



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

CAROLINA FERNANDES RIBEIRO

CONTRIBUIÇÃO À ROBUSTEZ DA METODOLOGIA
TECLIM PARA MELHOR GERENCIAMENTO HÍDRICO:
ESTUDO DE CASO EM UMA PLANTA DE METANOL



SALVADOR
2018



CONTRIBUIÇÃO À ROBUSTEZ DA METODOLOGIA TECLIM PARA MELHOR GERENCIAMENTO HÍDRICO: ESTUDO DE CASO EM UMA PLANTA DE METANOL

Carolina Fernandes Ribeiro

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientadores: Prof. Dr. Márcio André Fernandes Martins
Prof. Dr. Ricardo de Araújo Kalid

Salvador
Dezembro de 2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Ribeiro, Carolina Fernandes

Contribuição à robustez da metodologia TECLIM para
melhor gerenciamento hídrico: estudo de caso em uma
planta de metanol / Carolina Fernandes Ribeiro. --
Salvador, 2018.

144 f. : il

Orientador: Márcio André Fernandes Martins.

Coorientador: Ricardo de Araújo Kalid.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Industrial) -- Universidade Federal da
Bahia, Escola Politécnica, 2018.

1. metodologia TECLIM. 2. balanço de massa. 3.
reconciliação de dados. 4. indicador de desempenho
ambiental. 5. incerteza de dados. I. Martins, Márcio
André Fernandes. II. Kalid, Ricardo de Araújo. III.
Título.

**CONTRIBUIÇÃO À ROBUSTEZ DA METODOLOGIA TECLIM PARA MELHOR
GERENCIAMENTO HÍDRICO: ESTUDO DE CASO EM UMA PLANTA DE
METANOL**

CAROLINA FERNANDES RIBEIRO

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Dr. Édler Lins de Albuquerque Édler Lins de Albuquerque
Doutor em Engenharia Química, pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2007.

Profª. Dra. Karla Patricia S. Oliveira R. Esquerre Karla Patricia Oliveira R. Esquerre
Doutora em Engenharia Química, pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2003.

Prof. Dr. Márcio André Fernandes Martins Márcio André Fernandes Martins
Doutor em Engenharia Química, pela Universidade de São Paulo, Brasil, 2014.

Salvador, BA - BRASIL
Dezembro/2018

*À memória de meus avôs, Maria
Luzia Ribeiro e Lidio Antonio
Laranjeira.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por iluminar meu caminho e sempre me dar forças para encarar as dificuldades e seguir em frente na busca de meus objetivos.

Aos meus pais, Leonidia Fernandes e Raimundo Ribeiro, pelo amor incondicional e pela presença em todos os momentos de minha vida.

À minha família e aos meus amigos do colégio e da faculdade, pela força, positividade, carinho e compreensão nos momentos de ausência.

Ao Felipe Teixeira, pelas palavras de incentivo, companheirismo e paciência.

Ao meu orientador Márcio Martins, pelos ensinamentos, valiosas reflexões e oportunas apreciações durante todo o desenvolvimento desta pesquisa. Sou muito agradecida pela sua confiança e disposição para encarar este desafio comigo.

Ao professor Asher Kiperstok, pelas aulas enriquecedoras e sua predisposição em ajudar.

Ao meu orientador Ricardo Kalid, pelo compartilhamento de sua experiência sobre o tema.

Ao Reiner Requião e ao Rodrigo Meira, pelo imenso amparo no desenvolvimento deste trabalho, que foram essenciais no meu processo de aprendizado.

Ao Erbet Costa e à Cibele Araújo, pelo auxílio durante esta caminhada.

À secretária do PEI, pela assistência administrativa durante esse período, e à secretária do TECLIM, pela total disposição quando precisei.

Ao John Kennedy, pelo *insight* inicial do tema deste trabalho.

À COPENOR, pela oportunidade concedida para a realização desta pesquisa. Um agradecimento especial ao engenheiro Alan Costa, pela atenção, suporte e fundamental colaboração durante todo o percurso.

À FAPESB, pelo apoio financeiro concedido a realização deste trabalho.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação, meus sinceros agradecimentos.

“Os problemas significativos que enfrentamos não podem ser resolvidos no mesmo nível de pensamento em que estávamos quando os criamos.”

Albert Einstein

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se você não fizer nada, não existirão resultados.”

Mahatma Gandhi

RIBEIRO, C. F. **Contribuição à robustez da metodologia TECLIM para melhor gerenciamento hídrico**: estudo de caso em uma planta de metanol. 2018. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

RESUMO

O conceito de qualidade de informação (QI) foi criado pela Rede TECLIM para contornar a inviabilidade de realização da reconciliação de dados clássica nos balanços hídricos devido à falta de redundância de medição das correntes aquosas. Como o conceito QI é construído de forma empírica para cada processo, a sua incerteza associada pode impactar os correspondentes resultados da reconciliação de dados. O objetivo deste trabalho é propor um aperfeiçoamento na construção do balanço hídrico reconciliado da metodologia TECLIM através da consideração do impacto da incerteza da QI na avaliação das incertezas das vazões reconciliadas. Estas vazões reconciliadas usadas em indicadores de desempenho ambiental permitem avaliar a incerteza do indicador, assegurando maior confiança nas tomadas de decisão no gerenciamento hídrico. A contribuição da robustez na metodologia TECLIM foi testada pela aplicação em um estudo de caso em uma planta industrial de produção de metanol, localizada no Polo Petroquímico de Camaçari, Bahia. Como resultado preliminar, uma escala QI específica foi desenvolvida para a planta em estudo e sua utilização permitiu o fechamento do balanço hídrico da planta que possui 64% de suas correntes aquosas com pouca ou nenhuma confiança na sua fonte de informação. A partir destes resultados, a aplicação da metodologia TECLIM aprimorada possibilitou avaliar a incerteza das vazões reconciliadas e traçar com maior confiança o perfil de água da planta. Foram identificados que o desaerador, a caldeira a vapor e a torre de resfriamento são os principais pontos consumidores de água e que mais da metade das perdas hídricas da planta advêm da evaporação da torre de resfriamento. Duas das vazões reconciliadas resultantes da aplicação da metodologia TECLIM aprimorada foram utilizadas na reformulação de um indicador de desempenho operacional referente ao consumo de água de *make-up* da planta de metanol. Foi constatado que o indicador possui uma incerteza em torno de 2% nas condições operacionais da planta. Sendo assim, metas de redução do consumo de água de até 2% não devem ser impostas pelo sistema ambiental da empresa, pois estão dentro do intervalo de abrangência do indicador. Metas acima de 2% não vão atingir de fato o objetivo estipulado, a não ser que medidas operacionais sejam tomadas. Deste modo, a avaliação da incerteza do indicador é muito importante na análise adequada de quais são as metas efetivas e ações necessárias para gerenciar o consumo.

Palavras chaves: Metodologia TECLIM; balanço de massa; reconciliação de dados; indicador de desempenho ambiental; incerteza de dados; gestão hídrica.

RIBEIRO, C. F. Contribution to robustness of the TECLIM methodology for better water management: case study on methanol industrial plant. 2018. 144 pp. Dissertation (Masters of Science in Industrial Engineering) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

ABSTRACT

Quality of information (QI) was created by the Clean Technology Network (TECLIM). They created that to overcome the infeasibility of performing classical data reconciliation in water balances due to the lack of redundancy in measurement of the aqueous streams. The concept of QI is made empirically for each process, so that its associated uncertainty could impact the corresponding data reconciliation results. The main purpose of this dissertation is to propose an improvement in the reconciled water balance of the TECLIM methodology by considering the impact of the uncertainty of the QI in the uncertainties of the reconciled flow rates. These reconciled flow rates used in environmental performance indicators allow estimating the uncertainty of the indicator and this guarantees better credit in decision making in water management. The contribution to robustness of the TECLIM methodology was assayed with the case study application in a methanol industrial plant. The company in study is in Petrochemical Complex of Camaçari, Bahia. As a preliminary result, a specific QI scale was developed for the study plant and its use allowed the closure of the water balance, which has 64% of its aqueous streams with little or no confidence in its source information. The application of the improved TECLIM methodology based on the preliminary results enabled to evaluate the uncertainty of the reconciled flow rates and to draw with better consistency the water profile of the methanol plant. It was identified that the deaerator, the boiler and the cooling tower were the main water consumptions. Moreover, more than half of the water losses in the plant came from the evaporation of the cooling tower. Two reconciled flow rates resulting from the improved TECLIM methodology application were used in the reformulation of an operational performance indicator about water make-up consumption in the methanol industrial plant. It was verified that the uncertainty of the indicator was around 2% in the operational conditions of the plant. Thus, water consumption reduction targets of up to 2% must not be imposed by the company's environmental system because it is within the coverage interval of the indicator. Targets above 2% will not actually achieve the stipulated target, unless operational measures are taken. Therefore, the uncertainty evaluation of the indicator is very important in the proper analysis over the effective goals and actions necessary to manage the consumption.

Keywords: TECLIM methodology; mass balance; data reconciliation; environmental performance indicator; data uncertainty; water management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Abordagens de Produção mais Limpa	21
Figura 2 - Aplicações já realizadas da metodologia TECLIM para uso racional da água	30
Figura 3 - Resumo esquemático para realizar o balanço hídrico	37
Figura 4 - Exemplo de diagrama de blocos do balanço hídrico de uma empresa parceira	38
Figura 5 - Exemplo de escala QI	41
Figura 6 - Integração entre a gestão organizacional, operacional e a condição do meio ambiente	48
Figura 7 - Fluxograma com as etapas para cálculo de avaliação de incerteza das vazões aquosas reconciliadas via Monte Carlo (MMC)	57
Figura 8 - Etapas de produção de metanol baseadas na planta em estudo	60
Figura 9 - Escala QI para a planta de metanol	63
Figura 10 - Distribuição da QI em relação às correntes aquosas mapeadas	65
Figura 11 - Etapas para avaliação de incerteza das vazões aquosas reconciliadas da planta de metanol	67
Figura 12 - Distribuição normal (azul) e distribuição uniforme (cinza) da QI da vazão de água clarificada (AGC), para $M = 10^4$ no MMC, incerteza de 10% para a QI e 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas)	68
Figura 13 - Análise de sensibilidade de M nas simulações de MMC para a vazão de AGD assumindo: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI	69
Figura 14 - Análise de sensibilidade de M nas simulações de MMC para a vazão de AGC assumindo: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI	69
Figura 15 - Análise de sensibilidade do desvio-padrão dos desvios-padrão das 30 simulações em relação ao número de amostras (M) definidos para a vazão de AGD, assumindo: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI	70
Figura 16 - Análise de sensibilidade do desvio-padrão dos desvios-padrão das 30 simulações em relação ao número de amostras (M) definidos para a vazão de AGC, assumindo: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI	70
Figura 17 - Tempo médio de processamento para cada número de amostras apresentados, assumindo: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI	71
Figura 18 - PDFs da vazão de AGD assumindo: $M = 10^4$ no MMC, 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas) e: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI	72
Figura 19 - PDFs da vazão de AGC assumindo: $M = 10^4$ no MMC, 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas) e: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI	72
Figura 20 - Ilustração parcial do balanço reconciliado de água em t/h	79
Figura 21 - Legenda do balanço hídrico da planta de metanol	79
Figura 22 - Resumo do consumo de água da planta de metanol	80
Figura 23 - Principais equipamentos consumidores de água da planta de metanol	80
Figura 24 - Distribuição percentual das saídas de água na planta de metanol	81

Figura 25 - PDF da vazão de produto de metanol cru para $M = 10^4$ no MMC e 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas)	87
Figura 26 - Avaliação da repetibilidade da incerteza-padrão do indicador ICAM para $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI seguindo uma distribuição normal.....	88
Figura 27 - Avaliação da repetibilidade da incerteza-padrão do indicador ICAM para $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI seguindo uma distribuição uniforme ..	88
Figura 28 - PDF resultante do indicador ICAM assumindo: $M = 10^4$ no MMC, 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas) e: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI.....	89
Figura 29 - PDF resultante do indicador IREP assumindo: $M = 10^4$ no MMC, 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas) e: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI.....	91
Figura 30 - Diagrama esquemático da ordem de prioridade sugerida pela Produção mais Limpa	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Trabalhos acadêmicos relacionados à metodologia TECLIM e suas ferramentas..	33
Tabela 2 - Exemplos de indicadores para a ADA.....	47
Tabela 3 - Distribuição da QI em relação aos desvios percentuais	65
Tabela 4 - Valores do desvio-padrão dos desvios-padrão das 30 simulações em relação ao número de amostras (M) definidos para a vazão de AGD	71
Tabela 5 - Valores do desvio-padrão dos desvios-padrão das 30 simulações em relação ao número de amostras (M) definidos para a vazão de AGC	71
Tabela 6 - Valores médios da simulação de MMC assumindo distribuição normal para a QI	73
Tabela 7 - Valores médios da simulação de MMC assumindo distribuição uniforme para a QI	75
Tabela 8 - Cálculo do indicador ICAM.....	83
Tabela 9 - Dados para realizar a reconciliação de dados do balanço do nó do processo.....	85
Tabela 10 - Resultados para o balanço reconciliado do nó do processo.....	85
Tabela 11 - Comparação entre as incertezas-padrão antes e após a reconciliação.....	86
Tabela 12 - Resultados para o ICAM com $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI com distribuição normal	89
Tabela 13 - Resultados para o ICAM com $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI com distribuição uniforme	89
Tabela 14 - Resultados para o IREP com $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI com distribuição normal	91
Tabela 15 - Resultados para o IREP com $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI com distribuição uniforme	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADA	Avaliação de Desempenho Ambiental
AGC	Água Clarificada
AGD	Água Desmineralizada
AGI	Água de Incêndio
AGP	Água de Poço Artesiano
AGUAPURA	Programa de Uso Racional da Água da UFBA
ANA	Agência Nacional de Águas
ATM	Atmosfera
BCB	Bacia do Complexo Básico
BHP	Barreira Hidráulica do Polo
BHR	Balço Hídrico Reconciliado
BI	Banco de Ideias
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CLT	<i>Central Limit Theorem</i>
CNTL	Centro Nacional de Tecnologias Limpas
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
COPENOR	Companhia Petroquímica do Nordeste
CPU	<i>Central Process Unit</i>
DME	<i>Dimethyl Ether</i>
ECOTIME	Equipe multidisciplinar formada para implantar programas ambientais
EMS	<i>Energy Management System</i>
EMSO	<i>Environment for Modeling, Simulation and Optimization</i>
EnPI	<i>Energy Performance Indicator</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
EUA	Estados Unidos da América
E ^z	Potência de 10 (notação científica)
GCA	<i>Green Construction Assessment</i>
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i>
ICA	Indicador de Condição Ambiental
ICAM	Indicador de consumo de água de <i>make-up</i> da planta de metanol

ICI	<i>Imperial Chemical Industries</i>
IDA	Indicador de Desempenho Ambiental
IDG	Indicador de Desempenho Gerencial
IDO	Indicador de Desempenho Operacional
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IREP	Indicador do consumo efetivo de água de reposição na planta de metanol
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LI	Limite inferior do intervalo de abrangência
LPM	<i>Low Pressure Methanol</i>
LPU	<i>Low of Propagation of Uncertainties</i>
LS	Limite superior do intervalo de abrangência
M	Número de amostras
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
MEN	<i>Mass Exchange Network</i>
MINLP	<i>Mixed-Integer Nonlinear Programming</i>
MISO	<i>Multiple Input and Single Output</i>
MMA	Metacrilato de metila
MMC	Método de Monte Carlo
MS	<i>Microsoft Software</i>
MTBE	<i>Methyl Tert-Butyl Ether</i>
MTG	<i>Methanol to Gasoline</i>
MTO	<i>Methanol to Olefins</i>
MTP	<i>Methanol to propylene</i>
NBR	Normas Brasileiras
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>
P+L	Produção mais Limpa
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PME	<i>Principle of Maximum Entropy</i>
PMO	<i>Project Management Office</i>
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
QI	Qualidade de Informação
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RMS	Região Metropolitana de Salvador

RS	Rio Grande do Sul
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SMR	<i>Steam Methane Reforming</i>
TECLIM	Rede de Tecnologias Limpas
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
VA	Vapor de Alta
VB	Vapor de Baixa
VC	Volume de Controle
WEF	<i>World Economic Forum</i>
WRG	<i>Water Resources Group</i>
WWAP	<i>World Water Assessment Programme</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	17
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	17
1.2 GERENCIAMENTO HÍDRICO INDUSTRIAL E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	21
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO	26
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	26
CAPÍTULO 2	28
2 METODOLOGIA TECLIM	28
2.1 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA TECLIM.....	28
2.2 FERRAMENTAS DA METODOLOGIA TECLIM	32
2.3 DETALHAMENTO DA FERRAMENTA 5 DA METODOLOGIA TECLIM: CONSTRUÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO RECONCILIADO (BHR) USANDO O CONCEITO DE QUALIDADE DE INFORMAÇÃO (QI).....	36
2.4 DETALHAMENTO DA FERRAMENTA 14 DA METODOLOGIA TECLIM: CÁLCULO DE INDICADORES DE DESEMPENHO AMBIENTAL (IDA), USANDO DADOS RECONCILIADOS E AVALIANDO SUA INCERTEZA	45
2.4.1 Indicadores de Desempenho Ambiental (IDA)	46
2.4.2 Credibilidade de um IDA	49
2.4.3 IDA envolvendo água	52
CAPÍTULO 3	55
3 METODOLOGIA TECLIM APRIMORADA	55
3.1 PROPOSTA DE ROBUSTEZ NA METODOLOGIA TECLIM PELA INCLUSÃO DA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA QI E DAS VAZÕES RECONCILIADAS	55
3.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA TECLIM APRIMORADA EM UMA PLANTA DE METANOL	58
3.2.1 Panorama geral do processo produtivo	58
3.2.2 Construção do balanço hídrico reconciliado e da escala QI da planta de metanol.....	62
3.2.3 Balanço hídrico reconciliado com a avaliação das incertezas na planta de metanol	66
3.2.4 Análise dos resultados do balanço hídrico reconciliado na planta de metanol.....	78
3.3 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE INDICADOR AMBIENTAL UTILIZANDO DADOS ADVINDOS DA METODOLOGIA TECLIM APRIMORADA.....	82
3.3.1 Cálculo do indicador ICAM da planta de metanol	82
3.3.2 Balanço reconciliado do denominador do indicador ICAM	84
3.3.3 Avaliação da incerteza do indicador ICAM	87
3.3.4 Sugestão de indicador para avaliar o consumo total de reposição de água na planta de metanol	90

CAPÍTULO 4	92
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	92
4.1 CONCLUSÕES.....	92
4.2 RECOMENDAÇÕES PARA APLICAÇÃO NA PLANTA DE METANOL	94
4.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	100
REFERÊNCIAS	101
APÊNDICE A	117
APÊNDICE B	118
APÊNDICE C	138
APÊNDICE D	142
APÊNDICE E	143

Capítulo 1

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo introduz a conjuntura e a relevância do presente trabalho. Ele está dividido em quatro seções. Na primeira seção é abordada a relação da água com o setor industrial e o contexto atual que exige continuamente o gerenciamento hídrico. Na segunda seção é apresentada a importância do balanço hídrico neste gerenciamento, as dificuldades de implantação desta ferramenta devido à falta de redundância de informações das correntes aquosas e a aplicação da metodologia TECLIM para contornar esta dificuldade. Em seguida, é apresentada as lacunas na metodologia TECLIM que este trabalho visa preencher para auxiliar em tomadas de decisões mais assertivas em prol da racionalização de água na indústria. Um estudo de caso é realizado em uma planta de metanol, onde as propostas de melhoria sugeridas para a metodologia TECLIM são aplicadas para comprovar a sua viabilidade e atestar sua importância.

Nas seções seguintes, respectivamente, são apresentados os objetivos que este trabalho busca atingir e a estrutura da dissertação.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

A água é um recurso natural polivalente. Nos processos industriais, ela é empregada para transferência de energia (resfriamento ou aquecimento de equipamentos e sistemas), transferência de massa (lavagem, extração, misturador ou diluidor), e/ou como parte da cadeia produtiva (matéria-prima, reagente e componente do produto). Ela também é usada em funções auxiliares, em interface com outros processos, bem como fora da área de produção, como paisagismo, necessidades humanas e diques de combate a incêndio. O uso dado à água e as quantidades requeridas para as diversas atividades industriais variam a depender do ramo da atividade, da capacidade produtiva, qualidade da matéria-prima e rota tecnológica de produção. Variam também em função das condições climáticas, disponibilidade, custo da água e cultura operacional da empresa (ANA, 2017; KIPERSTOK *et al.*, 2011, 2013a; MIERZWA; HESPANHOL, 2005). A influência destes fatores irá determinar a quantidade e

qualidade da geração de efluentes líquidos, uma das resultantes da sua utilização. Um grande volume de efluente líquido é produzido diariamente em todo o mundo (ASAITHAMBI; AZIZ; DAUD, 2016). Desse modo, o setor industrial tanto depende, quanto impacta diretamente nos recursos hídricos (KIPERSTOK *et al.*, 2013a).

As mudanças de atitude empresarial em relação à questão ambiental são influenciadas pelas pressões exercidas do governo, mercado, sociedade, investidores e o setor de seguro (BABIERI, 2008). Por causa destas pressões, gradativamente nas últimas décadas, o setor industrial vem modificando a sua percepção em relação à importância do uso eficiente da água nos seus processos, a fim de garantir vantagens competitivas no mercado e atender os requisitos legais, as imposições do comércio e as cobranças dos consumidores. Entretanto, a preservação da água pela indústria ainda não é uma consideração primária (BARRINGTON; PRIOR; HO, 2013; KIPERSTOK *et al.*, 2013a; KURLE; HERRMANN; THIEDE, 2017), pois as empresas tendem a se concentrar na maximização da produção e minimização dos custos (BARRINGTON; PRIOR; HO, 2013).

Segundo os autores Barrington, Prior e Ho (2013), Walsh, Bruton e O'Sullivan (2017) e Walsh, Cusack e O'Sullivan (2016), embora o custo da água de alimentação do processo varie a depender da localização da empresa e do seu uso, no geral, a água tem um custo econômico relativamente baixo comparado a outros insumos de processo e produto. Conseqüentemente, a busca da conservação hídrica é pequena, já que ela proporciona retornos baixos financeiramente, e no geral, tem um tempo de amortização muito mais longo em referência às medidas tomadas para aumentar a eficiência produtiva de processos comerciais. Demajorovic e Jacobi (2015), por exemplo, avaliam como a cobrança do uso da água de uma bacia hidrográfica, no Brasil, tem influenciado o comportamento dos usuários industriais no sentido de adotar estratégias para a racionalização do consumo de recursos hídricos. Suas conclusões apontam que o preço reduzido da cobrança da água não estimula mudanças profundas na gestão de recursos hídricos, bem como não gera recursos financeiros significativos para a preservação da qualidade da água na região, ainda que a cobrança resulte no estímulo do uso racional da água pelo setor.

Para Kurle, Herrmann e Thiede (2017), existem vários obstáculos que impedem a implementação de melhorias na eficiência hídrica, mesmo já se tendo disponíveis tecnologias adequadas para tratamento dos processos industriais e reutilização de água e efluentes. São eles:

- O sistema de água dentro de uma empresa é bastante desconhecido;
- A água é considerada um recurso muitas vezes invisível na produção;
- A demanda de água é alta para contínuo abastecimento e condicionamento;
- A água é necessária em diferentes qualidades e quantidades para diferentes propósitos; e
- As opções de reutilização de água e os pré-requisitos são praticamente desconhecidos.

Outra barreira para o incentivo ao uso eficiente de água é a falta de dados credíveis sobre o seu uso pelas indústrias. De acordo com Walker, Lv e Masanet (2013), nos EUA não existe uma compilação de dados nas pesquisas nacionais regulares do uso da água ao nível de processo ou pela tipologia industrial de manufatura, como é feito com o uso de energia. Essa ausência de dados contribui para uma falta geral de conscientização da engenharia e das autoridades sobre as fontes e a dimensão de consumo de água pelas fábricas. Isso limita a atenção mais ampla para a eficiência hídrica, bem como não revela incentivos externos para que os fabricantes reduzam seu consumo de água doce. Já no Brasil, segundo a ANA (2017), existe a estimativa do balanço hídrico quantitativo nacional para o setor industrial por subsetor. No entanto, ela é feita utilizando um método indireto, com diversas limitações, pois a disponibilização das medições de entrada e saída das empresas é insuficiente. Esta insuficiência torna a base de dados cadastrais ineficientes, com falta de informações das vazões, medidas e outorgadas, com representatividade e consistência com a realidade.

Na contramão aos importantes entraves ainda encontrados para racionalização da água pelo setor industrial, estudos e relatórios internacionais continuam apontando a necessidade eminente de a água deixar de ser um recurso natural negligenciado. De acordo com o WEF (2018), a crise de água vem sendo avaliada consecutivamente nos últimos sete anos como um dos cinco principais riscos globais de maior impacto negativo para vários países ou indústrias nos próximos 10 anos. O aumento do seu uso, as mudanças climáticas e degradação da sua qualidade estão dentre os fatores que corroboram na sua classificação.

Segundo a WWAP (2018), a demanda de água vem crescendo a uma taxa de aproximadamente 1% por ano e continuará a aumentar de forma significativa durante as

próximas duas décadas, devido, entre outros fatores, ao crescimento populacional, ao desenvolvimento econômico e às mudanças dos padrões de consumo. Conforme a OECD (2012) ocorrerá um aumento em torno de 55% da demanda global de água até 2050, dos quais o aumento da demanda do consumo mundial somente do setor de manufatura deverá ser de 400% entre 2000 e 2050. Já a 2030 WRG (2009) estima que até 2030 haja um *déficit* de água de 40% pela demanda ser maior que a capacidade de água acessível nas reservas de águas subterrâneas e superficiais do mundo, em um cenário de crescimento econômico médio e sem assumir ganhos de eficiência na sua utilização.

Ao mesmo tempo, de acordo com o IPCC (2014), as mudanças climáticas estão modificando os padrões de precipitação em muitas regiões, de maneira a afetar os recursos hídricos em termos de quantidade e qualidade. Nas regiões de altas latitudes há uma probabilidade de aumento das precipitações médias anuais. Em contraste, para as regiões subtropicais mais secas estão projetadas uma diminuição na precipitação e nos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, intensificando a competitividade pela água doce entre os setores. No Brasil também são esperadas alterações nos padrões de precipitação, que podem modificar a disponibilidade, a distribuição temporal da vazão de águas superficiais e as taxas de recarga de águas subterrâneas. Na região Nordeste do Brasil, por exemplo, segundo previsões pelo IPCC 2007, IPCC 2014 e PBMC 2014, há uma tendência de aumento nos eventos de seca nesta região, dos quais o sistema de gerenciamento da água atual não está preparado para enfrentar (ANA, 2016).

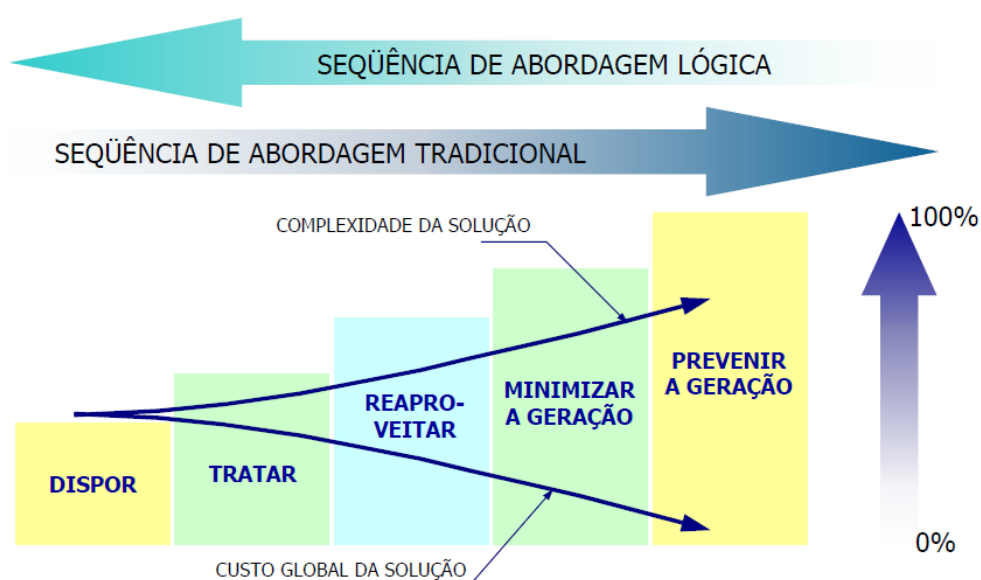
Ademais, no âmbito geral, mais de 80% das águas residuais são despejadas sem tratamento adequado. Se as tendências atuais persistirem, de despejo de esgotos não tratados, combinado com o escoamento agrícola e as águas residuais das indústrias tratadas de forma inadequada, a qualidade da água irá piorar nas próximas décadas (WWAP, 2017).

Perante as previsões de alerta em relação ao futuro do fornecimento adequado de água doce, é persistente a necessidade de uma mudança de atitude mais preventiva das autoridades, sociedade e empresários em busca do desenvolvimento sustentável e da minimização do estresse hídrico. Dependentemente, é imperativa uma postura mais atuante das indústrias em prol de um melhor gerenciamento estratégico dos seus recursos hídricos, uma vez que, problemas de restrições de água no setor podem provocar aumento de custo de produção e até perda de operação (KIPERSTOK *et al.*, 2013a; OLIVEIRA, 2011b).

1.2 GERENCIAMENTO HÍDRICO INDUSTRIAL E JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Com a visão de ecoeficiência do setor industrial, os esforços de mudança de sua atuação devem ser direcionados no sentido de inserir os princípios da Produção mais Limpa e privilegiar a gestão de demanda (KIPERSTOK *et al.*, 2011). Produção mais Limpa (P+L) tem sido considerada a melhor estratégia para o desenvolvimento sustentável (YANG; SHI, 2000). P+L significa a aplicação contínua de uma estratégia ambiental, econômica e social, integrada nos processos, produtos e/ou serviços, com o objetivo de aumentar a eficiência no uso dos recursos naturais, com o mínimo de impacto ao meio ambiente e ao ser humano (CNTL SENAI-RS, 2003a; UNEP, 2004a, 2004b). Para isso, a prioridade da P+L é verificar os problemas na fonte ao invés de no fim do processo produtivo. Ou seja, sua aplicação significa modificar a visão de fim-te-tubo (abordagem tradicional) para uma visão da prevenção da poluição (abordagem lógica), através da eliminação, minimização ou reciclagem dos resíduos, efluentes e emissões geradas – Figura 1 (CNTL SENAI-RS, 2003a). A gestão da demanda de água é um viés de quebra do paradigma da gestão da oferta, a partir de estratégias de conservação da água e da ampliação da produtividade, por meio de otimização e racionalização do uso, redução do consumo e desperdício, redução de custos de investimentos em novas infraestruturas e aproveitamento das águas utilizadas (FARIAS *et al.*, 2010).

Figura 1 - Abordagens de Produção mais Limpa



Fonte: CNTL SENAI-RS (2003a).

O balanço material é um dos passos de implantação da P+L (CEBDS, 2005; CNTL SENAI-RS, 2003a; HUANG; LUO; XIA, 2013; ÖZBAY; DEMIRER, 2007; UNEP, 2004a, 2004b). Além disso, o balanço é uma técnica básica utilizada no ambiente industrial para ter um diagnóstico da eficiência do uso dos seus recursos naturais (KIPERSTOK, 2008). A elaboração do balanço de massa hídrico é feita pela contabilização da quantidade de água que entra e sai de uma planta. Logo, ele atua como um importante artifício para relacionar todas as correntes aquosas do processo, traçar um perfil de uso e fornecer meios para controlar suas perdas e desperdícios. Segundo Kiperstok, Kalid e Sales (2006), o processo de construção do balanço hídrico por si só já possibilita redução no consumo, pois ele motiva os funcionários a usarem o recurso com maior cuidado.

Conforme Fontana *et al.* (2004, 2005), Martins *et al.* (2010a), Valle (2013) e Van Der Bruggen e Braeken (2006), o balanço hídrico é a base essencial para iniciar processos de otimização, como também é um instrumento crucial para gerenciar os fluxos de água em uma fábrica e identificar oportunidades de economia. A utilização da técnica tem sido tema de pesquisa de algumas áreas para controlar a quantidade de água de consumo e da geração de efluentes, a exemplo de áreas urbanas (KENWAY; GREGORY; MCMAHON, 2011) e industriais (GUMBO *et al.*, 2003; PHAM *et al.*, 2016; VAN DER BRUGGEN; BRAEKEN, 2006). Sua utilização também pode ser combinada com o balanço de energia para definir, por exemplo, o consumo de água na geração de vapor industrial (WALKER; LV; MASANET, 2013).

