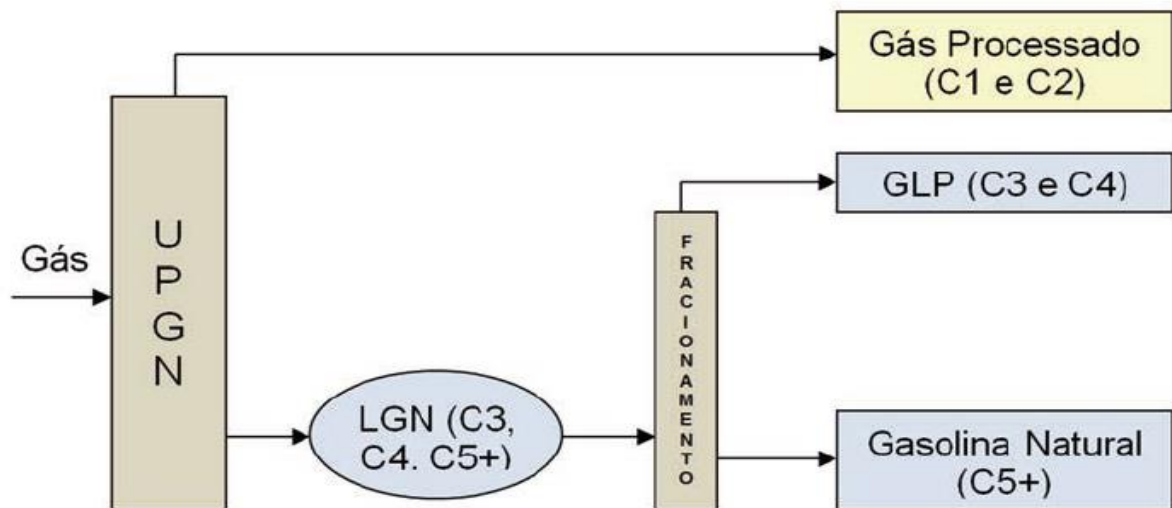
d) **Cogeração de energia:** a cogeração é a geração de energia elétrica e térmica (calor ou frio) a partir do Gás Natural. Neste processo, a queima do Gás Natural aciona turbinas a gás. Estas turbinas conectam-se a geradores e produzem a energia elétrica.

A cadeia produtiva do Gás Natural, desde a exploração até o consumo pela sociedade, através das indústrias, residências, cogeração, dentre outros, é classificada nas seguintes etapas, conforme Teixeira (2015):

a) **Exploração:** envolve estudos geológicos e geofísicos que visam determinar a viabilidade de se explorar o campo. Logo após, é realizada a perfuração do poço para comprovar a viabilidade da produção comercial. Sendo viável, o poço é preparado para a extração dos gases e/ou óleos.

- b) **Produção:** momento em que ocorre a elevação do Gás Natural bruto do poço até a superfície com o processamento primário do GN – retirada de água líquida, partículas sólidas, gás carbônico e compostos de enxofre (dessulfurização). Também é realizada nesta etapa a injeção do GN no próprio reservatório para aumentar a recuperação de petróleo residual (*gas lift*).
- c) **Processamento:** etapa realizada nas Unidades de Processamento de Gás Natural (UPGNs), quando é feita primeiramente a retirada de vapor d'água. Depois, o GN é processado, separando-se uma mistura de metano (C1) e etano (C2) dos hidrocarbonetos mais pesados chamados de líquidos de Gás Natural (LGNs), conforme resumo na Figura 1.

**Figura 1** – Unidade de Processamento de Gás Natural



Fonte: Adaptado de IBP (2009).

- d) **Transporte:** envolve o transporte do gás em dutos de aço carbono na maioria das vezes. A etapa de transporte do GN compreende desde os locais de produção até os chamados *city gates*, que são os pontos de “entrega” da custódia e venda do GN, dos produtores para as distribuidoras estaduais, começando a etapa de distribuição.
- e) **Distribuição:** etapa da cadeia em que o GN é conduzido desde os *city gates* até os consumidores finais, que podem ser residenciais, comerciais, automotivos ou industriais. A distribuição é feita normalmente com o GN no estado gasoso, através de gasodutos.

O transporte e a distribuição de Gás Natural necessitam de medições confiáveis. A medição de Gás Natural tem importância fundamental na cobrança correta do consumo aos clientes residenciais e industriais, assim como na transferência de custódia perante a empresa transportadora de Gás Natural. Alguns dos problemas enfrentados para medição correta do Gás Natural compreendem desde furtos dos respectivos equipamentos de medição (comumente em área rural), montagem incorreta da estrutura de tubulação e demais acessórios perante normas vigentes, até custos associados à correta calibração dos equipamentos de medição de vazão.

Medição confiável da vazão e da composição do Gás Natural é a forma mais adequada para o contabilizar em conformidade com a legislação vigente. Faz-se necessária a atribuição de confiabilidade metrológica dos equipamentos à técnica de medição utilizada. Como se trata de um composto leve e volátil, no transporte o GN torna-se vulnerável a perdas de massa do produto, o que gera prejuízos para os investidores (BARRETO, 2015; THOMAS, 2001; RIBEIRO, 2001).

A qualidade da medição de Gás Natural pode ser comprometida pelo uso de métodos inadequados de medição, devido ao cumprimento inadequado de normas prescritas de medição, instalação inadequada e falta de calibração de equipamentos. A ausência de turbulência, perfil de velocidades não desenvolvido a montante do medidor, variações nas propriedades do fluido e condições do escoamento são alguns dos fatores que podem comprometer a qualidade da medição (BARRETO, 2015; RIBEIRO, 2001).

No caso da medição da vazão de massa em gasodutos, inexatidões da medição podem comprometer a confiança nos processos de auditoria associados à transferência de custódia, podendo causar possíveis processos judiciais para as partes envolvidas. A exatidão da medição é dependente da técnica de medição, da aptidão do profissional responsável pela supervisão e da calibração do medidor. Operados de forma correta, medidores (ultrassônicos, de deslocamento positivo, turbina, Coriolis e medidores por placa de orifício) calibrados em conformidade com as normas aplicáveis proporcionam níveis aceitáveis de exatidão (BARRETO, 2015).

Contudo, mesmo atendendo a todas as exigências legais e metrológicas, os dados disponíveis são medidos por instrumentos e equipamentos que apresentam incertezas de medição e estão sujeitos a falhas. Além disso, também existem variabilidade e falhas inerentes ao próprio processo. Conseqüentemente, não deve ser esperado que as medições de uma planta sejam aderentes ao balanço de massa



(BAI et. al., 2007; OLIVEIRA, 2006; PRATA, 2005). Dessa forma, faz-se necessário que os dados sejam processados, analisados, criticados e melhorados antes de serem utilizados para tomadas de decisão.

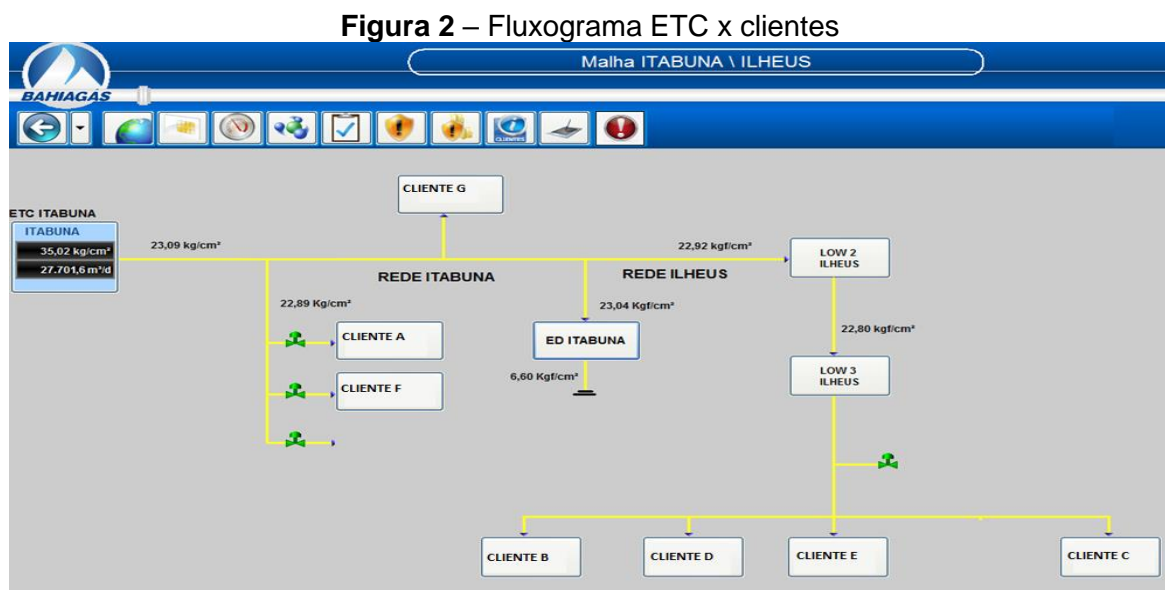
A reconciliação de dados é uma técnica de ajuste das medições obtidas em um processo, de modo que essa técnica atenda aos balanços de massa e/ou energia de cada medição. A base da reconciliação de dados está voltada para a minimização de uma função objetivo sujeita a restrições definidas pela natureza do processo (KNOPF, 2012; NARASIMHAN; JORDACHE, 2000).

### 1.1 DEFINIÇÕES DO PROBLEMA

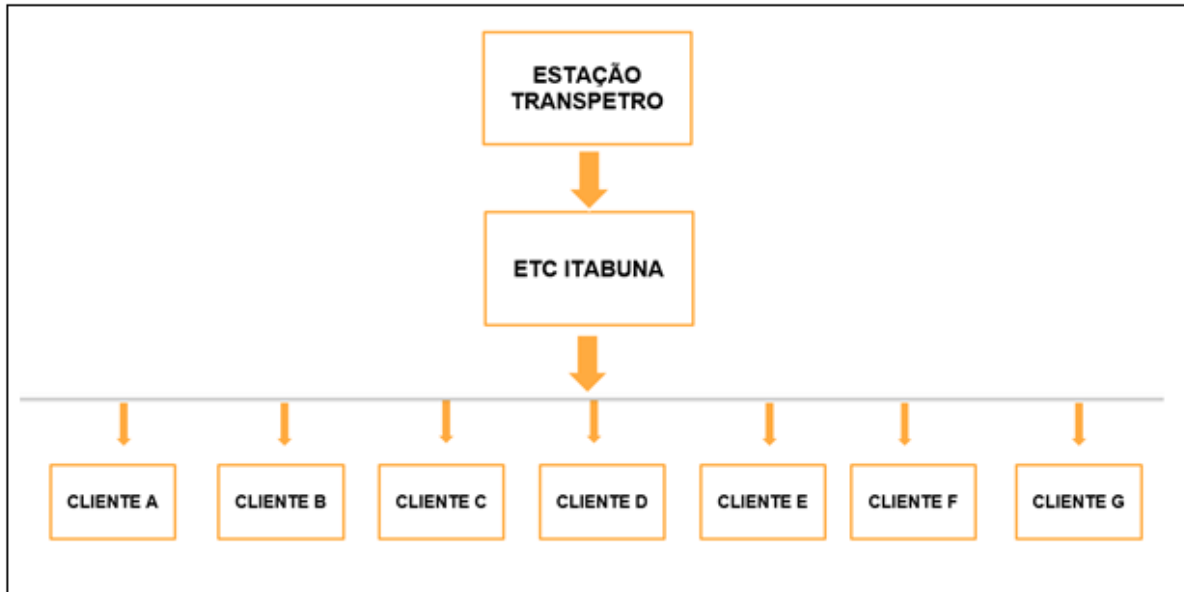
As diferenças de contabilização entre a produção e o repasse para os clientes que indiretamente consomem o gás produzido, com conseqüente validação das premissas da função objetivo na reconciliação de dados assim como interpretação estatística dos resultados obtidos, constituem a definição do problema a ser analisado.

A contabilização errônea da compra ou venda de Gás Natural envolvendo os respectivos clientes e fornecedores pode causar perdas econômicas de grande valor.

Com a realização de tratamento estatístico para o banco de dados de Gás Natural objetivando inicialmente a detecção de erros grosseiros aliados à técnica de reconciliação de dados, pode-se avaliar o grau do problema frente ao balanço de massa da malha de gasodutos.



Fonte: Figura adaptada do Sistema Supervisório Bahiagás (2020).

**Figura 3** – Diagrama de blocos – ETC e Clientes

As Figura 2 e 3, ilustram a distribuição do Gás Natural desde a ETC até os clientes. A figura 2 é uma adaptação do fluxograma do sistema supervisorio da Bahiagás. As válvulas *Low 2* e *Low 3* são válvulas de segurança para fechamento automático da malha de infraestrutura em caso de situação adversa. Por exemplo, pode-se verificar a partir da figura 2 que, um possível vazamento na malha de dutos, medição errônea de algum cliente ou fechamento inadvertido de alguma válvula na malha de dutos, podem ocasionar sérios problemas no balanço mássico, assim como contabilização errônea na venda de gás natural. Já a figura 3, ilustra a distribuição do gás natural na região de Itabuna em formato de diagrama de blocos.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.2.1 Objetivo geral:

Aplicar a técnica de reconciliação de dados e a detecção de erros grosseiros para a avaliação das medições numa rede de distribuição de Gás Natural da Bahiagás, além de comparar as medições entre as ETC (Estações de Transferência de Custódia) e os pontos de consumo para os diversos clientes da concessionária, verificando a relação entre consumo e fornecimento de GN.

### 1.2.2 Objetivos específicos:

- Avaliar o balanço de massa da malha de gasodutos comparando a medição não reconciliada e reconciliada.
- Avaliar as premissas matemáticas da função objetivo para que a reconciliação de dados tenha significado estatístico;
- Detectar potenciais problemas nas medições através de técnicas de reconciliação de dados e detecção de erros grosseiros.

### 1.3 IMPORTÂNCIA DA PESQUISA

A importância e a contribuição desta pesquisa consistem na possibilidade de avaliar o balanço de massa da malha de dutos de Gás Natural na Bahiagás comparando o banco de dados de vazões por um determinado período e confrontando dados reconciliados e não reconciliados. Aliás, a utilização prévia de ferramentas estatísticas para verificação de erros grosseiros na avaliação preliminar do banco de dados mostra-se como parte integrante fundamental desta pesquisa.

A avaliação do balanço mássico de malha de gasodutos, a validação das premissas da função objetivo na reconciliação de dados, assim como a interpretação estatística dos resultados obtidos constituem fatores de relevância nesta dissertação, pois, por meio da reconciliação de dados, serão comparadas as discrepâncias de consumo do Gás Natural distribuído entre os diversos clientes pela concessionária.

A discussão desse tema contribui para a melhoria da eficiência do sistema de medição, melhoria esta que resulta na qualidade do processo de controle e monitoramento e no aumento da margem de lucros da empresa, minimizando as perdas operacionais e assegurando o controle metrológico do processo de medição.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ASPECTOS REGULATÓRIOS – GÁS NATURAL

O marco regulatório do Gás Natural está embasado em dois referenciais: a Constituição Federal do Brasil de 1988 e a Lei do Petróleo de 1997. O conceito de regulação consiste em controlar (geralmente sob domínio do Estado) determinada atividade de interesse público (TEIXEIRA, 2015).

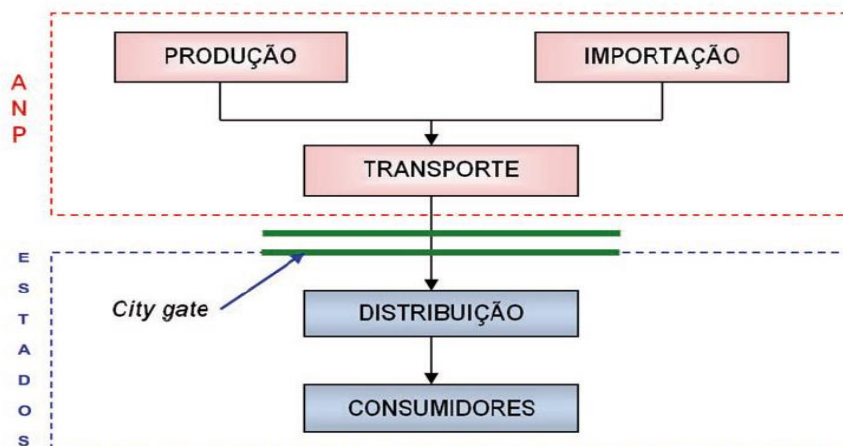
A partir de 1988, através da Constituição Federal, foram estabelecidos os direitos e princípios de exploração do Gás Natural canalizado. Além do direito de explorar a distribuição de GN, diretamente ou por concessão, os estados brasileiros também criaram as agências estaduais reguladoras dessas atividades.

Em 1997, foi criada a Agência Nacional do Petróleo (ANP), cuja responsabilidade, em nível nacional, envolve a regulação e a fiscalização das atividades relativas à indústria do petróleo. Em 2005, com a Lei 11.097, a ANP passou a chamar-se de Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, pelo fato de estes últimos energéticos também serem objetos de sua regulação.

Em 2009, foi promulgada a Lei 11.909, denominada Lei do Gás, que dispõe sobre as atividades relativas ao transporte de Gás Natural, bem como sobre as atividades de tratamento, processamento, estocagem, liquefação, regaseificação e comercialização de GN.

A Figura 4 esquematiza, em fluxograma, as responsabilidades sobre a regulação da indústria de GN.

**Figura 4 – Responsabilidades da distribuição do Gás Natural**



Fonte: Teixeira (2015).

A ANP é a responsável pela regulação das atividades que vão desde a exploração até o transporte do gás aos *city gates* (ou ETC – Estação de Transferência de Custódia), além da importação. A distribuição dos *city gates* até os consumidores finais fica sob a competência das agências reguladoras estaduais. No estado da Bahia, a regulação do GN está sob a responsabilidade da Agência Estadual de Regulação dos Serviços Públicos de Energia, Transportes e Comunicação (AGERBA).

Sobre as distribuidoras, a maioria tem os estados da Federação como acionistas majoritários, além da participação da Petrobras, que se mantém presente em toda a cadeia do GN. Na Bahia, a concessionária de Gás Natural é a Companhia de Gás da Bahia (BahiaGás).

## 2.2 DISTRIBUIÇÃO DO GÁS NATURAL

As empresas distribuidoras estaduais realizam a condução do Gás Natural desde os *city gates* até os consumidores finais, que podem ser residenciais, comerciais, automotivos ou industriais.

São de notável destaque, em termos de questões operacionais e segurança, os padrões rígidos de especificação que o GN deve atender em relação à presença de contaminantes que possam danificar os equipamentos dos consumidores. Exceto para algumas indústrias, também é realizada a odorização do gás adicionando-se compostos de enxofre (chamados de mercaptanos), que permitem sua rápida detecção em caso de vazamentos. Também são instaladas válvulas de bloqueio ao longo da rede para conter uma eventual descompressão e válvulas de alívio ou purga de gás para evitar que aumentos bruscos de pressões danifiquem os aparelhos à jusante (TEIXEIRA, 2015).

## 2.3 COMERCIALIZAÇÃO DO GÁS NATURAL

Para distribuição do GN desde os *city gates* até os consumidores finais, é necessário construir redes de distribuição de gás e ramais para interligá-las até as estações de regulação de pressão e medição (ERPM) dos clientes consumidores. A partir da ERPM, cessa a responsabilidade da distribuidora, pois se inicia a rede interna do cliente que assume a responsabilidade de conduzir o gás até seus equipamentos

de consumo. Os custos da construção do ramal e da ERPM ficam a cargo da distribuidora e os custos relativos à rede interna, dos clientes.

Os contratos firmados entre as distribuidoras de GN e seus clientes variam de acordo com o segmento de consumo. Para clientes industriais de grande consumo, geralmente são aplicadas cláusulas semelhantes às aquelas contidas no contrato de compra do produtor (Petrobras). Existem contratos chamados Firmes Inflexíveis, que apresentam cláusulas do tipo *Take or Pay*, ou seja, fixam um consumo mínimo de longo prazo que justifique o investimento da distribuidora na infraestrutura de fornecimento, além da exigência de programação de retirada de gás. Há também contratos do tipo Ininterruptíveis, nos quais pode haver a restrição total ou parcial do fornecimento de gás e penalidades por consumo abaixo ou acima do percentual definido (TEIXEIRA, 2015).

Já os contratos com clientes industriais pequenos e automotivos não possuem cláusulas *Take or Pay*, porém é necessária a definição da quantidade diária contratual de consumo. Os clientes comerciais e residenciais, por sua vez, possuem contratos simplificados, sem ocorrência de penalidades por consumo mínimo (TEIXEIRA, 2015).

As distribuidoras aplicam valores das tabelas tarifárias publicadas trimestralmente pelas agências reguladoras estaduais. Essas tarifas são preços máximos de venda do GN.