Porém, vale ressaltar que a construção do balanço hídrico não é uma tarefa fácil e a falta de dados confiáveis se torna um empecilho para sua construção. Gumbo *et al.* (2003) relatam a dificuldade de realizar o balanço na refinaria de açúcar devido ao desconhecimento das correntes aquosas de alimentação de equipamentos, agravadas pelas máquinas serem obsoletas e existir a carência de registros adequados de todo o processo de produção. Van Der Bruggen e Braeken (2006) mencionam a exiguidade de vazões conhecidas para construir o balanço, e nenhum conhecimento formal sobre a organização e o *layout* da rede de distribuição de água dentro de uma cervejaria em Flandres, Bélgica. Por isso, eles declaram que a criação do balanço requer uma avaliação das lacunas de informação disponível e uma decisão do grau de detalhamento necessário. No parque industrial na província de Dong Nai, no Vietnã, estudado por Pham *et al.* (2016), o balanço hídrico ainda não tinha sido aplicado até então pela fraca disponibilidade e qualidade dos dados. No Brasil, de acordo com Fontana

et al. (2004, 2005) e Valle (2013), as plantas concebidas entre as décadas de 60 e 70 não tinham e ainda continuam apresentando a ausência de uma rede de monitoramento do uso de suas correntes aquosas. Matos *et al.* (2012) relatam que ao existirem medição das correntes aquosas, é comum a precariedade do sistema por falta de manutenção e calibração. Kiperstok, Kalid e Sales (2006) e Oliveira (2011b) ainda acrescentam expondo que o fator da carência de medição, ou a falta de manutenção e calibração dos instrumentos relacionados às correntes aquosas quando essas existem, perpassa pelo argumento que o investimento para controlar o seu consumo não compensa em relação aos custos da água.

A carência de dados não permite o fechamento do balanço hídrico, como também, é capaz de inviabilizar a aplicação das técnicas clássicas de otimização hídrica. Para resolver essa dificuldade, a Rede de Tecnologias Limpa (TECLIM), da Escola Politécnica, da Universidade Federal da Bahia (UFBA), desenvolveu um conceito de qualidade de informação (QI) como parte de uma metodologia para uso racional de água. Uma das vantagens de utilizar a QI é a possibilidade de compor o balanço hídrico com os dados de vazões disponíveis (mapeados), sem se preocupar, inicialmente, com a redundância das informações relacionadas às correntes (MARTINS *et al.*, 2010a; SOUZA *et al.*, 2009). Ao agregar o conceito QI à técnica de reconciliação de dados do balanço hídrico, torna-se possível o fechamento consistente do balanço, mesmo sem possuir a redundância de informação (FONTANA *et al.*, 2004, 2005; MARTINS *et al.*, 2010a). Desta forma, a metodologia TECLIM inova ao buscar a coleta e validação de dados de campo antes de investir na medição (OLIVEIRA, 2011b). A eficiência da sua metodologia já foi testada e comprovada pela aplicação em várias empresas do Polo Petroquímico de Camaçari, na Bahia (KIPERSTOK, 2008; KIPERSTOK *et al.*, 2013a, 2013b; KIPERSTOK; KALID; SALES, 2006; MARTINS *et al.*, 2010a; OLIVEIRA, 2011b; OLIVEIRA *et al.*, 2010).

O conceito QI é construído empiricamente para cada processo (MARTINS *et al.*, 2010a). Por isso, ele possui uma incerteza associada, cujo seu impacto nos correspondentes resultados da reconciliação de dados ainda não foi analisado no âmbito da metodologia TECLIM. Assim, um dos objetivos deste trabalho tem como finalidade incorporar uma avaliação das incertezas associadas às QIs, e integrá-las sistematicamente à análise de incerteza das correntes do balanço hídrico reconciliado, contribuindo com o aprimoramento e robustez da metodologia.

Nesse contexto, a robustez sugerida à metodologia TECLIM foi aplicada em uma

planta de metanol, localizada no Polo Petroquímico de Camaçari, com o intuito de comprovar sua empregabilidade e destrinchar de maneira mais confiável o conhecimento do uso hídrico da planta. Para isso, uma escala QI específica foi construída para atender às suas peculiaridades e permitir a reconciliação de dados.

A aplicação da metodologia TECLIM em um novo *site* de estudo tem a pretensão também de uma nova consolidação e agregação de novos resultados à Rede TECLIM. Ela foi apropriada para a planta em estudo, pois esta foi construída na década de 70 e até hoje existe uma carência de medição de suas correntes aquosas. Além disso, embora a empresa já possua uma cultura de recuperação de massa e energia, a planta segue uma abordagem fim-de-tubo no geral. Assim, o desenvolvimento deste trabalho se insere aliado aos interesses da empresa de modernizar sua postura ambiental e melhorar a eficácia do seu sistema de gestão ambiental (SGA).

Organizações que já possuem um SGA pela ISO 14001/2015 devem utilizar indicadores de desempenho ambiental (IDA) como uma ferramenta de gestão interna para avaliar o seu desempenho ambiental frente a sua política ambiental, objetivos e metas desejadas (ABNT, 2015a; JASCH, 2000). O uso desses indicadores permite analisar continuamente a eficiência de um sistema ambiental em relação a critérios pré-estabelecidos pela organização. O resultado dessa avaliação pode auxiliar a empresa a identificar os impactos ambientais, avaliar os riscos existentes, determinar quais aspectos deverão ser tratados como significativos, quais intervenções são necessárias para atingir seus critérios pré-estabelecidos e quais as tendências e oportunidades para melhorar a sua gestão. Além disso, uma comparação de indicadores entre anos anteriores, locais ou com outras empresas, permite uma avaliação do progresso e economias potenciais dentro da organização (ABNT, 2015b; CUNHA, 2001; JASCH, 2000). Ou seja, os resultados da utilização dos indicadores podem agregar a empresa redução dos impactos ambientais associados às suas atividades, economia de custos e recursos, melhoria na coordenação e cooperação de toda a empresa e conhecimento das informações necessárias para cumprir as limitações impostas por legislação ou outros regulamentos (TSOULFAS; PAPPIS, 2008).

Os IDAs servem, portanto, de base para tomadas de decisão pelos gestores (ABNT, 2015b). Por esse motivo, eles precisam ser confiáveis, relevantes, reproduzíveis, representativos e realizáveis (LAMBERTON, 2000; WILSON; BULLER, 2001). Confiáveis em relação ao que são projetados para medir. Relevantes nos objetivos do contexto em que

está inserido. Reproduzível para ser aplicável por outras empresas. Representativo para que seja possível comparar entre regiões e países. Realizável na possibilidade de calcular de forma simples e de fácil interpretação, com uma relação de custo-benefício razoável.

A ISO 14031/2013 é a norma internacional referente às diretrizes para avaliação de desempenho ambiental (ADA), baseada no modelo gerencial PDCA e na lógica de melhoria contínua. A norma ABNT NBR ISO 14031/2015 é a adoção idêntica da ISO 14031/2013 no Brasil (ABNT, 2015b). O uso de indicadores de desempenho ambientais para monitorar e revisar o seu progresso ambiental também faz parte da orientação da P+L (CNTL SENAI-RS, 2003b; UNEP, 2004b, 2004a), como conseqüentemente, também da metodologia TECLIM (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Na busca de prosperar na gestão estratégica dos recursos hídricos da empresa, um indicador de desempenho ambiental, existe no SGA da empresa, foi avaliado para ser utilizado como parâmetro de monitoramento do consumo hídrico da planta pelos gestores. O cálculo do indicador foi modificado para que os dados hídricos extraídos do balanço reconciliado fossem utilizados, ao invés dos dados medidos sem confiança. O propósito disto é garantir uma melhor consistência necessária às informações que compõem o indicador. Pela robustez proposta na metodologia TECLIM, é possível obter as incertezas de vazões reconciliadas e estas podem ser propagadas para avaliar a incerteza do indicador. O papel da incerteza no indicador é fundamental para avaliar corretamente o desempenho ambiental, o que por sua vez, também é essencial para garantir a efetividade do SGA (PEROTTO *et al.*, 2008). Isto porque quando a incerteza não é contabilizada, pode-se ocorrer estimativas incorretas de possíveis erros da empresa ou aumentar o risco de tomar decisões incorretas, como a falha na definição se a empresa está ou não em conformidade com normas ou requisitos específicos (PENDRILL, 2014). Assim, uma avaliação da incerteza também foi realizada no indicador da planta para melhor analisar as metas efetivas e ações necessárias. Vale enfatizar que essa avaliação da incerteza de indicadores de desempenho ambiental normalmente é negligenciada (SILVA, 2011). Poucos trabalhos acadêmicos incluem essa avaliação na análise dos indicadores (SILVA, 2011) e a sua realização neste trabalho pretende atestar a sua importância para as tomadas de decisões mais assertivas pelos gestores.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho tem como objetivo principal propor uma extensão da metodologia TECLIM de forma a incluir a tarefa das incertezas associadas à etapa de construção de balanços hídricos reconciliados, tornando-a mais robusta no que se refere ao gerenciamento hídrico de *sites* industriais.

Em face do contexto exposto, os objetivos específicos associados são:

- Propor uma escala QI adequada para uma planta de metanol que possui exiguidade de medição das correntes aquosas, e avaliar as incertezas associadas com base nas informações disponíveis e dentro de um paradigma bayesiano;
- Construir o balanço hídrico reconciliado da planta de metanol com análise de robustez através das incertezas avaliadas para as correntes reconciliadas por simulações de Monte Carlo (método não linear), de maneira a garantir confiavelmente o consumo total da planta e a identificação dos pontos de maior consumo de água e os geradores de efluentes;
- Dar suporte na assertividade das tomadas de decisões da gestão ambiental através da avaliação da incerteza associada de um indicador de desempenho ambiental, utilizando dados reconciliados na sua composição.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em quatro capítulos e cinco anexos. No presente capítulo é apresentada a introdução da pesquisa, os objetivos e a estrutura geral da dissertação.

O Capítulo 2 é dedicado à metodologia TECLIM, sendo dividida em quatro seções. Na primeira seção é dada uma visão geral de como surgiu a metodologia, as etapas que a compõem e quais locais ela já foi aplicada. A segunda seção é dedicada aos trabalhos publicados a respeito da metodologia. Nas duas próximas seções é realizado um aprofundamento maior às duas ferramentas da metodologia utilizadas neste trabalho: o balanço hídrico reconciliado e o cálculo de um indicador de desempenho ambiental. Na terceira seção é feita a fundamentação teórica necessária para a aplicação do balanço de massa

reconciliado e a quarta seção é dedicada à fundamentação teórica e revisão bibliográfica dos conceitos fundamentais para o cálculo de um indicador de desempenho ambiental.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia TECLIM aprimorada. Este capítulo é dividido em três seções. A primeira seção explana sobre a melhoria sugerida para a metodologia TECLIM. A segunda seção relata sobre a aplicação da metodologia proposta em um estudo de caso em uma planta de metanol. Já a terceira seção é destinada aos resultados da aplicação da metodologia proposta neste trabalho associada a um indicador de desempenho ambiental existente na planta de metanol.

O Capítulo 4 consta das principais conclusões obtidas à luz dos resultados, assim como as recomendações a serem implantadas na planta de metanol e sugestões para continuidade do estudo na área.

Ao final são listadas as referências bibliográficas e os anexos existentes.

Capítulo 2

2 METODOLOGIA TECLIM

Neste capítulo será apresentada a metodologia TECLIM, foco de estudo desta dissertação. Ele se inicia com uma breve apresentação da Rede TECLIM e uma visão geral da metodologia de racionalização de água criada por eles. Na segunda seção está apresentado o estado da arte da metodologia TECLIM, referente à suas ferramentas e a trabalhos que surgiram devido a sua aplicação. Neste trabalho, o enfoque será dado a duas das ferramentas da metodologia: o balanço hídrico reconciliado, usando o conceito de qualidade de informação, e o cálculo de um indicador ambiental. Desta forma, é feito separadamente um melhor detalhamento de cada uma destas ferramentas nas seções subsequentes.

2.1 VISÃO GERAL DA METODOLOGIA TECLIM

A Rede de Tecnologias Limpas (TECLIM) é um programa concebido em 1997 pelos departamentos de engenharia sanitária e ambiental e de engenharia química da UFBA (KIPERSTOK, 2000). Seu principal objetivo é promover a aproximação entre indústria, governo e universidade para fomentar e implementar o uso de tecnologias limpas nas atividades produtivas em geral, especialmente no Estado da Bahia, a qual se localiza (KIPERSTOK, 1998, 2000; KIPERSTOK *et al.*, 2004). Tem como intenção também contribuir para o desenvolvimento sustentável, ao mesmo tempo em que favorece o crescimento da competitividade das empresas perante as pressões ambientais (KIPERSTOK, 2008; KIPERSTOK *et al.*, 2004; NASCIMENTO; KIPERSTOK, 2003).

Para atingir seus propósitos, o TECLIM realiza projetos de pesquisa, capacitação e suporte de informação, com extensão universitária na graduação e pós-graduação (KIPERSTOK, 1998; KIPERSTOK *et al.*, 2004; NASCIMENTO; KIPERSTOK, 2003). Um dos principais temas dos projetos cooperativos e de pesquisa da Rede é a água. A possível justificativa para isso está relacionada com o interesse despertado das grandes empresas no meio industrial da Região Metropolitana de Salvador (RMS) pela racionalização do uso de água devido às crises hídricas ocorridas nas últimas décadas, às pressões de órgão ambiental e

a crescente discussão a respeito da cobrança do uso de água (KIPERSTOK, 2008).

Os requisitos legais nacionais e estaduais estão intrinsecamente correlacionados com o surgimento desta onda de preocupação. A Lei da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) nº 9.433/1997 prioriza os recursos hídricos para consumo humano e a dessedentação de animais em caso de escassez, como também permite a outorga e a cobrança pelo direito de uso da água, seja pela captação ou pelo despejo de efluentes nas bacias hidrográficas (BRASIL, 1997). A Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece as condições e padrões de lançamentos de efluentes e de sistemas de tratamento de esgotos sanitários (CONAMA, 2011) e a Lei nº 9.605/98 de crimes ambientais estabelece sanções aqueles que poluem as águas (BRASIL, 1998). Além dos requisitos federais, na Bahia, o decreto nº 14.024/2012 aprova a regulação da Lei nº 10.431/2006 e Lei nº 11.612/2009 (BAHIA, 2012). A Lei nº 10.431/2006 dispõe sobre a Política Estadual de Meio Ambiente e de Proteção à Biodiversidade, relacionado à concessão de licenciamento ambiental (BAHIA, 2006), e a Lei nº 11.612/2009 dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, para promover o uso racional das águas superficiais e subterrâneas do estado (BAHIA, 2009).

Nesse âmbito, o TECLIM desenvolveu uma metodologia de otimização ambiental do uso de água em processos industriais. Esta se baseia nos princípios de Produção mais Limpa (P+L), cuja incorporação, adaptação e criação das suas etapas procuram atingir todos os níveis hierárquicos da empresa (OLIVEIRA *et al.*, 2016). O objetivo da metodologia é elevar o desempenho ambiental da organização pela mudança de percepção quanto ao uso eficiente da água e pela motivação na geração de ideias e oportunidades para a empresa (OLIVEIRA *et al.*, 2016). A sua aplicação possibilita atingir a minimização na fonte e na geração de efluentes, assim como um melhor controle e monitoramento hídrico.

Vários projetos de pesquisa em parceria com indústrias de diversos ramos do Polo Petroquímico de Camaçari já foram realizados para implantar a metodologia, como pode ser visualizado na Figura 2 (KIPERSTOK *et al.*, 2013a; KIPERSTOK; KALID; SALES, 2006; MARTINS *et al.*, 2010a; OLIVEIRA, 2011b; OLIVEIRA *et al.*, 2010; TECLIM, 2018). Mas a metodologia não se limita apenas a indústria. Ela já se expandiu e também já foi empregada com eficiência em diferentes tipos de edificações (TECLIM, 2018), incluindo no aeroporto de Salvador (FREIRE, 2011; KIPERSTOK; FREIRE; KALID, 2011). Embora não seja o cerne deste trabalho, além de aplicação para a água, a metodologia também pode contemplar seu uso com o foco em energia. Para este fim, a metodologia já foi aplicada em alguns projetos

com a indústria, tais como na indústria de petroquímicos básicos, na indústria de resinas termoplásticas e em uma metalúrgica de cobre primário (OLIVEIRA, 2011b).

Figura 2 - Aplicações já realizadas da metodologia TECLIM para uso racional da água



Atualmente a metodologia TECLIM é composta por 16 ferramentas listadas como segue (OLIVEIRA *et al.*, 2016):

1. Montagem do ecotime, com pessoas comprometidas, com formação multidisciplinar e com experiências e habilidades complementares;
2. Construção de uma parceria entre universidade e indústria;
3. Inserção dos conceitos P+L através da capacitação permanente e em larga escala;
4. Utilização de ferramentas de acompanhamento de projetos: *MS Project*, curva S, reuniões semanais de toda equipe, reuniões trimestrais com a direção da empresa (*Project Management Office – PMO*);
5. Medição e conhecimento das vazões das correntes através de balanço hídrico com reconciliação de dados (BHR), que considera a qualidade da informação (QI) de cada fonte de dados;

6. Desenvolvimento de modelos fenomenológicos ou empíricos para operações unitárias ou processos de tratamento, movimentação ou armazenamento de água;
7. Implementação de um banco de ideias (BI) que considera aspectos culturais, ambientais e econômicos na avaliação do potencial ou dificuldade para execução de uma oportunidade;
8. Implantação de um sistema de informações geográficas (SIG) georreferenciando as fontes produtoras e consumidoras de água dentro da empresa e no seu contexto regional;
9. Otimização a partir da aplicação de conceitos e instrumentos para a síntese de redes de transferência de massa e/ou energia;
10. Análise da inserção da empresa no ciclo hidrológico regional;
11. Elaboração de projetos conceituais de minimização do uso da água e geração de efluentes;
12. Auditoria de fontes de efluentes;
13. Análise de desvios ambientais;
14. Cálculo de indicadores ambientais e sua incerteza, a partir de balanço de massa reconciliado;
15. Acompanhamento e monitoramento do consumo de água através do sistema AGUAPURA;
16. Avaliação dos resultados e mudanças culturais que ocorreram após o término do projeto cooperativo.

Os principais resultados pela aplicação da metodologia, de maneira geral, foram: a comprovação da importância da parceria entre universidade e empresas, que permite a criação de um ambiente favorável à troca de experiência e a disseminação do conceito P+L; o desenvolvimento de uma cultura operacional pela formação e conscientização dos funcionários da empresa com o conceito P+L; apresentação e publicação de artigos em revistas, congressos e demais eventos acadêmicos; identificação de várias ideias de racionalização do uso de água, das quais deram origem a projetos conceituais sustentáveis; a identificação dos maiores consumidores de água e maiores geradores de efluentes dentro do limite de bateria da empresa; identificação de anomalias no consumo sem o conhecimento prévio pela empresa; eficiência na racionalização do uso de água, seja pela minimização do

consumo e geração de efluentes ou por práticas de reuso, reciclo ou tratamento de efluentes; e a estruturação da gestão ambiental pelo aprimoramento da análise crítica de indicadores. Dentre as dificuldades na implantação da metodologia estão: a disponibilidade de tempo dos operadores e engenheiro, a falta de dados técnicos, a divergência de informações, a falta de medição e/ou calibração dos medidores de vazão disponíveis e a dificuldade de atribuição de valores as concentrações máximas a um determinado poluente a ser considerado na água que entra nos processos.

É possível que em determinados projetos nem todos os instrumentos sejam utilizados ao mesmo tempo (OLIVEIRA *et al.*, 2010). Neste trabalho, o enfoque será dado à utilização do balanço hídrico reconciliado e ao cálculo de um indicador ambiental (ferramentas 5 e 14), após a parceria entre a universidade e uma empresa produtora de metanol ter sido firmada (ferramenta 2).

2.2 FERRAMENTAS DA METODOLOGIA TECLIM

Diversos são os trabalhos acadêmicos referentes à metodologia TECLIM e suas ferramentas. Através deles é possível perceber como gradativamente a metodologia vem sendo aperfeiçoada ao longo dos anos, e os resultados encontrados comprovam a eficiência da sua utilização. A Tabela 1 resume os trabalhos acadêmicos encontrados em relação aos 16 instrumentos da metodologia existentes até o momento e listados na Seção 2.1. O “X” caracteriza a parte correspondente da metodologia elucidada e/ou aplicada em cada trabalho.

Os trabalhos de Kiperstok (2008), Kiperstok *et al.* (2011, 2013a, 2013b), Kiperstok, Kalid e Sales (2006), Oliveira (2011b) e Oliveira *et al.* (2010) dedicaram-se em descrever sobre a metodologia e os instrumentos que o compunha no período, assim como os resultados obtidos pela sua implementação. Kiperstok *et al.* (2013a) e Oliveira (2011b) relatam também sobre as principais dificuldades encontradas da aplicação da metodologia. Os outros diversos trabalhos se dedicaram em explicar, detalhar e/ou aplicar uma ou mais partes dos instrumentos.

Ao realizar o levantamento do estado da arte da metodologia foi verificado que a maioria dos itens da metodologia se encontra consolidado nos trabalhos acadêmicos e aplicados em situações reais. Algumas poucas ferramentas ainda se encontram em fase inicial de aplicação ou ainda carecem de aprimoramento ou publicação, como é o caso das

A ferramenta 4, responsável pelo planejamento do projeto utilizando ferramentas computacionais como suporte, ainda cabem estudos comprovando sua importância e utilidade no desenvolvimento dos projetos. A ferramenta 5 (balanço hídrico reconciliado, considerando o conceito de qualidade de informação) já comprovou o seu êxito pela aplicação em várias plantas reais. Entretanto, a sua utilização levando em consideração a incerteza do conceito QI ainda não havia sido alvo de análise. A principal contribuição deste trabalho é atribuir pela primeira vez uma incerteza para a QI, de maneira a permitir avaliar a incerteza das correntes reconciliadas. A ferramenta 6, de desenvolvimento de modelos fenomenológicos ou empíricos, possui poucos trabalhos publicados enfatizando sua importância. A ferramenta 9 (otimização hídrica para a síntese de MEN) ainda não foi alcançada em nenhum dos projetos de parceria do TECLIM (KIPERSTOK *et al.*, 2013b, 2013a; KIPERSTOK; KALID; SALES, 2006; OLIVEIRA, 2011b), embora já tenha sido aplicada pela Rede TECLIM, como é demonstrado nos trabalhos de Moreira (2009) e Souza Neto *et al.* (2008a, 2008b). A ferramenta 13, criada como uma adaptação da metodologia de árvore de falhas para analisar os desvios ambientais de forma sistemática, exige publicações com os resultados encontrados. A ferramenta 14 (cálculo de indicadores ambientais e sua incerteza, a partir de balanço de massa reconciliado) possui trabalhos relatando a construção de indicadores, outros utilizando os dados reconciliados no indicador e outros avaliando a incerteza de indicadores ambientais. Contudo, sua aplicação integrando a utilização de dados reconciliados ao cálculo do indicador com a avaliação da sua incerteza ainda não foram publicados estudos. Um dos focos deste trabalho também foi realizar a aplicação dessa integração em um indicador de uma planta com exiguidade de medição. Por fim, é importante que novos trabalhos surjam enfatizando os resultados obtidos após o término dos projetos cooperativos (ferramenta 16).

A aplicação da metodologia TECLIM também ensejou novos estudos com as oportunidades identificadas com a metodologia, a exemplo de Oliveira-Esquerre *et al.* (2006), Oliveira-Esquerre *et al.* (2007), Oliveira-Esquerre *et al.* (2011), Narciso *et al.* (2011a) e Narciso *et al.* (2011b, 2012).

Oliveira-Esquerre *et al.* (2006) apresentam um estudo de verificação da implantação de uma proposta de reaproveitamento de água identificada no desenvolvimento do projeto cooperativo com uma unidade industrial do Polo Petroquímico de Camaçari. A proposta foi de avaliar o reuso de água da Bacia do Complexo Básico (BCB) e da Barreira Hidráulica do Polo (BHP) para diminuir a captação dos mananciais, o volume de efluente enviado para o

emissário submarino, assim como o gasto energético com a captação. A BCB tem como função acumular temporariamente os efluentes inorgânicos, juntamente com água da chuva, antes de enviar para o emissário submarino. A BHP faz parte do sistema orgânico e serve para impedir que eventual contaminação do Polo atinja os aquíferos e as nascentes dos rios. O estudo quantitativo verificou o volume estimado disponível para reuso de ambas as bacias. Pelo estudo da água da BCB foi identificado que mudanças operacionais das unidades industriais ou diluição da água possibilitaria o enquadramento de parâmetros críticos e o reuso. Já o reuso da BHP requer análises detalhadas dos riscos das substâncias presentes. Em Oliveira-Esquerre *et al.* (2007) o enfoque é dado apenas ao reuso da BCB. Eles acrescentam ao trabalho de Oliveira-Esquerre *et al.* (2006) recomendações iniciais para tornar viável o reuso e garantir a qualidade da água da BCB, das quais uma das propostas já havia sido incorporada na unidade em estudo e as outras estavam em avaliação. Já em Oliveira-Esquerre *et al.* (2011) o foco é dado no estudo da possibilidade de reutilização do sistema inorgânico, analisando três bacias de acumulação do Complexo Industrial, sendo uma delas a BCB. O estudo identificou a possibilidade de uma redução considerável no volume extraído de captação e na disposição de efluentes inorgânicos para emissário submarino pela recuperação dos efluentes inorgânicos das bacias.

Narciso *et al.* (2011a) parte do conceito QI e dos resultados da reconciliação de dados da metodologia TECLIM para criar uma abordagem de alocação ideal de novos sensores em redes de água em sistemas que raramente possuem medições. Dois modelos de otimização de programação não linear mista inteira (MINLP) foram propostas para máxima confiabilidade, usando os dados de QI e custos de sensores. O primeiro modelo é pela minimização de uma função objetivo composta por dados de QI após a reconciliação. O outro modelo é a maximização da QI Global como função objetivo. O artigo mostra que os métodos propostos são apropriados para obter os posicionamentos ótimos do novo conjunto de sensores de uma planta industrial através da aplicação em uma unidade de fertilizantes nitrogenados, na Bahia. Narciso *et al.* (2011b, 2012) validam a metodologia proposta em Narciso *et al.* (2011a). Para isso, eles realizam a comparação dos seus resultados com dois exemplos consolidados na comunidade acadêmica. A aplicação da metodologia em sistema com ausência de medição permitir atualizar a rede de medição levando em consideração as informações disponíveis, e não apenas alocando aleatoriamente. O modelo criado por Narciso *et al.* (2011a) também se mostra capaz de alocar instrumentos em sistemas com presença de

redundância de medição.

2.3 DETALHAMENTO DA FERRAMENTA 5 DA METODOLOGIA TECLIM: CONSTRUÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO RECONCILIADO (BHR) USANDO O CONCEITO DE QUALIDADE DE INFORMAÇÃO (QI)

Diferentes projetos do TECLIM/UFBA com empresas indústrias do Polo Petroquímico de Camaçari já aplicaram com sucesso a construção do balanço hídrico reconciliado na indústria, utilizando o conceito QI. Recentemente o balanço foi aplicado em dois estudos sem nenhum vínculo direto com o TECLIM. Um em 22 unidades da Petrobras para amparar a melhoria da gestão dos recursos hídricos, sendo 18 unidades termoeletricas e quatro usinas de processamento de gás natural (ZAIDEN *et al.*, 2017), e outro em um shopping Center em Espírito Santo, para aproveitamento de fontes de água não potável (GUZZO, 2017).

Os passos necessários, respectivamente, para a construção do balanço hídrico pela metodologia TECLIM são (MARTINS *et al.*, 2010a):

- Mapeamento das fontes consumidoras de água e geradoras de efluentes líquidos;
- Elaboração do balanço hídrico em uma planilha;
- Atribuição de um QI para cada corrente mapeada;
- Detalhando das restrições operacionais; e
- Aplicação da reconciliação de dados ao balanço hídrico usando as vazões mapeadas e QI.

A Figura 3 representa um resumo esquemático do fluxo de atividades para realizar os passos necessários do balanço hídrico em cada unidade. A composição do balanço hídrico inicia-se com o diagnóstico do ciclo hídrico do processo industrial em estudo, realizando a coleta e o levantamento de dados das correntes aquosas e identificando os tipos de água (água bruta, potável, clarificada, desmineralizada, vapor, condensado ou efluente), suas inter-relações e os principais equipamentos e instrumentos envolvidos com o uso de água no processo. Segundo Valle (2013), esse processo é bastante trabalhoso e dependente da

empresa, pois carece de uma interação com a equipe de engenharia e operação da planta para adquirir as informações necessárias, seja ela retirada de consulta a documentos da planta, como relatórios técnicos, fluxogramas e folhas de dados, ou de visitas técnicas e entrevistas. 50% a 60% do tempo gasto no desenvolvimento de um projeto são investidos na coleta, compilação e validação das informações coletadas (KIPERSTOK *et al.*, 2013b).

Figura 3 - Resumo esquemático para realizar o balanço hídrico



Fonte: Zaiden *et al.* (2017).

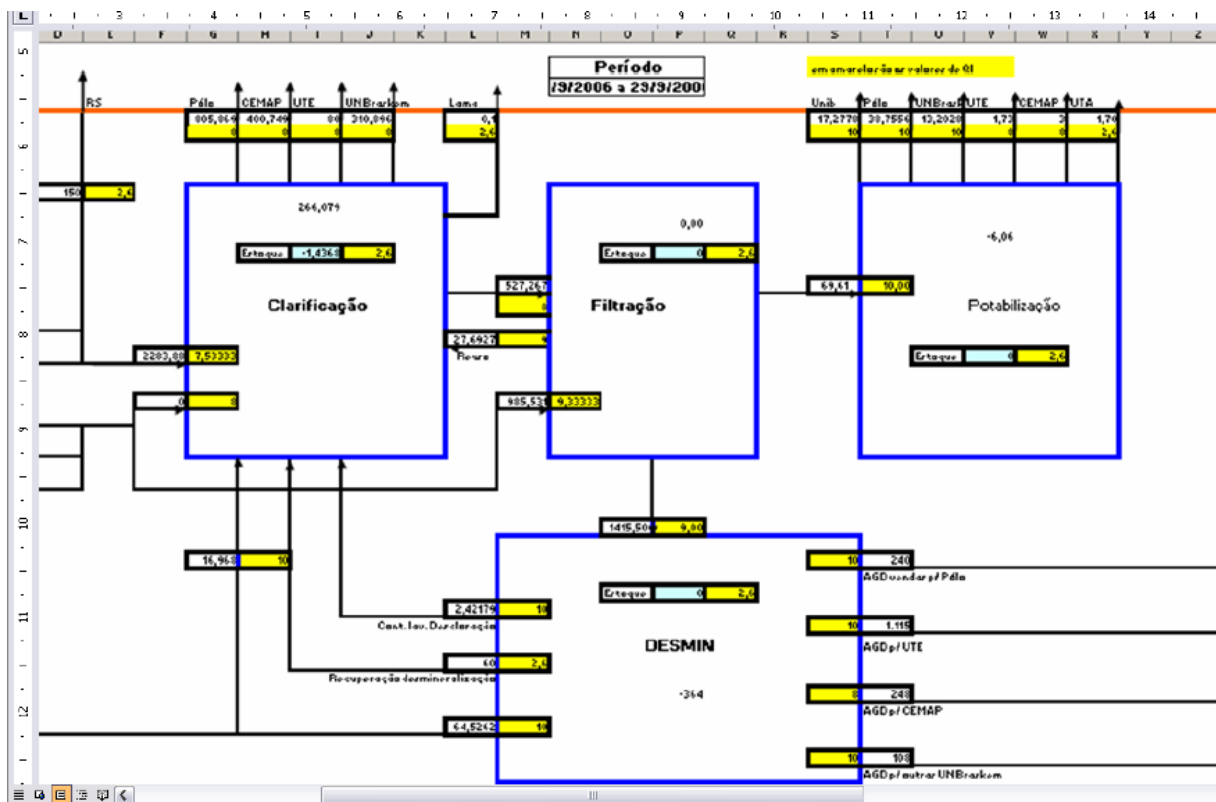
A topologia mapeada é, então, representada em forma de diagrama de blocos em uma planilha eletrônica, com o intuito de obter uma visualização macro do balanço global ou micro do balanço por unidade produtiva (KIPERSTOK, 2008; KIPERSTOK *et al.*, 2011, 2013b; SOUZA *et al.*, 2009). A Figura 4 mostra um exemplo macro realizado para uma empresa parceira.

A construção do diagrama de blocos é composta de vários elementos. O volume de controle (VC) é o volume de interesse estabelecido para o estudo ou análise, sendo limitada por uma determinada área, desde todo o *site* industrial a unidades específicas (FREIRE, 2011). Os blocos representam uma unidade de produção, área, processo ou equipamento. As linhas representam os fluxos das correntes e as setas estão associadas às direções de entrada e saída dos fluxos. O tipo de representação gráfica (coloração, contínuo e tracejado, etc.) representa o tipo de água (FONTANA *et al.*, 2004; KIPERSTOK *et al.*, 2011, 2013b; MARTINS *et al.*, 2010a; SOUZA *et al.*, 2009). Também é feita para cada bloco e/ou para

cada nó do processo, a diferença de entrada e saída para verificar se existe algum desequilíbrio. Essa diferença Δd pode ser calculada pela Equação 1, onde q_{out} é a vazão de saída e q_{in} é a vazão de entrada. Depois são adicionados os valores das correntes, das quais estas vazões devem ser compiladas em base contínua (KIPERSTOK, 2008).

$$\Delta d = q_{out} - q_{in} \quad (1)$$

Figura 4 - Exemplo de diagrama de blocos do balanço hídrico de uma empresa parceira



Fonte: Souza *et al.* (2009).

As variáveis medidas de processos necessárias para o balanço de massa, assim como quaisquer dados de medição, estão sujeitas a fontes de incertezas, advindos dos instrumentos, seres humanos e/ou do processo. Tal característica pode, por exemplo, ser responsável pela lei de conservação de massa não ser respeitada e, conseqüentemente, as equações de balanço normalmente apresentarem incoerências ($\Delta d \neq 0$). Para conseguir fechar o balanço ($\Delta d = 0$) e aumentar a consistência e confiança dos dados, uma importante ferramenta empregada é a reconciliação de dados.

A reconciliação de dados é uma técnica amplamente utilizada nos processos industriais (BENQLILOU, 2004; NARASIMHAN; JORDACHE, 2000). Seu objetivo é melhorar a confiança dos dados medidos, a fim de minimizar as incertezas pelo uso de redundâncias de medição. Seu procedimento consiste no ajuste ótimo das variáveis medidas de processo, obrigando os valores reconciliados a obedecerem às restrições explicitamente impostas (NARASIMHAN; JORDACHE, 2000). As principais vantagens da sua utilização são (BENQLILOU, 2004):

- Obtenção do valor mais provável para as variáveis não medidas;
- Ajuda na determinação da necessidade de instalação de instrumentos adicionais ou atualização dos existentes;
- Auxílio na localização ótima dos instrumentos de medição;
- Ajuda na detecção de falhas em instrumentos ou vazamento de processo;
- Obtenção de um melhor conhecimento das condições reais do processo;
- Estimativa da eficiência de equipamentos;
- Redução da incerteza de modelagem;
- Justificativa para priorizar tarefas de manutenção.

Matematicamente, a reconciliação de dados é um problema de otimização, onde as medidas reconciliadas podem ser definidas como o resultado da minimização de uma função objetivo, enquanto as restrições são satisfeitas. A função objetivo usualmente é o método de erros mínimos quadrados ponderados e os tipos de restrições dependem do escopo do problema. Elas podem ser lineares, bilineares e não lineares, e estarem em estado estacionário ou dinâmico (BENQLILOU, 2004; CROWE, 1996; NARASIMHAN; JORDACHE, 2000).

A técnica clássica de reconciliação para balanços de massa foi proposta por Crowe, Campos e Hrymak (1983). Eles desenvolveram um método chamado de matriz de projeção, cuja matriz elimina as variáveis não medidas para obter um conjunto contendo apenas as vazões medidas e redundantes. Este método é usado para problemas lineares e para processos que estão em estado estacionário. Sua formulação matemática pode ser representada pela Equação 2 e Equação 3. A Equação 2 refere-se à função objetivo do problema de otimização

quadrático e a Equação 3 representa as restrições de igualdade equivalentes ao balanço de massa. Sendo que: \mathbf{q}_r se refere ao vetor das vazões reconciliadas, \mathbf{q}_m ao vetor das vazões medidas, \mathbf{u}_m^2 é a matriz das covariâncias das vazões medidas (associada à incerteza de medição), \mathbf{g} é o vetor de restrições de conservação de massa, l é o índice de equações de restrições envolvidas e L é o número de equações referentes às restrições. O sobrescrito T representa a transposta da matriz e o sobrescrito $^{-1}$ refere-se à matriz inversa.

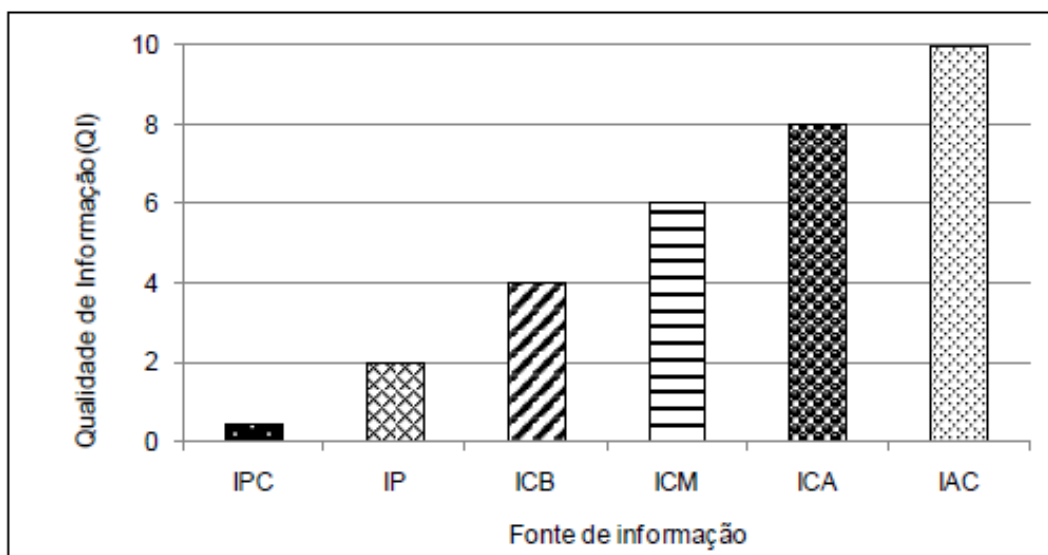
$$\min\{f(\mathbf{q}_r, \mathbf{q}_m) = (\mathbf{q}_m - \mathbf{q}_r)^T \cdot (\mathbf{u}_m^2)^{-1} \cdot (\mathbf{q}_m - \mathbf{q}_r)\} \quad (2)$$

$$\text{Sujeito à } \mathbf{g}_l(\mathbf{q}_r, \mathbf{q}_m) = 0 \quad l = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

No entanto, normalmente os processos industriais apresentam insuficiência de medição das suas correntes aquosas (KIPERSTOK *et al.*, 2013b; KIPERSTOK; KALID; SALES, 2006; NARCISO *et al.*, 2010; OLIVEIRA-ESQUERRE *et al.*, 2011, 2009a; OLIVEIRA, 2011b; SOUZA, 2011; SOUZA *et al.*, 2011). Os instrumentos de medição quando existentes são frequentemente tratados com descaso, sendo colocados em último lugar na lista de prioridades para manutenção e calibração (MATOS *et al.*, 2012). Segundo Matos *et al.* (2012), a água só recebe atenção quando de alguma forma passa a impactar de forma negativa e direta a qualidade e eficiência do produto final.

A falta de redundância de medição da planta torna inviável a aplicação das técnicas clássicas de reconciliação de dados em balanços hídricos. Para contornar esta dificuldade, o TECLIM criou o conceito de qualidade de informação (QI) (FONTANA *et al.*, 2004, 2005; KIPERSTOK *et al.*, 2003; MARTINS *et al.*, 2010a). A QI é um conceito subjetivo e adimensional, que permite aproveitar todas as fontes disponíveis para induzir a incerteza da variável associada. Ou seja, ela permite utilizar todos os tipos de informações, sejam ela de dados de projetos, relatórios operacionais, simulações de processos, variáveis medidas calibradas, não calibradas, de medição direta, indireta ou pontual, e até de estimativas teóricas ou de especialistas do processo (KIPERSTOK *et al.*, 2011, 2013b; MARTINS *et al.*, 2010a; OLIVEIRA, 2011b; SOUZA, 2011; SOUZA *et al.*, 2011). Por causa disto, ao utilizá-lo, há a modificação da definição de variável mensurada para variável mapeada (MARTINS *et al.*, 2010a; SOUZA *et al.*, 2011).

Figura 5 - Exemplo de escala QI

**Legenda:**

- IPC: informação pouco confiável – com base em estimativas grosseiras;
- IP: informação precária – simulação ou projeto antigos, medições grosseiras;
- ICB: informação com confiança baixa – baseada em relatórios operacionais e descritivos de processos desatualizados, estimativas de engenheiros e operadores que trabalharam na unidade ou instrumento descalibrado;
- ICM: informação com confiança média – informações de engenheiros e operadores pouco experientes e medição pontual nas condições normais de operação;
- ICA: informação com confiança alta – sistema de informação de processo validado pela operação ou engenharia, simulação ou projeto atuais, histórico de medições pontuais nas condições normais de operação;
- IAC: informação altamente confiável – medição com instrumento calibrado, simulação de processos validada pela engenharia, informações de engenheiros e operadores com muita experiência que estejam na ativa.

Fonte: Oliveira (2011b).

A depender da origem da informação, um número relativo à qualidade dos dados é concedido a cada um dos dados coletados (NARCISO *et al.*, 2011a; SOUZA *et al.*, 2011). Através deste valor quantitativo atribuído, uma escala numérica QI deve ser construída para cada processo a ser estudado, de modo a relacionar o grau de confiança ao método utilizado na sua obtenção. O valor máximo atribuído a QI é sempre a melhor fonte de informação disponível, como a medição por um totalizador de vazão calibrado e instalado em linha. Já o valor mínimo de QI refere-se às informações sem confiança (FONTANA *et al.*, 2004, 2005; MARTINS *et al.*, 2010a; SOUZA, 2011). Um exemplo de uma escala QI, construída para um processo industrial no qual já se aplicou tal método, pode ser vista na Figura 5. Cabe frisar que cada escala QI construída é específica para a planta em estudo, uma vez que os valores

QIs e suas atribuições com as fontes de informações são ajustadas a realidade do processo (OLIVEIRA, 2011b). O valor da QI é imputado, posteriormente, a cada corrente mapeada no diagrama de blocos. No exemplo da Figura 4, a QI representa os retângulos amarelos.

A escala QI estabelece que quanto maior a QI, maior a confiança no seu valor e conseqüentemente, menor a sua incerteza. Isto é, o conceito QI e a incerteza dos dados se relacionam de forma inversamente proporcional. Matematicamente, essa relação pode ser representada pela Equação 4, em que i se refere à vazão mapeada, K_i a constante de proporcionalidade, q_{Mi} as variáveis mapeadas e U_i a incerteza expandida (MARTINS *et al.*, 2010a).

$$QI_i = K_i \cdot \frac{q_{Mi}}{U_i} \quad (4)$$

A incerteza expandida U_i fornece o intervalo que contém o conjunto de valores que pode ser razoavelmente atribuído ao mensurando para uma probabilidade de abrangência definida. Ele é obtido pela multiplicação da incerteza de medição u_m pelo fator de abrangência k_i , demonstrado pela Equação 5 (BIPM *et al.*, 2008a).

$$U_i = u_m \cdot k_i \quad (5)$$

A junção da escala QI com a reconciliação de dados permite compor o balanço hídrico e aumentar o nível de confiança dos valores obtidos (OLIVEIRA, 2011b). Baseada na Equação 2 e usando a definição do conceito QI (Equação 4) e a definição da incerteza expandida (Equação 5), a função objetivo quadrática para o problema de reconciliação de dados de correntes aquosas desenvolvido pelo TECLIM é representada pela Equação 6, nas quais \mathbf{q}_{Ri} refere ao vetor das vazões reconciliados, \mathbf{q}_{Mi} ao vetor das vazões mapeadas e QI_i a qualidade de informação da vazão mapeada i .

$$\min \left\{ f(\mathbf{q}_{Ri}, \mathbf{q}_{Mi}) = (\mathbf{q}_{Mi} - \mathbf{q}_{Ri})^T \cdot \left(\frac{QI_i}{q_{Mi}} \right)^2 \cdot (\mathbf{q}_{Mi} - \mathbf{q}_{Ri}) \right\} \quad (6)$$

A aplicação da Equação 6 atribui à independência das variáveis mapeadas de um

balanço de massa, assim como é assumido por Crowe, Campos e Hrymak (1983) para as vazões mensuradas de cada corrente na Equação 2. A variável K_i da Equação 4 não aparece na Equação 6, pois Martins *et al.* (2010a) provam em seu trabalho que esta variável possui valor aproximadamente constante, de maneira que ela pode ser excluída da função objetivo do problema de minimização, sem modificar a solução do ponto ótimo do modelo.

A Equação 6 está sujeito às mesmas restrições lineares de balanço de massa da Equação 3 (MARTINS *et al.*, 2010a). Além dela, a metodologia considera também as restrições de não negatividade e restrições operacionais para uma melhor coerência com a realidade do sistema. As restrições de não negatividade evitam que vazões reconciliadas sejam negativas, enquanto que as restrições operacionais são os valores de vazões mapeadas com base na imposição das condições do processo (MARTINS *et al.*, 2010a). Portanto, a Equação 6 fica sujeito às restrições da Equação 7, Equação 8 e Equação 9, em que \mathbf{A} é a matriz de incidência, \mathbf{lb} é a matriz de limites inferiores operacionais e \mathbf{ub} é a matriz de limites superiores operacionais. A Equação 8 é outra maneira de escrever a Equação 3. A matriz de incidência \mathbf{A} é composta das equações do balanço de massa, onde os elementos são iguais a 1, -1 ou 0 a depender se, respectivamente, a corrente é de entrada, saída ou não participante do balanço de massa.

$$\mathbf{q}_{Ri} \geq 0 \quad (7)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{q}_{Ri} = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{lb} \leq \mathbf{q}_{Ri} \leq \mathbf{ub} \quad (9)$$

Assim como para as reconciliações de dados clássicas, a reconciliação da metodologia TECLIM pode ser solucionada usando ferramentas de otimização, como por exemplo, o *software* MATLAB (FONTANA *et al.*, 2004; SOUZA, 2011), o *solver* do *software* Excel (FREIRE, 2011; GUZZO, 2017) ou o *software* EMSO (MARTINS *et al.*, 2010a; MATOS *et al.*, 2010; NARCISO *et al.*, 2010). Para evitar problemas de indeterminação na otimização, a QI mínima não pode ser zero, assim como o valor das correntes aquosas. No caso destas últimas, devem-se substituir as vazões nulas por valores pequenos (FONTANA *et al.*, 2004).

A avaliação dos resultados encontrados da reconciliação de dados é calculada pelo desvio percentual entre o valor mapeado e o valor reconciliado, dado pela Equação 10 (MARTINS *et al.*, 2010a).

$$\Delta p (\%) = \frac{|q_{M_i} - q_{R_i}|}{q_{M_i}} \cdot 100 \quad (10)$$

O balanço hídrico reconciliado construído deve-se, então, passar pela engenharia da empresa em estudo para decidir se estão fidedignas ao processo. Caso não satisfaça a realidade, melhorias nas informações das vazões e na escala QI precisam ser feitas para atingir uma escala QI e um balanço hídrico mais representativo ao processo.

A grande diferença entre usar o método desenvolvido pelo TECLIM e os métodos tradicionais de reconciliação de dados é a possibilidade de realizar a reconciliação sem qualquer redundância de medição, mas reduzindo as incertezas associadas ao sistema de medição e fechando o balanço com desequilíbrio nulo similarmente à reconciliação clássica (MARTINS *et al.*, 2010a; NARCISO *et al.*, 2011b). Além desta, outra vantagem da sua realização é permitir detectar erros na ordem de grandezas de correntes (FONTANA *et al.*, 2004) e revelar incoerências que não são normalmente detectadas pelos sistemas de medição das empresas (KIPERSTOK *et al.*, 2013b; OLIVEIRA, 2011b). Uma incerteza significativa na medição de uma vazão advinda de um instrumento calibrado e a identificação de medições trocadas de correntes aquosas no SDCD são dois dos exemplos desses tipos de incoerências já encontrados em projetos anteriores da Rede TECLIM (KIPERSTOK *et al.*, 2013b).

Depois de validado o balanço hídrico reconciliado, a apresentação das incertezas associadas das vazões reconciliadas é imprescindível para endossar credibilidade os dados obtidos. Assim como para os valores medidos, os valores das variáveis reconciliadas não possuem apenas um único valor para um dado resultado encontrado, mas sim um infinito número de valores dispersos ao redor da melhor estimativa provável do resultado, que são consistentes com as informações disponíveis.

Os trabalhos de Souza *et al.* (2011) e Souza (2011) se utilizaram do método dos multiplicadores de Lagrange nas equações de reconciliação de dados clássica (Equação 2 e Equação 3) e do auxílio da lei de propagação de incertezas multivariáveis para explicitar as incertezas associadas às vazões reconciliadas. Assim, eles definem que as incertezas-padrão

reconciliadas podem ser calculadas pela diagonal principal da matriz de covariância, Equação 11 e Equação 12, em que I é a matriz identidade, S_m^T é a matriz transposta de sensibilidade das variáveis reconciliadas em relação às variáveis medidas, u_m^2 é a matriz das covariâncias das vazões medidas, u_r^2 é a matriz de covariância associada às vazões reconciliadas e A é a matriz de incidência.

$$S_m^T = (I - u_m^2 \cdot A^T \cdot (A \cdot u_m^2 \cdot A^T)^{-1} \cdot A) \quad (11)$$

$$u_r^2 = S_m^T \cdot u_m^2 \cdot S_m \quad (12)$$

Ao utilizar a reconciliação de dados da metodologia TECLIM, a matriz u_m da Equação 11 e Equação 12 pode ser construída pela definição da QI (Equação 4) (NARCISO *et al.*, 2011b, 2012; SOUZA, 2011; SOUZA *et al.*, 2011). Entretanto, ao usar a Equação 4, é preciso saber o valor da constante de proporcionalidade K_i , que é específico para cada sistema estudado (SOUZA, 2011). Além disso, o cálculo do K_i é dependente do conhecimento da incerteza expandida relativa de correntes mássicas medidas do sistema, como demonstrado em Martins *et al.* (2010a). Com o propósito de tornar o cálculo das incertezas reconciliadas mais genérica e robusta para quando não há redundância de informação, este trabalho propõe uma metodologia para avaliar as incertezas das vazões reconciliadas, sem precisar conhecer o valor de K_i . Esta metodologia tem como primórdio o impacto da avaliação das incertezas do conceito QI, parâmetro ainda não analisado anteriormente.

2.4 DETALHAMENTO DA FERRAMENTA 14 DA METODOLOGIA TECLIM: CÁLCULO DE INDICADORES DE DESEMPENHO AMBIENTAL (IDA), USANDO DADOS RECONCILIADOS E AVALIANDO SUA INCERTEZA

Os indicadores ambientais são os resultados mensuráveis da gestão de uma organização em relação à sua qualidade ambiental no processo produtivo em um determinado período (CUNHA, 2001). Na sua construção é preciso levar em consideração a confiabilidade, disponibilidade e a validação científica e estatística dos dados coletados já que decisões são tomadas com base neles (OLIVEIRA-ESQUERRE *et al.*, 2009b). Contudo, não são muitos os

trabalhos que avaliam o impacto da qualidade dos dados que os constituem, bem como a incerteza de indicadores de desempenho ambiental, apesar de serem fundamentais para uma tomada de decisão mais assertiva (BERTRAND-KRAJEWSKI; BARRAUD; BARDIN, 2002; MENDES *et al.*, 2011). Neste âmbito, um dos objetivos específicos deste trabalho é avaliar as incertezas de um indicador para comprovar a sua importância nas decisões tomadas pelas empresas, utilizando, para isso, dados advindos de balanços reconciliados, cujas incertezas foram avaliadas.

Para melhor explanação, esta seção foi dividida em três subseções. Primeiramente são caracterizados os indicadores de desempenho ambiental (IDA). Em seguida são apontados os trabalhos existentes que consideram a importância da qualidade dos dados e da avaliação da incerteza em IDAs, e por fim, na última subseção são denotados alguns trabalhos que usam IDAs relacionados à água.

2.4.1 Indicadores de Desempenho Ambiental (IDA)

A NBR ISO 14031/2015 é a norma responsável pelas orientações para a avaliação de desempenho ambiental (ADA) através da adoção de indicadores de desempenho (ABNT, 2015b). A norma divide os indicadores de desempenho em duas categorias: os indicadores de condições ambientais (ICA) e os indicadores de desempenho ambiental (IDA). Os ICAs fornecem as informações sobre a qualidade do meio ambiente que podem ser impactadas, reais ou potencialmente, pelas organizações. A aplicação de ICA é normalmente função das agências governamentais. Os IDAs são apropriados para fornecer informações relacionadas à gestão das técnicas adotadas e aspectos ambientais das organizações. Eles são subdivididos em: indicadores de desempenho do gerenciamento (IDG) e de desempenho operacional (IDO). Os IDGs propiciam informações sobre os esforços gerenciais que influenciam o desempenho ambiental das organizações, enquanto que os IDOs expressam informações sobre o desempenho ambiental dos processos operacionais das organizações. A Tabela 2 mostra alguns exemplos dos indicadores de desempenho. A Figura 6 resume como os tipos de indicadores de desempenho se correlacionam.

Ambos os indicadores de desempenho ambiental (IDGs e IDOs) são cruciais para medir e monitorar o desempenho ambiental de longo prazo das organizações (TAM; TAM; TSUI, 2004). Segundo Jasch (2000), os indicadores de desempenho ambiental oferecem um

conjunto de dados chaves, abrangentes e concisos das informações ambientais, que permitem os tomadores de decisão das empresas obterem uma visão geral relevante do seu progresso, bem como identificar áreas problemáticas.

Tabela 2 - Exemplos de indicadores para a ADA

CLASSIFICAÇÃO ISO 14031		
Categoria	Tipo	Exemplos
IDA	IDG	Sucesso das iniciativas de prevenção da poluição
		Percentual de empregados treinados versus o percentual de empregados que precisam ser treinados
		Número de sugestões de melhorias ambientais apresentadas pelos empregados
		Número e gravidade das violações contra os requisitos da organização
		Economia obtida através da redução do uso dos recursos, da prevenção de poluição ou da reciclagem de resíduos
	IDO	Materiais processados, reciclados ou reutilizados
		Água por unidade de produto
		Água de reuso
Matérias-primas reutilizadas no processo de produção		
ICA	Concentração de um contaminante específico na água subterrânea ou na água superficial	
	Turbidez em um curso d'água adjacente à instalação, medida a jusante e a montante do ponto de lançamento da água servida	
	Mudança no nível do lençol d'água subterrâneo	

Fonte: ABNT (2015a).

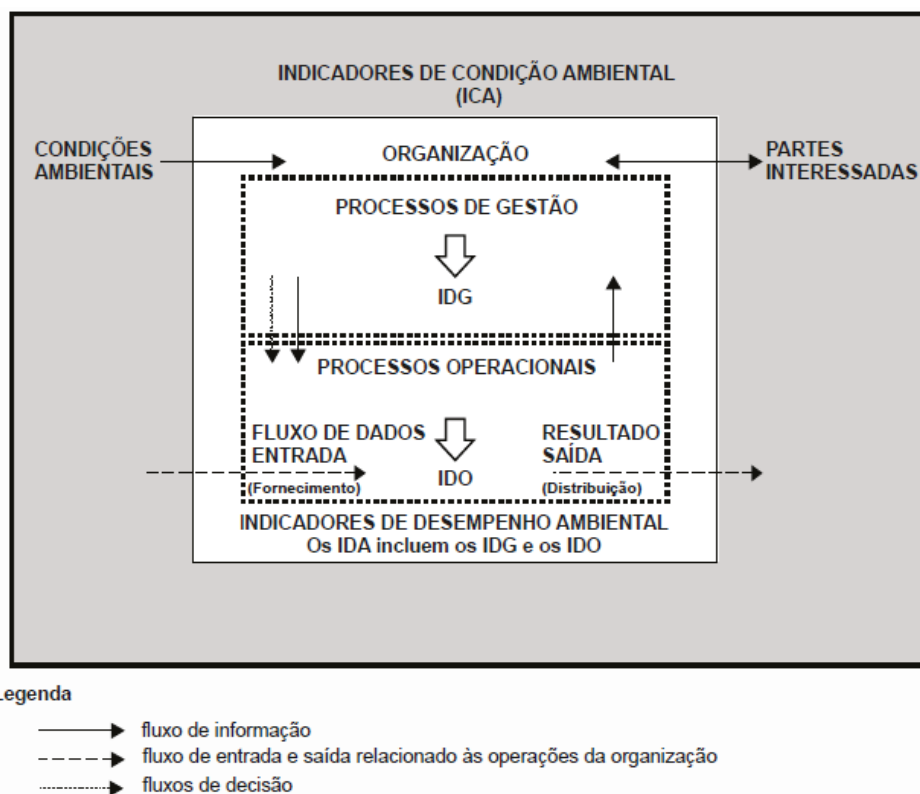
Para a elaboração de um indicador de desempenho ambiental é necessário definir os seguintes critérios (VELEVA; ELLENBECKER, 2001):

- Uma unidade de medida – Esta é a métrica usada no cálculo de um indicador, como quilogramas, toneladas, porcentagem, horas, etc.;
- Tipo de medição – Dependendo do seu tipo de utilização, eles podem ser expressos em medições absolutas ou relativas (VELEVA; ELLENBECKER, 2001) como também, agregadas ou ponderadas (JASCH, 2000). Medidas

absolutas representam somente um tipo fixo de escala de medida métrica. Medidas relativas servem para comparar parâmetros de dois tipos diferentes. Os indicadores agregados representam dados do mesmo tipo, mas de diferentes fontes. Os indicadores ponderados conferem certo peso às medidas de desempenho, mostrando a importância relativa de um indicador sobre o outro;

- Período de medição – O período para rastreamento e cálculo de um indicador;
- Abrangência da medida – Determina o limite, ou seja, o quanto uma empresa deseja ir para medir os indicadores.

Figura 6 - Integração entre a gestão organizacional, operacional e a condição do meio ambiente



Fonte: ABNT (2015a).

Além disso, para os indicadores de desempenho operacionais (IDOs) relacionados à gestão do consumo de água e da geração de efluentes, a Rede TECLIM desenvolveu uma metodologia para construir e acompanhar esses indicadores (OLIVEIRA-ESQUERRE *et al.*, 2009a). A metodologia consiste em: analisar o processo focado no consumo de água e geração

de efluentes, usando o levantamento e estudo das correntes aquosas pelo balanço hídrico; propor indicadores ecoeficientes, construídos com as características descritas por Veleza e Ellenbecker (2001); coletar a estruturação dos dados que serão utilizados; realizar uma análise estatística destes dados através da identificação dos fatores ambientais e operacionais que influenciam os indicadores; e construir uma plataforma eletrônica hierarquizada para proporcionar o acompanhamento dos indicadores pelos técnicos da planta. Oliveira-Esquerre *et al.* (2009b) utiliza-se desta metodologia para avaliar e tratar estatisticamente, por meio de séries temporais, gráficos de matrizes e análise de correlação, os dados da proposição de dois indicadores estruturados relacionados ao consumo de efluentes de uma planta petroquímica.

Entretanto, a aplicação dessa metodologia desenvolvida para IDOs pela Rede TECLIM é necessário possuir uma série histórica de dados. Oliveira-Esquerre *et al.* (2009a) citam em seu trabalho que a análise de vários indicadores propostos não pôde ser feita devido à limitação da falta de medição de consumo de água e geração de efluentes da empresa. Neste trabalho, os métodos propostos por Oliveira-Esquerre *et al.* (2009a) para a construção de indicadores hídricos também não foram utilizados no estudo de caso devido à falta de medição e série histórica hídrica, como também ao fato do período definido não produzir uma análise estatística segura das possíveis influências de uma variável sobre outra quando há medição. A planta já possui incorporada no seu SGA um indicador de consumo de água e este foi o indicador trabalhado para contribuir com o gerenciamento hídrico.

Todavia, Oliveira-Esquerre *et al.* (2009b) recomendam a utilização de outras ferramentas que não foram consideradas no seu trabalho, que inclui entre elas a estimativa de incertezas de indicadores. Esta avaliação da incerteza de um indicador será empregada neste estudo, e melhor esclarecida teoricamente na Subseção 2.4.2 e aplicada na Seção 3.3.

2.4.2 Credibilidade de um IDA

Definido as características do indicador de desempenho ambiental (IDA), a base de dado para sua construção deve ser coletada regularmente (ABNT, 2015b). Uma grande dificuldade encontrada quando se propõe o uso de indicadores é a má qualidade destes dados (TSOULFAS; PAPPIS, 2008). Entretanto, um indicador só pode fornecer uma representação confiável do desempenho ambiental se for baseado em dados de boa qualidade (PEROTTO *et al.*, 2008). Isto é, para uma interpretação correta de um IDA, é essencial ter o conhecimento

de como o indicador é construído e estar ciente das limitações da qualidade de cada um de seus componentes (MENDES *et al.*, 2011).

Uma maneira de obter dados com melhor qualidade para compor um IDA é retirá-los de balanços reconciliados. Conforme Oliveira-Esquerre *et al.* (2009a), o balanço reconciliado possibilita o cálculo e análise mais confiável de indicadores, especialmente quando há carência de medição. Exemplos de indicadores elaborados a partir de dados reconciliados podem ser encontrados dos trabalhos de Freire (2011), Kiperstok, Freire e Kalid (2011), Guzzo (2017) e Pitarch *et al.* (2017). Freire (2011) e Kiperstok, Freire e Kalid (2011) usam os resultados do balanço hídrico reconciliado do TECLIM nos indicadores de consumo por passageiro e de consumo por usuário para obter o desempenho do Aeroporto de Salvador e poder compará-lo com o desempenho de outros aeroportos. Guzzo (2017) utilizou-se de dados obtidos do balanço hídrico reconciliado do TECLIM, como também informações coletadas referentes ao número de funcionários, fluxo de pessoas por dia e área construída, para calcular os indicadores de consumo relacionados à conservação de água de um shopping Center. Pitarch *et al.* (2017) utilizam dados reconciliados para obter dados confiáveis do consumo de vapor e evaporação em um indicador de consumo de vapor fresco (utilidade) por unidade de água evaporada (produto) de um processo real de evaporação industrial de propriedade da Lenzing AG.

Além da qualidade dos dados que compõe o indicador, outro fator importante que precisa ser analisado para garantir confiabilidade ao IDA é a avaliação da sua incerteza. Segundo Mendes *et al.* (2011), a informação da incerteza associada aos indicadores de desempenho ambiental permite tomadas de decisão mais assertiva, a interpretação correta dos resultados e a comparabilidade de suas medições quanto a limites de tolerância estabelecidos por legislação.

Mendes *et al.* (2011) descrevem uma metodologia para ser usada na avaliação da incerteza de indicadores. Eles a utilizam em uma indústria petroquímica no Brasil para avaliar as incertezas de um indicador de energia, bem como dos componentes envolvidos para seu cálculo. A avaliação da incerteza do indicador mostrou um valor de incerteza maior que o apropriado para o uso pretendido. Para reduzi-la, foi feita tentativas de apontar as características mais marcantes que exigiam investimentos em recursos humanos e econômicos, como a melhoria nas medições e a implantação de novos medidores em pontos críticos. Já em Silva (2011), ele mostra além da avaliação da incerteza associada de consumo

de energia pela produção de Mendes *et al.* (2011), a avaliação de um indicador de geração de efluentes pela produção. Em ambas as análises, os resultados mostram que as avaliações das incertezas mensais são significativas e não podem ser assumidas como desprezíveis.

Além dos dois trabalhos desenvolvidos pela metodologia TECLIM de Mendes *et al.* (2011) e Silva (2011), apenas os trabalhos descritos a seguir foram encontrados em pesquisas bibliográficas realizadas sobre o assunto.

Bertrand-Krajewski, Barraud e Bardin (2002) avaliaram as incertezas relacionadas aos indicadores de desempenho em dois estudos de caso sobre instalações de águas pluviais. O primeiro estudo diz respeito ao efeito da incerteza analítica na avaliação de um único indicador de desempenho definido como a eficiência anual de interceptação de um tanque de armazenamento e decantação de águas pluviais. O segundo estudo de caso está relacionado ao efeito das incertezas de modelagem na avaliação de vários indicadores de desempenho e no impacto destes na escolha da estratégia de manutenção de um tanque de infiltração de águas pluviais. Em ambos os estudos de caso, as incertezas mostraram-se ser muito significativas e necessárias de ser contabilizadas no cálculo e no uso de indicadores de desempenho. Desse modo, segundo os autores, a negligência de fornecer a incerteza ou o intervalo de abrangência do indicador estabelece uma base fraca para as tomadas de decisão.

Perotto *et al.* (2008) avaliam a importância de incerteza associada a dois índices de descargas residuais de uma autoridade local, envolvidos com a implementação de um SGA. Os resultados mostraram que a compreensão da incerteza de medição é essencial para a comparação eficiente de dados e uma correta avaliação do desempenho ambiental. Eles afirmam também que a conexão entre a incerteza de medição e o indicador pode ser um diferencial competitivo, já que os IDAs são usados para *benchmarking* e IDAs com menor grau de incerteza não transparece confiança para os tomadores de decisão. Qualquer decisão sobre tomar ou não uma ação corretiva e qual seria a ação corretiva apropriada perpassa pela crítica de forma mais suscetível ao passo que aumenta a incerteza. Além disso, os autores declaram que os indicadores de desempenho ambiental podem ser fortemente afetados pela incerteza dos dados brutos a tal ponto que os resultados podem ser insignificantes, ou mesmo enganosos. Assim, a natureza e as características dos dados brutos devem ser claramente consideradas ao estimar a incerteza de um indicador.