## 2.4 ERRO DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

Como é impossível fazer medição sem incerteza, procura-se manter as incertezas dentro de limites toleráveis e estimar seus valores com exatidão aceitável. As incertezas da medição nunca podem ser completamente eliminadas, pois o valor verdadeiro para qualquer quantidade é desconhecido (RIBEIRO, 2001).

### 2.4.1 Detecção de Outliers

Antes da abordagem sobre as técnicas de detecção de outliers nesta pesquisa, se faz necessário destacar a diferença entre erros grosseiro e outlier:

- Outlier – Segundo Taylor (2012), outlier significa ponto fora da curva, ou seja, significa valor atípico, que apresenta alto afastamento dos demais

ou inconsistente. A medição que se apresentar como outlier tem altas probabilidades de ser um erro grosseiro;

- Erro grosseiro – Segundo Ribeiro (2003), são erros grandes (em comparação aos erros aleatórios), geralmente ligados a problemas de instrumentação ou no próprio processo. Nesta classe de erros se incluem também os erros sistemáticos, são caracterizados como medições continuamente altas ou baixas, e conseqüentemente com média não-nula. Esses erros estão geralmente relacionados a problemas de calibração ou falhas consistentes de operação dos equipamentos.

O critério de K-Médias é voltado a detecção de outliers, enquanto que o teste global (GT) e teste da medida na reconciliação de dados é voltado a detecção de erros grosseiros.

#### 2.4.1.1 Critério de agrupamento de dados

O critério de agrupamento é dividido em dois grupos: hierárquicos e não hierárquicos.

Conforme Jain, Murty e Flynn (1999) e Stasiu (2007), os métodos hierárquicos são aglomerativos, ou seja, são feitos de forma que cada elemento é considerado um grupo, os grupos combinam-se entre si até que certo critério seja satisfatório. Os métodos não hierárquicos (também chamados de divisivos), por outro lado, são iniciados com um único grupo que se divide até que o critério de parada seja encontrado. Este método foi aplicado nesta dissertação.

O método *K-Means*, utilizado nesta dissertação, é não hierárquico. Ele se baseia na organização de um conjunto de objetos em um grupo fixo de K partições. Cada partição define um grupo no problema de agrupamento.

Conforme Ferreira (2016), para a realização do particionamento dos dados, considera-se  $X = \{x_1, \dots, x_i\}$  um conjunto n-dimensional com i instâncias a serem particionadas entre um conjunto  $C = \{c_1, \dots, c_k\}$  com K centroides. Cada ponto  $x \in X$  é atribuído ao centroide mais próximo, e cada coleção de pontos atribuída a um centroide é um grupo ou aglomerado.

O melhor modelo de aglomerados será concluído de forma que o método *K-Means* (ou também conhecido como K-médias), considerando que  $\mu_k$  é a média ou centroide de todos os pontos no grupo  $ck$ , minimize da soma do erro quadrático entre  $\mu_k$  e os pontos no aglomerado  $ck$  para todos os  $K$  grupos.

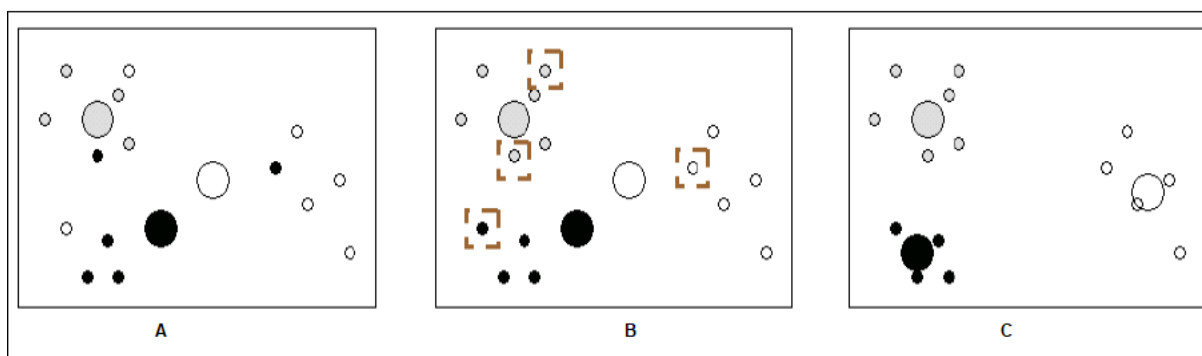
O algoritmo K-Média depende de um parâmetro ( $k$ =número de *clusters*), o qual pode ser definido pelo usuário ou calculado.

O algoritmo do K-Média pode ser descrito da seguinte maneira:

1. Determinação de distintos valores de  $k$  para os centros dos grupos (nesta dissertação, o valor de  $k$  foi calculado conforme explicação a seguir).
2. Associação de cada ponto ao centro mais próximo.
3. Recálculo do centro de cada grupo.
4. Repetição dos passos 2-3 até nenhum elemento mudar de grupo.

Segue exemplo da execução do algoritmo de *K-Means*, conforme Figura 5:

**Figura 5** – Exemplo de execução do algoritmo K-Média

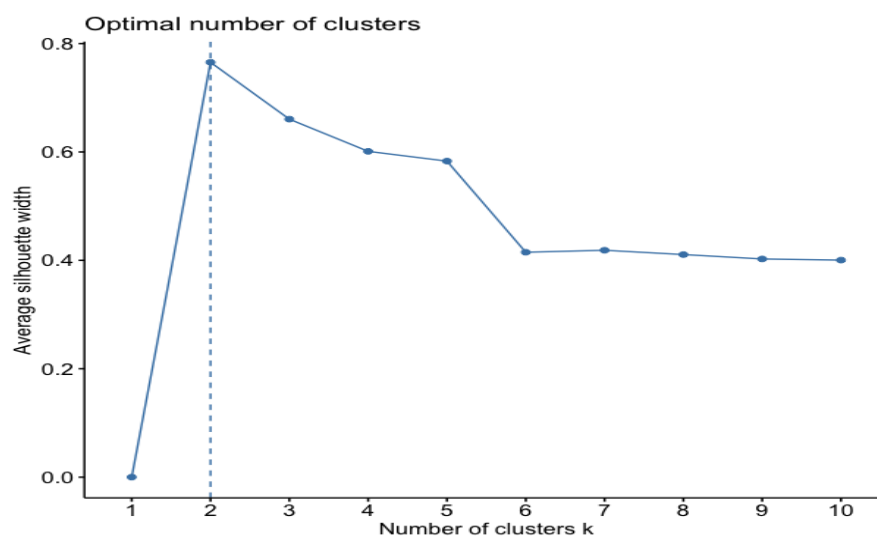


Fonte: Linden (2009).

Na Figura 5, (A), cada elemento foi designado para um dos três grupos aleatoriamente e os centroides (círculos maiores) de cada grupo foram calculados. Em (B), os elementos foram designados para os grupos cujos centroides lhes estão mais próximos e, em (C), os centroides foram recalculados.

Após diversos experimentos, o cálculo de  $K$  foi efetuado pelo método da silhueta, que calcula as distâncias de cada ponto em relação a todos os outros pontos da amostra.



**Figura 6** – Cálculo de K pelo método silhueta

Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir de então, através do software R, utilizando o algoritmo LDOF, é calculado os possíveis pontos de *outliers* tanto na Estação de Transferência de Custódia quanto nos clientes, conforme o método de detecção de *outlier* baseado em *clustering*, de acordo com Pamula, Deka e Nandi (2011).

Ainda de acordo com Pamula, Deka e Nandi (2011), LDOF significa um fator para detecção de *outlier*, o qual informa o quanto um determinado ponto está se desviando de seus vizinhos. O mais alto valor de LDOF para um determinado conjunto de pontos indica que ele possui a maior distância entre seus vizinhos. Consequentemente, apresenta alta probabilidade de ser um *outlier*. As figuras 24 e 25, contidas nos apêndices desta pesquisa contém respectivamente os seguintes scripts no software R: pacotes cluster, FactoMineR e factoextra (figura 24) e utilização do algoritmo LDOF (figura 25).

## 2.5 INCERTEZA DE MEDIÇÃO DE GÁS

### 2.5.1 Incerteza-padrão de medição

Na maioria dos casos, a melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza  $q$  que varia aleatoriamente e para a qual  $n$  observações independentes  $q_k$  foram obtidas sob as mesmas condições de medição, é a média aritmética ou média

$\bar{q}$  das  $n$  observações. A modelagem matemática é sequenciada através das equações a seguir. Segue equação 1 abaixo:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (\text{Equação 1})$$

As observações individuais  $q_k$  diferem em valor por causa de variações aleatórias nas grandezas de influência dos efeitos aleatórios. A variância experimental  $s^2(q_k)$  das observações é dada por:

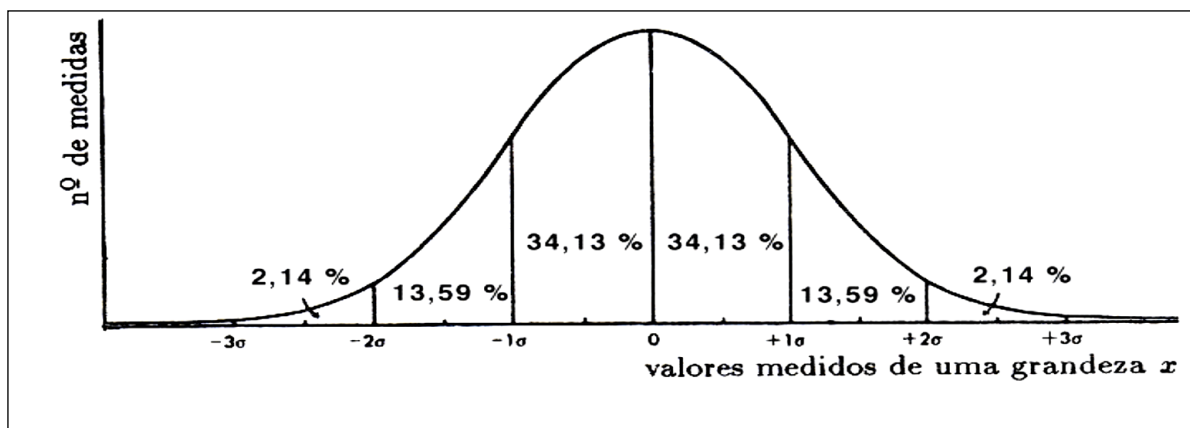
$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (\text{Equação 2})$$

A raiz quadrada positiva desta variância  $s(q_k)$  é denominada desvio padrão experimental e caracteriza a variabilidade dos valores  $q_k$  observados, mais especificamente, sua dispersão em torno da média. A variância da média  $s^2(\bar{q})$  é dada por:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (\text{Equação 3})$$

Onde a raiz quadrada positiva de  $s^2(\bar{q})$  é o desvio padrão experimental da média  $\bar{q}$ . Este valor quantifica quão bem  $\bar{q}$  estima o valor esperado de  $q$ , e qualquer um entre os valores pode ser usado como medida da incerteza de  $\bar{q}$ . Essa estimativa da variabilidade das medidas devido a erros aleatórios por meio do desvio padrão supõe que a frequência das medidas obedece à distribuição gaussiana dada na Figura 7. Nesta Figura, temos a representação gráfica de uma distribuição normal.

**Figura 7** - Gráfico para ilustração de desvio padrão



Fonte: Ribeiro (2003).

O uso das expressões acima pressupõe que, durante a realização de uma série de medidas, não ocorreram erros grosseiros; que os erros sistemáticos estiveram ausentes ou foram devidamente compensados, ou ainda são de ordem de grandeza inferior aos erros aleatórios; e que todas as demais fontes de erro contribuíram aleatoriamente, ora para aumentar, ora para diminuir o valor da grandeza.

### 2.5.2 Incerteza padrão da medição combinada

Muitas vezes, a grandeza que se quer obter não é medida diretamente, mas determinada indiretamente a partir de cálculo, empregando-se uma relação conhecida, na qual figuram as grandezas medidas diretamente. Existem situações em que todas as grandezas de entrada são independentes, que são chamadas de grandezas não correlacionadas, e situações em que duas ou mais grandezas de entrada são correlacionadas.

Inicialmente, considere que o mensurando  $Y$ , que não é medido diretamente, mas a partir de  $N$  outras grandezas  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , através de uma relação funcional  $f$ :

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (\text{Equação 4})$$

Considerando-se  $y$  a estimativa do mensurando  $Y$  ( $y = \bar{Y}$ ), a incerteza padrão de  $y$  é obtida pela combinação apropriada de incertezas padrão das estimativas de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_N$  ( $x = \bar{X}$ ). A incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  é a raiz quadrada positiva da variância combinada  $u_c^2(y)$ , que é dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (\text{Equação 5})$$

A incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  é um desvio padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que poderiam, razoavelmente, ser atribuídos ao mensurando  $Y$ . Pode-se expressar o resultado na forma:

$$Y = y \pm u_c(y) \quad (\text{Equação 6})$$

### 2.5.3 Incerteza padrão da medição expandida

A incerteza expandida  $U$  é obtida pela multiplicação da incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  por um fator  $k$ :

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (\text{Equação 7})$$

O valor do fator  $k$  é escolhido com base na probabilidade de abrangência requerida para o intervalo. Em geral,  $k$  é usado entre 2 e 3. Portanto, para aplicações especiais,  $k$  poderá ser determinado conforme a probabilidade de abrangência requerida, de acordo com a distribuição normal ou *t-Student* (ISO GUM, 2008).

## 2.6 PREMISSAS DA FUNÇÃO OBJETIVO

Segundo Barbosa (2008), a base estatística para a reconciliação de dados encontra-se nas propriedades que são pressupostas para erros aleatórios nas medidas. Geralmente se assume que os erros aleatórios seguem uma distribuição normal multivariada com média zero e uma matriz de covariância  $V_\varepsilon$  conhecida.

Somente a forma linearizada pode ser aproximada por uma distribuição normal. No caso de restrições não lineares, então uma técnica de reconciliação de dados não linear deve ser usada.

A matriz  $V_\varepsilon$  contém informação sobre a exatidão das medidas e as correlações entre elas. Os elementos na diagonal de  $V_\varepsilon$ ,  $\sigma_i^2$  são a variância na  $i$ -ésima variável medida e os elementos fora da diagonal,  $\sigma_{ij}^2$  são a covariância dos erros entre as variáveis  $i$  e  $j$ . Se os valores medidos são dados pelo vetor  $y$ , então as estimativas mais prováveis para  $x$  são obtidas pela maximização da função de verossimilhança da distribuição normal multivariada.

$$\max \mathbb{P}(y; x, V_\varepsilon) = \frac{1}{q\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\det(V_\varepsilon)}} \cdot \exp \left[ -\frac{1}{2} \cdot (\varepsilon - \bar{\varepsilon})^T \cdot V_\varepsilon^{-1} \cdot (\varepsilon - \bar{\varepsilon}) \right] \quad (\text{Equação 8})$$

Onde  $\varepsilon = y - x$ ,

$|V_\varepsilon|$  é o determinante de  $V_\varepsilon$ . O problema de máxima verossimilhança acima é equivalente à minimização da função:

$$\min (y - x)^T V_\varepsilon^{-1} (y - x) \quad (\text{Equação 9})$$

Assim, seguem as premissas para que o problema de reconciliação de dados possa ser formulado conforme equação 9:

- Os desvios de medição são conhecidos e distribuídos aleatoriamente com média zero.
- A matriz de covariância é conhecida.
- O processo está em estado estacionário.
- O modelo é ótimo, ou seja, o modelo da equação de reconciliação de dados é bem ajustado, não há falha de modelagem. O modelo dos balanços não possui erros.
- O experimento foi bem executado.
- Os resíduos (diferenças entre valores medidos e reconciliados) são independentes e seguem uma função de densidade de probabilidade (PDF) normal.
- As medições são redundantes.

A partir do princípio da máxima verossimilhança, quando é realizado um experimento, é fundamental que as observações estejam o mais próximo possível da realidade. Logo abaixo será realizada a dedução da equação 10 para encontrar a equação 11:

$$\max_{z_e} \mathbb{P}(z_e; z_R, V_\varepsilon), \quad (\text{Equação 10})$$

onde:

$\mathbb{P}$  – função de densidade de probabilidade, cuja distribuição é normal;

$z_R = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$  vetor das variáveis reais (e desconhecidas);

$z_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \end{bmatrix}$  vetor das observações experimentais;

$V_\varepsilon$ : matriz de covariância dos erros entre as observações experimentais e os valores reais.

Como é impossível solucionar esse problema devido aos valores das variáveis reais serem desconhecidos ( $z_R$ ), a alternativa é aproximar:  $z_R \cong z_m$ . Sendo que  $z_m$  é o valor das variáveis calculadas pelo modelo da equação de reconciliação de dados.

Conforme premissas da máxima verossimilhança, os valores  $\mathbf{z}_e$  têm alta probabilidade de estar próximos dos valores reais; dada a condução criteriosa dos experimentos -  $\mathbf{z}_e$  “apresentam máxima probabilidade de ocorrência” (Pinto, et. al. 2007).

Além disso, os valores reais  $\mathbf{z}_R$  são estimados pelo modelo:  $L(\mathbf{z}_e; \mathbf{z}_m, \mathbf{p}, \mathbf{V}_r)$ , onde  $\mathbf{V}_r$  é a matriz de covariância dos resíduos  $\mathbf{r} = \mathbf{z}_e - \mathbf{z}_m$ .

De acordo com as premissas da máxima verossimilhança, supõe-se que é conhecida a PDF conjunta dos erros entre as observações experimentais, assim como os valores reais (desconhecidos) e sua covariância são conhecidos. Por exemplo:  $\mathbb{P}(\mathbf{z}_e; \mathbf{z}_R, \mathbf{V}_\varepsilon)$  segue uma distribuição normal, logo:  $\mathbb{P}(\mathbf{z}_e; \mathbf{z}_R, \mathbf{V}_\varepsilon) \sim N(\mathbf{z}_e; \mathbf{z}_R, \mathbf{V}_\varepsilon)$ . Então:

$$\mathbb{P}(\mathbf{z}_e; \mathbf{z}_R, \mathbf{V}_\varepsilon) = \frac{1}{qz\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\det(\mathbf{V}_\varepsilon)}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} - \bar{\boldsymbol{\varepsilon}})^T \cdot \mathbf{V}_\varepsilon^{-1} \cdot (\boldsymbol{\varepsilon} - \bar{\boldsymbol{\varepsilon}})\right] \quad (\text{Equação 11})$$

Onde  $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{z}_e - \mathbf{z}_R$ .

A equação acima representa a equação 11.

Por definição, erro  $\boldsymbol{\varepsilon}$  é a diferença entre o valor experimental  $\mathbf{z}_e$  e o valor real  $\mathbf{z}_R$ , ou seja:  $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{z}_e - \mathbf{z}_R$ . Contudo, devido a limitações científicas e tecnológicas do processo e do sistema de medição, o valor real  $\mathbf{z}_R$  é sempre desconhecido. Logo é também impossível conhecer o erro  $\boldsymbol{\varepsilon}$ .

Visto que  $\mathbf{z}_R$  não é conhecido, então não se pode calcular o erro  $\boldsymbol{\varepsilon}$ :  $\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{z}_e - \mathbf{z}_R$ . Para superar esse paradoxo, o conceito de erro será substituído por desvio ou resíduo em relação a um valor de referência  $\mathbf{z}_R \cong \mathbf{z}_{ref}$ . O valor de referência é dado pelo modelo a ser ajustado  $\mathbf{z}_m$ , então:  $\mathbf{z}_R \cong \mathbf{z}_{ref} = \mathbf{z}_m$ .

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{z}_e - \mathbf{z}_R \cong \mathbf{r} = \mathbf{z}_e - \mathbf{z}_m$$

Como é impossível conhecer  $\mathbf{z}_R$  e  $\mathbf{V}_\varepsilon$ , substituímos  $\mathbf{z}_R \rightarrow \mathbf{z}_m$  e  $\mathbf{V}_\varepsilon \rightarrow \mathbf{V}_r$ , ou seja,  $\mathbf{z}_m$  é verossímil. Assim  $(\mathbf{z}_e; \mathbf{z}_R, \mathbf{V}_\varepsilon) \Rightarrow \mathbb{P}(\mathbf{z}_e; \mathbf{z}_m, \mathbf{V}_r)$ . Dessa forma, chega-se à função de verossimilhança:

$$\max_{\mathbf{z}_m} L(\mathbf{z}_e; \mathbf{z}_m, \mathbf{V}_r) \quad (\text{Equação 12})$$

Sujeito a  $f(\mathbf{z}_e, \mathbf{z}_m) = 0$

$\mathbf{V}_r$  é a matriz de covariância dos resíduos.

$\mathbf{z}_m$  são variáveis reconciliadas.