D'Emilia *et al.* (2015) propõem uma metodologia para endossar a abordagem sistêmica de um sistema de gestão energética (EMS). Eles sugerem o uso da avaliação da

incerteza de um indicador de desempenho energético (EnPI) como parâmetro quantitativo: do nível de conscientização de questões e oportunidades ligadas ao desenvolvimento de um EMS em uma situação específica; da capacidade de definir as estratégias referentes à melhoria da eficiência energética e à avaliação da eficácia da ação; e da economia de energia que pode ser garantida antecipadamente, em relação a uma meta de melhoria pré-definida. A fim de verificar a generalidade e eficácia da metodologia proposta, a metodologia foi aplicada em dois estudos de casos em setores industriais diferentes e em indústrias com diferentes esforços para implementação e desenvolvimento de um EMS. Em ambos os casos, a metodologia permitiu desenvolver considerações úteis para planos de melhoria da energia de forma eficaz e realista, como também permitiu destacar a viabilidade técnica e econômica das melhorias, tendo em vista a possibilidade de garantir a consecução da meta prevista com nível satisfatório de confiabilidade. Além disso, a aplicação recursiva da metodologia em cada caso permitiu demonstrar como a incerteza do EnPI é um parâmetro resolvível e confiável para detectar o status do EMS.

Assim, no trabalho de D'Emilia *et al.* (2015), a utilização da avaliação e o controle da incerteza dos EnPIs demonstraram como seu uso permite aumentar o nível de transparência do desempenho energético em termos dos aspectos que afetam o consumo de energia. Segundo os autores, embora não seja trivial a avaliação da incerteza, ela serve como: parte do procedimento de verificação de dados; parte da compreensão e conhecimento mais profundo dos processos sobre controle; útil para assegurar a adequação dos dados para fornecer informações confiáveis; e é um parâmetro que traz consigo os aspectos dinâmicos dos cenários examinados. De acordo com eles também, o nível de confiança no processo de tomada de decisão depende do peso da incerteza sobre o EnPI em relação à melhoria do objetivo no EnPI que se pretende alcançar. Quanto mais a incerteza do EnPIs foi reduzida, maior é a possibilidade de escolher como alto nível de confiança a obtenção das ações adequadas para a melhoria prevista.

2.4.3 IDA envolvendo água

O uso de indicadores de desempenho ambiental (IDAs) envolvendo água é comum. Além dos trabalhos já mencionados na Subseção 2.4.2, exemplos de IDAs têm sido citados em alguns outros estudos e para diferentes setores, como será relatado a seguir. Mas, nenhum

dos exemplos referidos nesta subsecção faz a avaliação da incerteza do indicador.

Ren (2000) desenvolveu IDAs para o processamento úmido têxtil. Seu consumo de água é um dos indicadores escolhidos para melhorar a eficiência interna. Cunha (2001) avaliou o indicador de desempenho operacional (IDO) de consumo de água em uma indústria de processamento de alumínio em Tubarão e comparou com outras unidades da mesma empresa para realizar um *benchmarking*.

Tam, Tam e Tsui (2004) desenvolveram um método de avaliação do desempenho ambiental de empreiteiras sobre medida para as construções de Hong Kong, chamado de Avaliação de Construção Verde (GCA). O GCA inclui treze indicadores de desempenho, onde a ponderação para cada critério é feita pela lógica *fuzzy*. Dentre os indicadores de desempenho que fazem parte do GCA e foi elaborado pela consulta ao setor, está incluso o IDO referente ao controle de poluição da água. Este IDO tem uma ponderação de 7,44% dos 49,54% referente aos sete indicadores de desempenho operacional. Dentre os sub indicadores propostos para o tema estão o monitoramento: do uso de água e promoção da conservação da água; do sistema de reutilização e reciclagem de água; da coleta e tratamento de águas residuais e de outras medidas relacionadas à poluição da água.

Rao *et al.* (2006) definem o indicador de consumo de água e outro de efluente líquido como parte dos indicadores ambientais analisados empiricamente, nas Filipinas, para demonstrar que usos adequados de indicadores ambientais representam o desempenho ambiental em pequenas e médias empresas.

Puig, Wooldridge e Darbra (2014) apontam os principais indicadores de desempenho ambiental que são viáveis para ser usados como ponto de partida para a melhoria do monitoramento e gestão sustentável nos portos europeus. O indicador de consumo de água, embora não tenha sido classificado com uma questão prioritária por todos os profissionais envolvidos na pesquisa feita, foi mantido como um dos três indicadores operacionais portuários de alta prioridade, devido à possibilidade de realizar sua coleta e demonstrar compromisso de redução e administração desse recurso.

Turki, Medhioub e Kallel (2017) avaliam a eficácia do sistema de gestão ambiental de uma empresa de alimentos da Tunísia, especializada na produção de refrigerantes, água mineral e sucos de frutas, através de indicadores de desempenho ambiental. Os IDAs avaliam o estado de conformidade da empresa com os requisitos regulamentares nacionais, como também, avaliam a eficiência da gestão de riscos e da saúde humana. O IDO de consumo de

água aparece como um dos indicadores de monitoramento para reduzir a significância dos impactos ambientais. Pelo indicador, a empresa reduziu o consumo por ano ao tomar ações de reutilização das águas residuais após o tratamento sobre certas condições e pela coleta de água da chuva para pulverização de áreas verdes.

No estudo de caso deste trabalho, o sistema de gestão ambiental da planta de metanol faz uso de um indicador de consumo de água (ICAM). Ele é composto pelo somatório dos volumes de água clarificada e desmineralizada em relação à vazão mássica de produção de metanol cru, em um mesmo período de tempo. Uma atenção foi dada a este indicador devido à sua relevância na contribuição para um melhor gerenciamento hídrico da planta. Seu cálculo foi reestruturado para utilizar dados mais confiáveis. Isto é, o indicador foi planejado para usar dados reconciliados. Além disso, uma avaliação dos impactos das incertezas associadas também foi realizada para viabilizar uma análise mais adequada das metas e medidas cabíveis. Dessa forma, a análise do indicador ICAM visa unir a relevância da utilização de um indicador de consumo de água à importância da qualidade dos dados que compõe o indicador para a melhor administração deste recurso. Um melhor detalhamento do ICAM, assim como os resultados obtidos da sua análise, será apresentado na Seção 3.3.

Capítulo 3

3 METODOLOGIA TECLIM APRIMORADA

Este capítulo é reservado para apresentar a metodologia TECLIM aprimorada, desenvolvida neste trabalho. A primeira seção explana sobre melhorias sugeridas para a metodologia TECLIM existente. A segunda seção exhibe os resultados gerados pela aplicabilidade da metodologia TECLIM aprimorada em um estudo de caso realizado em uma planta de metanol no Polo Petroquímico de Camaçari. Por fim, a terceira seção é dedicada ao emprego da metodologia TECLIM aprimorada agregada à análise de um indicador de desempenho ambiental. Neste último são explorados os resultados da avaliação da incerteza de um indicador existente na planta de metanol.

3.1 PROPOSTA DE ROBUSTEZ NA METODOLOGIA TECLIM PELA INCLUSÃO DA AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DA QI E DAS VAZÕES RECONCILIADAS

Como mencionado na Seção 2.3, os trabalhos de Souza *et al.* (2011) e Souza (2011) explicitam o cálculo das incertezas-padrão reconciliadas através da Equação 11 e Equação 12. A aplicação destas equações quando o processo possui falta de medição dependem da definição da QI (Equação 4), enquanto que para usar a Equação 4 é preciso conhecer o valor da constante de proporcionalidade K_i . K_i é dependente do conhecimento da incerteza expandida relativa de correntes mássicas medidas do sistema (MARTINS *et al.*, 2010a). Deste modo, com o intuito de tornar o cálculo das incertezas reconciliadas mais genérica e robusta para quando não há redundância de informação, este trabalho propõe uma metodologia para avaliar as incertezas das vazões reconciliadas, sem precisar conhecer o valor de K_i .

O conceito QI, criado pela Rede TECLIM e utilizado na construção do balanço hídrico reconciliado com exiguidade de medição, é construído empiricamente para cada processo (MARTINS *et al.*, 2010a). Por causa disto, ele possui uma incerteza associada à escolha do seu valor. A partir da premissa de que esta incerteza pode não ser desprezível, uma estimativa da incerteza da QI deve ser feita com base na escala QI construída. Esta estimativa integrada com a reconciliação de dados da metodologia TECLIM e com a avaliação da

incerteza pelo método de Monte Carlo (BIPM *et al.*, 2008b) fornecem as estimativas das incertezas das vazões reconciliadas.

O método de Monte Carlo (MMC) é um procedimento numérico para prever as propriedades estatísticas da grandeza de saída de um sistema a partir das informações sobre as distribuições de probabilidades (PDFs) das grandezas de entrada (BIPM *et al.*, 2008b; TAN; FOO; MANAN, 2007), cujas incertezas são conhecidas. A base da sua aplicação caracteriza-se pela determinação do modelo matemático de medição e a definição de um número de interações ou número de amostras aleatórias (M) para a construção das PDFs das grandezas de entrada. Através disto, o princípio básico do método consiste em retirar M amostras das PDFs conjuntas das grandezas de entrada e propagá-las através da função de medição, para produzir, então, M amostras da grandeza de saída (BIPM *et al.*, 2008b; MARTINS *et al.*, 2010b). Desta forma, o método consiste em simulações probabilísticas, cuja finalidade é definir a função densidade de probabilidade (PDF) empírica ou amostral do mensurando e, conseqüentemente, a estimativa do mensurando, a incerteza-padrão associada a esta estimativa e o intervalo de abrangência para uma dada probabilidade de abrangência desejada (BIPM *et al.*, 2008b; COX; HARRIS, 2003).

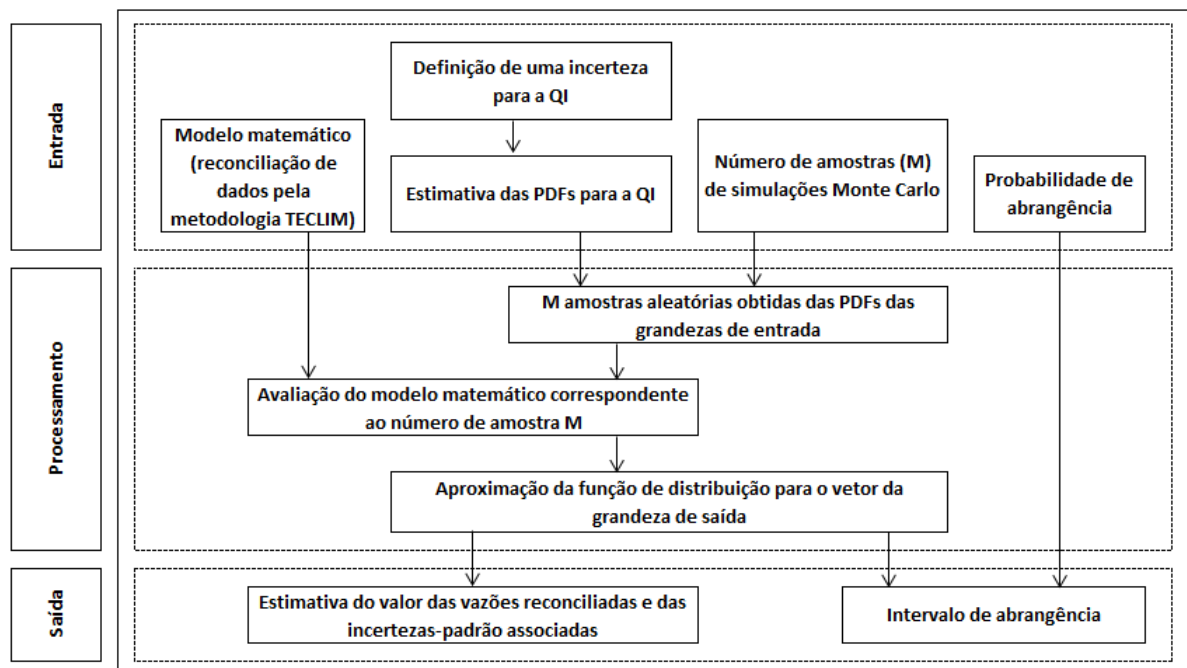
O método de Monte Carlo é de simples e de fácil implementação em um *software* computacional e pode ser empregado independente de qual seja o comportamento do modelo (linear ou não linear), como também pode considerar as mais diversas formas de PDFs para as variáveis de entrada, independentemente de ser simétrica ou assimétrica.

Neste trabalho, o método de Monte Carlo é usado para propagar as incertezas de cada QI atribuída para cada vazão reconciliada. Estimada a distribuição das PDFs das QIs e o número de amostras pseudoaleatórias para geração das suas PDFs em um *software*, é feita a propagação das incertezas das QIs pelas equações de reconciliação de dados do TECLIM, para resultar nas PDFs das vazões reconciliadas. Conseqüentemente, das PDFs resultantes da simulação, são retirados todos os parâmetros estatísticos desejados, como os respectivos valores mais esperados (média) e suas incertezas.

A Figura 7 sintetiza a metodologia proposta. Primeiramente, para sua aplicação, é definida uma incerteza para cada valor QI a partir da confiabilidade da escala QI utilizada. Como não se tem conhecimento da PDF da QI, uma análise de sensibilidade deve ser feita para investigar o impacto da distribuição. Uma análise de sensibilidade também precisa ser realizada em relação à definição do número de amostras (M). Este M deve ser um número

suficiente para garantir credibilidade e validação dos resultados, porém, o tempo computacional deve ser levado em consideração, uma vez que quanto maior o seu valor, maior é o seu tempo de processamento (BIPM *et al.*, 2008b). Aliado a isso, outro fator que merece ser analisado é a repetibilidade das incertezas encontradas. Isso porque ao executar o método de Monte Carlo, dependendo do M definido, em cada simulação é possível encontrar valores diferentes para a incerteza. Por isso, é necessário repetir a simulação algumas vezes e verificar os resultados encontrados. Ao final, deve-se considerar o M que atender o nível de tolerância numérica estabelecida, baseada no número de dígitos significativos e na dispersão dos valores encontrados, com o menor tempo de resposta e custo computacional. Os resultados finais dos mensurandos reconciliados são obtidos pela média dos valores encontrados para o M escolhido, que obrigatoriamente respeita a lei de conservação de massa graças ao modelo de reconciliação de dados do TECLIM. O desvio-padrão dos valores reconciliados são as incertezas-padrão associadas aos resultados encontrados.

Figura 7 - Fluxograma com as etapas para cálculo de avaliação de incerteza das vazões aquosas reconciliadas via Monte Carlo (MMC)



Fonte: Adaptado de BIPM *et al.*(2008b).

O intervalo de abrangência é o intervalo que contém o conjunto de valores que pode ser atribuído ao mensurando com base nas informações disponíveis ao definir uma

probabilidade de abrangência (BIPM *et al.*, 2008a). A probabilidade de abrangência de 90% é a recomendada para aplicações que utilizem medições de campo industrial, uma vez que tais medições têm variabilidade elevada (MARTINS *et al.*, 2010b). Contudo, existem controvérsias em relação à escolha adequada da probabilidade de abrangência e, por isso, é importante sempre explicitar qual foi o valor adotado (MARTINS *et al.*, 2010b) para estabelecer o intervalo de abrangência.

A construção desta metodologia surge como forma de aprimoramento da metodologia técnica-científica do TECLIM, embutindo à etapa de construção de balanços hídricos reconciliados as considerações das incertezas associadas, que são essenciais na representação final dos resultados. A aplicação da metodologia aprimorada difunde tanto as práticas TECLIM, quanto a importância de se levar em conta as incertezas das informações nas tomadas de decisão pelas empresas. Portanto, a aplicação da metodologia TECLIM aprimorada pode ser utilizada como ferramenta para agregar a gestão dos recursos hídricos nos *sites* industriais, onde a instrumentação das correntes aquosas não são prioridades. A seguir, isto será comprovado através da aplicação desta metodologia em um estudo de caso em uma planta de metanol.

3.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA TECLIM APRIMORADA EM UMA PLANTA DE METANOL

3.2.1 Panorama geral do processo produtivo

O metanol é uma matéria-prima importante e versátil devido a sua ampla gama de aplicabilidade, tanto na indústria química, como na fonte de energia (IAQUANIELLO *et al.*, 2017; LIMA NETO, 2009). Como intermediário químico é utilizado para produzir formaldeído, ácido acético, metacrilato de metila (MMA), metilamina, clorometano e, em bastante ascensão, em olefinas (MTO/MTP) (ALVARADO, 2016; LIMA NETO, 2009; RIAZ; ZAHEDI; KLEMEŠ, 2013). Como fonte de energia, pode ser usado para produzir o éter metil terc-butílico (MTBE), dimetil éter (DME), biodiesel, gasolina (MTG) e para uso em mistura direta com gasolina para automóveis e em célula a combustível (ALVARADO, 2016; LIMA NETO, 2009; RIAZ; ZAHEDI; KLEMEŠ, 2013). Ele também pode ser utilizado em medicamentos, pesticidas e vários outros fins indústrias (YANG; JACKSON, 2012), como

solvente ou elemento extrativo de diversos produtos.

Para produzir o metanol existem diversas rotas tecnológicas. A maioria dos seus processos é baseada no gás de síntese, oriundo do gás natural ou do carvão como matéria-prima (LIMA NETO, 2009). Cerca de 80% da produção é baseada no gás natural e 17% derivam do carvão e pequenas quantidades por óleo (IAQUANIELLO *et al.*, 2017). O uso do carvão é dado pela rica reserva existente na China, que é a maior produtora e consumidora do metanol na atualidade (YANG; JACKSON, 2012). Desta forma, compreender a economia de produção de metanol requer compreender sobre os preços do gás natural ao redor do mundo e os preços do carvão na China (ALVARADO, 2016).

A tecnologia utilizada, assim como as condições operacionais do processo, interfere diretamente no volume de água utilizado e nas características dos efluentes gerados do processo de produção de metanol. Este trabalho analisou o processo hídrico da tecnologia da *Imperial Chemical Industries* (ICI), empregada na empresa em estudo localizada no Complexo Petroquímico de Camaçari, Bahia. Ela é uma rota completa do gás natural ao metanol, na qual o gás de síntese utiliza-se do processo *Steam Methane Reforming* (SMR) e a síntese do metanol se dá pelo processo *Low Pressure Methanol* (LPM) *Synthesis Technology*.

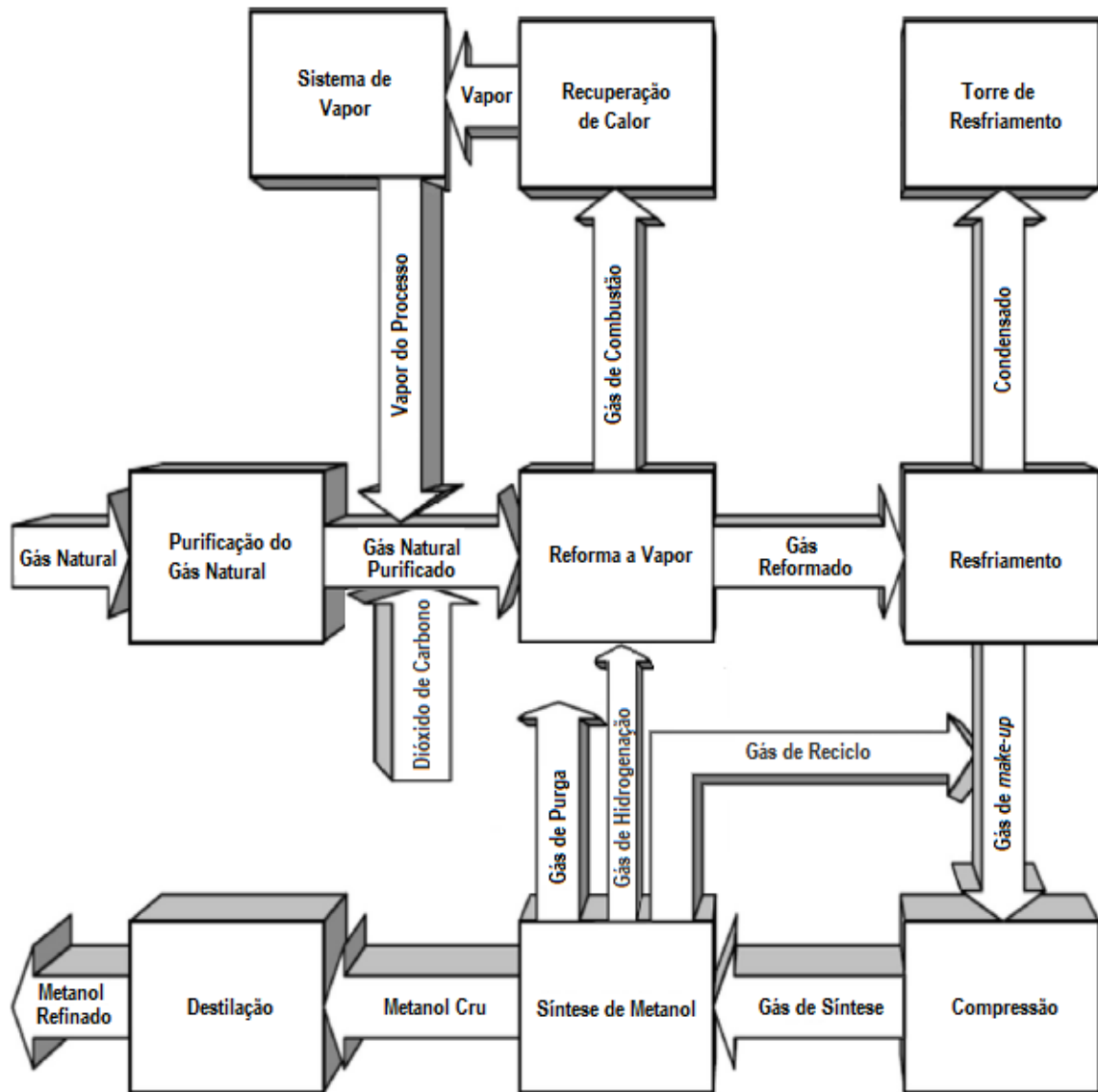
De maneira geral, o diagrama simplificado do fluxo do processo de metanol da Figura 8 mostra as três grandes etapas para produção final de metanol refinado: a reforma a vapor para produção do gás de síntese, a síntese de metanol cru e o processo de purificação para a produção do metanol refinado. As equações 13 a 16 mostram as principais reações para produzir o metanol, em que CH_4 é a fórmula do metano (principal componente do gás natural), H_2O é a fórmula da água, CO do monóxido de carbono, CO_2 do dióxido de carbono, H_2 do hidrogênio e CH_3OH do metanol.



Um diferencial da planta em estudo é que ela foi projetada para duas condições básicas na reforma a vapor: sem adição de CO_2 de fonte externa e com adição suplementar de

CO₂. Quando há a adição de CO₂, este promove o aumento do teor de CO no gás reformado que irá para a síntese, promovendo a redução do excesso de H₂ (COPENOR, 2013).

Figura 8 - Etapas de produção de metanol baseadas na planta em estudo



Fonte: Adaptado de Fitzpatrick (2000, apud Riaz, Zahedi e Klemeš, 2013).

A unidade de metanol em estudo utiliza-se de diferentes tipos de água no seu processo: água clarificada, de poço artesiano, desmineralizada, vapor e condensados. Seu abastecimento de água se dá a partir da sua captação de água de um poço artesiano existente dentro da empresa e pela compra de água clarificada (AGC) e água desmineralizada (AGD)

de uma empresa parceira. A AGC é comprada basicamente para *make-up* da torre de resfriamento e a água do poço artesiano (AGP) é utilizada para complementar a AGC da torre de resfriamento. A AGD é comprada para gerar vapor com pressões variadas (em torno de 4,6, 26 e 66 kgf/cm²). O vapor da planta de metanol é autossuficiente e o seu excedente gerado é disponibilizado para alimentar as demais unidades da empresa.

Embora a planta em análise tenha uma visão de recuperação de massa e energia, reutilizando, por exemplo, algumas correntes de condensados, ela ainda opera em ciclo aberto, enviando seus efluentes para controle, tratamento e descarte para outra empresa parceira de proteção ambiental. Os efluentes líquidos são segregados em dois sistemas distintos: o sistema inorgânico e o sistema orgânico. O efluente líquido destinado ao sistema não contaminado ou inorgânico é constituído basicamente por água de purga da torre de resfriamento e água pluvial. Nos limites da fábrica, esse efluente passa por uma calha Parshall, onde é realizada a medição de sua vazão. Na empresa parceira, juntamente com os efluentes não contaminados das outras empresas do Polo Petroquímico de Camaçari, o efluente inorgânico é lançado no Rio Capivara Pequeno (OLIVEIRA, 2011a). O efluente líquido direcionado para o sistema orgânico tem como principais fontes a drenagens e perdas das correntes de processo, acrescida de águas residuais provenientes do sistema de esgotamento sanitário das instalações administrativas. No limite da fábrica, também existe um medidor para mensurar sua vazão. O efluente orgânico, após o tratamento da empresa parceira, é lançado ao mar via emissário submarino (OLIVEIRA, 2011a).

Na empresa em estudo não existe conhecimento do consumo por unidade de processo. A planta de metanol foi construída na década de 70, na qual existe uma carência de medição de suas correntes aquosas até a atualidade. As medições existentes são em algumas vazões de vapor, devido a sua importância direta com a geração do produto final, e nas correntes de entrada e de efluentes, pois são medidas pelas empresas parceiras e envolve custo monetário.

A planta de metanol pode operar sob diversas condições operacionais em um mesmo mês, o que dificulta a definição de um período estável de produção. Além disso, o seu sistema de controle existente é analógico e pneumático em quase sua totalidade. Por conseguinte, todos os seus dados são registrados manualmente pelos operadores, o que aumenta a incerteza das medições existentes pela interferência humana, como também provoca uma falta de série histórica digital das vazões medidas.

3.2.2 Construção do balanço hídrico reconciliado e da escala QI da planta de metanol

A composição do balanço hídrico da planta de metanol se iniciou pelo estudo do processo industrial e levantamento dos dados necessários. Consultas aos documentos de engenharia da planta, a realização de visitas nas instalações físicas e na sala de controle, a disponibilização às folhas de medição e as entrevistas com engenheiros e operadores de produção diretamente envolvidos com o processo foram às atividades essenciais para adquirir o conhecimento peculiar do processo e realizar o mapeamento hídrico.

Os dados usados no levantamento foram para o período específico de produção de metanol cru em torno de 240 t/h, sendo esta a carga máxima de produção de metanol cru do período, limitada pelo tempo de vida útil do catalisador na reforma a vapor com injeção de dióxido de carbono. Este período foi escolhido pela empresa por representar uma condição crítica de processo, na qual se pode atingir uma maior geração de vapor na reforma. Além disso, no período definido dentro de julho de 2015, a planta estava em estado estacionário para os limites operacionais do *site* industrial e todas as plantas da fábrica estavam em operação, sendo que as outras unidades da fábrica são dependentes do vapor produzido pela planta de metanol.

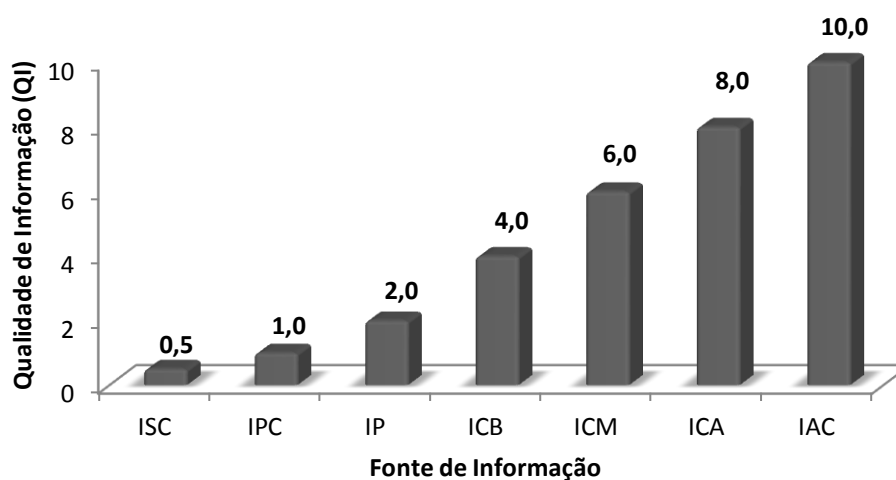
As condições especificadas foram válidas para o estabelecimento do balanço, pois seus resultados são importantes para obter a ordem de grandeza das correntes aquosas e realizar projeções para as condições atuais da empresa. Mas vale salientar que o balanço hídrico reconciliado é uma ferramenta dinâmica. Mudanças no estado operacional da unidade não implicam em seu desuso (SOUZA *et al.*, 2009), mas na necessidade de uma atualização das informações para as novas condições.

Levantado à topologia hídrica, o balanço foi compilado na forma de um balanço de massa global. A partir desta visão macro, um detalhamento também foi feito no balanço de vapor devido à sua ampla utilização no processo e necessidade de identificação das correntes mais importantes. Para os valores das correntes aquosas mensuradas, foram consideradas as médias temporais das vazões obtidas para cada medidor instalado na planta, na mesma base de unidade (t/h). As vazões volumétricas do estado líquido foram convertidas para a base mássica, considerando as massas específicas constantes.

Como a planta de metanol em estudo carece de medição das correntes aquosas, a aplicação da metodologia TECLIM foi extremamente importante para desenvolver o balanço

hídrico. A escala QI foi construída com base nas informações disponíveis de medição e dados estimados das correntes. Pela falta de controle automatizado na planta, as informações referentes às medições incorporaram suas condições de incertezas existentes: incerteza do mensurando, erros de tendência pessoal na leitura dos instrumentos analógicos e pneumáticos e possíveis erros de transcrição dos dados manuscritos para planilha eletrônica por falta de legibilidade da caligrafia de operadores.

Figura 9 - Escala QI para a planta de metanol



ISC (informação sem confiança) - Estimativas grosseiras (ex.: diâmetro da tubulação, diferença de pressão ou estimativa por área).

IPC (informação pouco confiável) - Dados de projetos antigos (ex.: fluxograma de processo, folhas de instrumentos ou equipamentos), estimativa de percentual de abertura de válvula baseado em vazões de projeto e estimativa aproximada com base em informações de outros meses.

IP (informação precária) - Histórico de medições de instrumentos não calibrados, relatório mensal terceirizado não validado, simulação não validada e estimativa de percentual de abertura de válvula com certificado de calibração.

ICB (informação com confiança baixa) - Estimativa aproximada por engenheiro ativo ou histórico de medição nas condições normais de operação por Calha Parshall.

ICM (informação com confiança média) - Histórico de medições nas condições normais de operação com acompanhamento 1 vez por dia.

ICA (informação com confiança alta) - Histórico de medições nas condições normais de operação com acompanhamento de 2 em 2 ou de 3 em 3 horas e balanço estequiométrico.

IAC (informação altamente confiável) - Histórico de medições com instrumentos calibrados com acompanhamento de 2 em 2 horas ou de 3 em 3 horas.

Na Figura 9 está a escala QI representativa para o processo, construída com a colaboração dos conhecimentos de processo dos funcionários da planta. Nela estão as informações das 77 principais correntes mapeadas no balanço hídrico da planta de metanol,

no qual os valores de QI foram atribuídos ao método usado para obtenção dos dados das vazões. O valor máximo de QI (10) foi atribuído à melhor fonte de informação disponível e o valor mínimo de QI (0,5), por outro lado, para a informação sem nenhuma confiança ou sem nenhuma informação registrada. Antes de chegar à escala QI desta forma, ela sofreu algumas alterações a partir da realização de alguns testes de reconciliação de dados do balanço hídrico. O parâmetro inicial dos valores da QI foi baseado na Figura 5. A partir desses valores, adaptações e adequações foram feitas para construir uma escala QI propícia a realidade da planta de metanol, tomando como princípio o desvio percentual (Δp), calculado pela Equação 10, menor do que 3% para as correntes aquosas onde a QI era máxima. Medições pontuais para melhorar a QI em algumas circunstâncias, não puderam ser consideradas, pois a planta sofreu uma paralisação durante o desenvolvimento da pesquisa.

Os testes de avaliação de coerência do balanço pela reconciliação de dados possibilitaram reavaliar também algumas vazões e identificar incoerências de medição anteriormente não conhecidas pela empresa. Como exemplo foi encontrado um equipamento com valor de medição de entrada menor do que da medição de saída, sem existir qualquer outra corrente de entrada significativa. De modo consequente e integrado, o valor da QI desta medição foi modificado.