Função objetivo:  $\max_{\mathbf{z}_m} L(\mathbf{z}_e; \mathbf{z}_m, \mathbf{V}_r)$

$$L(\mathbf{z}_e; \mathbf{z}_m; \mathbf{V}_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \det(\mathbf{V}_r)}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \mathbf{r}^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot \mathbf{r}\right] \quad (\text{Equação 13})$$

O logaritmo é uma função monotônica crescente →

$$\max_{z_m} \mathbf{L} = \max_{z_m} (\text{Ln}(\mathbf{L}))$$

Aplicando o logaritmo neperiano a  $\mathbb{P}$  :

$$\text{Ln}(\mathbf{L}) = \text{Ln}\left(\frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \det(\mathbf{V}_r)}}\right) + \text{Ln}\left(\exp\left[-\frac{1}{2} \cdot \mathbf{r}^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot \mathbf{r}\right]\right) \quad (\text{Equação 14})$$

O logaritmo é uma função monotônica crescente, e o primeiro termo de  $\text{Ln}(\mathbf{L})$  não é função de  $z_m$  →

$$\max_{z_m} \mathbf{L} = \max_{z_m} (\text{Ln}(\mathbf{L})) = \max_{z_m} \left(-\left[\frac{1}{2} \cdot \mathbf{r}^T \cdot \mathbf{V}_r^{-1} \cdot \mathbf{r}\right]\right) \quad (\text{Equação 15})$$

Sendo que  $V_\varepsilon$  é substituído por  $V_r$ .

O problema de reconciliação de dados tradicional pode ser considerado como o procedimento para a otimização das estimativas experimentais, de modo que os valores ajustados obedeçam às leis de conservação e outras restrições (PRATA, et. al., 2010; CROWE, 1986).

A reconciliação de dados é baseada na hipótese de que somente erros aleatórios estão presentes nas medidas, os quais seguem uma distribuição normal (gaussiana). Se um erro grosseiro devido a um viés na medida está presente em alguma medida ou se há um vazamento significativo no processo que não tenha sido contabilizado no modelo das restrições, então os dados reconciliados podem ser bastante inexatos. É, portanto, necessário identificar e remover tais erros grosseiros.

Segundo Schwaab e Pinto (2007), estimar parâmetros consiste na variação desses parâmetros, com base em um modelo de referência, até que as predições do modelo atinjam o mais próximo possível os valores dos dados experimentais, respeitando-se as incertezas da medição.

Conforme Farias (2009), observando a função objetivo proposta na equação 9, pode-se concluir que a simples minimização do resíduo gerado entre o valor reconciliado (estimado) e a medição (estado observado) garante somente que as estimativas sejam ótimas do ponto de vista do estado observado. Porém, isso não garante a obtenção de estimativas que reflitam o estado verdadeiro (e desconhecido).

Dessa forma, a matriz  $V_\varepsilon$  (de ponderação da função objetivo) tem um papel importante na solução do problema de otimização.

Além disso, as observações (medidas) são consideradas independentes, logo não existe correlação entre as variáveis, o que torna, assim,  $V_\varepsilon$  uma matriz diagonal. Como consequência, o problema de otimização reduz-se à equação 9, já mencionada anteriormente.

O outro item importante inserido nesta pesquisa foi o coeficiente de correlação entre as variáveis medidas e reconciliadas, calculadas da seguinte forma (Schwaab, 2007):

$$\rho = \frac{\sum_{i=1} (y_i^e - \overline{y_i^e})(y_i^m - \overline{y_i^m})}{\sqrt{[(y_i^e - \overline{y_i^e})^2][(y_i^m - \overline{y_i^m})^2]}} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

- $\rho$  : Coeficiente de correlação entre variáveis medidas e reconciliadas;
- $y_i^e$ : Variáveis experimentais (valores medidos);
- $y_i^m$ : Variáveis Reconciliadas.

O coeficiente de correlação indica o quão proximamente os dados calculados acompanham os dados experimentais (neste caso são os dados medidos). De acordo com Schwaab, caso o coeficiente de correlação seja maior que 0,9, o modelo para cálculo das variáveis reconciliadas será considerado satisfatório, de forma que os valores preditos pelo modelo variam de forma aproximadamente linear e proporcional com os valores medidos. Por outro lado, caso o valor do coeficiente de correlação esteja menor que 0,9, podem indicar desajuste do modelo ou erros experimentais excessivos.

Além do coeficiente de correlação entre variáveis medidas e reconciliadas, é abordado também nesta pesquisa o coeficiente de correlação paramétrica. Segundo Schwaab, quanto mais próximos de zero estiverem os coeficientes de correlação de parâmetros, menor é a interdependência entre eles. Quando a correlação paramétrica supera em módulo o valor de 0,9, é conveniente analisar a necessidade de introduzir esses parâmetros no modelo, dado que pequenas mudanças no valor de um dos parâmetros podem ser compensadas com mudanças de um segundo parâmetro que está relacionado ao modelo.



Note que entre 0 e 1 existe uma grande gama de valores que o coeficiente pode assumir, conforme Tabela 1.

**Tabela 1** - Categorização para os valores do coeficiente de correlação paramétrica

Coeficiente de Correlação	Classificação
$0 < r \leq 0,1$	Nula
$0,1 < r \leq 0,3$	Fraca
$0,3 < r \leq 0,6$	Moderada
$0,6 < r \leq 0,9$	Forte
$0,9 < r < 1$	Muito Forte

Fonte: Adaptação Schwaab (2007).

Caso o valor calculado de  $r$  seja menor que 0,3, pode-se “concluir” que a correlação entre os parâmetros foi fraca. Consequentemente, pode-se dar significado estatístico às medições e calcular, por exemplo, a incerteza das medições após esses dados serem reconciliados, por exemplo.

## 2.7 CÁLCULO DA MATRIZ DOS COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO DOS PARÂMETROS

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 17) (Souza *et al.*, 2011):

$$u_{GM} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Mi}^2} \quad \text{Equação 17}$$

Onde,

- $n$  – Número total de correntes,
- $u_{GM}$  – Incerteza padrão combinada global antes da reconciliação;
- $u_{Mi}$  – Incerteza padrão combinada da corrente  $i$  não reconciliada.

Para que a equação 17 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.

Analogamente à incerteza antes da reconciliação, pode-se definir a incerteza após a reconciliação (Souza *et al.*, 2011):

$$u_{GR} = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Ri}^2} \quad \text{Equação 18}$$

Onde,

- $u_{GR}$  – Incerteza padrão combinada global após a reconciliação;
- $u_{Ri}$  – Incerteza padrão combinada da corrente  $i$  após a reconciliada;

Admite-se que as incertezas das correntes após a reconciliação são não correlacionadas entre si.

O problema de reconciliação de dados de balanços de massa globais pode ser definido conforme as equações 19 e 20:

$$\min(V_R, V_M) = (V_M - V_R)^T (U_M^2)^{-1} (V_M - V_R) \quad \text{Equação 19}$$

$$\text{sujeito a: } f(V_R | A) = A_{VR} = 0 \quad \text{Equação 20}$$

- $V_R$  – Vetor das vazões reconciliadas com dimensão  $(n \times 1)$ ,
- $V_M$  – Vetor das vazões medidas com dimensão  $(n \times 1)$ ,
- $U_M^2$  – Matriz variância e covariância das vazões não reconciliadas  $(n \times n)$ ,
- $A$  – Matriz de Incidência.

Observação: A equação 19 é a mesma utilizada que a equação 9.

Nesta pesquisa será considerada a independência entre as variáveis não reconciliadas, sendo assim a matriz de variância-covariância é diagonal e dada pela matriz abaixo: (Souza, Leonardo – 2011)

$$(U_M^2)_{n,n} = \begin{bmatrix} U_{M_1}^2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & U_{M_2}^2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & U_{M_N}^2 \end{bmatrix} \quad \text{Equação 21}$$

onde  $n$  é o número de correntes (variáveis). Para resolver o problema definido pelas equações 19 e 20 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 22.

$$\phi(V_R, \lambda | V_M, U_M^2, A) = (V_M - V_R)^T (U_M^2)^{-1} (V_M - V_R) + 2(A_{V_R})^T \lambda \quad \text{Equação 22}$$

Para encontrar a solução do problema de otimização deve-se derivar a equação 22 em relação as variáveis de decisão (variáveis reconciliadas) e aos multiplicadores de Lagrange e igualar a zero, conforme a Equação 23 e equação 24 (Souza, Leonardo – 2011):

$$\frac{\partial \phi(V_R, \lambda)}{\partial V_R} = 2(U_M^2)^{-1} (V_M - V_R) + 2(A_{V_R})^T \lambda = 0 \quad \text{Equação 23}$$

$$\frac{\partial \phi(V_R, \lambda)}{\partial \lambda} = 2A^T V_R = 0, \quad \text{Equação 24}$$

da Equação 23 se obtém a equação 25:

$$(U_M^2)^{-1} V_R = (U_M^2)^{-1} V_M + A^T \lambda \quad \text{Equação 25}$$

Pré-multiplicando a equação 25 pela matriz de variância-covariância das variáveis medidas, o vetor das variáveis reconciliadas é obtido, equação 26:

$$V_R = V_M + (U_M^2) A^T \lambda \quad \text{Equação 26}$$

Substituindo a equação 26 na equação 24 obtém:

$$A(V_M + (U_M^2) A^T \lambda) = 0 \quad \text{Equação 27}$$

Resolvendo a equação 27 para os multiplicadores de Lagrange obtém-se a equação 28

$$\lambda = -A((U_M^2)A^T)^{-1}AV_M = 0 \quad \text{Equação 28}$$

Substituindo a equação 28 na equação 26 obtém-se a equação 29:

$$V_R = V_M - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}AV_M \quad \text{Equação 29}$$

$$V_R = (I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)V_M, \quad \text{Equação 30}$$

onde a equação I é a matriz identidade. Da equação 30 pode-se definir a matriz sensibilidade das variáveis reconciliadas em relação as variáveis medidas, equação 31:

$$S_M^T = \left(\frac{\partial V_R}{\partial V_M}\right)^T = [(I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)], \quad \text{Equação 31}$$

Então, substituindo equação 31 na equação 30, obtém-se equação 32:

$$V_R = S_M^T V_M, \quad \text{Equação 32}$$

onde  $V_R$  é o vetor das vazões reconciliadas.

Conforme Souza (2011), a incerteza padrão é a raiz quadrada positiva da variância de uma variável, enquanto que a variância é, por definição, uma integral, equação 33:

$$U_R^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} (V_R - E[V_R]) (V_R - E[V_R])^T p(V_R) dV_R = E[(V_R - E[V_R])(V_R - E[V_R])^T],$$

$$\text{Equação 33}$$

onde  $E[ ]$  é o operador esperança dos elementos da matriz e  $p( )$  é o PDF da variável. Aplicando o operador esperança na equação 33:

$$\begin{aligned} E[V_R] &= E[V_M - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}AV_M], \\ E[V_R] &= E[V_M] - E[(U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}AV_M], \\ E[V_R] &= E[V_M] - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}AE[V_M], \\ E[V_R] &= [(I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)]E[V_M] = S_M^T E[V_M] \end{aligned} \quad \text{Equação 34}$$

Substituindo a equação 30 e a equação 34 na equação 33, obtém-se a equação 35:

$$\begin{aligned}
 U_R^2 &= E[(I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)V_M \\
 &- (I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)E[V_M](I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)V_M \\
 &- (I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)E[V_M]^T) \\
 \\
 U_R^2 &= E[(I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)(V_M - E[V_M])] \\
 &E[(I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)(V_M - E[V_M])^T S_R^2 \\
 U_R^2 &= (I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)E[(V_M - E[V_M])] \\
 U_R^2 &= E[(V_M - E[V_M])^T(I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)] \quad \text{Equação 35}
 \end{aligned}$$

a variância é dada pela equação 33, então a equação 35 pode ser reescrita conforme a equação 36:

$$U_R^2 = [(I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)]U_M^2[(I - (U_M^2)A^T(A(U_M^2)A^T)^{-1}A)]^T \quad \text{Equação 36}$$

Onde, a matriz de variância-covariância das variáveis medidas é dada pela equação 37:

$$U_M^2 = E[(V_M - E[V_M])E[(V_M - E[V_M])]^T] \quad \text{Equação 37}$$

Substituindo a matriz sensibilidade, equação 31, na equação 36, obtém-se a matriz de variância-covariância das variáveis reconciliadas, equação 38:

$$U_R^2 = S_M^T(U_M^2)S_M \quad \text{Equação 38}$$

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 39.

$$U_R = +\sqrt{\text{diag}(S_M^T(U_M^2)S_M)} \quad \text{Equação 39}$$

A partir da matriz de variância-covariância das variáveis reconciliadas, é calculada a matriz de correlação dos parâmetros:

$$= \frac{S_M^T (U_M^2) S_M}{U_R U_R^T} \quad \text{Equação 40}$$

### 2.7.1 Teste de autocorrelação dos resíduos

Segundo Maia (2017), autocorrelação é a associação entre os valores de uma mesma variável comum, quando os valores podem ser ordenados no tempo (com dados de séries temporais) ou no espaço (com dados espaciais).

Principais causas da autocorrelação:

- Inércia: séries econômicas, por exemplo, costumam apresentar ciclos, ou seja, períodos de crescimento ou decaimento. É possível que as mudanças de comportamento em variáveis não observadas aconteçam de forma lenta.

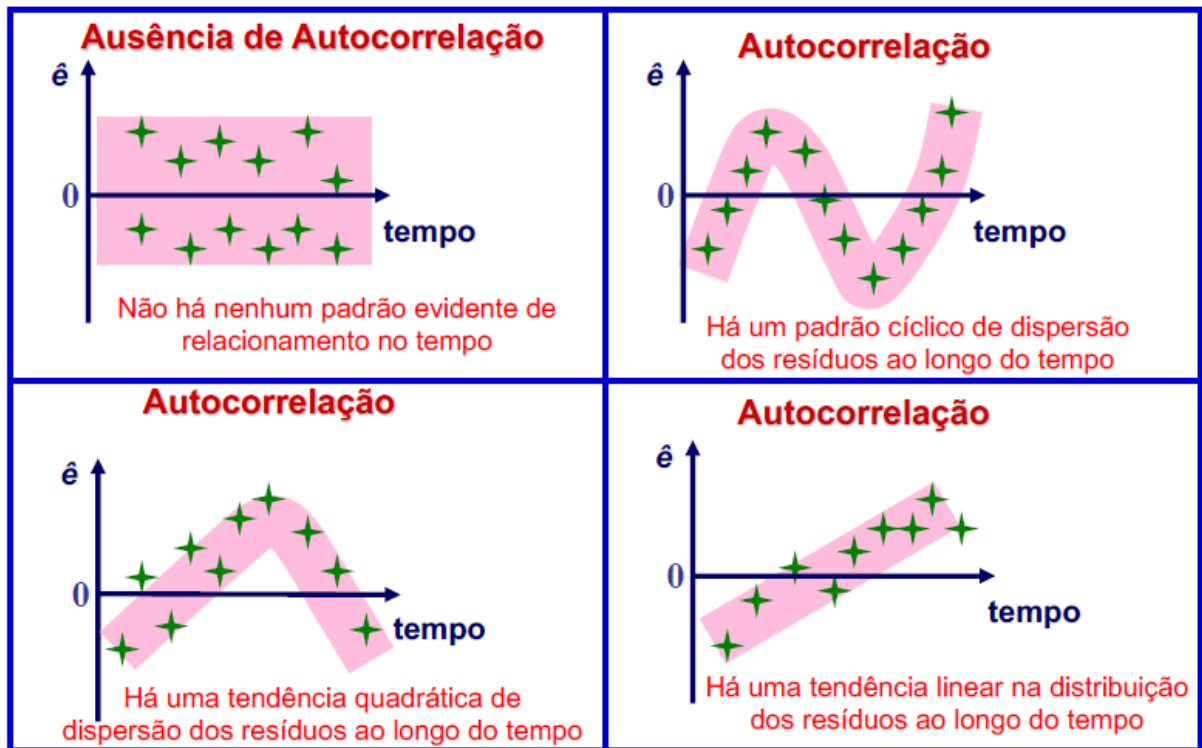
- Falhas de especificação: a autocorrelação pode ser devida à falha na especificação da forma funcional. Os erros expressam, neste caso, um padrão sistemático por causa da ausência dessa informação.

- Defasagens: decisões econômicas, por exemplo, em um período  $t$  dependem, muitas vezes, de informações defasadas do período  $t-1$ .

Nesta pesquisa, a identificação da autocorrelação é feita de forma gráfica, conforme exposição no item de resultados e discussão.

Segue exemplo de análise gráfica de autocorrelação, conforme Figura 8.

**Figura 8** – Análise de autocorrelação gráfica



Fonte: Maia (2017).

## 2.8 FUNDAMENTOS DA RECONCILIAÇÃO DE DADOS

Segundo Narasimhan e Jordache (2000), a reconciliação de dados é uma técnica de ajuste das medições obtidas em um processo, de modo que tais medições atendam aos balanços de massa ou energia desse mesmo processo. A RD obtém estimativas de variáveis do processo ajustando as medidas para que as estimativas satisfaçam as restrições.

Medidas de processo são inevitavelmente corrompidas por erros durante a medição, o processamento e a transmissão do sinal medido. Esses erros podem ser causados por várias fontes diferentes, como flutuações da fonte de alimentação, transmissão de rede e ruído de conversão de sinal, filtragem de entrada analógica ou erros grosseiros causados por eventos não aleatórios, como mau funcionamento do instrumento (devido à instalação incorreta de dispositivos de medição), má calibração, desgaste ou corrosão de sensores e depósitos sólidos (RIBEIRO, 2001).

A natureza não aleatória dos erros grosseiros implica que a qualquer momento eles têm uma certa magnitude e um sinal que pode ser desconhecido. Outras causas

grosseiras de erro, como o desgaste ou a incrustação de sensores, podem ocorrer gradualmente ao longo de um período de tempo, e, portanto, a magnitude do erro bruto aumenta lentamente durante um período de tempo relativamente longo. Assim, erros grosseiros ocorrem com menos frequência, mas suas magnitudes são tipicamente maiores do que os erros aleatórios (RIBEIRO, 2001).

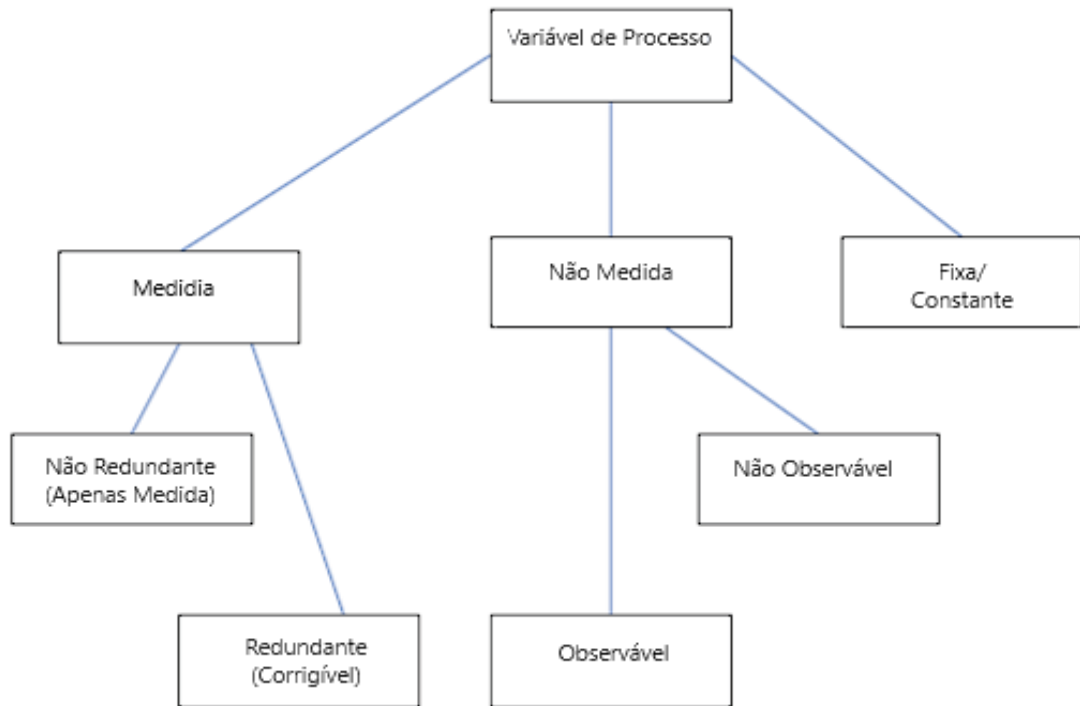
A reconciliação de dados é usada como uma ferramenta de monitoramento eficaz, produz estimativas para variáveis não medidas e parâmetros de processo. Em sua essência, a reconciliação de dados é uma técnica que reduz os erros de medição fazendo uso de redundâncias nos dados do processo, estimando o verdadeiro estado do processo industrial com base no ajuste das medidas do processo para satisfazer um conjunto de restrições, o que é realizado minimizando algum tipo de desvio entre os valores corrigidos e observados da planta. A reconciliação de dados faz uso explícito do modelo de processo para que as estimativas reconciliadas sejam consistentes com as relações conhecidas entre as variáveis do processo, conforme definido pelas restrições, além de ser mais preciso do que as medições. (Mauricio M Câmara, et al, 2017).

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 podem se tornar 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. O tratamento dos erros grosseiros tem, portanto, um importante papel na reconciliação de dados (FELDMAN, 2007; NARASIMHAN e JORDACHE, 2000).

Simplesmente medir uma variável não garante que ela possa vir a ser usada no problema de reconciliação de dados. Os valores reconciliados devem fornecer valores únicos nas restrições do processo. Todas as variáveis em um determinado balanço material ou balanço de energia devem ser medidas ou fixadas (valor constante) para que as variáveis medidas possam ser reconciliadas. Variáveis de processo podem ser definidas como redundante medida (reconciliável ou corrigível), medida não redundante, não medida observável, não observável, não medida ou fixa, conforme demonstrado na Figura 9 (KNOPF, 2012).



**Figura 9** - Classificação de variáveis



Fonte: Adaptado Knopf (2012).

A pesquisa em pauta trata-se de uma reconciliação de dados, cuja função objetivo refere-se a uma programação quadrática, ou seja, função objetivo não linear com restrições lineares, representada pela equação 41 (CROWE, 1986):

$$\min_{x_R} = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{(x_{o_i} - x_{R_i})^2}{u_{x_{o_i}}^2} \right] \quad \text{Equação 41}$$

Sujeito às seguintes restrições de balanços mássicos (restrições lineares):

$$A \cdot x_R = 0 \quad \text{Equação 42}$$

Com a matriz A:

$$A = [1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1 \quad -1] \quad \text{Equação 43}$$

Sendo:  $x_{R_i}$  = vazões reconciliadas;  $x_{o_i}$  = vazões medidas;  $u_{x_{o_i}}^2$  = incerteza do sistema de medição;  $N$  = número de correntes envolvidas;  $A$  = matriz de Incidência;  $i$  = referente à corrente associada à vazão.

Além das restrições de balanço (equação 42), são apontadas também outras restrições, tais como: a impossibilidade de vazões negativas (restrições de não negatividade) e restrições operacionais (determinadas vazões possuem limites). Geralmente estas restrições são inseridas com base em informações provenientes de especialistas da área (EDGAR, et. al., 2001).

A técnica de otimização utilizada nesta pesquisa foi o gradiente reduzido generalizado (GRG). Com o objetivo de comparar os resultados obtidos pela técnica GRG com outra técnica de otimização, utiliza-se o método dos multiplicadores de Lagrange.

### 2.8.1 Teste global – Reconciliação de Dados

O teste global, também conhecido como *global test* (GT), tem como objetivo detectar possíveis erros grosseiros no balanço de massa para um determinado fluxograma de processo. Conforme (NARASIMHAN; JORDACHE, 2000), Farias (2009) e Valle (2013), o GT usa o resultado dos resíduos dos balanços (diferença entre valores medidos e reconciliados), ponderados pela matriz de variância-covariância dos resíduos:

$$\gamma = (y - x)^T V_r^{-1} (y - x) \quad \text{Equação 44}$$

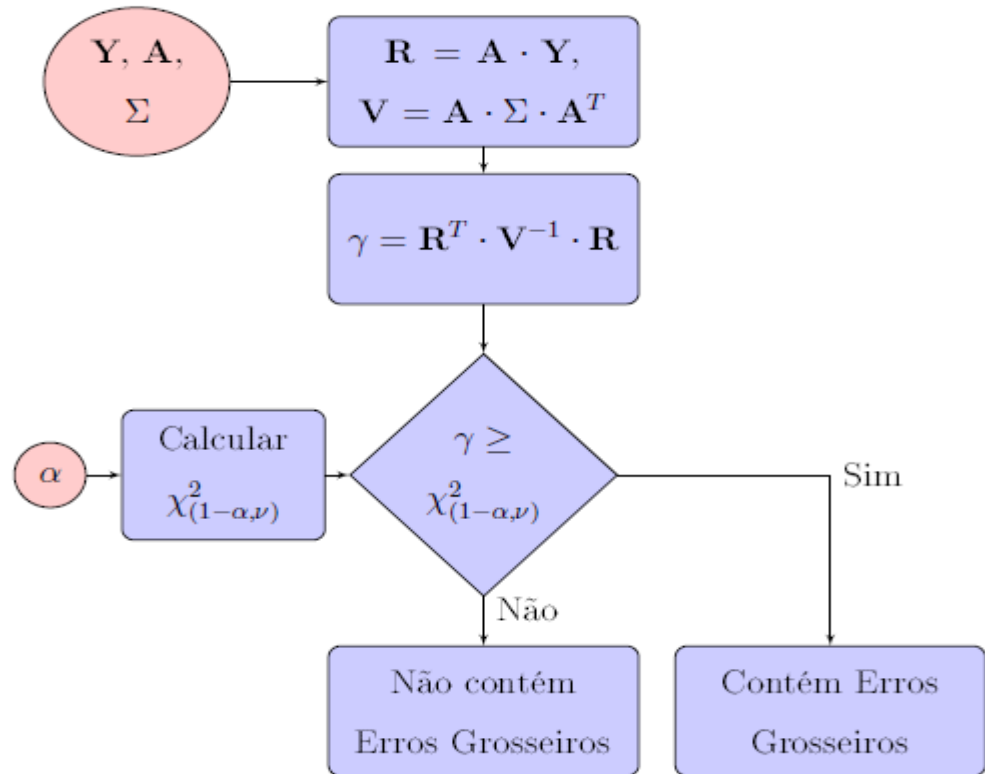
Como se consideram as interações da totalidade do balanço, o valor de  $\gamma$  trata-se de uma estatística multivariável, seguindo distribuição  $\chi^2$ , com  $\nu$  graus de liberdade. A aceitação ou rejeição da hipótese nula  $H_0$  é efetuada da seguinte forma: através de uma significância estatística  $\alpha$  e de informações da distribuição  $\chi^2$  com  $\nu$  graus de liberdade de dados tabelados, encontra-se o valor crítico do teste, cuja magnitude deve ser comparada com  $\gamma$ . Se  $\gamma$  é maior que o valor crítico do teste,  $\chi^2$ , o balanço mássico contém um ou mais erros grosseiros. Senão, contém somente erros aleatórios.

Conforme Valle (2013), o GT detecta a presença de erro no balanço do processo. Por outro lado, somente com esse resultado não é possível apontar a localização do erro, nem o tipo, nem mesmo se há a presença de um ou mais erros

de medição. Geralmente, o resultado do teste global é usado em conjunto com outras técnicas para auxiliar na identificação e localização dos erros grosseiros.

A figura 10 exibe o esquema para detecção de erros grosseiros utilizando o teste global:

**Figura 10** – Esquema para detecção de erros grosseiros através do teste global



Fonte: Valle (2013)

Onde:

V– Matriz variância-covariância dos resíduos do balanço de massa;

A – Matriz Jacobiana do balanço de massa do processo (matriz de incidência);

R– Resultado da seguinte equação:

$$R = A \cdot Y$$

Equação 45

Y – Vetor das vazões medidas;

## 2.8 .2 Teste de Medida – Reconciliação de Dados

De acordo com Narasimhan; Jordache (2000) e Valle (2013), o teste da medida tem como base o ajuste da medida após a reconciliação:

$$ad_i = y_i - x_i \quad \text{Equação 46}$$

A forma vetorial fica da seguinte forma:

$$Ad = \Sigma \cdot A^T \cdot V^{-1} \cdot R \quad \text{Equação 47}$$

Onde:

$x_i$  – Valor reconciliado da medida;

$y_i$  – Valor medido;

$\Sigma$  – Matriz variância-covariância das medidas;

$A$  – Matriz Jacobiana do balanço de massa do processo (matriz de incidência);

$R$  – Resultado da seguinte equação:

$$R = A \cdot Y \quad \text{Equação 48}$$

$Y$  – Vetor das vazões medidas.

De início, é construída a matriz de covariância dos ajustes ( $\bar{W}$ ):

$$\bar{W} = \Sigma \cdot A^T \cdot V^{-1} \cdot A \cdot \Sigma \quad \text{Equação 49}$$

Onde:

$$V = cov(R) = A \cdot \Sigma \cdot A^T \quad \text{Equação 50}$$

Logo após, é calculado o termo  $Z_{ai}$  (estatística do teste):

$$Z_{ai} = \frac{|ad_i|}{\sqrt{\bar{w}_{ii}}} \quad \text{Equação 51}$$

Onde;

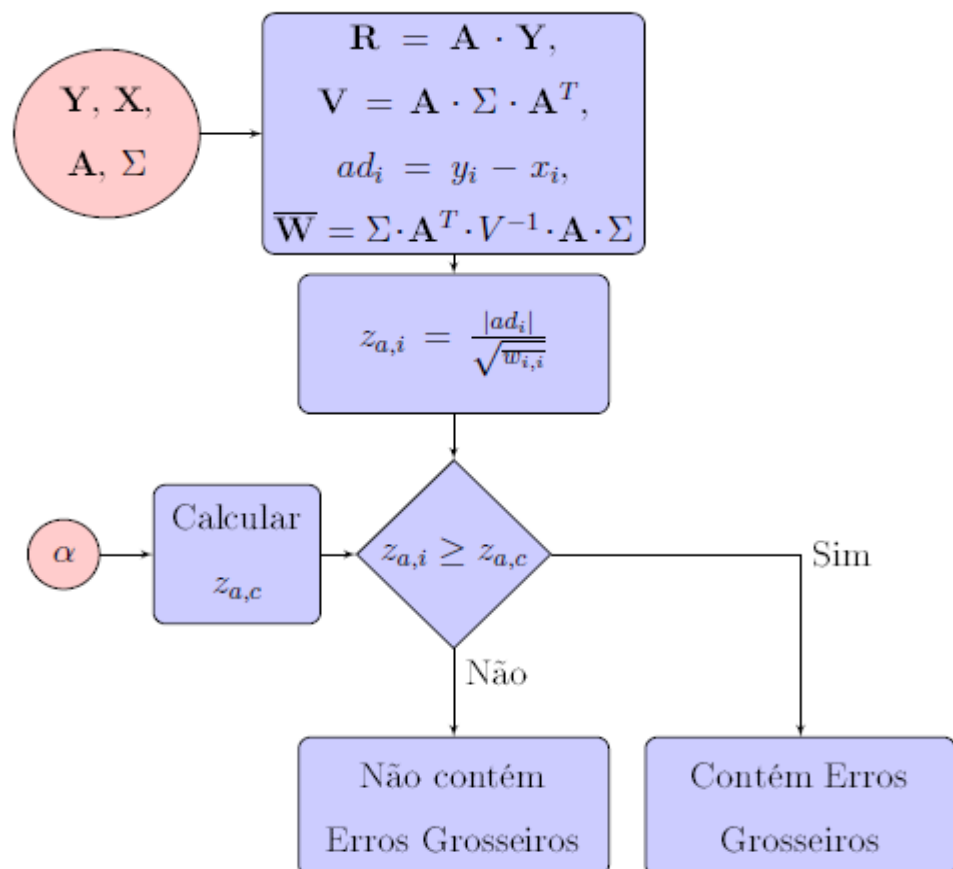
$\bar{w}_{ii}$  - Elemento  $i, i$ , da diagonal da matriz  $\bar{W}$  ;

O teste de hipótese  $z$  (monovariável), considerando-se que as medidas possuem distribuição normal), é capaz de detectar falha em medição específica, baseando-se no valor da variável  $z_{ai}$ .

Para aceitação ou rejeição da hipótese nula, através da seleção de uma significância estatística  $\alpha$  e informações referentes da distribuição  $z$  (dados tabelados ou avaliação da própria função), é encontrado o valor crítico do teste. O valor crítico do teste ( $z_{ac}$ ) é comparado com ( $z_{ai}$ ).

Se  $z_{ai}$  é maior que o valor crítico do teste,  $z_{ac}$ , a medição, dentro da significância estatística escolhida, é classificada como contendo erro grosseiro. Se  $z_{ai}$  é menor que o valor crítico do teste, a medição é classificada como contendo erros puramente aleatórios, conforme figura 11. Caso ocorram falhas em outras medições, é possível detectá-las aplicando o teste em outras medidas do processo simultaneamente.

**Figura 11** – Esquema para detecção de erros grosseiros através do teste da medida



Fonte: Valle (2013)

### 3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, dispostos como se segue:

O capítulo 1 (introdução), no qual se desenvolve a contextualização da pesquisa, os objetivos gerais e específicos, definição do problema e a importância da pesquisa.

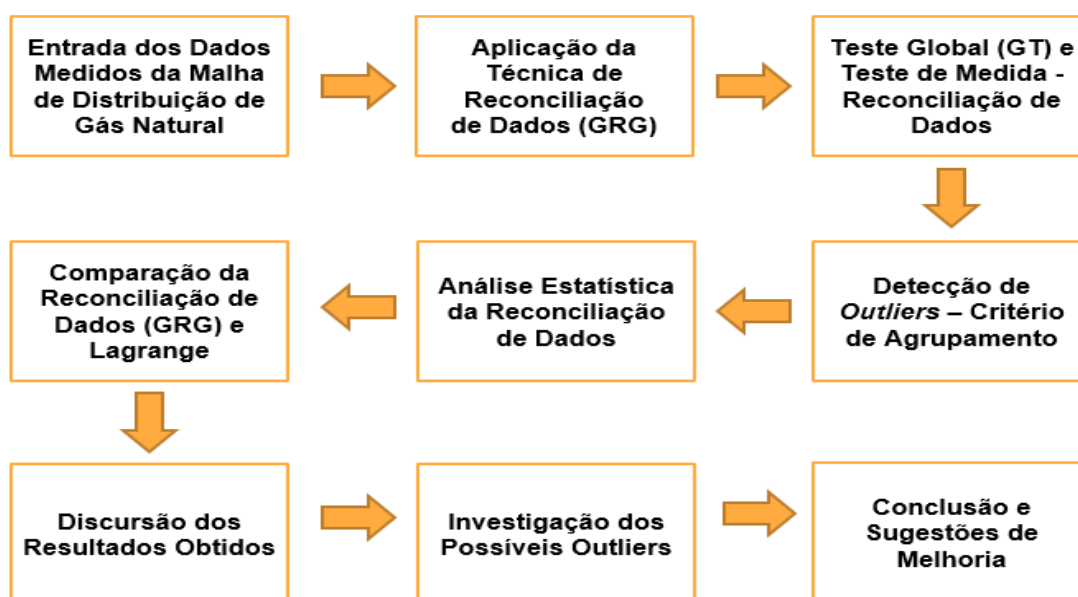
No segundo capítulo, foi realizado o levantamento bibliográfico sobre os seguintes temas:

- aspectos regulatórios – Gás Natural;
- distribuição do Gás Natural;
- comercialização do Gás Natural;
- erro de medição de vazão;
- incerteza de medição de Gás Natural;
- fundamentos da reconciliação de dados.

Em seguida, no capítulo 3, é explanado o problema e as limitações da pesquisa, além dos materiais e métodos, dialogando com trabalhos relevantes em reconciliação de dados.

O diagrama ilustrativo, exibido na Figura 12, explica as etapas desta pesquisa:

**Figura 12 – Etapas da pesquisa**



Fonte: Elaborada pelo autor.

- Entrada dos Dados Medidos da Malha de Distribuição de Gás Natural

A primeira etapa é a entrada de dados medidos. As medições coletadas estão compreendidas entre 1 a 30 de junho de 2019, a partir do *city gate* de Itabuna-BA. É realizada a comparação entre a medição na ETC Itabuna e o somatório dos sete clientes, verificando o grau de discrepância entre a quantidade de gás natural que sai da ETC Itabuna e o respectivo consumo com todos os clientes envolvidos. Quanto maior a discrepância percentual entre as medições citadas, maior a percepção de que pode estar ocorrendo uma falha em algum medidor de vazão, falha operacional, falha na comunicação do sinal entre campo e sala de controle, etc.

- Aplicação da Técnica de Reconciliação de Dados (GRG)

As medições são reconciliadas utilizando-se o método Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e comparando-se as discrepâncias entre medições dos clientes e os valores reconciliados.

- Teste Global (GT) /Teste da Medida - Reconciliação de Dados

Utilizando-se a técnica consolidada nas pesquisas sobre reconciliação de dados – Teste Global (GT), tem por objetivo encontrar possíveis erros grosseiros (embora os informem apenas, e não os localizam no balanço de medição) por meio do teste qui-quadrado da função objetivo após a reconciliação e comparar com valores tabelados.

Já o teste da medida é realizado para encontrar erros grosseiros diretamente nos medidores de vazão, através do teste z, comparando-se o valor de teste com o valor crítico, de acordo com a figura 11 - Esquema para detecção de erros grosseiros através do teste da medida.

- Detecção de Outliers – Critério de Agrupamento

A técnica de K-Médias é executada após o teste global e teste da medida - reconciliação de dados. O teste para detecção de *outliers* é realizado para verificar se os possíveis outliers encontrados estão associados a erros grosseiros na medição, comparando os resultados obtidos deste teste com o teste global e teste da medida.

Diferentemente do teste global, o teste K-Médias é executado em cada ponto de medição, ou seja, os dados são analisados de forma individual. São analisados,

para cada ponto de medição, o conjunto respectivo de 30 medições é verificada a existência de possíveis *outliers*.

- Comparação da Reconciliação de Dados (GRG) e Lagrange

Para efeito de comparação dos resultados obtidos com outras técnicas de reconciliação de dados, compara-se os resultados da reconciliação via GRG com multiplicadores de Lagrange.

- Análise Estatística da Reconciliação de Dados

Nesta etapa são realizadas as análises das premissas estatísticas para significado estatístico da reconciliação de dados. São verificadas as premissas da função objetivo, sendo analisados se valor resultante dos resíduos (diferença e entre valores medidos e reconciliados) estão próximos de zero, como também se há autocorrelação entre os resíduos. Além disto, é verificado o coeficiente de correlação entre as variáveis medidas e reconciliadas, afim de analisar o ajuste do modelo para cálculo das variáveis reconciliadas está ajustado ou há alguma falha no modelo ou erros experimentais excessivos.

Também é analisada o coeficiente de correlação da matriz paramétrica, afim de verificar se os resíduos não estão correlacionados entre si.

- Discussão dos Resultados Obtidos

O método para a coleta de dados foi feito da seguinte forma: através de medições obtidas diretamente dos medidores dos clientes e das ETC. Foi gerado um banco de dados das medições do mês de junho de 2019, com medições sempre diárias.

Foram levadas em conta as seguintes considerações:

- Verificação de possíveis vazamentos na malha de dutos:

Para esta pesquisa, considera-se que não há vazamentos na malha de dutos na companhia de distribuição de Gás Natural do estado da Bahia.

A Bahiagás realiza constantes inspeções periódicas nas suas respectivas malhas de dutos de acordo com as normas vigentes. Além disso, aplica o aditivo mercaptano, que é inserido no Gás Natural para alertar as pessoas do risco decorrente de vazamentos, garantindo salvaguarda ao usuário desse produto.



➤ Balanço material:

Como o regime é considerado estacionário para esta pesquisa, o balanço material não considera a inclusão dos inventários (acúmulo de massa) dos dutos entre clientes e ETC.

A massa específica é determinada em laboratório, através do resultado da análise cromatográfica do Gás Natural. A temperatura e a pressão foram padronizadas em 20 °C e 101,325 KPa, respectivamente.

Os pontos de coleta de Gás Natural estão na Estação de Transferência de Custódia. Não existem pontos de coleta de Gás Natural nas proximidades dos clientes. O contrato entre a empresa transportadora de Gás Natural e a distribuidora estabelece que o Gás Natural deverá ser entregue às companhias de distribuição com composição química pré-definida, podendo sofrer sanções contratuais.

O componente de restrição na reconciliação de dados está relacionado ao princípio da conservação de massa, ou seja, como não há reação química, a quantidade de massa de Gás Natural que sai da ETC é totalmente igual ao somatório de consumo de todos os clientes.

Após a reconciliação, houve a comparação entre as vazões mássicas medidas e reconciliadas. Nesta etapa, além da discussão dos resultados obtidos, é realizada uma investigação (através dos relatórios de manutenção da Bahiagás) sobre as possíveis causas dos erros grosseiros encontrados. Após a investigação, seguem-se as conclusões e sugestões de melhoria para a pesquisa.