A realização da reconciliação de dados ocorreu com auxílio do programa MATLAB, versão 2016b, utilizando o método de otimização quadrática (*quadprog*) e o algoritmo “*interior-point-convex*”. Mais informações sobre o método e o algoritmo utilizado podem ser encontradas no suporte do MATLAB (MATHWORKS, 2018a, 2018b).

Os parâmetros de entrada da reconciliação foram compostos pelas 77 vazões aquosas (F01 à F77) e 32 restrições lineares (Apêndice A). Como saída, a reconciliação de dados permitiu que a diferença global do balanço hídrico, de 10,34 t/h, fosse anulada, assim como todos os envoltórios dos tipos de água da unidade.

A Figura 10 exibe as qualidades de informação, baseadas na Figura 9, em relação ao número de correntes aquosas mapeadas. Através dela é possível visualizar o cenário de predominância de informações com baixa confiança da planta, podendo-se comprovar a importância do conceito QI na composição da reconciliação de dados.

A Tabela 3 exibe a relação da qualidade de informação com os desvios percentuais calculados pela Equação 10, depois de validada com a engenharia que os dados reconciliados são plausíveis e possuem desvio menor do que 3% nas correntes aquosas onde a QI era

máxima. Dessa relação, detecta-se a coerência de utilizar o conceito QI, que provoca uma maior variação nas vazões mapeadas que possuem qualidade de informação sem confiança (ISC) ou pouco confiável (IPC). Por esta tabela também se pode inferir que mesmo as fontes de informação não sendo totalmente confiáveis, a maioria dos seus valores estão dentro dos parâmetros de projeto e próximas às condições de trabalho, demonstrando o cuidado na estimativa das variáveis.

Figura 10 - Distribuição da QI em relação às correntes aquosas mapeadas

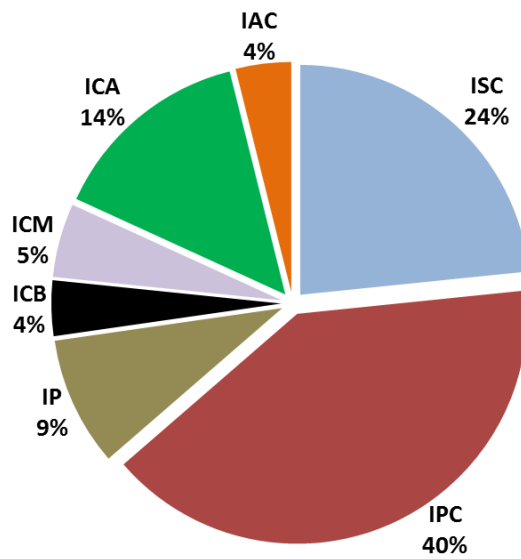


Tabela 3 - Distribuição da QI em relação aos desvios percentuais

Qualidade de Informação (QI)	$\Delta p < 10 \%$	$\Delta p \geq 10 \%$
ISC	3	15
IPC	16	15
IP	4	3
ICB	3	0
ICM	4	0
ICA	11	0
IAC	3	0
TOTAL	44	33

A construção do balanço hídrico reconciliado foi a etapa mais demorada, como expresso em Valle (2013), pois não é tarefa simples reunir todas as informações, definir a escala QI com representatividade, ajustar dificuldades de otimização e definir os resultados mais próximos do processo real. Mas o balanço de massa é fundamental para concatenar todas as informações.

Essa primeira análise é importante para realizar o fechamento do balanço hídrico e validar a escala QI. Entretanto, apresentar a incerteza das variáveis juntamente com o valor resultante encontrado é imprescindível para melhor estimativa da qualidade e confiabilidade dos dados. Estas incertezas reconciliadas não podem ser obtidas pela metodologia TECLIM existente, pois não são conhecidas as incertezas associadas às correntes mapeadas da grande maioria das correntes, o que prejudica o cálculo de K_i . Por isso, é usada a metodologia sugerida neste trabalho, para suprir as lacunas da metodologia TECLIM, e permitir avaliar as incertezas associadas às vazões reconciliadas com base nas informações disponíveis e dentro de um paradigma bayesiano.

3.2.3 Balanço hídrico reconciliado com a avaliação das incertezas na planta de metanol

A metodologia TECLIM aprimorada da Seção 3.1 foi utilizada na planta de metanol para obter os resultados do balanço hídrico reconciliado. A Figura 11 apresenta uma remodelação da Figura 7, para incluir as estimativas adotadas na planta de metanol.

Uma incerteza de 10% foi assumida para cada valor da QI a partir da confiabilidade na escala QI construída (Figura 9). As PDFs das QIs foram estimadas com o auxílio do princípio de entropia máxima (PME) (WEISE; WOGER, 1992) devido à falta de conhecimento do estilo da PDF que a QI possuía. Assim, segundo o PME, pode-se assumir que a distribuição segue uma PDF uniforme ou retangular quando só é possível estimar os limites superior (a_+) e inferior (a_-) (BIPM *et al.*, 2008b; MARTINS *et al.*, 2010b). Definido que esses limites são simétricos, os limites da QI para distribuição uniforme foram calculados pela Equação 17.

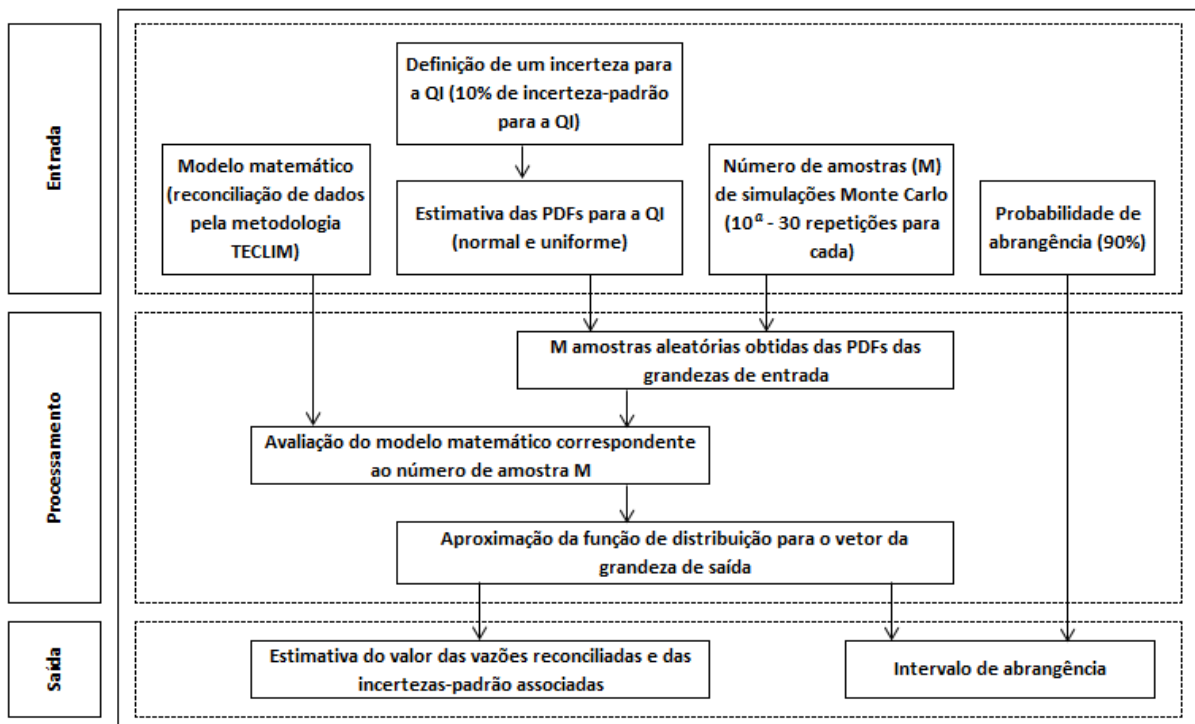
$$a = u(QI_i) \cdot \sqrt{3} = (10\% \cdot QI_i) \cdot \sqrt{3} \quad (17)$$

Quando as únicas informações conhecidas são a média e a incerteza-padrão da

grandeza de entrada, de acordo com o PME, a PDF assumida é a gaussiana (BIPM *et al.*, 2008b). Assim, em posse do valor médio da QI definido da escala QI e a incerteza-padrão estabelecida como sendo a mesma da distribuição uniforme para efeito comparativo, esta última foi calculada pela Equação 18 para a distribuição normal da QI.

$$u(QI_i) = (10\% \cdot QI_i) \quad (18)$$

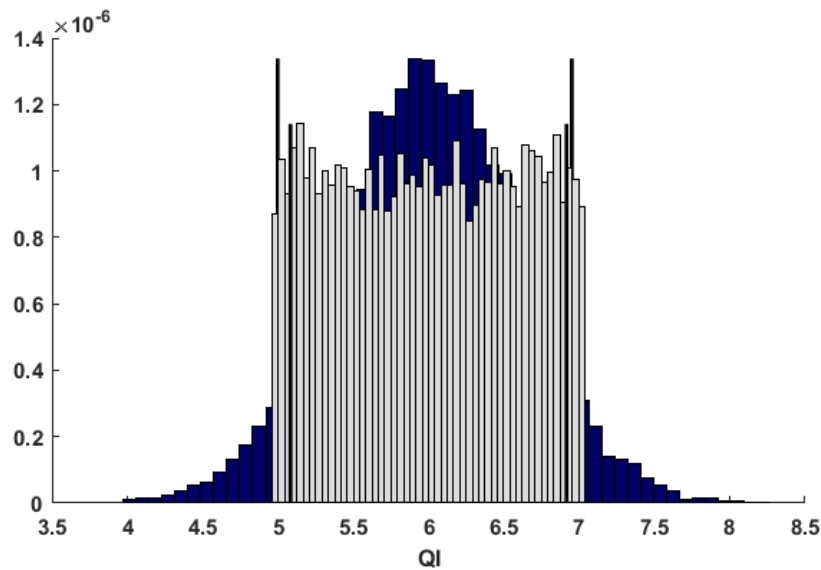
Figura 11 - Etapas para avaliação de incerteza das vazões aquosas reconciliadas da planta de metanol



A Figura 12 demonstra um exemplo de ambas as PDFs sobrepostas para um QI. A partir das estimativas das PDFs das variáveis de entrada QI e pelo modelo matemático de reconciliação de dados da metodologia TECLIM, é possível obter as PDFs das vazões reconciliadas pelo método de Monte Carlo (BIPM *et al.*, 2008b). Uma das etapas essenciais para aplicar o método de Monte Carlo é determinar o número de amostras (M) para a geração dos dados aleatórios das distribuições. A escolha adequada do M a ser utilizado foi realizada através de uma análise de sensibilidade. O número de amostras foi aumentado na potência de base 10^a, onde “a” é um número inteiro, até que fosse verificado que a incerteza-padrão da vazão reconciliada foi estabilizada. Depois, foram realizadas 30 simulações aleatórias para

verificar a repetibilidade das incertezas encontradas. Desta maneira, um conjunto de 30 amostras foi gerado para cada “a” para verificar a convergência da incerteza encontrada em relação a M.

Figura 12 - Distribuição normal (azul) e distribuição uniforme (cinza) da QI da vazão de água clarificada (AGC), para $M = 10^4$ no MMC, incerteza de 10% para a QI e 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas)



A aplicação da metodologia proposta foi utilizando o *software* MATLAB, versão 2016b, na qual as configurações da reconciliação de dados foram às mesmas da subseção anterior (Subseção 3.2.2). Como o processo tem 77 principais correntes aquosas, para demonstrar o conjunto, os resultados mais detalhados serão apresentados apenas das variáveis de água desmineralizada (AGD) e de água clarificada (AGC), já que ambas são as variáveis úteis no cálculo do indicador da planta.

As análises de repetibilidade das incertezas-padrão e o tempo computacional para execução das simulações de Monte Carlo são fatores complementares que precisam ser investigados para definir o número de amostras apropriado. A Figura 13 mostra a análise de sensibilidade dos resultados obtidos para os 30 valores encontrados para cada M da vazão de água desmineralizada (AGD), assumindo a distribuição normal e uniforme para a QI. A Figura 14 faz a mesma comparação, só que para a vazão de água clarificada (AGC). Através dessas figuras é observado que à medida que o “a” aumenta, da potência de base 10^a , as variações nas incertezas diminuem e tornam-se mais confiáveis (mais estáveis

numericamente). O M de 10^2 e 10^3 não existe uma repetibilidade da incerteza. Seus valores variam a cada simulação e por isso não são representativos. As incertezas para M de 10^4 , 10^5 e 10^6 apresentaram melhores resultados em relação à reprodutibilidade: para 10^4 começa a existir uma repetibilidade e uma divergência baixa entre seus valores; para 10^5 a variação é bem menor; e para 10^6 praticamente não existe variação.

Figura 13 - Análise de sensibilidade de M nas simulações de MMC para a vazão de AGD assumindo: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI

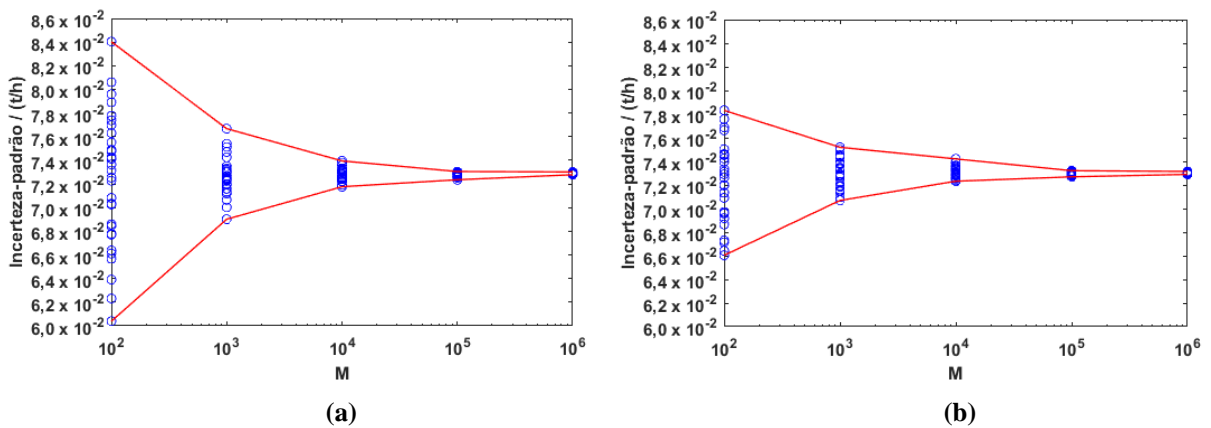
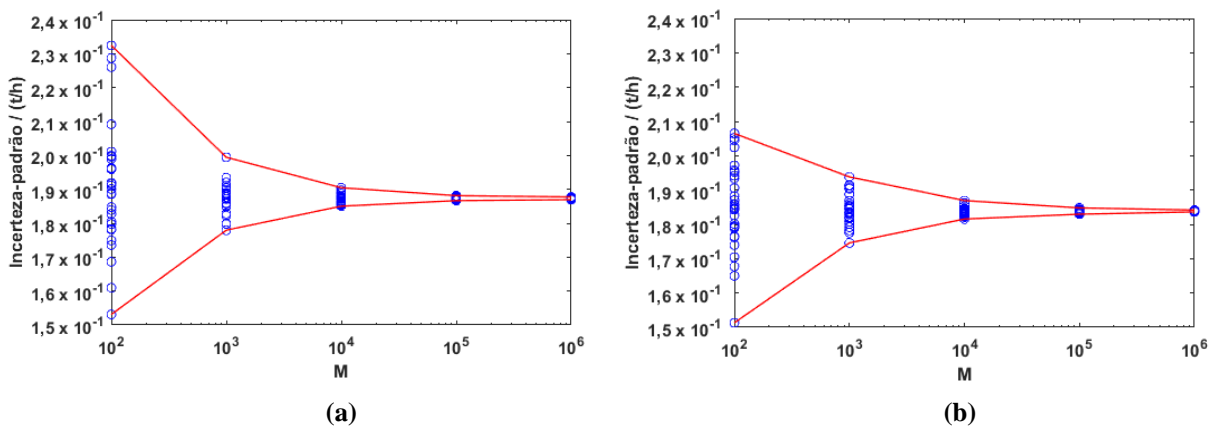


Figura 14 - Análise de sensibilidade de M nas simulações de MMC para a vazão de AGC assumindo: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI



Para verificar a convergência da incerteza-padrão, é observada a dispersão entre o número de repetições para cada M. A Figura 15 e Figura 16 revelam a relação do desvio-padrão dos desvios-padrão para as 30 simulações realizadas em relação a M. O que se observa com essas figuras é que os desvios entre as incertezas-padrão diminuem de forma mais acentuada de M igual a 10^2 para M igual a 10^4 , e seu decrescimento vai se tornando mais

brando de M igual a 10^4 até 10^6 . Na Tabela 4 e Tabela 5 pode-se visualizar isso em termos de valores. Desta forma, conclui-se que a passo que o M aumenta, menos disperso ficam os valores das incertezas-padrão, garantindo uma maior reprodutibilidade na estimativa dos resultados gerados pelo método de Monte Carlo.

O tempo de processamento é o outro fator importante a ser analisado para definir o M propício. O *software* MATLAB foi executado em um computador com o sistema operacional Windows 10 *Home Single Language*, versão 1803, processador Intel® Core™ i5-4440S CPU, com 2.80 GHz de frequência e 6 GB de memória RAM.

Figura 15 - Análise de sensibilidade do desvio-padrão dos desvios-padrão das 30 simulações em relação ao número de amostras (M) definidos para a vazão de AGD, assumindo: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI

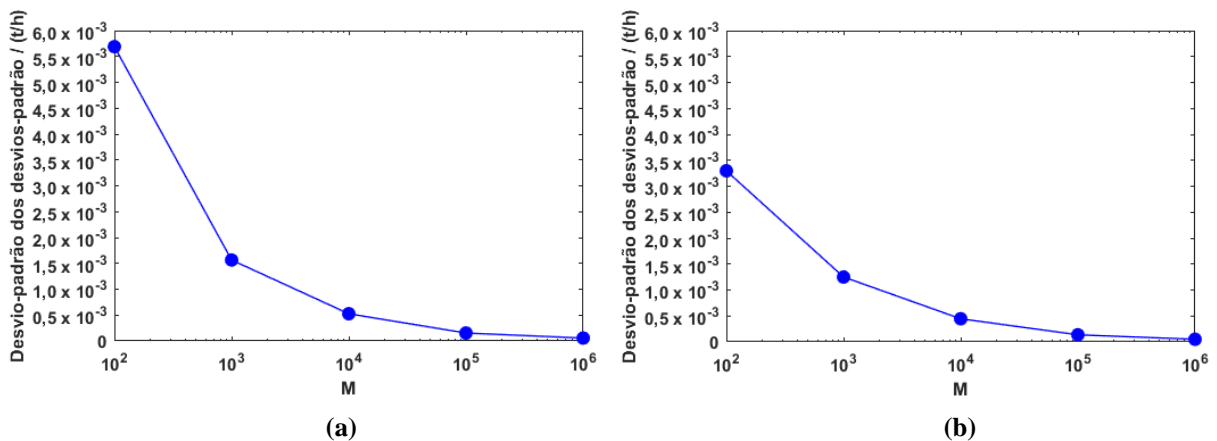


Figura 16 - Análise de sensibilidade do desvio-padrão dos desvios-padrão das 30 simulações em relação ao número de amostras (M) definidos para a vazão de AGC, assumindo: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI

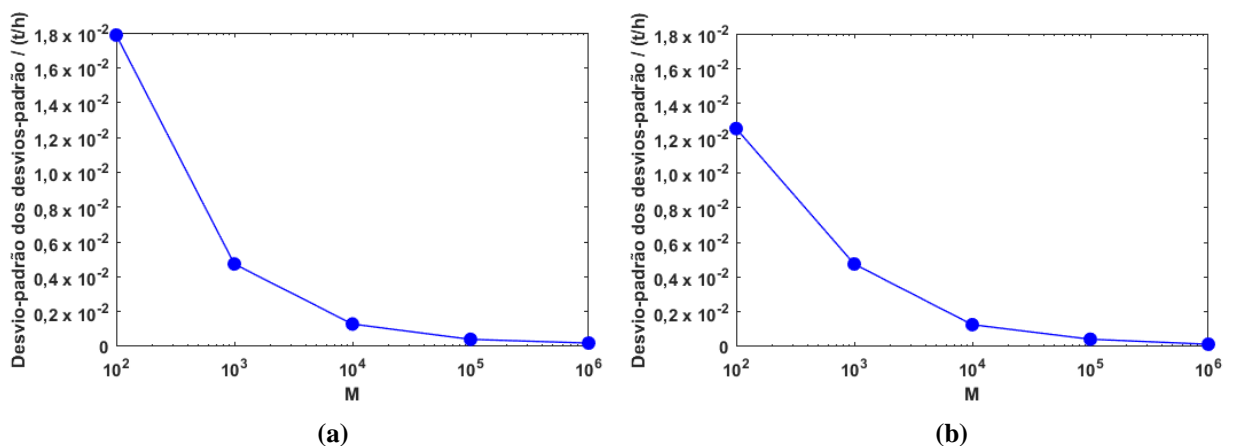


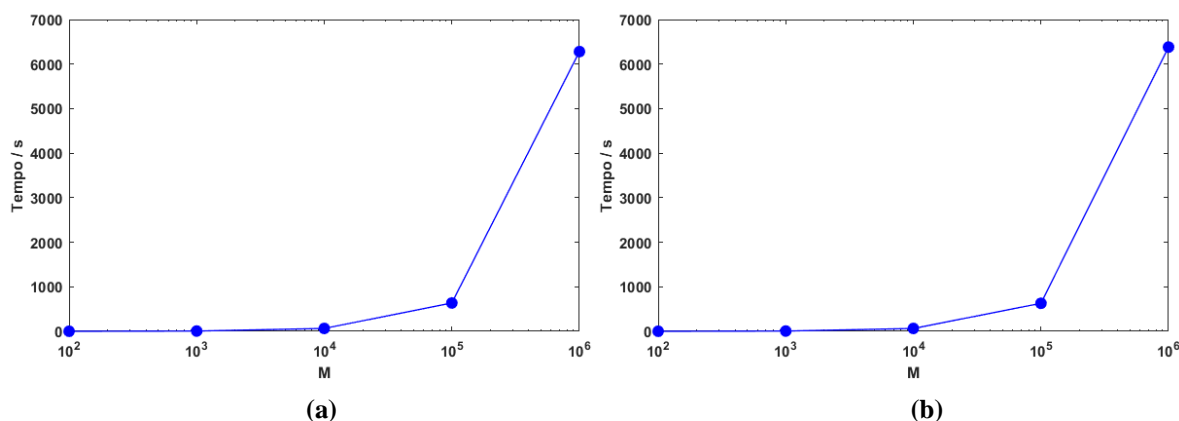
Tabela 4 - Valores do desvio-padrão dos desvios-padrão das 30 simulações em relação ao número de amostras (M) definidos para a vazão de AGD

Número de amostras	Desvio-padrão dos desvios-padrão / (t/h)	
	Distribuição normal da QI	Distribuição uniforme da QI
$M = 10^2$	$5,7 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
$M = 10^3$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
$M = 10^4$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$
$M = 10^5$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
$M = 10^6$	$5,7 \cdot 10^{-5}$	$5,0 \cdot 10^{-5}$

Tabela 5 - Valores do desvio-padrão dos desvios-padrão das 30 simulações em relação ao número de amostras (M) definidos para a vazão de AGC

Número de amostras	Desvio-padrão dos desvios-padrão / (t/h)	
	Distribuição normal da QI	Distribuição uniforme da QI
$M = 10^2$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$
$M = 10^3$	$4,7 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-3}$
$M = 10^4$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
$M = 10^5$	$4,1 \cdot 10^{-4}$	$4,2 \cdot 10^{-4}$
$M = 10^6$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$

Figura 17 - Tempo médio de processamento para cada número de amostras apresentados, assumindo: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI



A Figura 17 exhibe o tempo médio de processamento das 30 simulações para cada número de amostras (M) definido. O que se observa pela figura é que o tempo médio de processamento é crescente. Ele é menos de 1 minuto para cem dados e mil dados. A partir de mil dados, o tempo de processamento passa a aumentar de maneira quase que exponencial, atingindo um pouco mais de 1 minuto para dez mil dados, quase 10 minutos e 37 segundos para cem mil dados e perto de 1 hora e 45 minutos para um milhão de dados. Portanto, é

possível comprovar que à medida que se aumenta o número de amostras, a velocidade de processamento torna-se mais lenta, independente da distribuição atribuída a PDF. Ou seja, para garantir uma melhor precisão, maior será o tempo de processamento computacional.

À vista dos resultados apresentados, o M de 10^6 seria o melhor a ser escolhido em termos de melhor convergência da incerteza-padrão, contudo, seu tempo computacional é demasiadamente lento. O M de 10^4 alia uma convergência da incerteza-padrão dentro da representatividade metrológica, com o menor tempo de processamento computacional para realizar as simulações, considerando duas casas decimais nos resultados reconciliados. Portanto, foi o M escolhido para ser trabalhado neste estudo.

Figura 18 - PDFs da vazão de AGD assumindo: $M = 10^4$ no MMC, 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas) e: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI

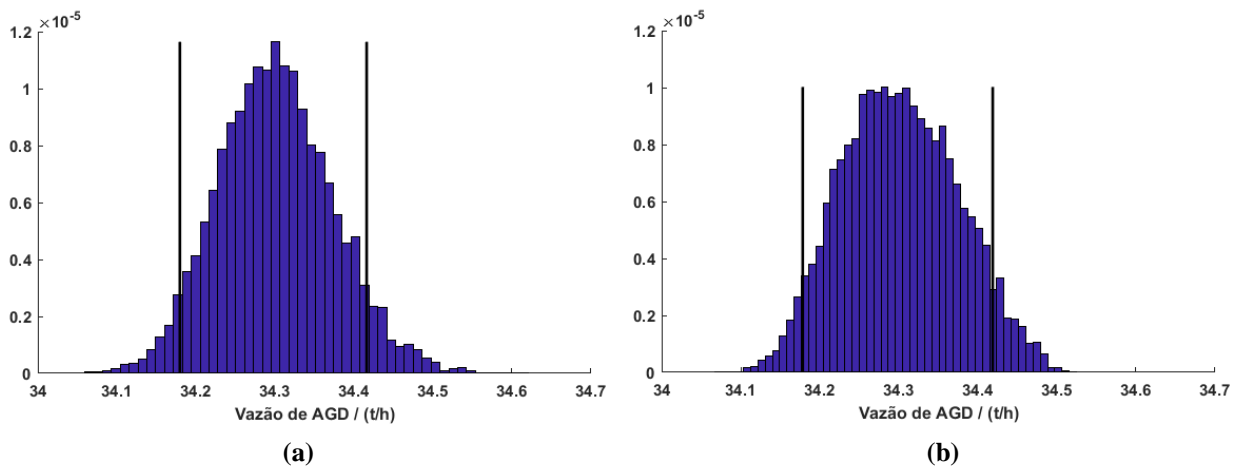
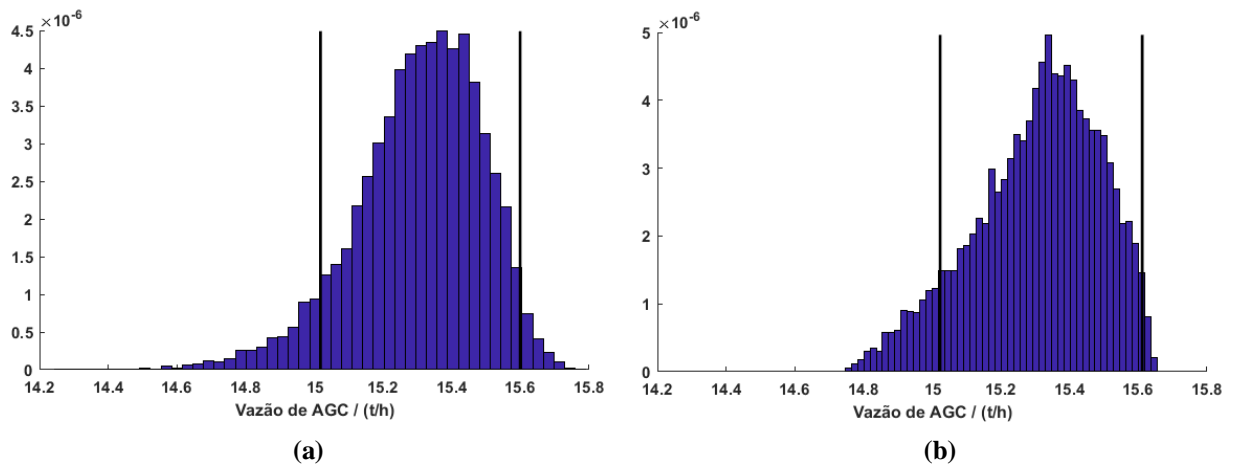


Figura 19 - PDFs da vazão de AGC assumindo: $M = 10^4$ no MMC, 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas) e: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI



Como resultado final, a Figura 18 demonstra as PDFs resultantes para a vazão de AGD para ambas as distribuições estudadas (uniforme e normal) e o M escolhido para realizar as simulações de Monte Carlo. Já na Figura 19 estão apresentadas as PDFs geradas para a vazão de AGC, também para as duas distribuições definidas e o M escolhido. Constata-se que para uma probabilidade de 90%, determinado pelas linhas pretas na Figura 18 e Figura 19, o intervalo de abrangência é praticamente o mesmo entre as distribuições definidas. Isto pode ser confirmado pela Tabela 6 e Tabela 7 que exibem os resultados das 77 correntes apenas com o M definido de 10^4 , dos quais a vazão de AGC é a corrente F05 e a vazão de AGD é a corrente F10. Sendo que: q_M refere-se às vazões mapeadas, lb os limites inferiores operacionais, ub os limites superiores operacionais, QI a qualidade de informação das vazões mapeadas, q_R as vazões reconciliados, u_R as incertezas-padrão das vazões reconciliadas, LI o limite inferior do intervalo de abrangência e LS o limite superior do intervalo de abrangência. Pelas tabelas, averigua-se também, pelo intervalo de abrangência, que as PDFs concebidas podem ser simétricas ou assimétricas.

A Tabela 6 e Tabela 7, assim como as PDFs da Figura 18 e Figura 19, foram montadas a partir da média dos valores para a 30ª simulação de Monte Carlo. O Apêndice B apresenta as tabelas com os resultados de todas as 77 correntes aquosas, utilizando também as médias dos valores da 30ª simulação realizada para cada M analisado (10^2 a 10^6).