- Conclusões e sugestões de melhoria

Nesta etapa, é explanada uma síntese do que foi realizado nas etapas dos resultados e discussões desta pesquisa. São destacados a importância que os resíduos possuem para seguirem as premissas da função objetivo, além de quais pontos de medição os resíduos apresentaram maiores discrepâncias (erros grosseiros). Foi apontado como sugestões de melhoria que sejam realizadas mais manutenções preventivas, assim como configurações de dados e modelagem da reconciliação de dados na sala de controle da BAHIAGAS. Com isso, os possíveis erros grosseiros serão encontrados de forma mais rápida, minimizando possíveis impactos financeiros. Além disso, foi apontado realizar a automação da migração da composição molar dos cromatógrafos diretamente aos computadores de vazão,

evitando a inserção manual destes valores pelo operador, minimizando possíveis fontes de erros.

### 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

A ferramenta utilizada para a realização desta pesquisa é o Solver, através do software Excel, que processa as reconciliações. Os gráficos para avaliação estatística da reconciliação de dados foram realizados através do programa em R para reconciliação de dados, (nhemu\_ver\_20.1.R), cadastrado no Zenodo ([www.zenodo.org](http://www.zenodo.org)), conforme DOI 10.5281/zenodo.3782266.

No software Excel foi utilizada a técnica de otimização GRG. O software R foi empregado para encontrar possíveis *outliers* através do método não hierárquico de agrupamentos (*clustering*) – *K-Means*.

A tolerância de medição utilizada nesta pesquisa é de 1,5%, conforme resolução ANP nº 807, de 23 de janeiro de 2020 e as incertezas de medição estão inseridas na tabela 9 – incerteza expandida dos medidores de vazão (no apêndice desta pesquisa), de acordo com o VIM (vocabulário internacional de metrologia).

### 3.3 LIMITES E LIMITAÇÕES

Os principais limites para o desenvolvimento deste trabalho estão relacionados ao grau de complexidade representativo para a realização da pesquisa. Assim, não foram considerados todos os clientes e Estações de Transferência de Custódia da Bahiagás. O local de estudos levou em conta o *city gate* e a distribuição de Gás Natural para os clientes na região de Itabuna/Ilhéus (BA).

Além das restrições sobre os clientes e malha de distribuição de gás natural da BAHIAGAS, tem-se as restrições de disponibilização de dados. Por questões de confidencialidade da BAHIAGAS não serão informados tipos e/ou modelos de medidores de vazão utilizados nesta pesquisa.

### 3.4 TRABALHOS RELEVANTES EM RECONCILIAÇÃO DE DADOS PARA CONSTRUÇÃO DESTA PESQUISA

Barbosa (2008) descreve a fundamentação matemática do problema de reconciliação de dados, aponta abordagens para a solução de problemas de reconciliação de dados em estado estacionário para sistemas lineares, assim como aborda o problema da reconciliação de dados estacionária em sistemas, com o fato peculiar de a não linearidade ser fruto do produto de duas variáveis.

A tese de doutorado de Barbosa (2008) traz conceitos sobre a base estatística da reconciliação de dados e sobre estimadores de máxima verossimilhança, descreve técnicas de reconciliação de dados não linear e aborda os métodos que lidam com problemas sujeitos a restrições de igualdade e de desigualdade. Além disso, dedica atenção à detecção de erros grosseiros, descrevendo os principais testes estatísticos usados na detecção desse tipo de erro, assim como o desenvolvimento do aplicativo Reconciliare.

A dissertação de mestrado de Barreto (2015) teve como objetivo a adequação da técnica de reconciliação de dados para avaliação metrológica do balanço de massa no gasoduto Urucu-Manaus, buscando excluir os erros grosseiros obtidos na medição e minimizá-los com a aplicação da técnica de reconciliação de gás, além de reduzir o indicador de gás não contado. Barreto (2015) explanou conceitos de reconciliação de dados, erros grosseiros e modelagem estatística da reconciliação de dados. Por outro lado, assim como Barbosa (2008), não realizou uma análise da base matemática dos dados e verificação das premissas para desenvolvimento da função objetivo.

D'Andréa (2016), assim como Barreto (2015), descreve a adequação da técnica da reconciliação de dados para avaliação metrológica do balanço de massa. Um ponto de importante destaque é a explanação da pauta sobre os inventários dos dutos e respectivo impacto na reconciliação de dados. Comparou-se a reconciliação volumétrica com a reconciliação mássica. Não é feita uma análise da base matemática dos dados e verificação das premissas para desenvolvimento da função objetivo e consequente significado estatístico das medições.

Farias (2009), em sua respectiva dissertação de mestrado, realiza explicações sobre os conceitos de reconciliação de dados e apresenta algoritmos de detecção de erros grosseiros, além de uma nova proposta de detecção de erros grosseiros.

Ademais, apresenta indicadores de desempenho, tanto para a qualidade de reconciliação, quanto para a detecção dos erros grosseiros.

Feldman (2007) descreve os conceitos de reconciliação de dados, aplicações da técnica em problemas industriais e em tempo real, e descrição das operações de transporte e armazenamento de petróleo e derivados e dos sistemas típicos de automação industrial. Traz, além disso, a descrição do sistema real adotado para implementação da reconciliação de dados, incluindo o modelo matemático usado na dissertação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta etapa, os resultados serão explanados da seguinte forma:

Primeiramente são explanados os valores referentes a entrada dos dados medidos da malha de distribuição de gás natural, comparando-se as medições entre ETC e somatório de clientes (tabela 2). Logo após, através da tabela 3, são exibidas as diferenças percentuais entre valores medidos e reconciliados.

A próxima etapa é a realização do teste global de reconciliação de dados, exibindo-se através da tabela 4 os dias que apresentaram alta possibilidade de apresentarem erros grosseiros no balanço de medição, com consequente realização do teste da medida – Reconciliação de Dados. Além disso, é realizado o teste de detecção de outliers – K-Means, com objetivo de associar a detecção de outliers com possíveis erros grosseiros na medição.

Por conseguinte, é comparado o resultado dos dados reconciliados pela técnica GRG com a técnica dos multiplicadores de Lagrange, afim de ratificar os resultados entre técnicas distintas de otimização.

A próxima etapa se faz presente pela análise das premissas da função objetivo, destacando-se como se comportam os dias que possuem erros grosseiros mediante ao atendimento das premissas da função objetivo. Além disso, será verificado, o grau de correlação dos resíduos (variáveis medidas e reconciliadas) através da matriz dos coeficientes de correlação dos parâmetros, além do coeficiente de correlação entre variáveis medidas e reconciliadas.

Por fim, será feita uma investigação, para as medições que apresentarem erros grosseiros, através do planejamento de manutenção preventiva e corretiva da BAHIAGAS.

- Entrada dos dados medidos da malha de distribuição de Gás Natural

Conforme a Tabela 2, foi realizado o comparativo percentual entre as medições na ETC e o somatório dos clientes, através do balanço mássico da malha de dutos em destaque (antes da reconciliação). Vale destacar que a massa específica utilizada nos clientes foi a mesma da ETC.

**Tabela 2** - Comparação entre ETC e somatório de clientes antes da reconciliação

Dia	ETC	Somatório Clientes	* Massa Específica / (kg/m <sup>3</sup> )	ETC	Somatório Clientes	** Diferença em Percentual
	m <sup>3</sup> /dia	m <sup>3</sup> /dia		Kg/dia	Kg/dia	
1	30313,92	28567,00	0,73	22157,05	20880,19	5,76
2	14717,13	14377,00	0,73	10743,80	10495,50	2,31
3	26828,98	26587,00	0,73	19603,67	19426,86	0,90
4	27263,51	25908,00	0,73	19922,53	18932,01	4,97
5	29893,04	30355,00	0,73	21806,07	22143,06	-1,55
6	36118,81	36599,00	0,73	26442,94	26794,49	-1,33
7	33880,80	34013,00	0,74	24920,68	25017,92	-0,39
8	31484,25	31733,00	0,74	23180,91	23364,06	-0,79
9	20072,34	20308,00	0,73	14749,36	14922,52	-1,17
10	33111,14	32933,00	0,74	24498,27	24366,47	0,54
11	33704,74	33486,00	0,74	24970,83	24808,77	0,65
12	42037,02	42233,00	0,74	30920,33	31064,48	-0,47
13	47386,65	47322,00	0,73	34571,88	34524,71	0,14
14	34039,15	34094,00	0,71	24223,96	24263,00	-0,16
15	32983,90	32938,00	0,70	23116,11	23083,94	0,14
16	16523,00	16631,00	0,70	11620,13	11696,08	-0,65
17	29488,41	29563,00	0,73	21541,58	21596,07	-0,25
18	35602,03	35449,00	0,73	25998,38	25886,63	0,43
19	32138,81	32131,00	0,71	22721,18	22715,65	0,02
20	31546,83	30294,00	0,70	22061,65	21185,50	3,97
21	23914,26	23991,00	0,70	16767,96	16821,77	-0,32
22	26661,87	26673,00	0,70	18717,44	18725,25	-0,04
23	20367,35	20083,00	0,70	14239,63	14040,83	1,40
24	18258,26	18141,00	0,69	12568,26	12487,54	0,64
25	25785,33	24682,00	0,69	17875,16	17110,30	4,28
26	26065,62	25681,00	0,72	18872,29	18593,81	1,48
27	24886,80	24615,00	0,73	18056,37	17859,17	1,09
28	26327,75	27096,00	0,73	19093,94	19651,10	-2,92
29	24146,44	24780,00	0,69	16773,33	17213,43	-2,62
30	17947,35	16795,00	0,69	12408,26	11611,56	6,42

\* Valores a 20°C e 101,325 KPa.

\*\*Diferença em percentual = (ETC (kg/m<sup>3</sup>) – Somatório Clientes (kg/m<sup>3</sup>)) / (ETC (kg/m<sup>3</sup>) x 100.

Antes da reconciliação, já se nota a diferença de medição entre o somatório de clientes e ETC Itabuna superior a 5% em alguns dias (por exemplo, dias 1 e 30), enquanto em outros dias (por exemplo, dias 21 e 22) a diferença é inferior a 0,5%.

Outro ponto de evidência é, conforme a própria Tabela 2, a baixa diferença em percentual entre as medições mássicas da ETC e dos clientes na maioria dos dias do mês.

- Aplicação da técnica de reconciliação de dados (GRG)

A tabela 3 mostra, em indicativo percentual, a diferença entre os dados medidos e reconciliados realizados em GRG.

**Tabela 3** – Indicativo percentual: diferença entre dados medidos e reconciliados

Dia	ETC	Cliente A	Cliente B	Cliente C	Cliente D	Cliente E	Cliente F	Cliente G
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	-5,32	0,73	0,82	0,97	0,87	0,17	0,55	0,41
2	-1,95	0,43	0,66	0,27	0,10	0,09	0,34	0,00
3	-0,78	0,13	0,09	0,04	0,15	0,03	0,11	0,20
4	-4,47	0,70	0,60	0,14	0,81	0,14	0,57	1,05
5	1,30	-0,19	-0,19	-0,13	-0,26	-0,04	-0,17	-0,35
6	1,11	-0,12	-0,35	-0,15	-0,17	-0,03	-0,13	-0,21
7	0,33	-0,04	-0,11	-0,03	-0,05	-0,01	-0,04	-0,06
8	0,66	-0,10	-0,23	-0,04	-0,11	-0,02	-0,07	-0,11
9	0,87	-0,22	-0,50	-0,09	-0,01	-0,03	-0,12	0,00
10	-0,45	0,06	0,16	0,04	0,07	0,01	0,06	0,07
11	-0,56	0,08	0,16	0,06	0,09	0,02	0,07	0,09
12	0,38	-0,04	-0,03	-0,14	-0,05	-0,01	-0,04	-0,05
13	-0,11	0,01	0,01	0,04	0,01	0,00	0,01	0,02
14	0,14	-0,02	-0,02	-0,03	-0,02	0,00	-0,01	-0,03
15	-0,12	0,02	0,02	0,03	0,02	0,00	0,01	0,02
16	0,53	-0,17	-0,08	-0,15	-0,04	-0,03	-0,09	0,00
17	0,22	-0,03	-0,04	-0,02	-0,04	-0,01	-0,03	-0,05
18	-0,37	0,04	0,11	0,05	0,06	0,01	0,04	0,07
19	-0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	-3,59	0,36	0,50	0,61	0,61	0,11	0,36	0,67
21	0,27	-0,04	-0,04	-0,05	-0,01	-0,01	-0,05	-0,07
22	0,01	-0,05	-0,04	-0,01	-1,30	-0,10	-0,04	0,00
23	-1,08	0,18	0,24	0,49	0,00	0,03	0,10	0,00
24	-0,45	0,02	0,09	0,28	0,00	0,00	0,02	0,00
25	-3,79	0,00	0,71	0,52	0,52	0,14	0,43	1,09
26	-1,26	0,00	0,15	0,17	0,29	0,05	0,16	0,35
27	-0,94	0,00	0,11	0,16	0,20	0,03	0,12	0,21
28	2,39	0,00	-0,33	-0,46	-0,59	-0,09	-0,38	-0,54
29	2,17	0,00	-0,33	-0,41	-0,47	-0,10	-0,35	-0,49
30	-5,40	0,19	1,04	2,11	0,19	0,22	0,66	0,08

\*Diferença em percentual = (Medição reconciliada – Medição não reconciliada) / (Medição reconciliada) x 100.

Observando a Tabela 3, nota-se a pouca diferença percentual entre dados medidos e reconciliados entre os clientes. Com isso, mostra-se a eficácia da medição de Gás Natural para a malha de distribuição escolhida na concessionária de distribuição de Gás Natural no estado da Bahia. Nos dias 1 e 30 de junho de 2019 é notável a maior diferença percentual entre valores medidos e reconciliados na ETC Itabuna.

- Teste global (GT) de reconciliação de dados

Na tabela 4, apresenta-se o resultado do teste global de reconciliação de dados, indicando os pontos de medição com alta probabilidade de erros grosseiros. A tabela completa, com todos os testes realizados, encontra-se nos apêndices desta pesquisa. Os resultados referentes a tabela 4 são o reflexo da comparação da função objetivo após o respectivo processo de minimização dos resíduos e a tabela qui quadrado, cujo valor é de 3,841. São expostos nesta tabela todos os valores superiores a 3,841.

**Tabela 4 – Teste global da reconciliação de dados**

Dia	Função objetivo após reconciliação	Conclusão	Nível de significância (alfa)	qui-quadrado tabelado
		Teste qui-quadrado	0,05	3,841
1	75,693	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
2	11,484			
4	55,363			
5	5,299			
6	3,900			
20	35,775			
23	3,865			
25	40,570			
26	4,770			
28	18,601			
29	15,123			
30	85,519			

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados do teste qui-quadrado exibidos através da Tabela 4 – “Teste global reconciliação de dados” –, mostram que, nos dias mencionados, existem erros grosseiros, embora não apontem em qual cliente está cada um dos erros.

Principalmente nos dias 1, 4, 20, 25, 28, 29 e 30, existe alta probabilidade da existência de medições com desvios não aleatórios. Nesta pesquisa, é realizada uma investigação sobre as prováveis causas e os clientes nos quais se localizam os desvios.

- Teste da Medida – Reconciliação de Dados



Na tabela 5 (Resultado de detecção de erros grosseiros através do teste da medida) apresenta-se o resultado do teste da medida de reconciliação de dados, indicando os pontos de medição com alta probabilidade de erros grosseiros. As tabelas completas, com todos os testes realizados, encontram-se nos apêndices desta pesquisa.

**Tabela 5** – Resultado de detecção de erros grosseiros através do teste da medida

Dia	ETC	A	B	C	E	F	G
1	erro grosseiro		erro grosseiro	erro grosseiro		erro grosseiro	
2							
3							
4	erro grosseiro				erro grosseiro		
5					erro grosseiro		
6							
7							
8							
9							
10							erro grosseiro
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20		erro grosseiro		erro grosseiro			
21							
22							
23		erro grosseiro					
24							
25				erro grosseiro			
26							
27							
28				erro grosseiro			
29							erro grosseiro
30							

Observação: Os nomes em amarelo representam que o resultado de teste z foi maior que z crítico. Os nomes em verde representam que o z crítico é maior que o resultado do teste z - todavia, com diferença baixa.

Os resultados do teste da medida, exibidos através da tabela 5, mostram que, nos dias mencionados existem erros grosseiros. Os nomes em amarelo representam que o resultado de teste  $z$  foi maior que  $z$  crítico. Os nomes em verde representam que o  $z$  crítico é maior que o resultado do teste  $z$  - todavia, com diferença muito baixa.

Os dias 1, 4, 20, 25, 28 e 29 são dias que existem alta probabilidade da existência de medições com desvios não aleatórios. Foram detectados erros grosseiros tanto pelo teste global, quanto pelo teste da medida. Nesta pesquisa, é realizada uma investigação sobre as prováveis causas e os clientes nos quais se localizam os desvios. Uma notável observação deverá ser feita referente ao dia 30/06/2019. Apesar de não ter sido detectado erro grosseiro neste dia em nenhum ponto de medição, a diferença entre os resultados do teste  $z$  e o respectivo valor para  $z$  crítico teve aproximação considerável ao cliente C, conforme apêndice F – resultados de testes da medida – reconciliados de dados, tabela referente ao dia 30/06/2021.

- Detecção de *outliers*: critério de agrupamento

O critério de agrupamento utilizado nesta dissertação é um método estatístico que foi desenvolvido para a detecção de *outliers*, conforme explanação no item 2.4.1.1

O critério de agrupamento não hierárquico (K-Médias) foi realizado a partir dos valores medidos (antes da reconciliação), com objetivo de verificar, além da detecção de *outliers*, se estes estão associados a algum erro grosseiro detectado pelos testes global e teste da medida – reconciliação de dados.

O apêndice G – resultado teste de detecção de *outliers* (k-means), com os resultados dos *outliers* para ETC e demais clientes, encontra-se no apêndice desta pesquisa. Conforme os resultados apresentados, os *outliers* encontrados não estão associados a erros grosseiros explanados pelo teste da medida. Os *outliers* encontrados no critério de agrupamento estão associados a variação de consumo dos respectivos clientes.

- Comparação da reconciliação de dados (GRG) e Lagrange

Para efeito de comparação dos resultados obtidos com outras técnicas de reconciliação de dados, foi comparado os resultados da reconciliação via GRG com multiplicadores de Lagrange, através do apêndice G – comparação dos resultados: reconciliação de dados GRG e multiplicadores de Lagrange.

Os valores percentuais entre a diferença dos métodos GRG e Lagrange ratificam que a técnica de reconciliação foi aplicada corretamente. A diferença entre os dois métodos foi extremamente baixa. A técnica aplicada para cálculo da reconciliação de dados através da técnica dos multiplicadores de Lagrange é bastante consolidada e já aplicada em diversos artigos, teses e dissertações. Por isso, os resultados percentuais comparativos no apêndice G já eram esperados e referendam a técnica GRG aplicada nesta dissertação.

Tanto na técnica de otimização GRG quanto na de Lagrange, as diferenças entre valores medidos e reconciliados entre todos os clientes foram similares, ou seja, as maiores discrepâncias continuam sendo na ETC Itabuna.

- Análise estatística da reconciliação de dados

Nesta etapa foram realizadas as análises das premissas estatísticas para significado estatístico da reconciliação de dados.

Com o objetivo de validar as premissas para desenvolvimento da função objetivo, assim como interpretar a estatística dos resultados obtidos, foi realizado um diagnóstico, através dos gráficos, comparando-se valores medidos e reconciliados, da dispersão dos resíduos em torno da média igual a zero, do histograma dos resíduos e do teste de normalidade dos resíduos.

Conforme explanação nesta pesquisa, no item 2.6 – “Premissas da função objetivo” –, buscou-se certificar se as premissas da RD estariam sendo obedecidas para o desenvolvimento da função objetivo, além de interpretar a estatística dos resultados obtidos. Por essa razão, para cada dia (entre 1 e 30 de junho) foram confeccionados 2 gráficos referentes a cada cliente e ETC. Os gráficos dos itens que apresentaram elevadas discrepâncias no reconhecimento das premissas da reconciliação de dados estão no apêndice desta pesquisa.

O primeiro gráfico – “Resíduos relativos com base na reconciliação” – compara os resíduos relativos em relação à média (zero). Conforme premissa já comentada anteriormente, os desvios de medição são conhecidos e distribuídos aleatoriamente com média zero.

Já o segundo gráfico representa a autocorrelação entre os resíduos, ou seja, verifica a independência dos resíduos.