Tabela 6 - Valores médios da simulação de MMC assumindo distribuição normal para a QI

Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	q_R para $M = 10^4$ (t/h)	Incerteza- padrão u_R para $M = 10^4$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% para $M = 10^4$ / (t/h)		Incerteza relativa para $M = 10^4$ / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,93	$5,0 \cdot 10^{-2}$	9,84	10,01	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,49	$9,0 \cdot 10^{-2}$	8,34	8,63	1,1%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	$6,2 \cdot 10^{-3}$	0,57	0,59	1,1%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,74	0,96	7,7%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,30	$1,9 \cdot 10^{-1}$	15,02	15,60	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	$6,4 \cdot 10^{-2}$	10,82	11,03	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	$3,0 \cdot 10^{-2}$	2,63	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,54	$2,8 \cdot 10^{-1}$	31,07	31,99	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	$7,3 \cdot 10^{-2}$	34,18	34,42	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	$7,3 \cdot 10^{-2}$	34,18	34,42	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	$7,2 \cdot 10^{-2}$	28,65	28,89	0,2%

Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	q_R para $M = 10^4$ (t/h)	Incerteza- padrão u_R para $M = 10^4$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% para $M = 10^4$ / (t/h)		Incerteza relativa para $M = 10^4$ / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	$7,2 \cdot 10^{-3}$	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	$3,1 \cdot 10^{-3}$	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,49	$9,0 \cdot 10^{-2}$	8,34	8,63	1,1%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	$3,0 \cdot 10^{-2}$	2,63	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,74	0,96	7,7%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	$7,2 \cdot 10^{-2}$	28,65	28,89	0,2%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	$5,9 \cdot 10^{-3}$	0,16	0,18	3,5%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	$4,6 \cdot 10^{-3}$	0,37	0,39	1,2%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	$4,8 \cdot 10^{-4}$	1,76	1,77	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,11	0,14	7,9%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	$3,4 \cdot 10^{-4}$	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	$2,2 \cdot 10^{-3}$	0,11	0,12	1,9%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,32	$4,6 \cdot 10^{-2}$	16,24	16,39	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,55	$1,0 \cdot 10^{-1}$	3,39	3,72	2,9%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	$5,5 \cdot 10^{-5}$	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	$2,2 \cdot 10^{-2}$	2,86	2,93	0,8%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	$6,8 \cdot 10^{-3}$	0,36	0,38	1,9%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	$4,3 \cdot 10^{-2}$	0,99	1,13	4,0%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	$8,5 \cdot 10^{-4}$	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,27	0,34	6,9%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,55	0,60	3,0%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,74	$3,6 \cdot 10^{-2}$	1,69	1,81	2,1%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	$2,0 \cdot 10^{-2}$	4,40	4,46	0,5%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	$2,6 \cdot 10^{-2}$	3,46	3,54	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	$4,3 \cdot 10^{-2}$	0,15	0,28	20,3%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,96	$5,6 \cdot 10^{-2}$	1,87	2,05	2,9%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	$1,3 \cdot 10^{-2}$	5,67	5,71	0,2%
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	$5,3 \cdot 10^{-2}$	10,54	10,71	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,87	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,82	0,91	3,0%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	$7,3 \cdot 10^{-3}$	0,32	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	$3,9 \cdot 10^{-3}$	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,23	0,29	6,7%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	$1,9 \cdot 10^{-2}$	0,07	0,13	19,0%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	$2,2 \cdot 10^{-2}$	0,05	0,12	26,1%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	$4,8 \cdot 10^{-3}$	0,17	0,19	2,7%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	$7,7 \cdot 10^{-2}$	2,78	3,03	2,6%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	$1,6 \cdot 10^{-2}$	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,34	$1,9 \cdot 10^{-1}$	34,02	34,65	0,6%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	$2,4 \cdot 10^{-3}$	0,21	0,22	1,1%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,16	$2,2 \cdot 10^{-1}$	2,80	3,53	7,1%

Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	q_R para $M = 10^4$ (t/h)	Incerteza- padrão u_R para $M = 10^4$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% para $M = 10^4$ / (t/h)		Incerteza relativa para $M = 10^4$ / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	$7,8 \cdot 10^{-2}$	2,96	3,21	2,5%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	$2,6 \cdot 10^{-2}$	2,57	2,66	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,90	$9,8 \cdot 10^{-2}$	29,74	30,06	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	$4,2 \cdot 10^{-2}$	20,45	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,39	$1,1 \cdot 10^{-1}$	9,22	9,56	1,1%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	$4,7 \cdot 10^{-2}$	3,05	3,20	1,5%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	$9,0 \cdot 10^{-3}$	1,02	1,05	0,9%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,93	$2,3 \cdot 10^{-1}$	2,58	3,31	7,7%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	$1,3 \cdot 10^{-2}$	6,86	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	$1,7 \cdot 10^{-3}$	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	$1,7 \cdot 10^{-2}$	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,83	$1,6 \cdot 10^{-1}$	2,56	3,09	5,7%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,54	$1,9 \cdot 10^{-2}$	1,50	1,57	1,3%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,31	$1,9 \cdot 10^{-1}$	34,99	35,62	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	$7,8 \cdot 10^{-3}$	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,75	$1,9 \cdot 10^{-1}$	22,44	23,07	0,9%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,72	$2,1 \cdot 10^{-1}$	0,38	1,08	29,3%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	$3,2 \cdot 10^{-3}$	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,49	$2,0 \cdot 10^{-1}$	29,16	29,82	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,64	$1,2 \cdot 10^{-1}$	32,45	32,85	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	$1,0 \cdot 10^{-2}$	0,16	0,19	5,9%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	$1,1 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,04	2,5%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,13	$2,2 \cdot 10^{-1}$	12,77	13,48	1,7%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	$2,3 \cdot 10^{-2}$	16,02	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	$2,6 \cdot 10^{-2}$	2,37	2,46	1,1%

Tabela 7 - Valores médios da simulação de MMC assumindo distribuição uniforme para a QI

Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	q_R para $M = 10^4$ (t/h)	Incerteza- padrão u_R para $M = 10^4$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% para $M = 10^4$ / (t/h)		Incerteza relativa para $M = 10^4$ / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,93	$5,1 \cdot 10^{-2}$	9,85	10,01	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,49	$9,1 \cdot 10^{-2}$	8,35	8,65	1,1%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	$6,2 \cdot 10^{-3}$	0,57	0,59	1,1%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,75	0,97	7,7%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,31	$1,8 \cdot 10^{-1}$	15,02	15,61	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	$6,4 \cdot 10^{-2}$	10,83	11,03	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	$3,0 \cdot 10^{-2}$	2,63	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,54	$2,8 \cdot 10^{-1}$	31,10	32,01	0,9%

Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	q_R para $M = 10^4$ (t/h)	Incerteza- padrão u_R para $M = 10^4$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% para $M = 10^4$ / (t/h)		Incerteza relativa para $M = 10^4$ / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	$1,6 \cdot 10^{-3}$	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	$7,3 \cdot 10^{-2}$	34,18	34,42	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	$7,3 \cdot 10^{-2}$	34,18	34,42	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	$7,3 \cdot 10^{-2}$	28,66	28,89	0,3%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	$6,9 \cdot 10^{-3}$	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	$3,0 \cdot 10^{-3}$	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,49	$9,1 \cdot 10^{-2}$	8,35	8,65	1,1%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	$3,0 \cdot 10^{-2}$	2,63	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,75	0,97	7,7%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	$7,3 \cdot 10^{-2}$	28,66	28,89	0,3%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	$5,8 \cdot 10^{-3}$	0,16	0,18	3,4%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	$4,5 \cdot 10^{-3}$	0,37	0,39	1,2%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	$4,8 \cdot 10^{-4}$	1,76	1,77	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	$9,9 \cdot 10^{-3}$	0,11	0,14	7,7%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	$3,4 \cdot 10^{-4}$	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	$2,1 \cdot 10^{-3}$	0,11	0,12	1,9%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,32	$4,6 \cdot 10^{-2}$	16,24	16,39	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,55	$1,0 \cdot 10^{-1}$	3,38	3,72	2,9%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	$5,3 \cdot 10^{-5}$	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	$2,1 \cdot 10^{-2}$	2,86	2,93	0,7%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	$6,7 \cdot 10^{-3}$	0,36	0,38	1,8%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	$4,2 \cdot 10^{-2}$	0,99	1,13	4,0%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	$8,2 \cdot 10^{-4}$	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,27	0,34	6,8%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,55	0,60	2,9%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,74	$3,5 \cdot 10^{-2}$	1,69	1,80	2,0%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	$1,9 \cdot 10^{-2}$	4,40	4,46	0,4%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	$2,5 \cdot 10^{-2}$	3,46	3,54	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	$4,3 \cdot 10^{-2}$	0,14	0,28	20,2%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,95	$5,6 \cdot 10^{-2}$	1,86	2,05	2,9%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	$1,3 \cdot 10^{-2}$	5,67	5,71	0,2%
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	$5,3 \cdot 10^{-2}$	10,54	10,71	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,87	$2,6 \cdot 10^{-2}$	0,82	0,91	3,0%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	$7,1 \cdot 10^{-3}$	0,32	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	$3,7 \cdot 10^{-3}$	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	$1,7 \cdot 10^{-2}$	0,23	0,29	6,5%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	$1,9 \cdot 10^{-2}$	0,07	0,13	18,7%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	$2,1 \cdot 10^{-2}$	0,05	0,12	25,5%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	$4,5 \cdot 10^{-3}$	0,17	0,19	2,5%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	$7,7 \cdot 10^{-2}$	2,78	3,03	2,6%

Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	q_R para $M = 10^4$ (t/h)	Incerteza- padrão u_R para $M = 10^4$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% para $M = 10^4$ / (t/h)		Incerteza relativa para $M = 10^4$ / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	$1,5 \cdot 10^{-2}$	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,34	$1,9 \cdot 10^{-1}$	34,02	34,65	0,6%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	$2,3 \cdot 10^{-3}$	0,21	0,21	1,1%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,16	$2,2 \cdot 10^{-1}$	2,81	3,53	7,0%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	$7,8 \cdot 10^{-2}$	2,97	3,22	2,5%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	$2,6 \cdot 10^{-2}$	2,57	2,66	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,90	$9,9 \cdot 10^{-2}$	29,73	30,06	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	$4,2 \cdot 10^{-2}$	20,45	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,39	$1,1 \cdot 10^{-1}$	9,21	9,55	1,1%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	$4,6 \cdot 10^{-2}$	3,04	3,19	1,5%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	$8,8 \cdot 10^{-3}$	1,02	1,05	0,9%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,93	$2,3 \cdot 10^{-1}$	2,56	3,28	7,7%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	$1,2 \cdot 10^{-2}$	6,86	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	$1,6 \cdot 10^{-3}$	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	$1,7 \cdot 10^{-2}$	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,83	$1,6 \cdot 10^{-1}$	2,55	3,08	5,7%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,54	$1,9 \cdot 10^{-2}$	1,50	1,56	1,2%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,30	$1,9 \cdot 10^{-1}$	34,99	35,63	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	$7,6 \cdot 10^{-3}$	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,75	$1,9 \cdot 10^{-1}$	22,44	23,07	0,9%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,72	$2,1 \cdot 10^{-1}$	0,35	1,05	29,4%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	$3,1 \cdot 10^{-3}$	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,49	$2,0 \cdot 10^{-1}$	29,15	29,81	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,64	$1,2 \cdot 10^{-1}$	32,44	32,84	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	$9,9 \cdot 10^{-3}$	0,15	0,19	5,8%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	$1,0 \cdot 10^{-3}$	0,04	0,04	2,4%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,13	$2,2 \cdot 10^{-1}$	12,78	13,48	1,7%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	$2,2 \cdot 10^{-2}$	16,03	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	$2,6 \cdot 10^{-2}$	2,37	2,46	1,1%

A partir da Tabela 6 e Tabela 7 é possível avaliar a sensibilidade da PDF da QI. Ao comparar a incerteza-padrão de uma vazão reconciliada em relação à distribuição adotada (normal ou uniforme) da QI, observa-se que os resultados obtidos são próximos, considerando dois algoritmos significativos. Isso ocorre para todas as vazões. Desta forma, pode-se dizer que os resultados reconciliados são pouco dependentes do tipo de PDF assumida neste estudo de caso.

Outra observação interessante percebida pela Tabela 6 e Tabela 7 é em relação à QI e

as incertezas relativas encontradas. Percebe-se que, de maneira geral, as vazões que sofreram variações com maior intensidade são as que possuíam um QI menor. As fontes com QI de valores 0,5 e 1,0 têm uma maior probabilidade de estarem mais distantes do seu valor verdadeiro, já que a origem da sua informação é menos confiável. Para as correntes F37, F45, F46 e F69, à baixa confiança na fonte de informação de suas correntes (QI de valor 0,5), atrelado ao valor pequeno de suas vazões, consumaram essas correntes como as que apresentaram as maiores incertezas relativas de todas as correntes.

Essa análise pode ser visualizada melhor reestruturando os resultados da QI e incerteza relativa da Tabela 6 e Tabela 7 em função das restrições dos balanços hídricos (Apêndice C). No Apêndice C, constata-se que as vazões que sofreram variações com maior intensidade são as que possuíam um QI menor, mas nota-se também que em alguns casos a maior variação na QI de valor menor não ocorre devido à limitação advinda de outros balanços, que limita a alteração da incerteza daquela corrente com QI mais baixo, e consequentemente, promove uma alteração maior no valor de outras correntes com QI maior para atingir o objetivo principal de obedecer às restrições de fechamento do balanço.

3.2.4 Análise dos resultados do balanço hídrico reconciliado na planta de metanol

Ao comparar os valores obtidos da aplicação da metodologia TECLIM aprimorada para as duas distribuições assumidas para a QI, percebe-se que seus resultados são iguais ou bem próximos. Apenas para definir uma das PDFs para utilizar seus dados nas análises da planta, ao reparar o percentual das incertezas relativas na Tabela 6 e Tabela 7, nota-se que, na maioria dos casos, quando há uma pequena diferença entre seus valores, ela é levemente maior para a PDF com distribuição normal da QI em relação à PDF com distribuição uniforme da QI. Já que quanto maior a incerteza, mais mutável pode ser o valor reconciliado, e seguindo uma premissa conservadora, o estudo desta subseção foi feito utilizando os dados obtidos a partir da PDF da QI com distribuição normal e com número de amostras de 10^4 , definido anteriormente pelo estudo da Subseção 3.2.3.

A representação do balanço hídrico reconciliado foi feita através de diagramas de blocos. A Figura 20 ilustra uma visão parcial do diagrama de blocos global do processo. Nela consta as vazões reconciliadas e QI, como também foram incluídos as incertezas-padrão das vazões reconciliadas. A coloração foi utilizada para diferenciar os parâmetros e os tipos de

água – Figura 21. No Apêndice D pode-se ver o balanço hídrico reconciliado completo e no Apêndice E o balanço hídrico reconciliado detalhado somente do vapor. A Figura 22 representa a síntese do balanço hídrico reconciliado para as principais correntes do processo.

Com 90% de probabilidade de abrangência, o consumo da empresa está entre [62,67; 63,45] t/h, com um consumo médio de 63,05 t/h de água para o período estabelecido, seja para seu processo, utilidade ou consumo humano. Dessa vazão de entrada, o consumo da planta de metanol está em torno de [57,14; 57,92] t/h, uma vez que [5,51; 5,54] t/h da água de AGD que entra na empresa é enviada para outras plantas da unidade. Ou seja, a planta de metanol consome uma média de 57,52 t/h de água, já que uma média de 5,53 t/h de AGD é enviada para as outras unidades fabris.

Figura 20 - Ilustração parcial do balanço reconciliado de água em t/h

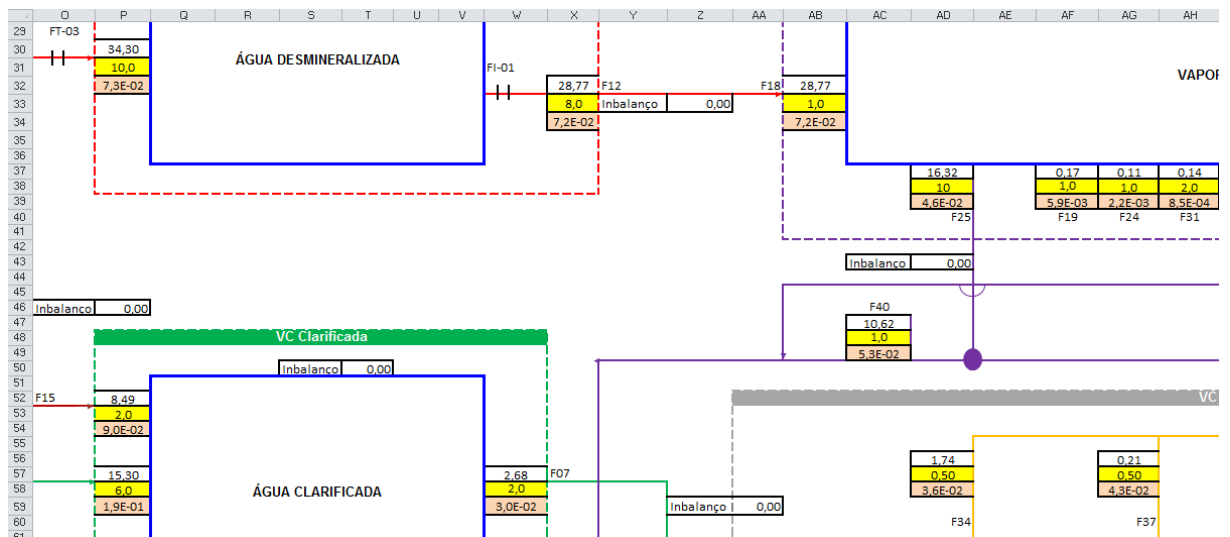


Figura 21 - Legenda do balanço hídrico da planta de metanol

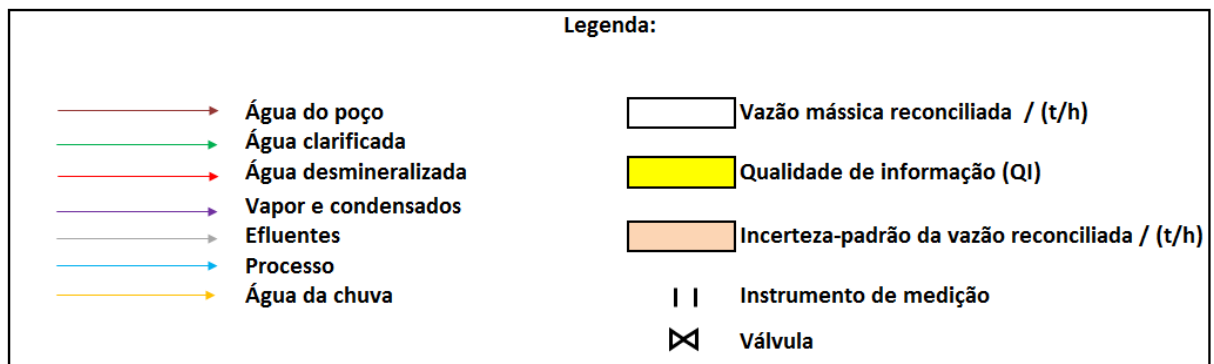
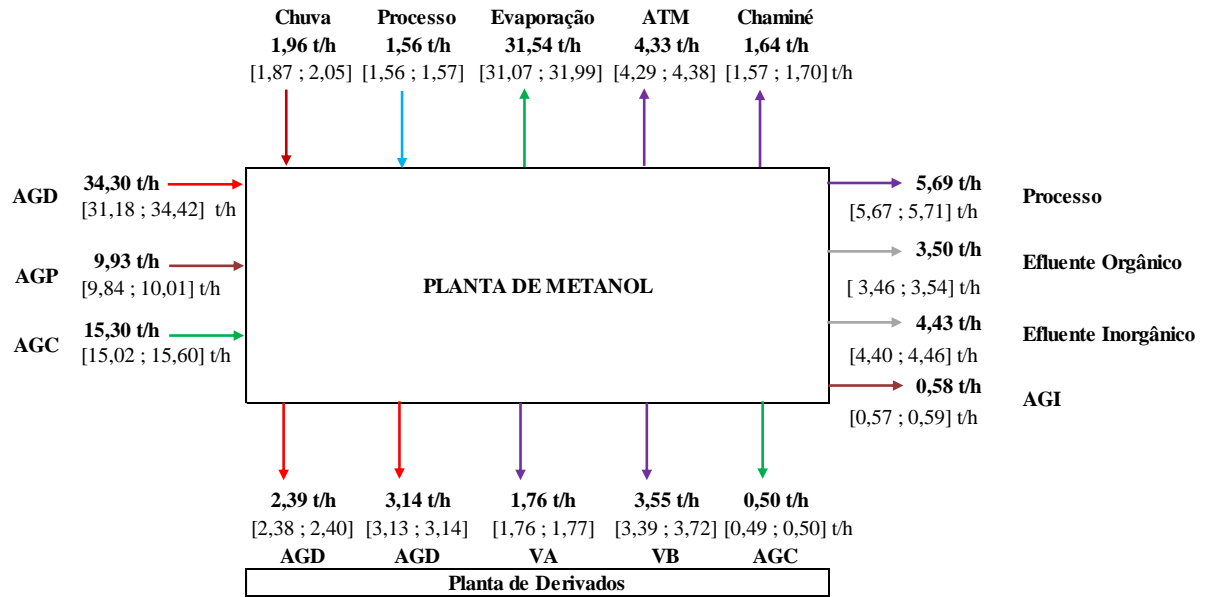


Figura 22 - Resumo do consumo de água da planta de metanol



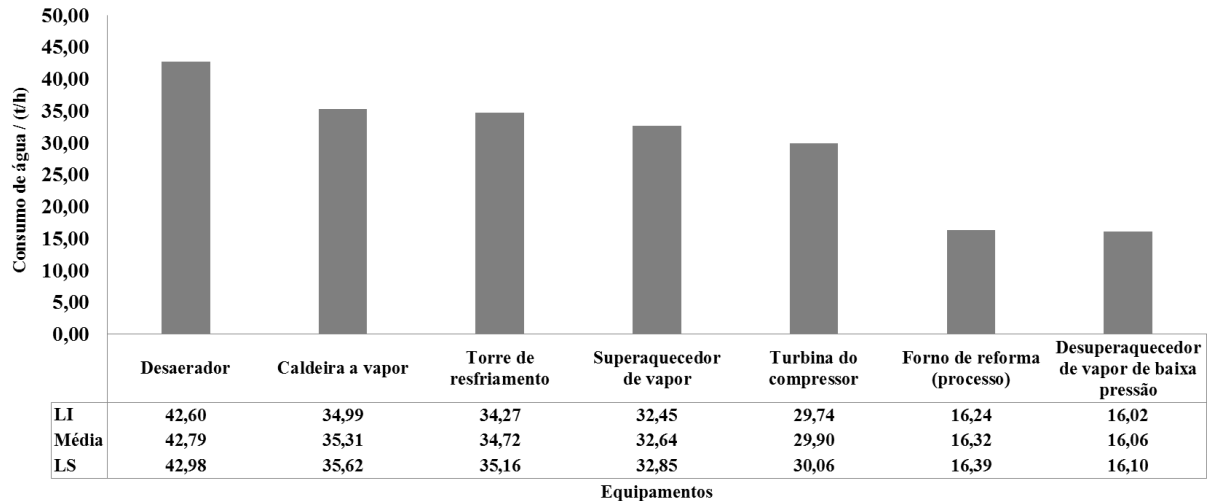
Balanco Global: $(F01 + F05 + F10 + F38 + F70) - (F03 + F08 + F09 + F13 + F14 + F21 + F26 + F35 + F36 + F39 + \text{Chaminé} + \text{ATM}) = 0$

Sendo que: Chaminé = F30 + F33

$\text{ATM} = F23 + F27 + F28 + F29 + F42 + F43$

Legenda: [LI ; LS] - Intervalo de abrangência para probabilidade de 90%

Figura 23 - Principais equipamentos consumidores de água da planta de metanol



Balancos dos equipamentos:

Desaerador: $(F18 + F48 + 49 + F62 + 65) - (F27 + F43 + F46 + F52 + F60 + F66 + F69 + 74) = 0$

Produção de vapor na caldeira: $F66 - (F20 + F42 + F44 + F50) = 0$

Torre de resfriamento: $(F05 + F06 + F15) - (F07 + F08 + F09) = 0$

Superaquecedor de vapor: $(F52 + F71) - F72 = 0$

Turbina do compressor: $F55 - (F56 + F57) = 0$

Forno de reforma: $F25 - (F39 + F40) = 0$

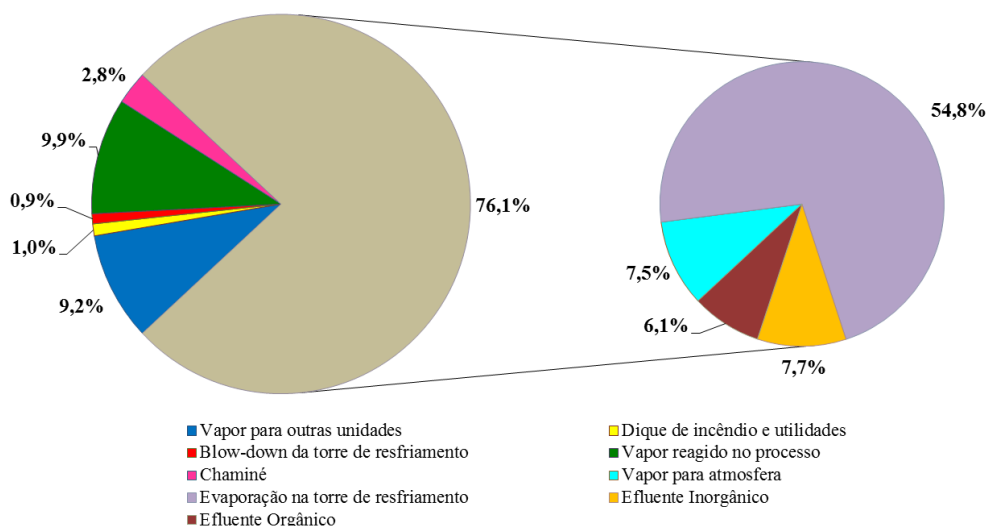
Desuperaquecedor de vapor de baixa pressão: $F76 - (F61 + F62 + F63) = 0$

Legenda: [LI ; LS] - Intervalo de abrangência para probabilidade de 90%

A Figura 23 mostra os equipamentos identificados como maiores consumidores de água da planta de metanol, todos com consumo acima de 10 t/h. Desta figura pode-se perceber que os maiores consumidores fazem uso de vapor e condensados. O vapor é produzido através do consumo de AGD comprada e parte de reciclagem de condensados no desaerador, que representam em torno de 19% do vapor produzido. Por isso que 50% das águas que entram na planta são de água desmineralizada, como mostrado na Figura 22.

A torre de resfriamento é o único equipamento que consome diferentes tipos de água. Nela há um reuso de condensados de vapor, de maneira que a torre é alimentada por aproximadamente 44% de água clarificada comprada, 32% de condensados e 24% de água do poço. Esta água do poço é advinda de um poço artesiano da empresa, dos quais quase 85% são utilizadas como *make-up* da torre, sendo o restante destinado para água de incêndio (AGI) e utilidades no geral. Estas águas de utilidades posteriormente se transformam em efluentes líquidos.

Figura 24 - Distribuição percentual das saídas de água na planta de metanol



De toda água que adentra o processo, em torno de 76% sai em forma de efluentes ou perdas. Dos 7,7% de efluente inorgânico, 60,6% são referentes às perdas líquidas da torre de resfriamento. Já dos 6,1% de efluente orgânico, 44,7% provém do processo na etapa de purificação do metanol cru, 24,7% de drenos durante o processo e 30,6% são referentes a efluentes sanitários e chuva do período. Além dos sistemas de drenagem, uma grande

quantidade de água é lançada na atmosfera na forma de perdas de vapor e evaporação da torre de resfriamento. Como pode ser visto na Figura 24, mais da metade da perda é na forma de evaporação de água na torre de refrigeração, como já se era esperado. Os sistemas de resfriamento são responsáveis por grande parte das perdas de água na indústria devido à evaporação, falta de manutenção e a forma de operar em sistema aberto (OLIVEIRA, 2011b).

O vapor lançado para a atmosfera inclui, principalmente, perdas por gaxetas e flanges de válvulas, passagens indevidas pelos *vents*, controle de pressão do sistema de vapor e equipamentos, e excesso de vapor produzido e não utilizado. Estas perdas de vapor à atmosfera correspondem 7,5% do consumo de água da planta. Entretanto, o percentual dessas perdas para a atmosfera pode ser maior se levar em consideração as perdas advindas do percentual da chaminé e de outras perdas advindas dos 9,2% do vapor de alta pressão e baixa pressão que são enviados para as outras unidades da empresa e não foram avaliadas.

3.3 AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE INDICADOR AMBIENTAL UTILIZANDO DADOS ADVINDOS DA METODOLOGIA TECLIM APRIMORADA

A metodologia TECLIM aprimorada aliada à construção de indicadores ambientais propicia a qualidade nos dados do indicador, uma vez que integra dois importantes fatores para conceber informações mais consistentes, que são: o balanço reconciliado e a avaliação da incerteza. Ao usar os dados oriundos do emprego da metodologia TECLIM aprimorada, é exequível propagar a incerteza de cada componente do indicador relacionado à água para obter a incerteza do próprio indicador. Esta avaliação da incerteza de indicadores ambientais é primordial para embasar as tomadas de decisão. Logo, indicadores com dados da metodologia proposta pode ser uma ferramenta complementar para um melhor gerenciamento hídrico.

3.3.1 Cálculo do indicador ICAM da planta de metanol

O indicador de desempenho operacional de consumo de água (ICAM) é utilizado pelos gestores da planta de metanol para ter um acompanhamento do consumo de água de *make-up* da planta em relação ao limite previamente estabelecido pela empresa. O seu cálculo é demonstrado pela Equação 19, em que: $\bar{\rho}_j$ e \bar{m}_j são a massa específica média (kg/m^3) e a vazão mássica média (t/h) de cada tipo j de água, respectivamente, \bar{P} é a vazão mássica média

da produção de metanol cru (t/h) e \bar{C} é a fração mássica média de metanol (adimensional). Ambos os fatores, numerador e denominador, são dispostos para o mesmo período de tempo e multiplicados por 24 para converter horas em dia.

$$ICAM = \frac{\sum_{j=1}^2 24 \cdot \left(\frac{1000}{\bar{\rho}_j}\right) \cdot \bar{m}_j}{24 \cdot \bar{C} \cdot \bar{P}} \quad (19)$$

Os dados hídricos que compõem \bar{m}_j foram extraídos do balanço reconciliado proveniente da aplicação da metodologia TECLIM aprimorada para assegurar uma melhor confiança aos dados. Mantendo a coerência de usar dados reconciliados, o denominador do indicador também foi retirado de um balanço reconciliado.

Devido à inviabilidade de efetuar todo o balanço reconciliado em relação ao lado do processo produtivo de metanol, foi realizado o balanço de apenas um volume de controle específico do processo, abrangendo a variável \bar{P} da produção de metanol cru. Quando se passa a analisar o lado do processo, se torna mais provável existir medição das principais correntes, ainda mais das correntes referentes à quantificação de produção. No caso da planta de metanol, para a construção do balanço definido (um nó do processo), havia redundância das variáveis medidas necessárias, sendo assim possível empregar os métodos clássicos de reconciliação e avaliação da incerteza.

Tabela 8 - Cálculo do indicador ICAM

Item	\bar{m}_j	\bar{P}
Vazão do balanço	Mapeada	Medida
Balanço de massa construído	Balanço hídrico	Balanço de um nó do processo
Incerteza das vazões do balanço	Conceito de qualidade de informação (QI)	Lei de propagação da incerteza (LPU) (BIPM <i>et al.</i> , 2008a)
Reconciliação de dados	Metodologia TECLIM	Metodologia clássica (CROWE; CAMPOS; HRYMAK, 1983)
Incerteza das vazões reconciliadas	Metodologia proposta da Figura 11	Matriz de covariância do nó reconciliado (SOUZA <i>et al.</i> , 2011).
Construção das PDFs das vazões reconciliadas	Metodologia proposta da Figura 11	Função de geração de números aleatórios a partir de uma distribuição normal multivariada

Desta forma, dois procedimentos foram realizados para construir o indicador ICAM, resumido pela Tabela 8. Vale destacar que a massa específica e a fração mássica de metanol foram parâmetros considerados constantes e com incertezas desprezíveis neste estudo.

A avaliação do impacto da incerteza associada ao indicador ICAM foi realizada para demonstrar a importância desta análise no que diz respeito a possíveis ações assertivas de melhoria de desempenho ambiental. Em posse de todas as variáveis que compõem o indicador, a incerteza do indicador foi executada usando a simulação de Monte Carlo (BIPM *et al.*, 2008b), de modo a incorporar as incertezas tanto das vazões hídricas reconciliadas, como também da vazão de produção de metanol cru.

3.3.2 Balanço reconciliado do denominador do indicador ICAM

A variável \bar{P} do denominador, referente à produção de metanol cru, foi retirada de um balanço definido (um nó do processo) de produção de metanol. Para construir este balanço havia redundância das variáveis medidas necessárias, e por isso, foi possível empregar o método de reconciliação de dados clássica proposto por Crowe, Campos e Hrymak (1983) – Equação 2 e Equação 3 – e realizada a avaliação da incerteza de medição requerida pelo método do GUM (BIPM *et al.*, 2008a).

O GUM (BIPM *et al.*, 2008a) estabelece os critérios e regras gerais, reconhecidas internacionalmente pela comunidade metrológica, para avaliar e expressar a incerteza de medição de um sistema MISO, ou seja, de um sistema com várias grandezas de entrada e uma única grandeza de saída (mensurando). Ele se baseia na lei de propagação da incerteza (LPU) que consiste em propagar as estimativas das grandezas de entrada e suas incertezas-padrão para o mensurando, de modo a obter a melhor estimativa do seu valor e das suas incertezas associadas. Informações sobre o método pode ser obtidas no GUM (BIPM *et al.*, 2008a), e nas revisões encontradas nos trabalhos de: Bich, Cox e Michotte (2016), Cox *et al.* (2003), Efremova e Chunovkina (2017a, 2017b), Kacker (2006), Kacker e Jones (2003), Kacker, Sommer e Kessel (2007), Kacker, Toman e Huang (2006) e Martins *et al.* (2010b).

A definição da incerteza-padrão combinada de cada uma das correntes do nó do processo foi calculada pela LPU baseada em todos os fatores disponíveis que impactavam o resultado da medição: as medidas diretas de cada dia, a resolução do instrumento e as correções e fatores de correções advindas da calibração dos instrumentos. A Tabela 9 exhibe a

média dos valores medidos e suas incertezas-padrão combinadas, considerando uma análise bayesiana para as incertezas-padrão do Tipo A e do Tipo B.

A Tabela 9 mostra também os limites operacionais inferiores (*lb*) e superiores (*ub*) dos valores medidos, necessários para realizar a reconciliação de dados. A restrição do balanço de massa é dada por uma equação, na qual P01 é uma variável de entrada e P02, P03 e P04 são as variáveis de saída. Na Tabela 10 estão apresentados os resultados finais, após aplicar a reconciliação de dados clássica e realizar a estimativa das incertezas-padrão das vazões reconciliadas pela Equação 11 e Equação 12 (SOUZA, 2011; SOUZA *et al.*, 2011). Os resultados da Tabela 10 foram obtidos empregando a mesma configuração usada para realizar a reconciliação de dados da metodologia TECLIM: o programa MATLAB, versão 2016b, com o método de otimização quadrática (*quadprog*) e o algoritmo “*interior-point-convex*”.

Tabela 9 - Dados para realizar a reconciliação de dados do balanço do nó do processo

Variável	Média do valor medido / (t/h)	<i>lb</i> / (t/h)	<i>ub</i> / (t/h)	Incerteza-padrão combinada u_m calculado pelo método GUM / (t/h)
P01	12,20	0,00	infinito	$1,4 \cdot 10^{-1}$
P02	1,51	0,42	4,62	$3,7 \cdot 10^{-2}$
P03	1,96	1,30	2,95	$3,8 \cdot 10^{-4}$
P04	9,27	6,72	12,60	$3,8 \cdot 10^{-1}$
Diferença no balanço de massa	-0,60	-	-	-

Tabela 10 - Resultados para o balanço reconciliado do nó do processo

Variável	Média do valor reconciliado / (t/h)	Incerteza-padrão u_r / (t/h)
P01	12,27	$1,3 \cdot 10^{-1}$
P02	1,51	$3,7 \cdot 10^{-2}$
P03	1,96	$3,8 \cdot 10^{-4}$
P04	8,80	$1,4 \cdot 10^{-1}$
Diferença no balanço de massa	0,00	-

Um estudo comparativo entre as Tabela 9 e Tabela 10 nota-se que a reconciliação de dados zerou o desequilíbrio no balanço de massa existente antes da reconciliação. Outro aspecto importante a ser observado é que as incertezas-padrão sofreram variações após a

reconciliação, modificando o valor reconciliado com mais intensidade para as variáveis que tinha maior incerteza antes da reconciliação. A variável P04, com maior incerteza do conjunto, teve o seu valor médio alterado de forma mais intensa do que a variável P03 que tinha a menor incerteza entre as variáveis. Este comportamento valida o esperado da reconciliação de dados, que faz uma distribuição das incertezas e deve alterar com maior amplitude as variáveis com maior incerteza. Essa variação da incerteza pode ser vista melhor pelo desvio relativo apresentado na Tabela 11.

Uma análise complementar em relação às incertezas-padrão (u) antes e depois da reconciliação pode ser obtida calculando a incerteza-padrão combinada global (u_G) – Equação 20 (SOUZA, 2011). Na Tabela 11 observa-se que a incerteza global após a reconciliação diminuiu em torno de 54%. Ou seja, isto está de acordo com o fato que a reconciliação de dados melhora a confiança nas informações sobre os elementos em estudo.

$$u_G = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_i^2} \quad (20)$$

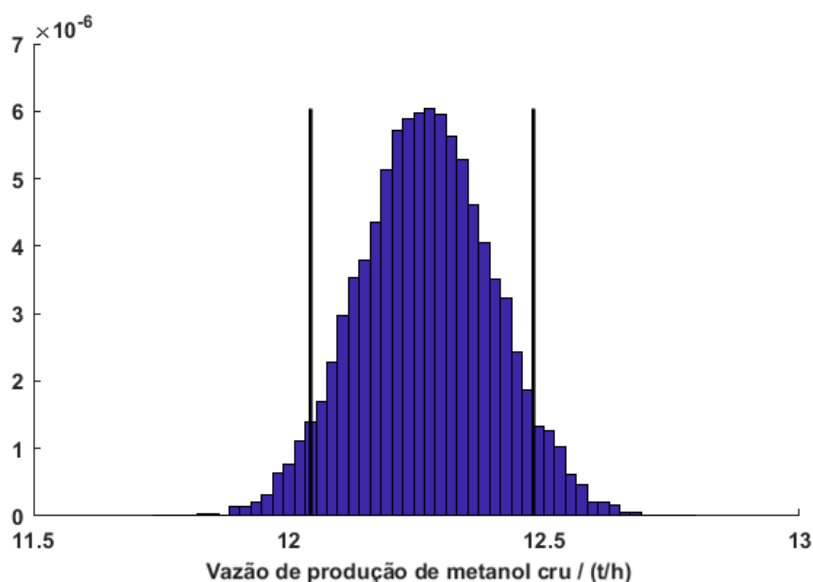
Tabela 11 - Comparação entre as incertezas-padrão antes e após a reconciliação

Variável	Incerteza-padrão combinada antes da reconciliação u_m / (t/h)	Incerteza-padrão após a reconciliação u_r / (t/h)	Desvio relativo / % $[(u_m - u_r) / u_m]$
P01	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$1,3 \cdot 10^{-1}$	6,4
P02	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	0,3
P03	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	- 0,1
P04	$3,8 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	64,4
u_G	$4,1 \cdot 10^{-1}$	$1,9 \cdot 10^{-1}$	54

A variável P01 é a variável necessária ao cálculo do indicador. A PDF de P01, ou seja, a PDF de P do indicador, está associada às PDFs das outras correntes reconciliadas do balanço definido (do nó). Pelo teorema do limite central (CLT), a combinação de um grande número de distribuições resulta em uma distribuição normal (COSTA-FÉLIX; BERNARDES, 2017). O método GUM utiliza-se do apoio do CLT para presumir que a PDF da grandeza de saída segue uma distribuição gaussiana (BICH; COX; MICHOTTE, 2016; COX; HARRIS, 2003; EFREMOVA; CHUNOVKINA, 2017a). Sendo assim, por essas premissas, para

construir a PDF de P foi necessário utilizar uma função de geração de números aleatórios a partir de uma distribuição normal multivariada (*mvnrnd* no MATLAB). O número definido para isto foi o mesmo número de amostras (M) definido para as variáveis de m_j . Como m_j é composto pelos resultados obtidos das vazões de água clarificada e desmineralizada da aplicação da metodologia TECLIM aprimorada exposto na Subseção 3.2.3, o número de interações foi de 10^4 . A PDF de P (Figura 25) é, então, utilizada posteriormente no método de Monte Carlo para avaliação do indicador.

Figura 25 - PDF da vazão de produto de metanol cru para $M = 10^4$ no MMC e 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas)



3.3.3 Avaliação da incerteza do indicador ICAM

Definido as PDFs de água clarificada e água desmineralizada, detalhadas na Subseção 3.2.3, como também construída a PDF da vazão de metanol cru na Subseção 3.3.2, torna-se factível realizar a avaliação da incerteza do indicador ICAM pelo método de propagação das PDFs, ou seja, Monte Carlo (BIPM *et al.*, 2008b).

O número de amostras (M) adotado inicialmente para a simulação de Monte Carlo foi o mesmo estabelecido no balanço hídrico reconciliado, ou seja, 10^4 . Para conferir se o número de amostras de 10^4 atende ao indicador, a simulação de Monte Carlo foi realizada 30 vezes para avaliar a sua repetibilidade. A Figura 26 e Figura 27 apresentam os resultados para essa

análise a partir da estimativa da PDF da QI usada para obter os valores hídricos do numerador do indicador. Como o limite máximo do indicador estabelecido pela empresa só tem dois algoritmos significativos, as incertezas-padrão encontradas para M igual a 10^4 atendem as condições estabelecidas, em que a média do desvio-padrão dos 30 desvios-padrão para a Figura 26, que considera a distribuição normal para as PDFs da QI, é de $3,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{t}$ e para a Figura 27, que considera a distribuição uniforme para as PDFs da QI, é de $3,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{t}$. Ou seja, pode-se considerar que existe uma dispersão baixa das incertezas-padrão.

Figura 26 - Avaliação da repetibilidade da incerteza-padrão do indicador ICAM para $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI seguindo uma distribuição normal

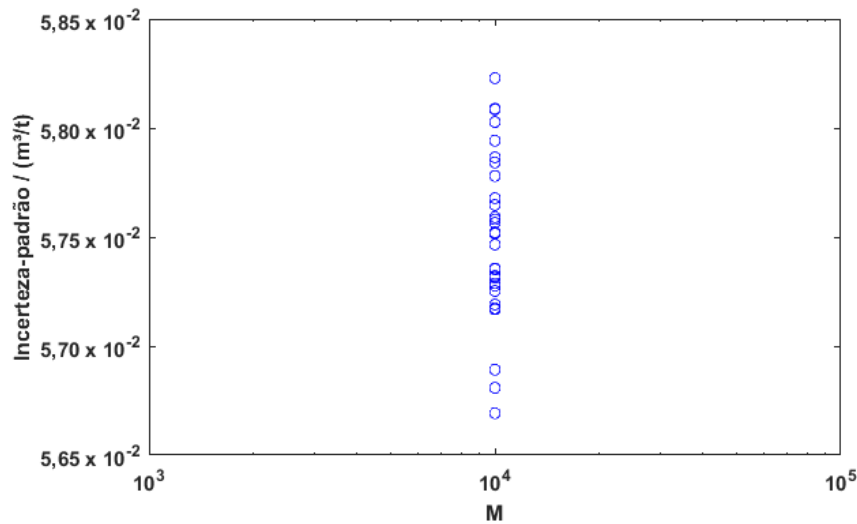
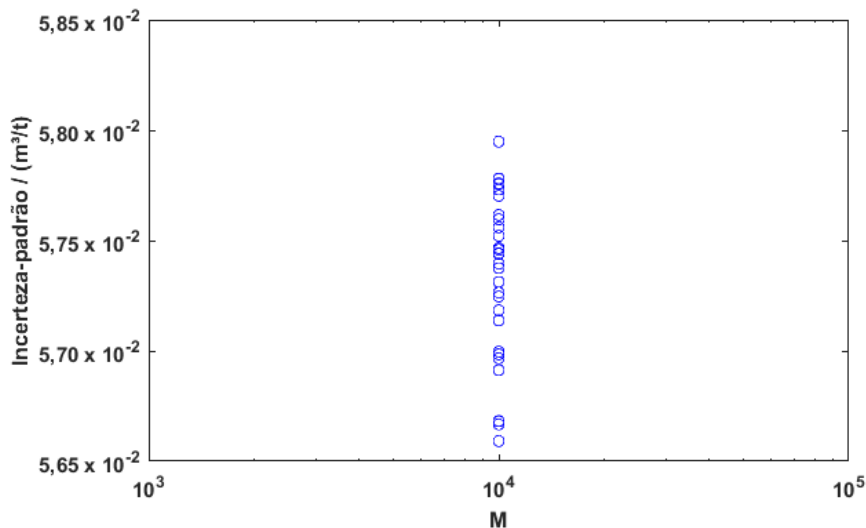


Figura 27 - Avaliação da repetibilidade da incerteza-padrão do indicador ICAM para $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI seguindo uma distribuição uniforme



Estabelecido que o M igual a 10^4 atende para o indicador, a Figura 28 apresentam as PDFs resultantes para o indicador ICAM, realizando uma simulação de Monte Carlo para cada estimativa de PDF da QI. A Tabela 12 e Tabela 13 exibem os resultados médios obtidos para a simulação de MMC, sendo que a Tabela 12 adota a distribuição normal para a PDF da QI e a Tabela 13 a distribuição uniforme para a PDF da QI. A incerteza-padrão associada não exibiu diferenças nos resultados obtidos para dois algoritmos significativos em relação à estimativa das PDFs da QI.

Figura 28 - PDF resultante do indicador ICAM assumindo: $M = 10^4$ no MMC, 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas) e: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI

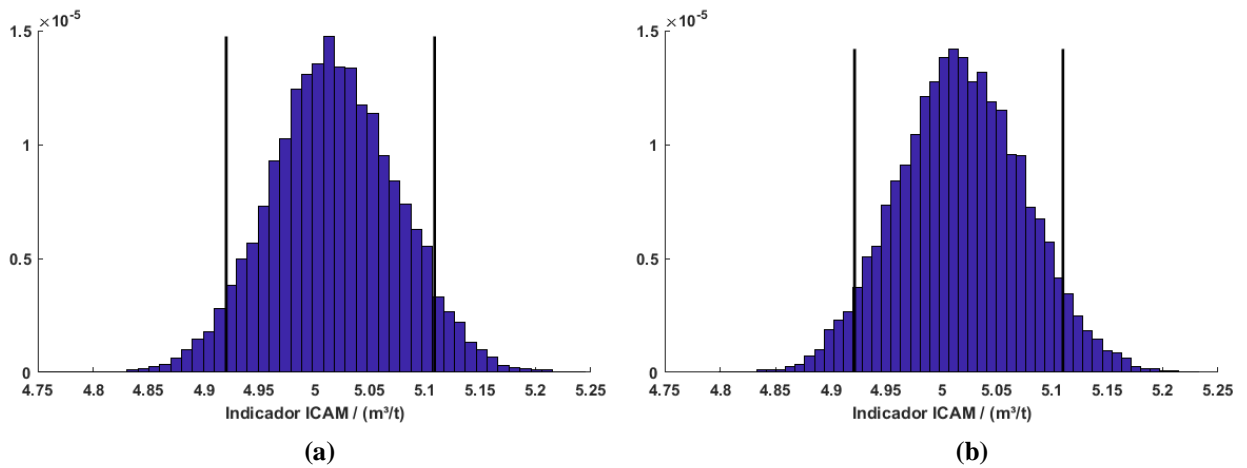


Tabela 12 - Resultados para o ICAM com $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI com distribuição normal

Estimativa do valor do indicador / (m³/t)	Incerteza-padrão do indicador / (m³/t)	Intervalo de abrangência para probabilidade de 90% / (m³/t) [LI; LS]	Tamanho do intervalo de abrangência / (m³/t)	Incerteza expandida relativa do indicador / %
5,0	$5,8 \cdot 10^{-2}$	[4,9; 5,1]	0,2	2%

Tabela 13 - Resultados para o ICAM com $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI com distribuição uniforme

Estimativa do valor do indicador / (m³/t)	Incerteza-padrão do indicador / (m³/t)	Intervalo de abrangência para probabilidade de 90% / (m³/t) [LI; LS]	Tamanho do intervalo de abrangência / (m³/t)	Incerteza expandida relativa do indicador / %
5,0	$5,8 \cdot 10^{-2}$	[4,9; 5,1]	0,2	2%

O valor estimado para o indicador de 5,0 m³/t está dentro do limite máximo atual de 5,3 m³/t estabelecido pela empresa. Entretanto, metas são estabelecidas pelos gestores em cima do indicador com o objetivo de minimizar o consumo. O indicador possui uma incerteza percentual em torno de 2%. Desta forma, metas de redução do indicador de até 2% não devem ser estabelecidas, pois estão dentro da faixa de abrangência do indicador. Metas acima de 2% só irão atingir o objetivo estipulado se outras medidas operacionais forem tomadas. Isto é, se a meta da empresa for minimizar em 5% o seu valor atual do indicador, ou seja, atingir 4,8m³/t, pelo conhecimento da incerteza, nota-se que a redução mais factível será apenas em torno de 3%. Para atingir efetivamente os 5%, ações ou manobras no processo seriam necessárias para diminuir a incerteza, em equivalência a 8% ou 11% do valor atual. Analogamente, se a meta for reduzir o indicador em 10%, isto é, minimizar o indicador para 4,5 m³/t, a redução mais realista será ao redor de 8%. Para atingir os 10%, ações em equivalência a 17% ou 20% do valor atual precisariam ser tomadas, que pode significar, inclusive, em um inconveniente do ponto de vista operacional.

Portanto, a efetividade de qualquer ação eficaz da gestão dos recursos hídricos, no sentido de minimizar o consumo de água, perpassa pela análise dos limites probabilísticos associados ao indicador. Com isso, este trabalho reitera a importância de avaliar a incerteza de um indicador de desempenho ambiental para maior assertividade nas tomadas de decisão.

3.3.4 Sugestão de indicador para avaliar o consumo total de reposição de água na planta de metanol

O indicador ICAM da planta de metanol serve para analisar o consumo de água de *make-up* da planta, já que esta é a parcela de água comprada de uma empresa parceira. Entretanto, para avaliar o consumo efetivo de água de reposição da planta, é preciso adicionar ao cálculo do indicador ICAM a corrente aquosa referente à água do poço artesiano (variável F01), retirado de um poço artesiano existente dentro da empresa. Assim, usando as mesmas condições definidas para o ICAM, a Figura 29 mostra as PDFs resultantes para este indicador de consumo total de reposição de água no limite de bateria da planta, denominado de IREP. Os resultados médios deste indicador IREP estão apresentados na Tabela 14 e Tabela 15, sendo que a Figura 14 utiliza os dados hídricos do numerador estimando distribuição normal para a PDF da QI e a Figura 15 estimando distribuição uniforme para a PDF da QI.

Comparando o indicador IREP com o ICAM, percebe-se que o IREP aumentou $1 \text{ m}^3/\text{t}$ no seu valor estimado em relação ao ICAM, mas em termos de análise de abrangência do indicador, o tamanho do intervalo de abrangência permaneceu o mesmo para dois algoritmos significativos.

Figura 29 - PDF resultante do indicador IREP assumindo: $M = 10^4$ no MMC, 90% de probabilidade de abrangência (linhas pretas) e: (a) distribuição normal para a QI e (b) distribuição uniforme para a QI

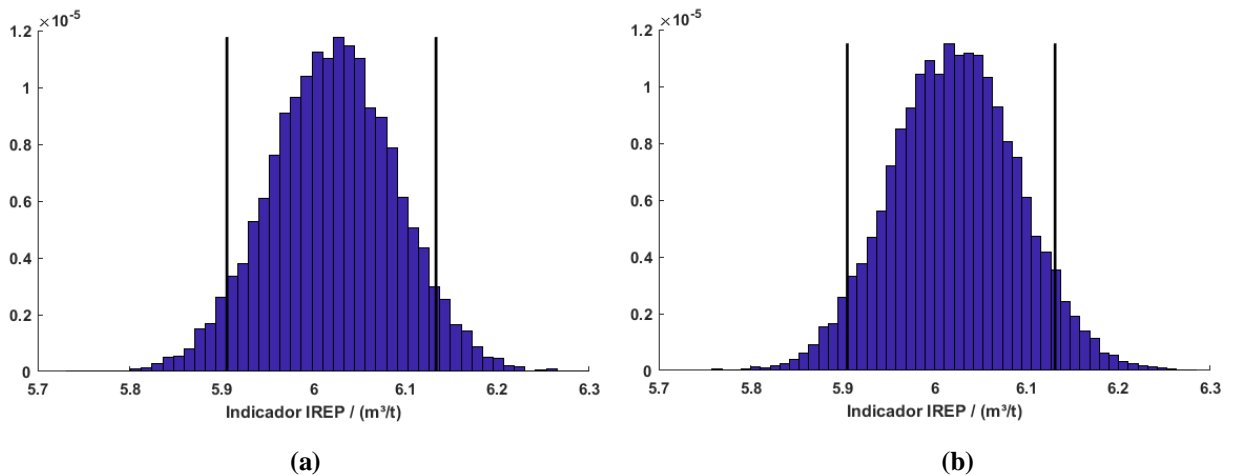


Tabela 14 - Resultados para o IREP com $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI com distribuição normal

Estimativa do valor do indicador / (m^3/t)	Incerteza-padrão do indicador / (m^3/t)	Intervalo de abrangência para probabilidade de 90% / (m^3/t) [LI; LS]	Tamanho do intervalo de abrangência / (m^3/t)	Incerteza expandida relativa do indicador / %
6,0	$6,9 \cdot 10^{-2}$	[5,9; 6,1]	0,2	2%

Tabela 15 - Resultados para o IREP com $M = 10^4$ no MMC e numerador oriundo de QI com distribuição uniforme

Estimativa do valor do indicador / (m^3/t)	Incerteza-padrão do indicador / (m^3/t)	Intervalo de abrangência para probabilidade de 90% / (m^3/t) [LI; LS]	Tamanho do intervalo de abrangência / (m^3/t)	Incerteza expandida relativa do indicador / %
6,0	$6,9 \cdot 10^{-2}$	[5,9; 6,1]	0,2	2%

Capítulo 4

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo compreende as conclusões mais relevantes identificadas durante a construção do presente trabalho. Além disso, são apresentados direcionamentos para futuras aplicações na planta de metanol, assim como sugestões para continuidade na linha de pesquisa.

4.1 CONCLUSÕES

Neste trabalho é feita uma proposta de melhoria na metodologia TECLIM com o intuito de inserir na construção do balanço hídrico reconciliado à consideração das incertezas associadas ao conceito de qualidade de informação (QI). A QI possui uma incerteza devido a sua construção empírica, que pode não ser desprezível em relação aos resultados reconciliados. Assim, a metodologia TECLIM aprimorada é composta de uma definição de uma incerteza-padrão para a QI, integrada a reconciliação de dados da metodologia TECLIM e a avaliação de incerteza pelo método de Monte Carlo. Como resultado de sua aplicação são obtidos os valores reconciliados mais esperados e as suas incertezas.

A metodologia TECLIM aprimorada permite refinar a construção de indicadores de desempenho ambiental relacionados à água, propiciando a propagação das incertezas das vazões aquosas reconciliadas para a avaliação da incerteza do indicador. Esta avaliação do indicador permite tomada de decisão mais efetivas pelos gestores, pois auxilia no direcionamento de ações mais promissoras para identificar e solucionar problemas, aprimorar o processo hídrico e torná-lo mais sustentável. Desta forma, a metodologia TECLIM aprimorada pode ser usada como instrumento de aperfeiçoamento da gestão dos recursos hídricos nos *sites* industriais, onde a medição das correntes aquosas não são prioridades.

A legitimação da aplicabilidade da metodologia TECLIM aprimorada foi realizada em uma planta de metanol existente no Polo Petroquímico de Camaçari. A construção de uma escala QI específica para a planta de metanol viabilizou a realização da reconciliação de dados na planta sem redundância de informação, dos quais 64% de suas correntes possuíam

fontes de informação sem confiança ou pouco confiável. A reconciliação de dados do balanço hídrico operacional e vivo permitiu tornar o desequilíbrio nulo, como também possibilitou validar a representatividade da escala QI, já que reproduziu valores reconciliados coerentes com a realidade da planta.

A partir da escala QI, foi atribuída uma incerteza-padrão de 10% para cada QI. Em seguida, uma análise de sensibilidade foi feita para definir a PDF da QI e o número de amostras (M) adequado para realizar as simulações de Monte Carlo. Pela análise da PDF, foi identificado que os tipos de distribuição normal e uniforme interferem de forma semelhante nos resultados reconciliados. A análise do número de amostras definiu o M de 10^4 por aliar a convergência da incerteza-padrão, com o menor tempo de processamento computacional.

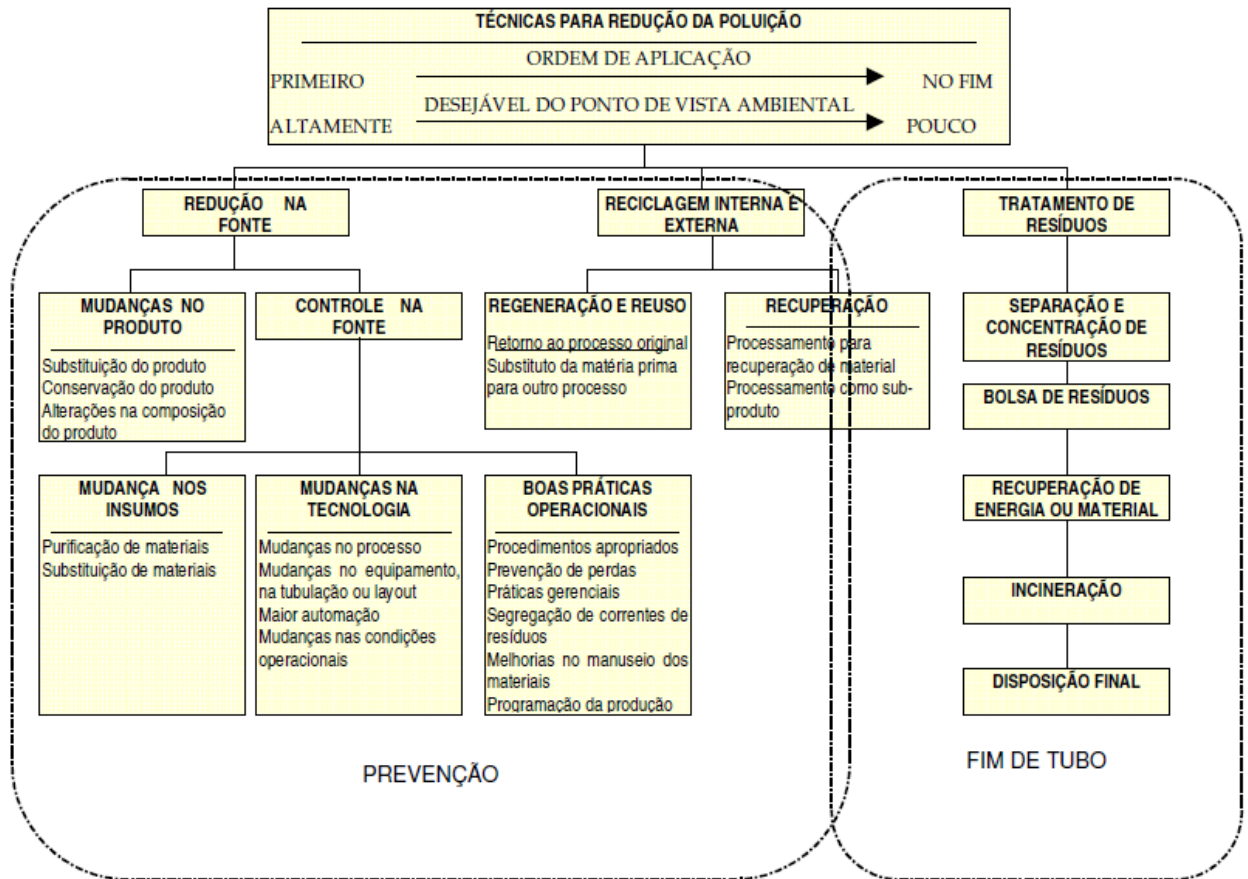
Os resultados obtidos da metodologia TECLIM aprimorada permitiu um diagnóstico mais confiável da topologia hídrica da planta, cujo conjunto de dados e informações constitui-se indispensável para a realização de melhorias operacionais. A vazão total consumida pelo volume de controle da planta de metanol é em torno de [57,14; 57,92] t/h, onde os maiores consumidores são o desaerador, a caldeira a vapor e a torre de resfriamento. Dessa água que adentra o processo, em torno de 76% sai em forma de efluentes ou perdas, dos quais quase 55% são referentes a perdas por evaporação na torre de resfriamento.

O indicador ICAM da planta de metanol referente ao consumo de água de *make-up* do processo foi calculado utilizando como dados hídricos os resultados obtidos da aplicação da metodologia TECLIM aprimorada. Isto permitiu uma melhor qualidade nos dados que compõem o indicador, como também possibilitou a avaliação da incerteza do próprio indicador ao propagar as incertezas das vazões hídricas reconciliadas. Como o indicador possui uma incerteza em torno de 2%, as metas de redução do consumo não devem ser menores de 2%, pois está dentro do intervalo de abrangência. Metas acima de 2% não vão atingir realmente o objetivo estipulado, a não ser que outras medidas operacionais sejam tomadas. Portanto, a avaliação da incerteza de indicador de desempenho ambiental é muito importante para maior assertividade nas tomadas de decisão.

4.2 RECOMENDAÇÕES PARA APLICAÇÃO NA PLANTA DE METANOL

Os resultados obtidos ao longo deste trabalho possibilitam evidenciar oportunidades de redução de impactos ambientais que podem servir de subsídios para a intervenção no processo. Algumas discussões e recomendações identificadas estão listadas a seguir. O objetivo destas sugestões é promover soluções tangíveis para a empresa, com ganhos ambientais, financeiros e de desempenho na empresa, assim como resultados intangíveis, com ambiente de trabalho participativo e melhoria da imagem da empresa.

Figura 30 - Diagrama esquemático da ordem de prioridade sugerida pela Produção mais Limpa



Fonte: Adaptado de LaGrega *et al.* (1994, apud Kiperstok *et al.*, 2011).

A planta de metanol já utiliza técnicas de reuso, porém ainda existem muitas oportunidades de melhoria no processo. A lógica da prevenção da poluição deve ser incorporada na empresa para garantir a eficácia do sistema de gestão ambiental certificado

pela ISO 14001, com foco na melhoria contínua do desempenho ambiental. Deste modo, as medidas a serem implantadas devem seguir os princípios da Produção mais Limpa e as estratégias de otimização descritas na hierarquia do organograma de LaGrega *et al.* (1994) – Figura 30. Ou seja, devem-se adotar primeiramente técnicas de prevenção com redução na fonte, seguida de reuso e reciclagem interna e, por último, reuso e reciclagem externa. Em todas as circunstâncias, o efluente líquido deve ser considerado um fluido que faz parte dos processos de produção, apesar de sua qualidade inferior (KIPERSTOK *et al.*, 2013b).