A autocorrelação informa o poder de influência de um determinado valor de uma variável aleatória nos respectivos vizinhos, ou seja, revela o quanto a existência

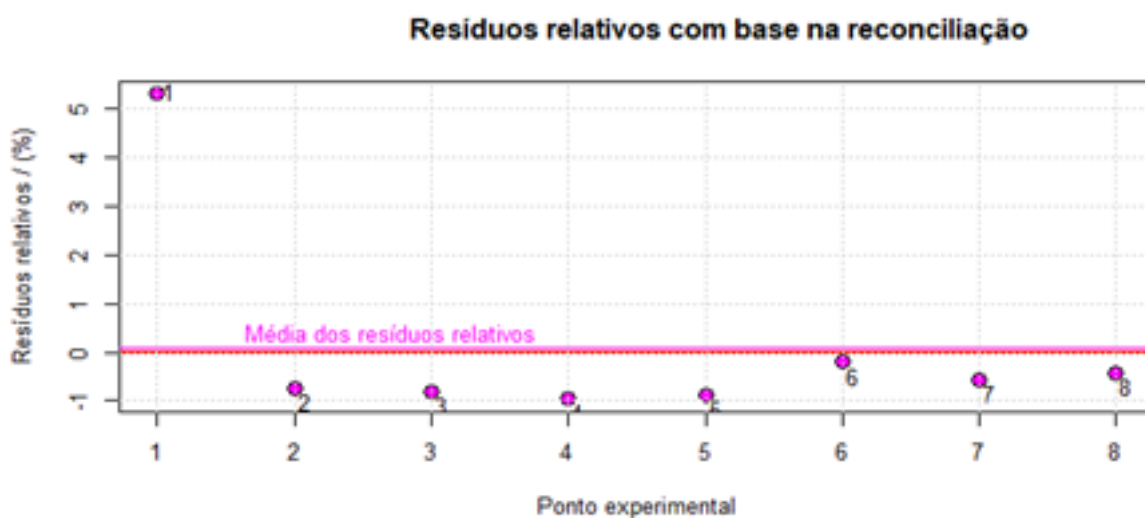
de um valor mais alto condiciona valores também altos de seus vizinhos, caso a relação seja proporcional.

Em todos os gráficos, os comportamentos dos resíduos foram similares, obedecendo às premissas da RD para desenvolvimento da função objetivo e à interpretação estatística dos resultados obtidos. O ponto de observação é em relação aos dias que foram detectados erros grosseiros, tanto pela técnica do teste global quanto pelo teste da medida, pois nos gráficos dos dias 1, 4, 20, 25, 28 e 29 os resíduos apresentaram comportamento anômalo. Estes gráficos estão contidos no anexo desta pesquisa. A análise das premissas da função objetivo devem ser usadas em consonância às análises dos testes de detecção de erros grosseiros e outliers, para que possam ser analisadas a significância estatísticas dos referidos dados do balanço mássico, assim como comparar o comportamento dos erros grosseiros frente às premissas da função objetivo da reconciliação de dados.

Segue, como exemplo, a análise do dia 1 de junho:

- Média dos resíduos relativos: para a ETC, é o ponto com maior discrepância em relação à média igual a zero dos resíduos. Vale destacar que, através do teste da medida, foram destacados erros grosseiros, além da ETC, para os clientes B, C e F. Neste gráfico, através da figura 13, nota-se que a média dos respectivos resíduos estão distantes do valor zero, distanciando-se da premissa para a função objetivo – Média dos resíduos iguais a zero.

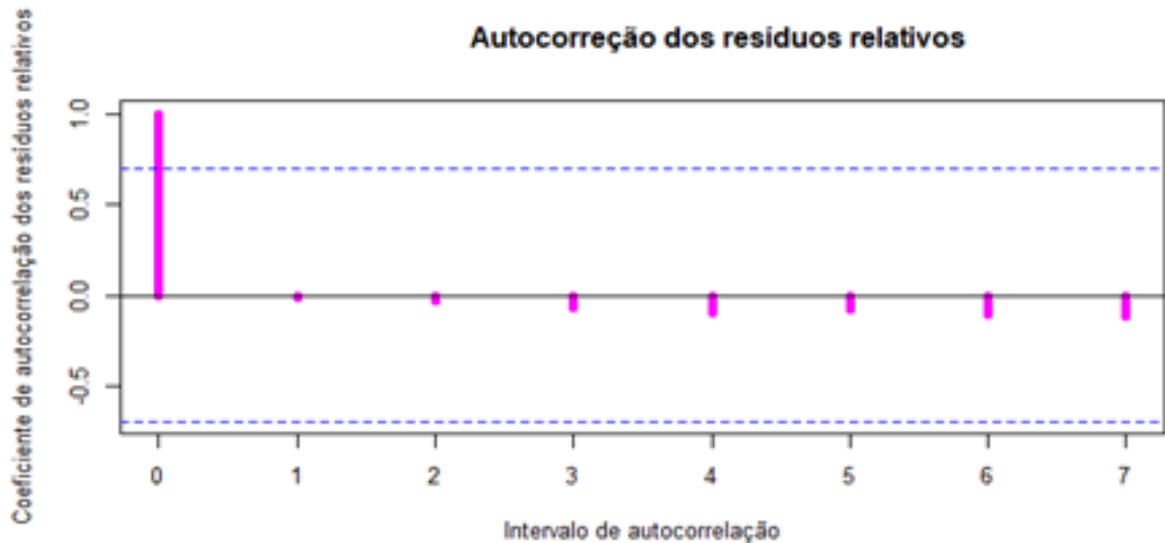
**Figura 13** – Resíduos relativos com base na reconciliação



Fonte: Elaborada pelo autor.

- Gráfico de autocorrelação dos resíduos: todos os resíduos estão abaixo dos limites estabelecidos, ou seja, os resíduos são independentes entre si. Ou seja, não correlação dos resíduos entre o dia de análise e o dia anterior, conforme exibido na figura 14.

**Figura 14** – Verificação de autocorrelação



Fonte: Elaborada pelo autor.

Logo, para o dia 1 de junho, aglutinando-se as análises conjuntas dos testes das medidas e teste global da reconciliação de dados, as medições na ETC e clientes B, C e F merecem destaque com relação a possíveis problemas de falta de calibração do medidor de vazão e inspeções de sensores e transmissores

Após, análise das premissas da função objetivo, segue matriz de variância – covariância das variáveis reconciliadas onde, a partir dela é calculada a matriz dos coeficientes de correlação paramétrica:

0,34	0,06	0,06	0,04	0,04	0,03	0,04	0,06
0,06	0,38	-0,07	-0,05	-0,04	-0,04	-0,05	-0,07
0,06	-0,07	0,41	-0,06	-0,05	-0,04	-0,05	-0,08
0,04	-0,05	-0,06	0,31	-0,03	-0,03	-0,04	-0,05
0,04	-0,04	-0,05	-0,03	0,27	-0,02	-0,03	-0,05
0,03	-0,04	-0,04	-0,03	-0,02	0,23	-0,03	-0,04
0,04	-0,05	-0,05	-0,04	-0,03	-0,03	0,30	-0,05
0,06	-0,07	-0,08	-0,05	-0,05	-0,04	-0,05	0,39

Segue a matriz dos coeficientes de correlação paramétrica:

1,00	0,16	0,17	0,14	0,13	0,12	0,14	0,16
0,16	1,00	-0,18	-0,15	-0,14	-0,13	-0,15	-0,18
0,17	-0,18	1,00	-0,16	-0,15	-0,13	-0,16	-0,19
0,14	-0,15	-0,16	1,00	-0,12	-0,11	-0,13	-0,15
0,13	-0,14	-0,15	-0,12	1,00	-0,10	-0,12	-0,14
0,12	-0,13	-0,13	-0,11	-0,10	1,00	-0,11	-0,13
0,14	-0,15	-0,16	-0,13	-0,12	-0,11	1,00	-0,15
0,16	-0,18	-0,19	-0,15	-0,14	-0,13	-0,15	1,00

Na matriz de variância – covariância, tanto os elementos da diagonal, a variância  $\sigma_i^2$ , na *i*-ésima variável medida, quanto os elementos fora da diagonal,  $\sigma_{ij}^2$ , que são a covariância dos erros entre os parâmetros *i* e *j*, são diferentes de zero, dessa forma calculou-se a matriz de coeficiente de correlação dos resíduos. Apenas através da matriz de covariância dos resíduos não seria possível afirmar que as medições nesta pesquisa poderiam ter significado estatístico, ou seja, utilizar esses dados reconciliados para calcular incerteza de medição, por exemplo.

Além da matriz de variância e covariância, foi calculado o coeficiente de correlação das variáveis medidas e reconciliadas, cujos resultados obtidos através do apêndice E – resultado: coeficiente de correlação entre variáveis medidas e reconciliadas no balanço mássico por dia, utilizando a equação 16. Este coeficiente foi calculado para cada dia do balanço mássico, durante os 30 dias (entre 1 e 30 de junho de 2019). De acordo com Schwaab, caso o coeficiente de correlação seja maior que 0,9, o modelo para cálculo das variáveis reconciliadas será considerado satisfatório, de forma que os valores preditos pelo modelo variam de forma aproximadamente linear e proporcional com os valores medidos. Os valores encontrados (para os 30 dias) são aproximadamente iguais a 1. Consequentemente, o modelo para cálculo das variáveis reconciliadas é satisfatório.

Para o coeficiente de correlação da matriz paramétrica, a diagonal principal apresentou valor 1 e os elementos fora da diagonal principal apresentaram sinal inferior a 0,3. Os elementos fora da diagonal principal, por sua vez, apresentaram correlação fraca. Logo, os resíduos não estão correlacionados entre si, obedecem a uma das premissas dos Mínimos Quadrados Ponderados.

Comparando-se esta pesquisa com os demais trabalhos relevantes no assunto, vê-se que o diferencial de contribuição da dissertação para a reconciliação de dados para medição de Gás Natural em malha de dutos encontra-se na realização do teste das premissas da função objetivo da reconciliação de dados, possibilitando que as medições tenham significado estatístico. E assim, para a base estatística da reconciliação de dados, as premissas de aleatoriedade e média dos resíduos igual a zero foram respeitadas, excetuando-se os dias e pontos de medição que foram detectados erros grosseiros, principalmente os dias 1,4,20,25,28 e 29 (dias que apresentaram elevada discrepância no teste qui quadrado – teste global de detecção de erros grosseiros).

Somente a detecção de erros grosseiros não é suficiente para identificar uma possível falha de medição, falta de calibração ou sujeira em equipamentos como sensores e transmissores. Levando em consideração esse aspecto, a presente pesquisa abordou, através do programa R em reconciliação de dados (Nhemu\_ver\_20.1), a possibilidade de detecção de elevada autocorrelação e média dos resíduos diferente de zero (o que caracteriza que as medições não contêm somente erros aleatórios), indicando que essas medições merecem uma análise mais aprofundada. Somente a detecção de erros grosseiros não daria a riqueza de detalhes que a análise das premissas da reconciliação de dados disponibilizou.

#### 4.1 INVESTIGAÇÃO DAS MEDIÇÕES A PARTIR DO PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÕES DA BAHIAGAS – CAUSAS DOS ERROS GROSSEIROS

Conforme explanado no tópico teste das medidas – reconciliação de dados, através da Tabela 5 – Resultado de detecção de erros grosseiros através do teste da medida, faz-se necessária uma investigação mais aprofundada das causas pelas quais ocasionaram detecção de erros grosseiros principalmente nos dias 1,4,20,25,28 e 29 de junho de 2019.

Segue no quadro 1 as atividades de manutenção preventiva/corretiva que aconteceram na ETC Itabuna no mês de junho de 2019. Foram registradas manutenções preventivas nos dias 31 de maio de 2019, 13 de junho de 2019 e 25 de junho 2019.

**Quadro 1** – Atividades de manutenção preventiva/preditiva na ETC Itabuna

<b>Data da Manutenção/Intervenção</b>	<b>Descrição do Equipamento/Sistema</b>	<b>Local</b>
25/06/2019	TESTE DE ACIONAMENTO DE VÁLVULA ESDV	ETC ITABUNA
25/06/2019	TESTE DE ACIONAMENTO DE VÁLVULA ESDV	SAÍDA ETC ITABUNA
13/06/2019	INSPEÇÃO PREVENTIVA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	ETC ITABUNA
13/06/2019	CALIBRAÇÃO DO COMPUTADOR DE VAZÃO	ETC ITABUNA
31/05/2019	INSPEÇÃO PREVENTIVA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO E CALIBRAÇÃO DO COMPUTADOR DE VAZÃO	CLIENTE A

Fonte: Elaborada pelo autor.

Dia 31 de maio de 2019:

No dia 31 de maio foram realizadas inspeções e calibração do computador de vazão no cliente A. Nesta calibração, através da Unidade Terminal Remota, emite-se um sinal de comunicação de dados para sala de controle da Bahiagás e se compara a vazão do equipamento localizado no cliente A e na sala de controle da Bahiagás. Através do teste da medida - Tabela 5 – Resultado de detecção de erros grosseiros através do teste da medida, não foram detectados erros grosseiros no cliente A imediatamente após aos primeiros dias de execução da calibração no sistema de medição. Somente foi detectado erro grosseiro nos dias 20 e 23 de junho de 2019.

Dia 13 de junho de 2019:

No dia 13 de junho foram realizadas inspeções e calibração do computador de vazão na ETC Itabuna. Nesta calibração, através da Unidade Terminal Remota, emite-se um sinal de comunicação de dados para sala de controle da Bahiagás e se compara a vazão do equipamento localizado na ETC Itabuna e na sala de controle da Bahiagás. Como os dias que apresentaram maiores discrepâncias entre valores medidos e reconciliados foram 1, 4, 20, 25, 28, 29 e 30 de junho, logo as inspeções e calibração no dia 13 não causaram interferências nos demais dias citados.



Dia 25 de junho de 2019:

No dia 25 de junho foram realizados testes de acionamento remoto das válvulas ESDV – válvulas de segurança acionadas automaticamente, bloqueando o fluxo de gás em caso de aumento ou queda pressão que estejam fora dos valores mínimos e máximos regulados na válvula.

Comparando-se as pressões a montante e jusante das válvulas ESDV, não foi detectada diferencial de pressão elevado. Caso houvesse, poderia ser levantada a suspeita de que a referida válvula estaria com algum percentual de fechamento (bloqueio) do duto. Consequentemente, as válvulas ESDV não foram motivos geradores de discrepâncias entre dados medidos e reconciliados na ETC Itabuna.

A partir da análise somente dos dias que tiveram manutenção na ETC Itabuna, não foram detectadas falhas de manutenção ou calibração nos medidores de vazão e respectivos acessórios (sensores e transmissores ou até mesmo na comunicação dos dados ao sistema supervisório – sala de controle da Bahiagás).

Diante disso, faz-se necessária, como ponto de melhoria, a elaboração de planos de manutenção que possam prever mais manutenções preventivas e calibrações de equipamentos, além do desenvolvimento da reconciliação de dados em tempo real no sistema supervisório da Bahiagás para detecção de possíveis falhas de medição no início do problema, e não quando já se passaram diversos dias.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O procedimento para a coleta de dados foi empreendido da seguinte forma: medições diretamente dos medidores dos clientes e das ETC. A partir daí, gerou-se um banco de dados das medições do mês de junho de 2019, com medições sempre diárias. Os instrumentos utilizados para a realização desta pesquisa foram os softwares Excel e a ferramenta Solver.

Na primeira fase da pesquisa, realizou-se uma análise documental e bibliográfica, caracterizando uma abordagem qualitativa.

Na segunda fase da investigação realizou-se coleta de dados em campo, relacionando o balanço de massa entre os pontos de entrega de Gás Natural da ETC aos clientes, para o que foram utilizados dados quantitativos de medições diárias.

Na terceira etapa, foi realizado o teste qui-quadrado para detecção de erros grosseiros e teste da medida e, logo após, o teste *K-Means*, para detecção de possíveis outliers.

Na quarta etapa, foi realizada a reconciliação de dados através da técnica de otimização GRG. Além disso, foram comparados os resultados através da técnica GRG com multiplicadores de Lagrange.

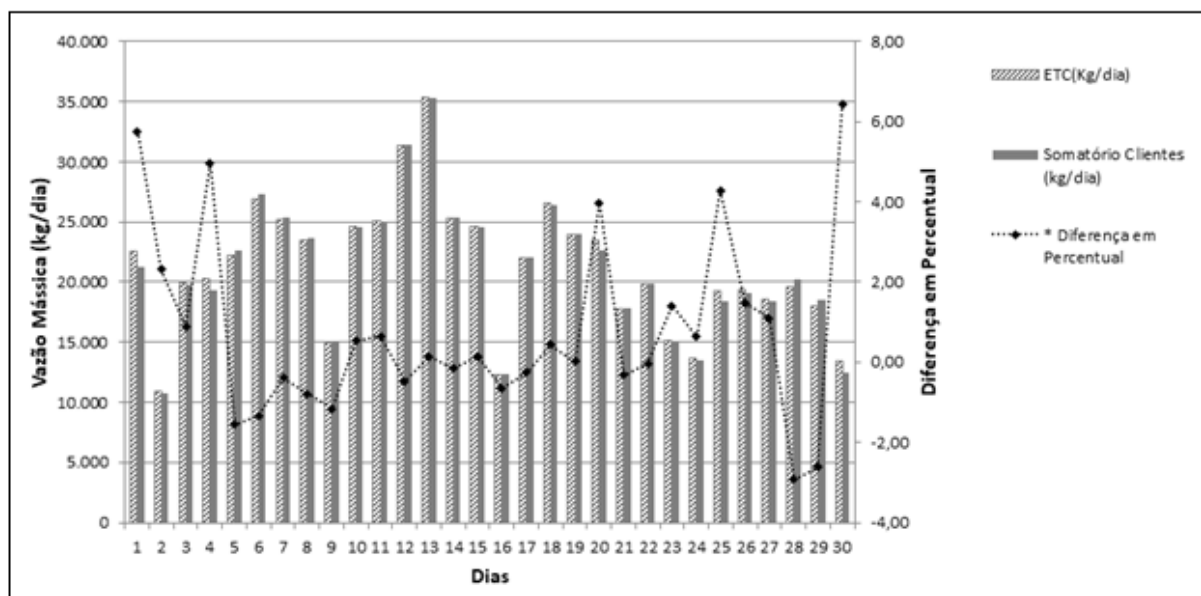
Na quinta etapa, com o objetivo de validar as premissas para o desenvolvimento da função objetivo, assim como interpretar a estatística dos resultados obtidos, foi realizado um diagnóstico, através dos gráficos, da dispersão dos resíduos em torno da média igual a zero e autocorrelação dos resíduos.

### 5.1 CONCLUSÕES

A reconciliação de dados, tanto sem ou com a inserção de dados espúrios, funcionou de forma correta, ou seja, atendeu a todas as restrições estabelecidas.

De acordo com Figura 15, nota-se, antes da reconciliação de dados, que na grande parte dos dias entre 1 e 30 de junho de 2019 as diferenças entre as medições entre ETC e somatório de clientes são pequenas (inferior a 1%).

**Figura 15** – Comparação das medições de vazão mássica entre ETC e a soma dos clientes (dados não reconciliados)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por outro lado, especialmente nos dias 1, 4, 20, 25, 28 e 29 de junho, notam-se discrepâncias inclusive superiores a 5%. Então, esses dias foram pontos de atenção e análise mais aprofundada para falha de medição.

Foram realizados o teste qui-quadrado (teste global) e teste da medida, para detecção de erros grosseiros, além do teste de detecção de outliers: *K-Means*. Verificou-se que clientes que têm consumo variável podem produzir interferência na reconciliação de dados/detecção de erros grosseiros. Os clientes que consomem Gás Natural por batelada podem informar *outliers* ao ter o consumo abruptamente reduzido, por exemplo. Nesse sentido, deve-se destacar a importância de também analisar o perfil de consumo do cliente e a possibilidade de ter havido de fato consumo ou parada de manutenção do cliente naquele período antes de acusar a ocorrência de *outlier*.

Além disso, através da matriz de variância e covariância, foi calculado o coeficiente de correlação das variáveis medidas e reconciliadas. Os valores encontrados (para os 30 dias) são aproximadamente iguais a 1. Conseqüentemente, o modelo para cálculo das variáveis reconciliadas é satisfatório.

Para o coeficiente de correlação da matriz paramétrica, a diagonal principal apresentou valor 1 e os elementos fora da diagonal principal apresentaram sinal inferior a 0,3. Os elementos fora da diagonal principal, por sua vez, apresentaram

correlação fraca. Logo, os resíduos não estão correlacionados entre si, obedecem a uma das premissas dos Mínimos Quadrados Ponderados.

Por outro lado, em relação aos dias que foram detectados erros grosseiros nos pontos de medição conforme Tabela 5 – Resultado de detecção de erros grosseiros através do teste da medida, os respectivos medidores e sistemas de medição merecem destaque com relação a possíveis problemas de falta de calibração do medidor de vazão, inspeções de sensores e transmissores, assim como à comparação com a medição da empresa transportadora de Gás Natural. Na investigação realizada, através das manutenções preventivas realizadas na ETC Itabuna e cliente A (pontos de medição que foram realizadas manutenções preventivas no período de análise desta pesquisa) entre 1 e 30 de junho de 2019, não foram encontrados indícios de falha de manutenção e/ou calibração de equipamentos e seus respectivos acessórios. Por isso, considera-se necessária a elaboração de planos de manutenção que possam prever mais manutenções preventivas e calibrações de equipamentos, além do desenvolvimento da reconciliação de dados em tempo real no sistema supervisor da Bahiagás para detecção de possíveis falhas de medição no início do problema, e não quando já se passaram diversos dias.

No que se refere à análise estatística dos dados, para as premissas de média dos resíduos igual a zero e autocorrelação, somente os medidores com os respectivos dias que encontrados erros grosseiros foram os pontos em que essas premissas não foram respeitadas.

## 5.2 CONTRIBUIÇÕES E SUGESTÕES/PONTO DE MELHORIA

A contribuição desta pesquisa reside no fato de que ela é útil para a avaliação do balanço mássico da malha de gasodutos, além de auxiliar em diagnósticos de falhas como falta de calibrações, sujeira, falha nos equipamentos como sensores e transmissores. Para os próximos passos desta pesquisa, a fim de dar continuidade em numa tese de doutorado, sugere-se a utilização da reconciliação de dados em tempo real, além do desenvolvimento de uma metodologia para pré-tratamento de dados também em tempo real, assim como a detecção de erros grosseiros antes da reconciliação de dados.

A reconciliação de dados em tempo real na sala de controle da Bahiagás tem como principal objetivo a redução de perdas financeiras, na medida em que detecta possíveis falhas de medição no menor tempo possível.

Como ponto de melhoria, deve-se construir mais instalações de pontos de coletas para Gás Natural nas proximidades dos clientes, a fim de comparar a massa específica entre a Estação de Transferência de Custódia e os clientes. Com isso, haverá maior rigor na comparação da massa específica entre os pontos de medição.

Além disso, outro ponto de melhoria detectado é a inserção dos dados de cromatografia de forma automática nos computadores de vazão. Atualmente, os dados de inserção da composição molar são escritos de forma manual pelo operador no computador de vazão, sendo possível fonte de erro no cálculo da vazão volumétrica ou mássica daquele ponto de medição.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN GAS ASSOCIATION et. al. for **Rotary-Type Gas Displacement Meters**. 2000.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis. Resolução nº 807, de 2020b. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 24 jan. 2020. Seção 1, p. 46.

AMERICAN GAS ASSOCIATION et. al. **Measurement of Natural Gas by Turbine Meters**. AGA REPORT n7. Revised. February. 2006.

AMERICAN GAS ASSOCIATION et. al. Orifice metering of natural gas and other related hydrocarbon fluids. AGA REPORT, n. 3, p. 3, November. 2013.

BAHIAGAS. Companhia de Gás da Bahia. Disponível em: <http://www.bahiagas.com.br/gas-natural/Tabela-tarifaria>. Acesso em: 10/08/2019;

BAI, S.; MCLEAN, D. D.; THINBAULT, J. **Impact of Model Structure on the Performance of Dynamic Data Reconciliation**. Computers and Chemical Engineering, v. 31, p. 127-135. 2007.

BARBOSA, A. G. **Desenvolvimento de um software para detecção de erros grosseiros e reconciliação de dados estática e dinâmica de processos químicos e petroquímicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, 2008.

BARRETO, G. O. **Reconciliação de dados do balanço de massa no gasoduto Urucu-Manaus**. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Programa de Pós-Graduação em Metrologia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

BARRETO, G. D. O.; OLIVEIRA, É. C.; FROTA, M. N. **Redução do indicador gás não contado na medição de gás natural pelo uso da técnica de reconciliação de dados**. Petro & Química, p. 100-105, 2013.

\_\_\_\_\_. Use of data reconciliation: **A strategy for improving the accuract in gas low measurements**. Elsevier - Journal of Natural Gas Science and Engineering, p. 313-320, 2014.

BARRETO, G. D. O. et al. **Data reconciliation method for metrological assessment of mass balance: A case study of the Urucu-Manaus natural gas pipeline**. Rio Pipeline conference & exposition, p. 9, 2013.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Tradução. [S.l.]. Porto Alegre: Artmed Editora, 2009. 264 p.

CALLEGARO, R. F. **Uma arquitetura para fusão de dados de sensores de baixo custo em redes de sensores sem fio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

CÂMARA, Maurício M. et al. Numerical aspects of data reconciliation in industrial applications. **Processes**, v. 5, n. 4, p. 56, 2017.

CARPENTIER, J.; ABADIE, J. Généralisation de la méthode du gradient réduit de wolfe au cas des contraintes non lineaires. IV International Conference on Operational Research. **Anais...** In: PROCEEDINGS OF ... OPERATIONS RESEARCH SOCIETY OF AMERICA. New York: D. B. Herts and J. Melese, 1966.

CROWE, C. M. **Reconciliation of Process Flow rates by Matrix Projection**. Part II: The Nonlinear Case, AIChE Journal, v. 32, n.4, p. 616-623, 1986.

D'ANDRÉA, T. Z. **Reconciliação de dados de uma malha de gasodutos**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016

EDGAR, T. F.; HIMMELBLAU, D. M.; LASDON, L. S. **Optimization of chemical processes**. McGraw-Hill, 2001.

FARIAS, A. C. **Avaliação de estratégias para reconciliação de dados e detecção de erros grosseiros**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

FELDMAN, R. N. **Reconciliação de dados em tempo real para monitoração e detecção de falhas em terminal de transporte e armazenamento de derivados de petróleo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

FERREIRA, V. O. **Classificação de anomalias e redução de falsos positivos em sistemas de detecção de intrusão baseados em rede utilizando métodos de agrupamento**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) – Programa de

Pós-Graduação em Ciência da Computação, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, 2016.

HILLIER, F S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 8 ed, Nova Iorque: Mcgraw Hill, 2006.

HOLMAN, J. P. **Experimental Methods for Engineers**, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 1994. 739 p.

ISO GUM, **Avaliação de dados de Medição** - Guia para a expressão de incerteza de medição, 1ª edição brasileira, 2008.

KNOPF, C. F, **Modeling, Analysis and Optimization of Process and Energy System**. New Jersey, Published by John Wiley & Sons. 2012.

LINDEN, R. **Técnicas de Agrupamento**. Revista de Sistemas de Informação da Faculdade Salesiana Maria Auxiliadora, n.4, p.18-36, 2009.

MAIA, Alexandre Gori (2017). **Econometria**: conceitos e aplicações.

NARASIMHAN, S., JORDACHE, C. **Data reconciliation and gross error detection: an intelligent use of process data**. Houston, Gulf Publishing Company. 2000.

PAMULA. R, DEKA. J.K, NANDI. S. **An Outlier Detection Method based on Clustering**. Second International Conference on Emerging Applications of Information Technology- Department of Computer Science and Engineering Indian Institute of Technology Guwahati, Assam, India, 2011

OLIVEIRA JR, A. M. **Estimação de Parâmetros em Modelos de Processo Usando Dados Industriais e Técnicas de Reconciliação de Dados**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ORLANDO A. F. **Análise da incerteza de medição em um processo metrológico**. Dissertação (Mestrado em Metrologia) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2004.

PRATA, D. M. **Reconciliação de Dados em um Reator de Polimerização** Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.



PRATA, D. M.; et. al., Simultaneous robust data reconciliation and gross error detection through particle swarm optimization for an industrial polypropylene reactor. **Chemical Engineering Science**, v. 65, n. 17, p. 4943-4954, 2010.

RIBEIRO, M. A. **Curso de medição de petróleo e Gás Natural**. 3. ed., 2003. 355 p.

ROSEN, J. B. **The gradient projection method for nonlinear programming. part i: linear constraints**. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, v. 8, n. 1, p. 181-217, 1960.

SCHWAAB, M. M.; PINTO, J. C. **Análise de dados experimentais i: fundamentos da estatística e estimação de parâmetros**. Rio de Janeiro: e-papers, 2007. 462 p.

SIEGEL, S. **Estatística não-paramétrica para as ciências do comportamento**. Tradução. [s.l.] McGraw-Hill São Paulo, 1975. 448 p.

SOARES, M. **Informações Técnicas: Critério de Chauvenet**. (2013). Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/tecdiv/med200.shtml>>. Acesso em: 7 Ago. 2019.

SOUZA, L. S. **Propagação da incerteza na reconciliação de dados com restrições lineares**. Monografia (Especialização em Engenharia Industrial) - Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

SOUZA, et al. **Propagação de incertezas em reconciliação de dados sem redundância**. 6º Congresso Brasileiro de Metrologia, 2011

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional**. 8ª ed. 2008. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 366 p.

TAYLOR, J. R. **Introdução à análise de erros: o estudo de incertezas em medições físicas**. 2ª ed. Colorado: Bookman, 2012. 352 p.

TEIXEIRA, J. P. B.. **Gás Natural: O Energético Mais Competitivo**. PoD. 2015.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Interciência. 2004. 272 p.

VALLE, E. C. **Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação e monitoramento de sistemas de medição de águas industriais, sujeitos a baixa qualidade de informação**. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) - programa

de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

FILIFE, Eduarda et al. **Vocabulário Internacional de Metrologia-Conceitos fundamentais e gerais e termos associados** (VIM 2012)-1ª edição luso-brasileira, autorizada pelo BIPM, da 3ª edição internacional do VIM-International Vocabulary of Metrology. Rio de Janeiro, 2012.

WOLFE, P. **The reduced gradient method.** In: **GRAVES, R. L; WOLFE, P. Recent Advances Mathematical Programming.** New York: R. L. Graves and P. Wolfe, p. 67-86. 1963.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A – TABULAÇÃO DOS RESULTADOS DA PESQUISA.

**Tabela 6 – Medição não reconciliada dos clientes**

Dia	Cliente A	Cliente B	Cliente C	Cliente D	Cliente E	Cliente F	Cliente G
	kg/dia	kg/dia	kg/dia	kg/dia	kg/dia	kg/dia	kg/dia
1	2824,27	2833,05	4750,98	5014,11	1149,01	2795,77	1513,00
2	2486,45	2800,36	1688,54	692,79	762,87	2064,50	0,00
3	2951,99	1731,74	1187,37	5074,64	1177,14	3118,58	4185,39
4	2868,15	2214,87	740,24	4973,42	991,61	3037,69	4106,03
5	2715,82	2519,59	2401,42	5589,20	1037,31	3149,12	4730,61
6	2538,96	6319,57	4023,68	5182,61	1136,23	3491,43	4102,01
7	2664,13	6313,88	2461,85	5253,96	1344,57	3532,06	3447,48
8	3199,83	6375,36	1689,00	4905,03	1138,27	2983,37	3073,19
9	3272,11	6580,96	1733,42	257,92	815,64	2258,07	4,41
10	2692,42	6806,16	2301,03	5045,24	1066,17	3500,37	2955,08
11	3031,64	5675,06	2856,05	5437,99	1049,81	3492,46	3265,75
12	2844,37	2158,10	12446,98	5342,30	1229,84	3376,17	3666,72
13	2924,85	3549,36	14099,67	5386,42	1050,58	3026,99	4486,86
14	2601,08	2594,68	6012,02	4959,49	981,37	2937,69	4176,67
15	2569,94	2767,58	5672,52	4500,73	1010,60	2917,56	3645,02
16	2993,12	1756,07	3398,90	684,98	884,71	1978,30	0,00
17	2557,52	3223,01	2022,05	5399,93	979,61	3172,60	4241,34
18	2185,64	6398,45	3625,69	5311,84	1096,84	3210,18	4058,00
19	2142,12	3774,51	3563,84	5118,46	1063,28	3153,09	3900,35
20	1985,40	2511,29	4307,87	5110,00	1075,57	2605,70	3589,66
21	2290,72	1964,68	3500,94	1125,38	1145,01	3244,31	3550,72
22	2197,35	2570,83	10166,10	87,05	1109,91	2594,00	0,00
23	2104,41	2547,67	7231,90	0,00	649,50	1507,35	0,00
24	770,27	1328,53	7931,28	0,00	837,73	1619,71	0,00
25	0,00	2506,72	3793,35	3297,00	969,83	2423,53	4119,87
26	0,00	1904,92	4041,54	5021,15	930,38	2397,99	4297,84
27	0,00	1958,96	4000,63	4702,22	1126,76	2402,99	3667,60
28	0,00	1988,61	4212,19	5358,80	1094,39	3317,97	3679,14
29	18,06	1938,07	3405,87	4656,24	1139,92	2979,35	3075,91
30	405,83	1991,84	5784,00	598,73	816,51	1844,58	170,08

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Tabela 7** – Resultados das reconciliações da dados: Comparação das medições de vazão entre ETC e soma dos clientes.

Dia	ETC	Clientes	Diferença em Percentual
	kg/dia	kg/dia	%
1	21038,34	21038,34	0
2	10537,93	10537,93	0
3	19452,53	19452,53	0
4	19069,77	19069,77	0
5	22093,51	22093,51	0
6	26741,09	26741,09	0
7	25003,07	25003,07	0
8	23334,22	23334,22	0
9	14878,06	14878,06	0
10	24387,45	24387,45	0
11	24832,29	24832,29	0
12	31039,15	31039,15	0
13	34533,14	34533,14	0
14	24257,46	24257,46	0
15	23088,40	23088,40	0
16	11682,11	11682,11	0
17	21588,24	21588,24	0
18	25903,57	25903,57	0
19	22716,42	22716,42	0
20	21297,70	21297,70	0
21	16813,90	16813,90	0
22	18718,55	18718,55	0
23	14087,81	14087,81	0
24	12511,35	12511,35	0
25	17222,16	17222,16	0
26	18636,89	18636,89	0
27	17888,24	17888,24	0
28	19560,74	19560,74	0
29	17144,94	17144,94	0
30	11772,97	11772,97	0

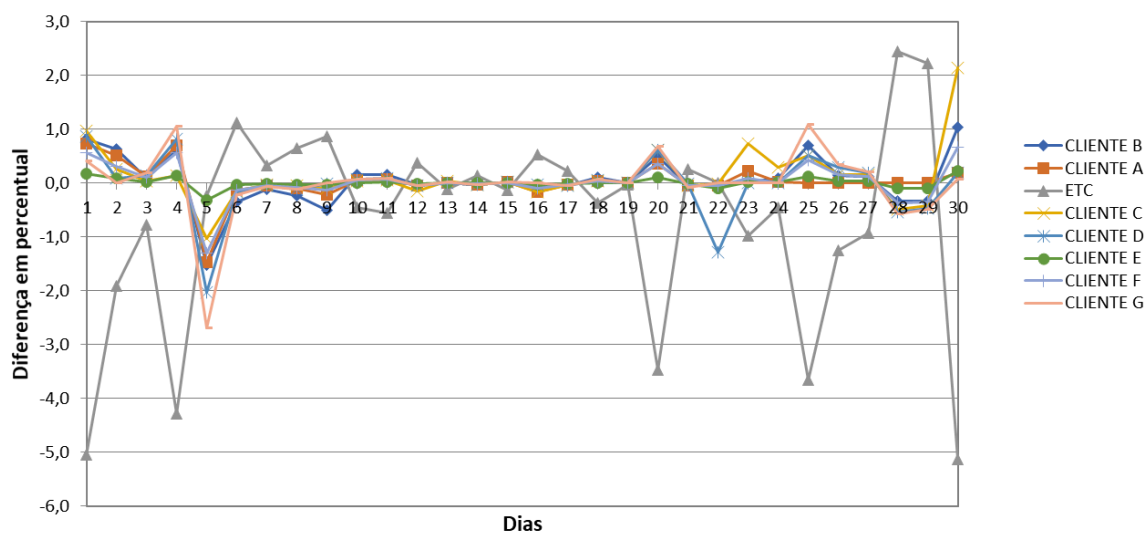
Fonte: Elaborada pelo autor.

Os próximos dados são referentes à reconciliação de medições de vazão dos clientes (dados reconciliados em GRG).

**Tabela 8** – Dados reconciliados das vazões dos clientes

Dia	Cliente A	Cliente B	Cliente C	Cliente D	Cliente E	Cliente F	Cliente G
	kg/dia	kg/dia	kg/dia	kg/dia	kg/dia	kg/dia	kg/dia
1	2845,06	2856,38	4797,34	5057,96	1150,97	2811,33	1519,29
2	2497,19	2819,08	1693,12	693,47	763,58	2071,48	0,00
3	2955,91	1733,24	1187,87	5082,39	1177,50	3121,93	4193,69
4	2888,37	2228,32	741,30	5014,09	993,00	3055,01	4149,68
5	2710,72	2514,69	2398,27	5574,75	1036,88	3143,88	4714,31
6	2535,81	6297,85	4017,46	5173,84	1135,87	3486,89	4093,37
7	2663,05	6307,13	2461,13	5251,16	1344,41	3530,62	3445,58
8	3196,49	6360,56	1688,27	4899,78	1138,03	2981,15	3069,94
9	3264,86	6548,26	1731,81	257,89	815,38	2255,44	4,41
10	2693,95	6817,07	2301,91	5048,84	1066,30	3502,35	2957,02
11	3033,98	5684,20	2857,69	5443,01	1049,97	3494,83	3268,61
12	2843,22	2157,37	12429,62	5339,58	1229,72	3374,94	3664,70
13	2925,16	3549,88	14105,48	5387,13	1050,60	3027,25	4487,64
14	2600,64	2594,19	6010,16	4958,41	981,33	2937,26	4175,47
15	2570,34	2768,08	5674,02	4501,53	1010,63	2917,94	3645,85
16	2988,10	1754,61	3393,78	684,71	884,41	1976,50	0,00
17	2556,76	3221,68	2021,68	5397,69	979,55	3171,72	4239,16
18	2186,40	6405,78	3627,35	5314,87	1096,95	3211,44	4060,78
19	2142,17	3774,68	3563,94	5118,65	1063,29	3153,17	3900,52
20	1992,47	2523,92	4334,12	5141,38	1076,76	2615,02	3614,03
21	2289,74	1963,87	3499,14	1125,22	1144,87	3242,81	3548,24
22	2196,24	2569,72	10164,98	85,94	1108,79	2592,89	0,00
23	2108,20	2553,87	7267,20	0,00	649,71	1508,83	0,00
24	770,41	1329,69	7953,42	0,00	837,73	1620,11	0,00
25	0,00	2524,61	3813,13	3314,28	971,17	2433,91	4165,06
26	0,00	1907,72	4048,23	5035,62	930,81	2401,72	4312,79
27	0,00	1961,18	4007,07	4711,64	1127,08	2405,91	3675,37
28	0,00	1982,16	4193,00	5327,53	1093,38	3305,37	3659,31
29	18,06	1931,74	3392,06	4634,32	1138,80	2969,11	3060,85
30	406,61	2012,73	5908,41	599,86	818,31	1856,84	170,22

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 16** – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 28 de junho de 2019

### Incerteza de Medição

**Tabela 9** – Incerteza expandida dos medidores de vazão

PONTOS DE MEDIÇÃO	INCERTEZA MEDIÇÃO (%)
ETC	0,620
CLIENTE A	0,663
CLIENTE B	0,700
CLIENTE C	0,589
CLIENTE D	0,542
CLIENTE E	0,501
CLIENTE F	0,580
CLIENTE G	0,681

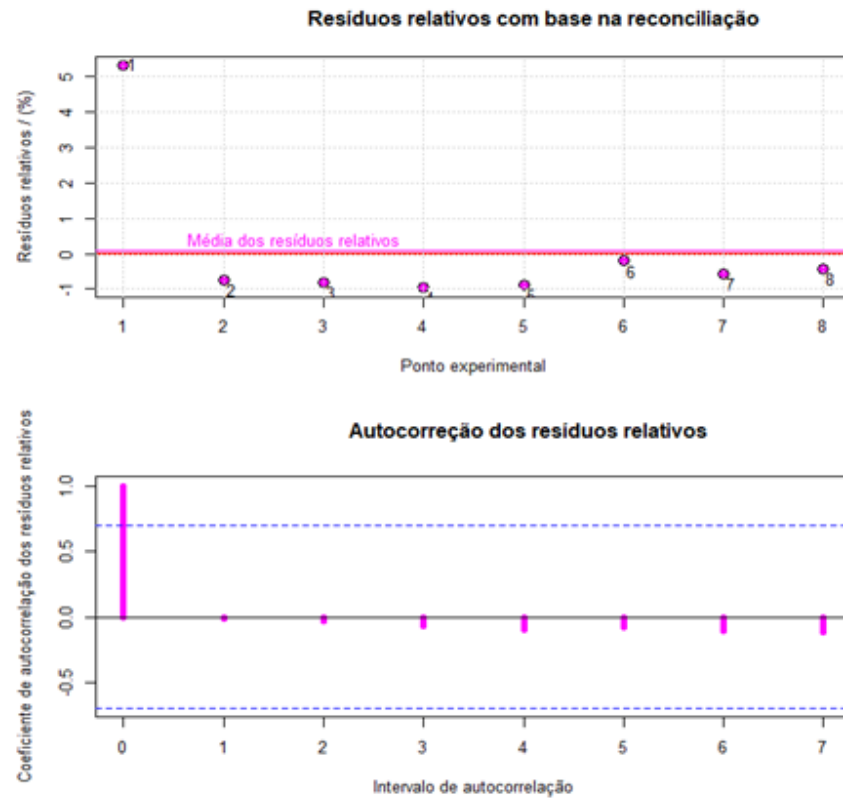
Fonte: Certificados de Calibração dos equipamentos de medição de vazão de Gás Natural.

## APÊNDICE B – DIAGRAMA DE DISPERSÃO DAS GRANDEZAS OBSERVADAS E RECONCILIADAS

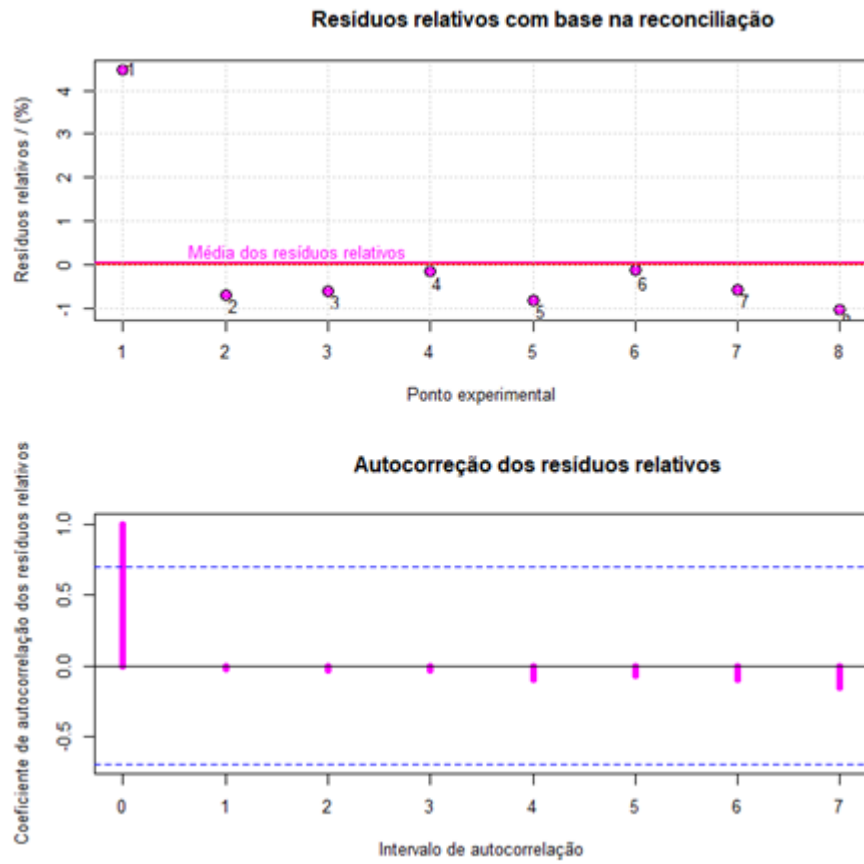
### Resultados da Pesquisa

- Teste das premissas da função objetivo

**Figura 17** – Representação dos resíduos da reconciliação - Dia 1º de junho de 2019

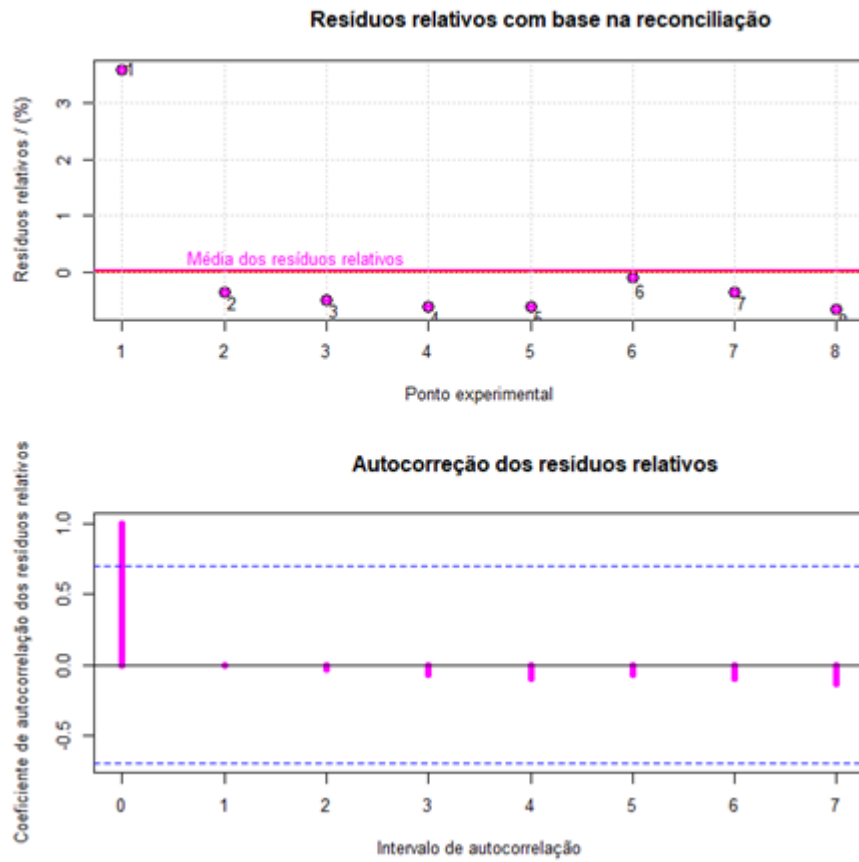


Fonte: Elaborada pelo autor.

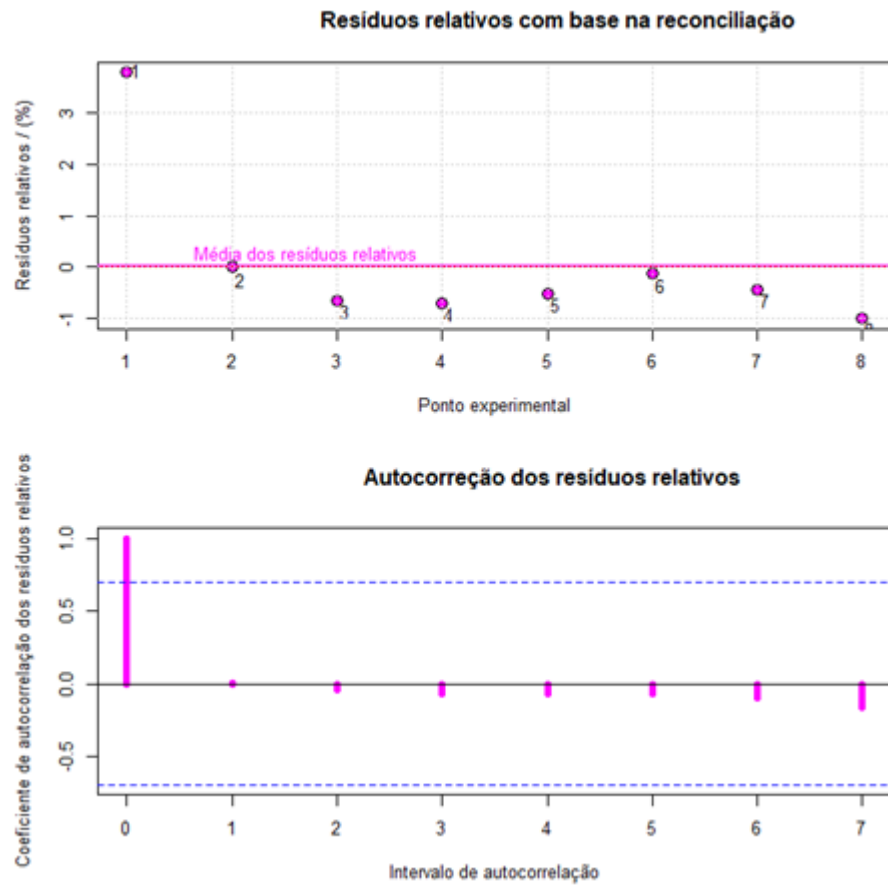
**Figura 18** – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 4 de junho de 2019

Fonte: Elaborada pelo autor.

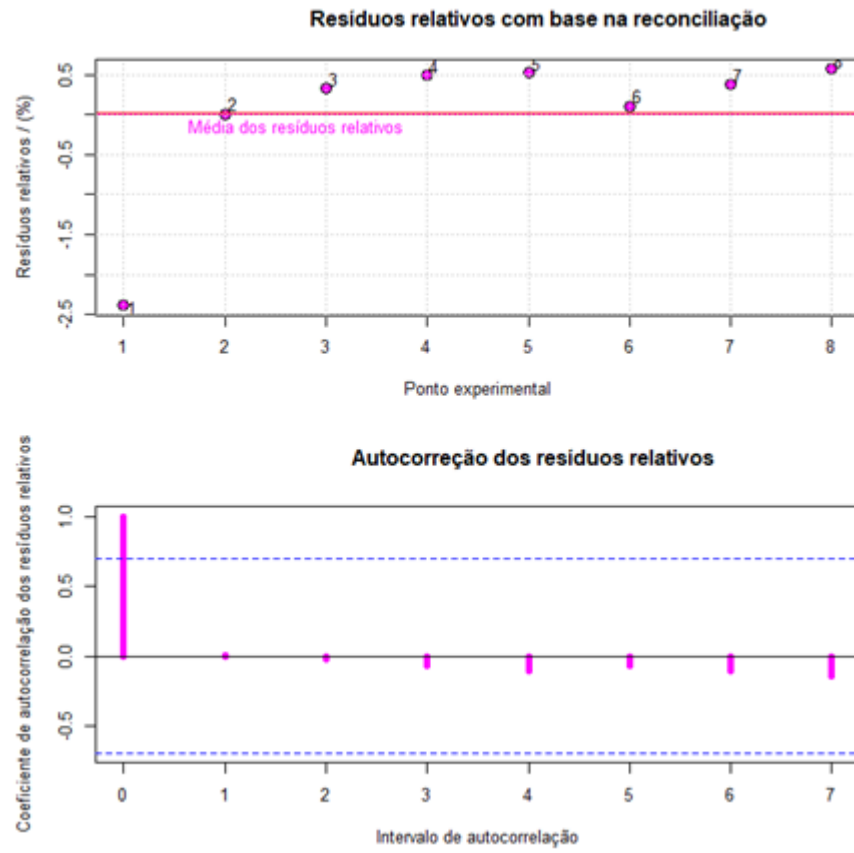


**Figura 19** – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 20 de junho de 2019

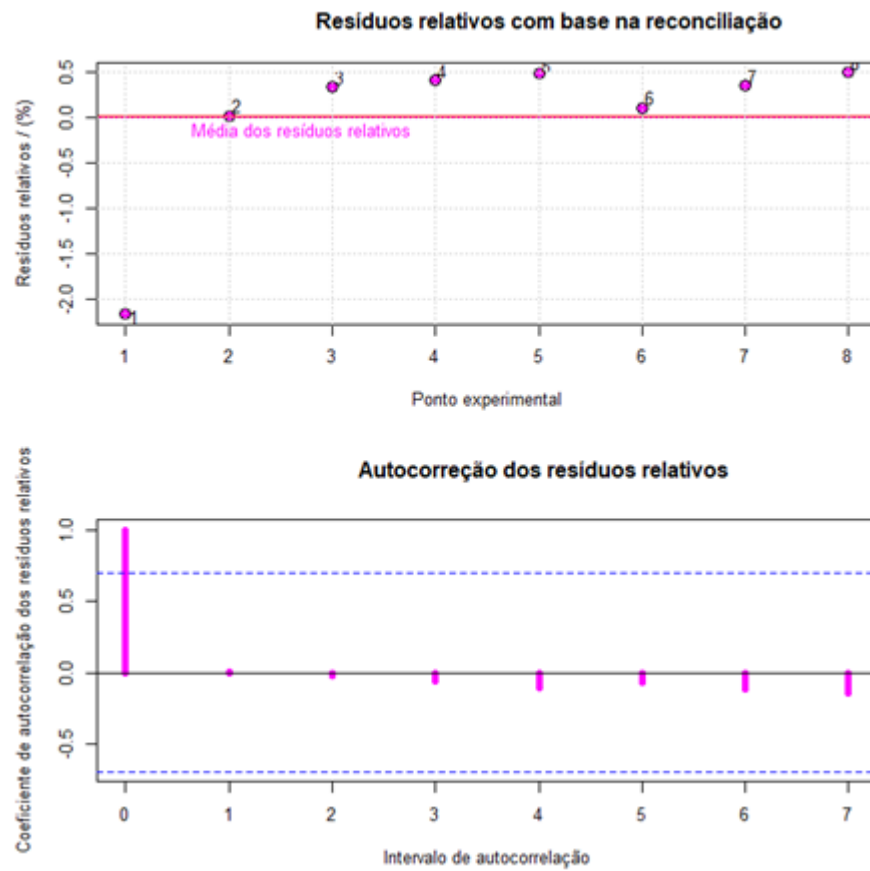
Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 20** – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 25 de junho de 2019

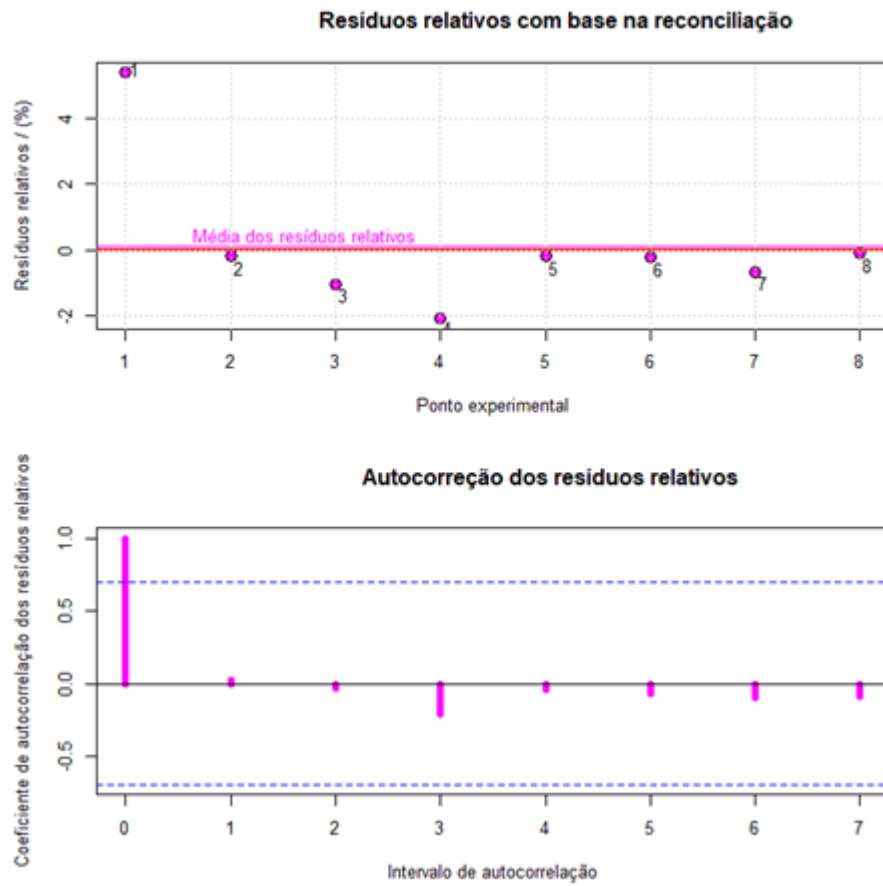
Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 21** – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 28 de junho de 2019

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 22** – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 29 de junho de 2019

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 23** – Representação dos resíduos da reconciliação Dia 30 de junho de 2019

Fonte: Elaborada pelo autor.

**Figura 24** – Script no software R – pacotes cluster, FactoMineR e factoextra

```
#BAIXAR PACOTES
library(cluster)
library(FactoMineR)
library(factoextra)
library(xlsx)

#definir otimo cluster

fviz_nbclust(A,kmeans,method = "silhouette")
```

**Figura 25** – Script no software R – LDOF. Utilização do algoritmo LDOF.

```
#definir otimo cluster

fviz_nbclust(A,kmeans,method = "silhouette")

#boxplot

boxplot(A[,2],1)

#Outlier

LDOF(dataset=A[,2], k=4)
```

## APÊNDICE C – TESTE GLOBAL DE RECONCILIAÇÃO DE DADOS

Dia	FUNÇÃO OBJETIVO APÓS RECONCILIAÇÃO	CONCLUSÃO	NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA (ALFA)	QUI- QUADRA DO TABELA DO
		TESTE QUI-QUADRADO		
			<b>0,05</b>	<b>3,841</b>
1	75,693	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
2	11,484	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
3	1,809	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
4	55,363	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
5	5,299	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
6	3,900	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
7	0,336	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
8	1,359	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
9	2,665	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
10	0,633	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).		
11	0,937	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos		

		aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
12	0,466	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
13	0,040	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
14	0,058	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
15	0,043	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
16	0,918	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
17	0,143	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
18	0,408	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
19	0,001	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste de qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
20	35,775	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
21	0,229	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
22	0,004	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos



		aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
23	3,865	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
24	0,766	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
25	40,570	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
26	4,770	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
27	2,629	Não temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados, pelo menos aproximadamente, não possuem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
28	18,601	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
29	15,123	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).
30	85,519	Temos evidências para rejeitar a hipótese nula, e os dados possuem alta probabilidade de terem erros grosseiros, segundo o teste qui-quadrado, com alfa (nível de significância).

APÊNDICE D – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS: RECONCILIAÇÃO DE DADOS GRG E MULTIPLICADORES DE LAGRANGE

Dia	ETC	CLIENTE A	CLIENTE B	CLIENTE C	CLIENTE D	CLIENTE E	CLIENTE F	CLIENTE G
	%	%	%	%	%	%	%	%
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,07	-0,03	0,00	0,00	0,00	-0,02	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,01	0,01	-0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,00
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,03	0,05	0,04	0,00	0,00	0,10	0,04	0,00
23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	-0,01	0,02	-0,02	-0,02	0,00	0,02	0,03	0,00
25	0,01	0,00	-0,06	0,17	-0,01	-0,01	0,00	-0,08
26	0,00	0,00	0,01	0,07	-0,03	-0,01	-0,02	-0,01
27	0,00	0,00	0,01	0,02	-0,02	0,01	-0,01	0,01
28	0,00	0,00	0,00	-0,03	0,06	0,00	0,01	-0,03
29	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

\*Diferença em percentual = (Medição reconciliada Lagrange – Medição reconciliada GRG) / (Medição reconciliada Lagrange) x 100. Fonte: Elaborada pelo autor.

APÊNDICE E – RESULTADO: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS MEDIDAS E RECONCILIADAS NO BALANÇO MÁSSICO POR DIA.

<b>Dia</b>	<b>Coefficiente de correlação (valores medidos e reconciliados)</b>
1	0,999895023
2	0,999967773
3	0,999996794
4	0,999897391
5	0,999992188
6	0,999994816
7	0,999999467
8	0,999997235
9	0,999981801
10	0,999998675
11	0,999998768
12	0,999997951
13	0,999999819
14	0,999999916
15	0,999999946
16	0,999997171
17	0,999999808
18	0,999999355
19	0,999999999
20	0,999955667
21	0,999999718
22	0,999999972
23	0,999971444
24	0,999992322
25	0,99991527
26	0,999987387
27	0,999993862
28	0,999955378
29	0,999967306
30	0,999416514





















19/06/2019

Z(teste)							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
0,036411638	0,036411638	0,036411638	0,036411638	0,036411638	0,036411638	0,036411638	0,036411638
Z(critico)							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
11,98373054	2,177450223	7,63345749	8,90991036	18,64884698	6,990894988	18,1118998	18,48862784
Resultado do teste Z							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO

20/06/2019

Z(teste)							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
5,98119633	5,98119633	5,98119633	5,98119633	5,98119633	5,98119633	5,98119633	5,98119633
Z(critico)							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
8,417707758	2,040548008	13,58902198	1,841379639	18,5289412	9,474567764	10,32497883	12,98325514
Resultado do teste Z							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	ALTA POSSIBILIDADE DE ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	ALTA POSSIBILIDADE DE ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO









27/06/2019

Z(teste)							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
1,622339486	1,622339486	1,622339486	1,622339486	1,622339486	1,622339486	1,622339486	1,622339486
Z(critico)							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
13,23841508	55,47558488	22,86844376	4,76028331	12,74834343	19,82313627	20,85615846	14,36439432
Resultado do teste Z							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO

28/06/2019

Z(teste)							
Z(ETC)	Z (cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
4,312136407	4,312136407	4,312136407	4,312136407	4,312136407	4,312136407	4,312136407	4,312136407
Z(critico)							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
7,628369529	55,47558488	22,37031295	2,750352009	22,05579354	13,27843395	26,67787495	14,56884077
Resultado do teste Z							
Z(ETC)	Z(cliente A)	Z(cliente B)	Z(cliente C)	Z(cliente D)	Z(cliente E)	Z(cliente F)	Z(cliente G)
SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	ALTA POSSIBILIDADE DE ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO	SEM ERROS GROSSEIROS NA MEDIÇÃO