Algumas das sugestões para implementação na planta de metanol são:

- Prospectar as rotas tecnológicas de produção de metanol para analisar a substituição ou adaptação da rota atual para um menor impacto ambiental;
- Verificar se as condições de processo podem ser ajustadas, sem perder a eficiência do processo, como, por exemplo, a relação vapor/carbono e H_2/CO na produção do gás de síntese;
- Inserir boas práticas operacionais. Algumas destas ações recomendadas a fazer parte dos procedimentos da empresa podem ser:
 - Programa de incentivo ao consumo consciente de água;
 - Campanhas educativas e treinamentos para conscientização dos colaboradores e fornecedores;
 - Auditorias programadas para detecção de perdas;
 - Análise contínua para correção de vazamentos e melhorias no processo;
 - Programa de rotina de manutenção, preventiva e corretiva, e calibração das válvulas, dos instrumentos de medição e dos equipamentos hidráulicos;
- Reparo e calibração das válvulas que se encontram dando passagem;
- Em relação às perdas para atmosfera:
 - Realizar o balanço energético do processo, com enfoque na melhoria da eficiência da torre de resfriamento do tipo tiragem induzida de ar com fluxo cruzado, para tentar minimizar a carga térmica através da melhor integração energética do processo;
 - Realizar a análise físico-química das águas de entrada na torre de resfriamento para avaliar a composição da água de reposição da torre. Este fator tem um papel importante para a otimização do sistema, já que a

composição influência nos ciclos de concentração e nas taxas de purga;

- Melhorar o controle operacional do sistema, realizando uma correta manutenção do sistema, assim como o monitoramento microbiológico, de corrosão, incrustação e da eficiência dos trocadores de calor e da torre de resfriamento;
- Avaliar as alternativas para as perdas de vapor não inerentes ao processo. Variações de carga na planta, mudanças nas condições operacionais e o tempo de campanha são parâmetros que modificam as necessidades do processo e determinam as vazões de entrada e saída de vapor. No caso de a geração ser menor que o consumo, o controle da pressão no sistema de geração de vapor é feito através da abertura de válvulas de controles que reduzem a pressão de uma parte do vapor. No caso de a geração ser maior que o consumo, o controle da pressão é feito pelo lançamento do vapor excedente para a atmosfera. Este segundo caso acontece nas condições de processo, onde a geração de vapor na pressão de 4,6 kgf/cm² é maior que o consumo, o que faz com que haja um excedente de vapor de baixa (VB) lançado na atmosfera. Para Serra (2006), uma solução para o vapor de 4,6 kgf/cm² é aumentar o consumo deste vapor no processo e reduzir a sua geração como exausto nas turbinas. Para isso, ele mostrou a possibilidade de se reduzir a geração através da substituição de uma parte da potência fornecida por turbinas pelo uso de motores elétricos. Mas deve-se analisar esta alternativa para a planta de metanol em termos de segurança e em relação a custo, já que esta opção há um aumento do consumo elétrico. Outras sugestões por Serra (2006) para garantir menos perdas de vapor, e que podem ser implementadas da planta em estudo, é revisar o plano de manutenção preventiva dos equipamentos (turbinados e motorizados), visando mantê-los na condição operacional ótima na maior parte do tempo e realizar a integração energética para identificar oportunidade de reuso do vapor de baixa como fonte de calor para aquecimento de correntes do processo;
- Avaliar as alternativas para as perdas inerentes ao processo. Algumas purgas de equipamentos são inerentes ao processo para evitar concentração

de impurezas, incrustação, corrosão e arraste de impurezas pelo vapor. Mas estas podem ser utilizadas com reuso ou reciclo. Purgadores de vapor na rede de distribuição também são dispositivos importantes para eliminar o condensado e não permitir fugas de vapor. Por isso, é necessário verificar se está corretamente dimensionado, localizado e em perfeito funcionamento, para evitar vazamentos comumente encontrados em flanges, uniões, válvulas e outros acessórios da tubulação. Para reduzir essas perdas, é preciso um plano apropriado de identificação de vazamento, para fazer o reparo ou troca quando necessário. Um plano de avaliação periódica da condição dos purgadores com aparelho de ultrassom é uma recomendação a ser implantada. Uma busca de referências em termos de vazão de purga ideal seria enriquecedora para obter o conhecimento mais sensível de até quando se pode reduzir a purga, sem que as concentrações das impurezas saiam do limite de segurança operacional. Sugestões para reduzir perdas das caldeiras, por exemplo, é aumentar a frequência das análises das impurezas que concentram na água e realizar o registro gráfico dos dados analíticos da água em local visível e próximo ao painel de controle. Assim, seria possível alterar o critério de ajuste da purga, passando-se a buscar a minimização dessa perda sem que os parâmetros químicos saíssem das respectivas faixas de segurança (SERRA, 2006);

- Avaliar a eficiência e a possibilidade de criação de um sistema de condensação para enviar o excesso de vapor, condensado e/ou resfriado, e depois do sistema para o tanque de água desmineralizada;

➤ Em relação ao sistema de efluentes:

- Realizar o levantamento quantitativo do sistema de efluentes. O laboratório pode realizar periodicamente análises físico-químicas das principais das correntes enviadas para os sistemas de efluentes, de forma a definir seus parâmetros em relação à qualidade da água para otimização hídrica. A qualidade da água é a ponto crucial para definir onde a corrente de água pode ser reutilizada (ZAIDEN *et al.*, 2017). Uma atenção também precisa ser dada a temperatura das correntes para não gerar impactos negativos na qualidade no processo, assim como o pH da água para evitar corrosão;

- Após o levantamento quantitativo, a realização da otimização hídrica seria o ideal para encontrar a melhor solução de reaproveitamento e evitar o aumento de concentração de substâncias indesejadas ao processo e possível incrustação. Exemplos de otimização podem ser visto em diversos trabalhos (BAGAJEWICZ, 2000; BAI; FENG; DENG, 2007; DENG; FENG; WEN, 2013; DOYLE; SMITH, 1997; GOMES; QUEIROZ; PESSOA, 2007; SAVELSKI; BAGAJEWICZ, 2000). A priori, de uma forma simplificada, poderia ser estudado o reaproveitamento dos efluentes inorgânicos e orgânicos para a torre de resfriamento. Isso poderia reduzir consideravelmente o consumo de água do poço, um dos objetivos da empresa. O artigo de Hansen, Rodrigues e Aquim (2016) mostraram um exemplo de sucesso da reutilização interna de efluentes geradas como fonte de reposição de água para torre de resfriamento em uma planta petroquímica no sul da Bahia. Uma terceira análise, ao caso de ser necessário tratamento das correntes de efluentes, é recomendada a neutralização de cada sistema de forma segregada, pois o efluente inorgânico contém menos contaminante, do qual o seu tratamento será dificultado se misturando com a qualidade do efluente orgânico. Alguns exemplos de processos de tratamento de efluentes líquidos podem ser encontrados em Mustafa (1998). Para isso, seria necessário analisar técnico e economicamente a construção da própria estação de tratamento de água (ETA) na planta;
- Instalar o Banco de ideias (BI) para verificar outras oportunidades de soluções mais promissoras. Esse processo participativo permitirá um maior envolvimento dos funcionários com a causa;
- Modernizar o sistema de controle atual para um sistema digital e automatizado. A adoção de um sistema de medição contínua, transmitindo sinais para um sistema digital de controle distribuído (SDCD), seria possível conhecer em intervalo de tempo menor e de forma mais rápida as vazões medidas. Isso melhoraria o monitoramento contínuo pelos operadores e no gerenciamento da água;
- Construir uma base histórica eletrônica para investigar estatisticamente a influência entre as suas variáveis para construção e modernização de indicador de

desempenho ambiental;

- Verificar se há a necessidade de substituição de instrumentos existentes para atender a precisão necessária da corrente, como também averiguar a viabilidade de instalação de novos instrumentos nas correntes aquosas para melhorar as fontes de informação disponíveis;
- Elaborar um plano de gerenciamento para atualizar todos os documentos correlacionados após qualquer alteração “*in loco*”. Foram encontradas algumas divergências entre os arquivos técnicos;
- Melhorar a interpretação dos dados e a comunicação entre departamentos. A área comercial, engenharia e terceiros deve alinhar suas fontes de informações, de forma que cada envolvido possa verificar se determinados valores estão coerentes entre as fontes retiradas e dentro do mesmo intervalo de incerteza. A área de logística, por exemplo, tem que verificar com a engenharia se os dados fornecidos pela empresa responsável pelo tratamento do efluente são similares ao medidor existe na planta;
- Emitir relatórios anuais de sustentabilidade, relatando ao nível individual de cada planta, os dados corporativos sobre o uso da água. O objetivo é iniciar a mudança de fornecimento deste tipo de informação, permitindo as agências governamentais, regionais e nacionais, melhorar o balanço hídrico quantitativo nacional por subsetor industrial. Isso pode facilitar também o *benchmarking* entre as empresas produtoras;
- Reaproveitar a água da chuva como uma importante opção para compor o abastecimento de água da indústria, já que ela dispõe de um grande espaço físico. Assim, é cabível um estudo da viabilidade técnico e econômica para captação direta da chuva como avaliar se o aproveitamento de água pluvial é uma alternativa cabível. A NBR nº 15.527/2007 (ABNT, 2007) pode ser consultada, caso seja uma opção, pois sugere alguns requisitos para aproveitamento de água da chuva para fins não potáveis.

4.3 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Algumas ideias para continuidade desta pesquisa são:

- Dar continuidade a aplicação das outras ferramentas da metodologia TECLIM na planta de metanol;
- Realizar o estudo de otimização energética da planta, para agregar na gestão hídrica;
- Replicar este estudo nas outras unidades industriais da empresa;
- Realizar a aplicação da metodologia TECLIM para uso racional de água na parada e partida da planta. Esta utilização ainda não faz parte do escopo da metodologia, mas é um estudo que carece de exploração (OLIVEIRA, 2011b);
- Dar continuidade ao desenvolvimento e aprimoramento das ferramentas da metodologia TECLIM;
- Realizar a avaliação da incerteza das vazões reconciliadas inteiramente pela análise bayesiana.

REFERÊNCIAS

2030 WATER RESOURCES GROUP – 2030 WRG. **Charting Our Water Future: Economic frameworks to inform decision-making.** Washington, DC: 2030 WRG, 2009.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Mudanças climáticas e recursos hídricos: Avaliações e diretrizes para adaptação.** Brasília: ANA, GGES, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. **Água na indústria: uso e coeficientes técnicos.** Brasília: ANA, 2017.

ALVARADO, M. The changing face of the global methanol industry. **IHS Chemical Bulletin**, n. 3, p. 10–11, 2016.

ASAITHAMBI, P.; AZIZ, A. R. A.; DAUD, W. M. A. B. W. Integrated ozone-electrocoagulation process for the removal of pollutant from industrial effluent: Optimization through response surface methodology. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 105, p. 92–102, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15527: Água de chuva: Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 14001: Sistema de Gestão Ambiental: Requisitos com orientações para uso.** Rio de Janeiro, 2015a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR ISO 14031: Gestão Ambiental: Avaliação de desempenho ambiental: Diretrizes.** Rio de Janeiro, 2015b.

BABIERI, J. C. Gestão Ambiental Empresarial. In: **Gestão Ambiental Empresarial: conceitos, modelos e instrumentos.** 2^a ed. São Paulo: Saraiva, 2008. cap. 4, p. 98–135.

BAGAJEWICZ, M. A review of recent design procedures for water networks in refineries and process plants. **Computers and Chemical Engineering**, v. 24, n. 9–10, p. 2093–2113, 2000.

BAHIA (Estado). Decreto nº 14.024, de 06 de junho de 2012. Aprova o Regulamento da Lei nº 10.431, de 20 de dezembro de 2006, que instituiu a Política de Meio Ambiente e de Proteção à Biodiversidade do Estado da Bahia, e da Lei nº 11.612, de 08 de outubro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial do Estado da Bahia**. Bahia, 2012. Disponível em: <http://www.seia.ba.gov.br/sites/default/files/legislation/Decreto%2014024_2012.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2018.

BAHIA (Estado). Lei nº 10.431, de 20 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a Política de Meio Ambiente e de Proteção à Biodiversidade do Estado da Bahia e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado da Bahia**. Bahia, 2006. Disponível em: <http://www.seia.ba.gov.br/sites/default/files/legislation/Lei%2010431_2006.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2018.

BAHIA (Estado). Lei nº 11.612, de 08 de outubro de 2009. Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. **Diário Oficial do Estado da Bahia**. Bahia, 2009. Disponível em: <[http://www.seia.ba.gov.br/sites/default/files/legislation/Lei_11612\[1\].pdf](http://www.seia.ba.gov.br/sites/default/files/legislation/Lei_11612[1].pdf)>. Acesso em: 10 nov. 2018.

BAI, J.; FENG, X.; DENG, C. Graphically based optimization of single-contaminant regeneration reuse water systems. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 85, n. 8 A, p. 1178–1187, 2007.

BARRINGTON, D. J.; PRIOR, A.; HO, G. The role of water auditing in achieving water conservation in the process industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 52, p. 356–361, 2013.

BENQLILOU, C. **Data reconciliation as a framework for chemical processes optimization and control**. 2004. 187 f. Thesis (Doctor of Science) – Department of Chemical Engineering, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.

BERTRAND-KRAJEWSKI, J. L.; BARRAUD, S.; BARDIN, J. P. Uncertainties, performance indicators and decision aid applied to stormwater facilities. **Urban Water**, v. 4, n. 2, p. 163–179, 2002.

BICH, W.; COX, M.; MICHOTTE, C. Towards a new GUM – an update. **Metrologia**, v. 53, n. 5, p. S149–S159, 2016.

BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML. **Evaluation of measurement data –**

Guide to the expression of uncertainty in measurement. [S.l.]: Joint Committee for Guides in Metrology – JCGM 100:2008, 2008a, 134 p.

BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML. **Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method.** [S.l.]: Joint Committee for Guides in Metrology - JCGM 101:2008, 2008b, 90 p.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil:** Brasília, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em: 10 nov. 2018.

BRASIL. Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil:** Brasília, 1998. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/CCivil_03/leis/L9605.htm>. Acesso em: 10 nov. 2018.

BRAVO, J. L. R.; KIPERSTOK, A.; PUSTILNIK, L.; KALID, R.; FONTANA, D. Studies on water conservation at a primary copper metallurgy. In: MERCOSUR CONGRESS ON CHEMICAL ENGINEERING, 2, 2005, Rio de Janeiro. **ENPROMER 2005.** Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda., 2005.

CARVALHO, E.; KIPERSTOK, A.; KALID, R. A.; ESQUERRE-OLIVEIRA, K. P.; MATTOS, M. C. O. SIG como ferramenta de apoio à gestão do uso industrial da água e geração de efluentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25, 2009, Recife. **Anais...** Recife: ABES, 2009. p. 1–6.

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS SENAI-RS – CNTL SENAI-RS. **Questões ambientais e Produção mais Limpa.** Porto Alegre: UNIDO, UNEP, CNTL SENAI-RS, 2003a. 126 p. (Série Manuais de Produção mais Limpa).

CENTRO NACIONAL DE TECNOLOGIAS LIMPAS SENAI-RS – CNTL SENAI-RS. **Indicadores ambientais e de processo.** Porto Alegre: UNIDO, UNEP, CNTL SENAI-RS, 2003b. 48 p. (Série Manuais de Produção mais Limpa).

COMPANHIA PETROQUÍMICA DO NORDESTE – COPENOR. **Descrição de processo da unidade de metanol**. 8. ed. Salvador: Sistema de Gestão Integrado da Empresa, 2013. 57p.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL – CEBDS. **Guia de Produção mais Limpa: Faça você mesmo**. Rio de Janeiro: CEBDS, 2005. 60 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Diário Oficial da União**. 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 10 nov. 2018.

COSTA-FÉLIX, R. P. B.; BERNARDES, A. **Metrologia Volume 1: Fundamentos**. Rio de Janeiro: Brasport, 2017.

COX, M. G.; DESENFANT, M.; HARRIS, P. M.; SIEBERT, B. R. L. Model-based measurement uncertainty evaluation, with applications in testing. **Accreditation and Quality Assurance**, v. 8, n. 12, p. 548–554, 2003.

COX, M.; HARRIS, P. The GUM and its planned supplemental guides. **Accreditation and Quality Assurance**, v. 8, n. 7–8, p. 375–379, 2003.

CROWE, C. M.; CAMPOS, Y. A. G.; HRYMAK, A. Reconciliation of process flow rates by Matrix Projection. Part I: linear case. **AIChE Journal**, v. 29, n. 6, p. 881–888, 1983.

CROWE, C. M. Data reconciliation – progress and challenges. **Journal of Process Control**, v. 6, n. 2–3, p. 89–98, 1996.

CUNHA, R. S. **Avaliação do desempenho ambiental de uma indústria de processamento de alumínio**. 2001. 100 f. Dissertação (Mestre em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

D’EMILIA, G; GASBARRO, D.; GASPARI, A.; NATALE, E. Uncertainty evaluation of EnPIs in industrial applications as a key factor in setting improvement actions. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 655, n. 1, p. 0–10, 2015.

DEMAJOROVIC, J.; JACOBI, P. R. Cobrança do uso da água e comportamento dos usuários industriais na bacia hidrográfica do Piracicaba, Capivari e Jundiá. **Revista de Administração Pública**, v. 49, n. 5, p. 1193–1214, 2015.

DENG, C.; FENG, X.; WEN, Z. Optimization of water network integrated with process models. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 15, n. 3, p. 473–487, 2013.

DOYLE, S. J.; SMITH, R. Targeting water reuse with multiple contaminants. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 75, n. 3, p. 181–189, 1997.

EFREMOVA, N. Y.; CHUNOVKINA, A. G. Development of the concept of uncertainty in measurement and revision of Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Part 1. Reasons and probability-theoretical bases of the revision. **Measurement Techniques**, v. 60, n. 4, p. 317–324, 2017a.

EFREMOVA, N. Y.; CHUNOVKINA, A. G. Development of the concept of uncertainty in measurement and revision of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Part 2. Comparative analysis of basic provisions of the Guide and their planned changes. **Measurement Techniques**, v. 60, n. 5, p. 418–424, 2017b.

FARIAS, A. S.; KIPERSTOK, A.; MEDEIROS, Y. D. P.; BERETTA, M. Aproximação dos conceitos de gestão de recursos hídricos e Produção Limpa, utilizando a abordagem gestão da demanda. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1, 2010, Salvador. **Anais...Salvador: COBESA**, 2010. 1–5 p.

FONTANA, D.; KALID, R.; SARTORI, I.; KIPERSTOK, A.; SILVA, M.; SALES, E. A.; PACHECO FILHO, J. G.; OLIVEIRA, S.; PERAZZO, C. Balanço hídrico – uma nova sistemática. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 15, 2004, Curitiba. **Anais...Curitiba: ABEQ**, 2004.

FONTANA, D.; KALID, R.; KIPERSTOK, A.; SILVA, M. A. S. Methodology for wastewater minimization in the Petrochemical Complex. In: MERCOSUR CONGRESS ON CHEMICAL ENGINEERING, 2005, Rio de Janeiro. **ENPROMER, 2005**. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda., 2005. 1–10 p.

FREIRE, M. T. M. **O consumo racional de água no Aeroporto Internacional de Salvador, Bahia/Brasil**. 2011. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

GOMES, J. F. S.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P. Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 5, p. 474–485, 2007.

GUMBO, B.; MLILO, S.; BROOME, J.; LUMBROSO, D. Industrial water demand management and cleaner production potential: a case of three industries in Bulawayo, Zimbabwe. **Physics and Chemistry of the Earth**, n. 28, p. 797–804, 2003.

GUZZO, F. R. **Estratégias para conservação de água potável através do aproveitamento de fontes não potáveis em uma edificação comercial de grande porte**. 2017. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

HANSEN, E.; RODRIGUES, M. A. S.; AQUIM, P. M. Wastewater reuse in a cascade based system of a petrochemical industry for the replacement of losses in cooling towers. **Journal of Environmental Management**, v. 181, p. 157–162, 2016.

HUANG, Y.; LUO, J.; XIA, B. Application of cleaner production as an important sustainable strategy in the ceramic tile plant – a case study in Guangzhou, China. **Journal of Cleaner Production**, v. 43, p. 113–121, 2013.

IAQUANIELLO, G.; CENTI, G.; SALLADINI, A.; PALO, E.; PERATHONER, S.; SPADACCINI, L. Waste-to-methanol: Process and economics assessment. **Bioresource Technology**, v. 243, p. 611–619, 2017.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Geneva: IPCC, 2014.

JASCH, C. Environmental performance evaluation and indicators. **Journal of Cleaner Production**, v. 8, n. 1, p. 79–88, 2000.

KACKER, R.; JONES, A. On use of Bayesian statistics to make the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement consistent. **Metrologia**, v. 40, n. 5, p. 235–248, 2003.

KACKER, R. N. Bayesian alternative to the ISO-GUM's use of the Welch-Satterthwaite formula. **Metrologia**, v. 43, n. 1, p. 1–11, 2006.

KACKER, R.; TOMAN, B.; HUANG, D. Comparison of ISO-GUM, draft GUM supplement 1 and Bayesian statistics using simple linear calibration. **Metrologia**, v. 43, n. 4, 2006.

KACKER, R.; SOMMER, K.-D.; KESSEL, R. Evolution of modern approaches to express uncertainty in measurement. **Metrologia**, v. 44, n. 6, p. 513–529, 2007.

KENWAY, S.; GREGORY, A.; MCMAHON, J. Urban water mass balance analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 15, n. 5, p. 693–706, 2011.

KIPERSTOK, A. Tecnologias Limpas, capacitação e pesquisa: o curso de especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria. **TECBAHIA**, v. 13, n. 1, p. 136–139, 1998.

KIPERSTOK, A. Implementation of cleaner production practices with the support of a diploma course. **Journal of Cleaner Production**, v. 8, n. 5, p. 375–379, 2000.

KIPERSTOK, A.; SILVA, M.; KALID, R. A.; SALES, E. A.; PACHECO FILHO, J. G. A.; OLIVEIRA, S. C.; PERAZZO, C.; FONTANA, D. Minimização do uso da água na indústria através da parceria entre universidade e empresas: o projeto Braskem-Água. **Bahia Análise & Dados**, v. 13, n. Especial, p. 557–566, 2003.

KIPERSTOK, A.; TORRES, E. A.; MENDONÇA, J. G.; CARDOSO, L. M. F. Implantação e desenvolvimento de uma rede de cooperação em tecnologias limpas com o apoio de cursos de pós-graduação: o caso da Rede de Tecnologias Limpas e Minimização de Resíduos – TECLIM. In: COLÓQUIO INTERNACIONAL SOBRE GESTÃO UNIVERSITÁRIA NA AMÉRICA DO SUL, 4, 2004, Florianópolis. **Anais...Florianópolis: UFSC**, 2004. p. 1–16.

KIPERSTOK, A.; KALID, R.; SALES, E. A. Development of water and wastewater minimization tools for the process industry: the experience of the Clean Technology Network of Bahia, Brazil. In: GLOBAL CONFERENCE ON SUSTAINABLE PRODUCT DEVELOPMENT AND LIFE CYCLE ENGINEERING, 4, 2006, São Carlos. **Sustainable Manufacturing: Proceedings...São Carlos: Suprema**, 2006.

KIPERSTOK, A. O papel da universidade e da Rede TECLIM na introdução das práticas de Produção Limpa na Bahia. In: KIPERSTOK, A. (Org.). **Prata da Casa: construindo Produção Limpa na Bahia**. 1ª ed. Salvador: TECLIM/UFBA, 2008. p. 19–42.

KIPERSTOK, A.; FREIRE, M. T. M.; KALID, R. A. Tecnologias poupadoras de água:

inovação, aspectos socioculturais e manutenção. In: JÚNIOR, W. C. S.; RIBEIRO, E. N. (Org.). **Uso eficiente da água em aeroportos**. São Carlos: RiMa Editora, 2011. p. 215–246.

KIPERSTOK, A.; OLIVEIRA, G. L.; ESQUERRE, K. P. S. O. R.; KALID, R. A. Conservação dos recursos hídricos no semiárido brasileiro frente ao desenvolvimento industrial. In: MEDEIROS, S. S.; GHEYI, H. R.; GALVÃO, C. O.; PAZ, V. P. S. (Org.). **Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas**. Campina Grande: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. p. 207–247.

KIPERSTOK, A.; ESQUERRE, K.; KALID, R.; SALES, E.; OLIVEIRA, G. Rationalizing the use of water in industry – Part 1: Summary of the instruments developed by the Clean Technology Network in the State of Bahia and main results obtained. **Journal of Environmental Protection**, v. 4, p. 486–496, 2013a.

KIPERSTOK, A.; ESQUERRE, K.; KALID, R.; SALES, E.; OLIVEIRA, G. Rationalizing the use of water in industry – Part 2: Instruments developed by the Clean Technology Network in the State of Bahia. **Journal of Environmental Protection**, v. 4, p. 497–507, 2013b.

KURLE, D.; HERRMANN, C.; THIEDE, S. Unlocking water efficiency improvements in manufacturing – from approach to tool support. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 19, p. 7–18, 2017.

LACERDA, L. P.; ALCÂNTARA, C. M. D.; KIPERSTOK, A.; KALID, R.; PUSTILNIK, L.; COHIM, E.; ROCHA, I.; MARINHO, A.; FIGUEIREDO, S.; CABRAL, A. Racionalização do uso de água: projetos de minimização de consumo numa indústria de pigmento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 16, 2006, Santos. **Anais...** Santos: ABEQ, 2006.

LAMBERTON, G. Accounting for Sustainable Development – a case study of City Farm. **Critical Perspectives on Accounting**, v. 11, p. 583–605, 2000.

LIMA NETO, E. P. **Perspectivas de reestruturação das indústrias de química e da energia: a via metanol**. 2009, v. 1, 194 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

LIMA, L.; SANTOS, V.; QUADROS, A.; KALID, R.; KIPERSTOK, A.; SALES, E.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K.; SCHUBACH, R. Banco de idéias do projeto Ecobraskem: uma ferramenta para gestão de oportunidades. In: CONGRESSO TÉCNICO BRASKEM, 1, 2006,

Salvador. **Anais...**Salvador: Braskem, 2006.

MARINHO, M.; GONÇALVES, S.; KIPERSTOK, A. Water conservation as a tool to support sustainable practices in a Brazilian public university. **Journal of Cleaner Production**, v. 62, p. 98–116, 2014.

MARTINS, M. A. F.; AMARO, C. A.; SOUZA, L. S.; KALID, R. A.; KIPERSTOK, A. New objective function for data reconciliation in water balance from industrial processes. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 12, p. 1184–1189, 2010a.

MARTINS, M. A. F.; KALID, R. A.; NERY, G. A.; TEIXEIRA, L. A.; GONÇALVES, G. A. A. Comparação entre os métodos linear e não linear para a avaliação da incerteza de medição. **Revista Controle & Automação**, v. 21, n. 6, p. 557–576, 2010b.

MATHWORKS. **quadprog**. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/optim/ug/quadprog.html>>. Acesso em 10 nov. 2018.

MATHWORKS. **Quadratic Programming Algorithms**. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/quadratic-programming-algorithms.html#bsqsp_m_>. Acesso em 10 nov. 2018.

MATOS, F. F.; MEDEIROS, F. F.; KIPERSTOK, A.; KALID, R.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P. Minimização do uso de água na indústria através da ferramenta digital balanço hídrico. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1, 2010, Salvador. **Anais...**Salvador: COBESA, 2010. 1–5 p.

MATOS, F. F.; KALID, R.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K.; KIPERSTOK, A. Avaliação de um sistema de medição de água em indústrias. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 19, 2012, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: ABEQ, 2012.

MENDES, C.; SOUZA, L. S.; KALID, R.; ESQUERRE, K.; KIPERSTOK, A. Assessment of the uncertainty associated with the energy indicator. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3156–3164, 2011.

MENEZES, F. C.; ESQUERRE, K. P. S. O. R.; KALID, R. A.; KIPERSTOK, A.; MATOS, M. C. O.; MOREIRA, R. Redes neurais artificiais aplicadas ao processo de coagulação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 449–454, 2009.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria: uso racional e reúso**. 1ª ed. São

Paulo: Oficina de textos, 2005.

MOREIRA, R. C. **Minimização de efluentes de uma unidade de tratamento de água industrial**. 2009. 115 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo) – Curso de Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

MUSTAFA, G. S. **Reutilização de efluentes líquidos em indústria petroquímica**. 1998. 99f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

NAKAGAWA, A. K. **Caracterização do consumo de água em prédios universitários: o caso da UFBA**. 2009. 183 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo) – Curso de Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

NARASIMHAN, S.; JORDACHE, C. **Data reconciliation & Gross Error Detection: an intelligent use of process data**. Houston: Gulf Publishing Company, 2000.

NARCISO, M. V. A.; KALID, R. A.; KIPERSTOK, A.; BRAGA, E. A. Nova metodologia para reconciliação de dados: construção de balanços hídricos em indústria utilizando o EMSO[®]. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1, 2010, Salvador. **Anais...**Salvador: COBESA, 2010. 1–5 p.

NARCISO, M.; VALLE, E.; BRAGA, E.; KIPERSTOK, A.; KALID, R. A MINLP formulation to optimize sensor allocation using reconciled data in systems with fewer measurements. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, 6, 2011, Natal. **Anais...**Natal: SBM, 2011a.

NARCISO, M.; VALLE, E.; KIPERSTOK, A.; KALID, R. Validação do modelo MINLP para alocação de instrumentos utilizando dados reconciliados em sistemas sem medições. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO, 7, 2011, Salvador. **Anais...**Salvador: 2011b. 1–6 p.

NARCISO, M. V. A.; VALLE, E. C.; KIPERSTOK, A.; KALID, R. A. Validação do modelo MINLP para alocação de instrumentos utilizando dados reconciliados em sistemas sem medições. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 19, 2012, Rio

de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: ABEQ, 2012. 1–10 p.

NASCIMENTO, L. F.; KIPERSTOK, A. Two new innovative environmental academic programs in Brazil. In: BELL CONFERENCE, 2003, [S.l.]. **Anais...**[S.l.]: [s.n.], 2003.

OLIVEIRA, G. L.; KALID, R. A.; KIPERSTOK, A.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P.; SALES, E. A. Resultados obtidos com a metodologia TECLIM para racionalização do uso de água na indústria. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1, 2010, Salvador. **Anais...**Salvador: COBESA, 2010. 1–5 p.

OLIVEIRA, R. F. S. **Avaliação dos resultados ambientais dos projetos cooperativos da parceria Rede TECLIM/UFBA e Braskem/UNIB BA à luz da Produção mais Limpa.** 2011a. 136 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo) – Curso de Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

OLIVEIRA, G. L. **A metodologia TECLIM para uso racional da água na indústria:** Uma proposta de sistematização. 2011b. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

OLIVEIRA, G. L.; KIPERSTOK, A.; KALID, R. A.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P. S.; SALES, E. A. Metodologia TECLIM para uso racional de água na indústria: o banco de ideias no contexto da metodologia Front-End Loading. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 4, p. 753–764, 2016.

OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P. S.; KIPERSTOK, A.; KALID, R.; SALES, E.; MATTOS, M. C.; COHIM, E.; MOTTA, A. R. P.; MENEZES, F.; LIMA, L.; SILVA, S.; DÓREA, W.; WERLANG, J.; BATISTA, J. SCHUBACH, R. F. Bacia do Complexo Básico e Barreira Hidráulica: reuso de água para fins industriais. In: CONGRESSO TÉCNICO BRASKEM, 1, 2006, Salvador. **Anais...**Salvador: Braskem, 2006.

OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P. S.; KIPERSTOK, A.; KALID, R. A.; COHIM, E.; SALES, E.; MATTOS, M. C. Estudo do potencial hídrico de uma bacia de contenção no Pólo Industrial de Camaçari. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 24, 2007, Belo Horizonte. **Anais...**Belo Horizonte: ABES, 2007. 1–7 p.

OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P. S.; KIPERSTOK, A.; SALES, E. A.; TEIXEIRA, L. S. S.; ANDRADE, S. Indicadores de desempenho operacional: apoio à gestão ambiental de uma

indústria petroquímica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25, 2009, Recife. **Anais...Recife: ABES, 2009a.** 1–8 p.

OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P. S.; KIPERSTOK, A.; KALID, R. A.; SILVA, C. E. P. M.; PIRES, V. F. M. Construção e análise de indicadores de efluentes industriais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25, 2009, Recife. **Anais...Recife: ABES, 2009b.** 1–8 p.

OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P.; KIPERSTOK, A.; MATTOS, M. C.; COHIM, E.; KALID, R.; SALES, E. A.; PIRES, V. M. Taking advantage of storm and waste water retention basins as part of water use minimization in industrial sites. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, n. 3, p. 316–324, 2011.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT – OECD. **OECD Environmental Outlook to 2050: The consequences of inaction.** Paris: OECD, 2012.

ÖZBAY, A.; DEMIRER, G. N. Cleaner production opportunity assessment for a milk processing facility. **Journal of Environmental Management**, v. 84, n. 4, p. 484–493, 2007.

PENDRILL, L. R. Using measurement uncertainty in decision-making and conformity assessment. **Metrologia**, v. 51, n. 4, 2014.

PEROTTO, E.; CANZIANI, R.; MARCHESI, R.; BUTELLI, P. Environmental performance, indicators and measurement uncertainty in EMS context: a case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 4, p. 517–530, 2008.

PHAM, T. T.; DUNG, M. T.; DUC, P. T.; TRANG, H. M.; KHAI, N. M.; THUY, P. T. Industrial water mass balance as a tool for water management in industrial parks. **Water Resources and Industry**, v. 13, p. 14–21, 2016.

PITARCH, J. L.; PALACÍN, C. G.; PRADA, C.; VOGLAUER, B.; SEYFRIEDSBERGER, G. Optimisation of the resource efficiency in an industrial evaporation system. **Journal of Process Control**, v. 56, p. 1–12, 2017.

PUIG, M.; WOOLDRIDGE, C.; DARBRA, R. M. Identification and selection of Environmental Performance Indicators for sustainable port development. **Marine Pollution Bulletin**, v. 81, n. 1, p. 124–130, 2014.

QUADROS, A.; KIPERSTOK, A.; KALID, R. **Sistema de apoio gestão da demanda e uso racional da água em edificações públicas: AGUAPURA VIANET**. Disponível em: <http://www.teclim.ufba.br/site/material_online/publicacoes/pub_art127.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2018.

RAO, P.; O'CASTILLO, O.; INTAL JR, P. S.; SAJID, A. Environmental indicators for small and medium enterprises in the Philippines: an empirical research. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 5, p. 505–515, 2006.

REDE DE TECNOLOGIAS LIMPAS – TECLIM. **Projetos concluídos**. Disponível em: <http://www.teclim.ufba.br/site/projetos_concluidos.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2018.

REN, X. Development of Environmental Performance Indicators for textile process and product. **Journal of Cleaner Production**, v. 8, n. 6, p. 473–481, 2000.

RIAZ, A.; ZAHEDI, G.; KLEMEŠ, J. J. A review of cleaner production methods for the manufacture of methanol. **Journal of Cleaner Production**, v. 57, p. 19–37, 2013.

SANTOS, L. C. A. **Gestão da água em edificações públicas: a experiência no prédio da empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. – EMBASA**. 2010. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana). – Curso de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SAVELSKI, M. J.; BAGAJEWICZ, M. J. On the optimality conditions of water utilization systems in process plants with single contaminants. **Chemical Engineering Science**, v. 55, n. 21, p. 5035–5048, 2000.

SERRA, O. C. **Identificação de oportunidades para redução das perdas de água e energia em um sistema de geração e distribuição de vapor**. 2006. 204 f. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo com ênfase em Produção Limpa) – Curso de Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SILVA, C. E. P. M. **Avaliação da incerteza de Indicadores de Desempenho Ambiental: estudo de caso**. 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

SILVA, S. F.; BRITTO, V.; AZEVEDO, C.; KIPERSTOK, A. Rational consumption of water in administrative public buildings: The experience of the Bahia administrative center, Brazil. **Water**, v. 6, n. 9, p. 2552–2574, 2014.

SOUZA NETO, J. N.; PACHECO, J. G.; SACRAMENTO, L. A.; KALID, R. A.; MAGALHÃES, S. L.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P. Metodologia para aquisição e validação de dados operacionais para aplicação da tecnologia Pinch numa planta de polietileno. In: KIPERSTOK, A. (Org.). **Prata da Casa: construindo Produção Limpa na Bahia**. 1ª ed. Salvador: TECLIM/UFBA, 2008a. p. 193–200.

SOUZA NETO, J. N.; PACHECO, J. G.; SACRAMENTO, L. A.; KALID, R. A.; MAGALHÃES, S. L.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P. Aplicação de integração energética para retrofit de uma planta petroquímica existente. In: KIPERSTOK, A. (Org.). **Prata da Casa: construindo Produção Limpa na Bahia**. 1ª ed. Salvador: TECLIM/UFBA, 2008b. p. 201–206.

SOUZA, L. S.; BRAGA, B. V. D.; KIPERSTOK, A.; KALID, R. A.; SALES, E. A. Balanço hídrico: uma ferramenta para gestão industrial e otimização ambiental. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 25, 2009, Recife. **Anais...Recife: ABES**, 2009. 1–8 p.

SOUZA, L. S.; KALID, R.; MARTINS, M. A. F.; KIPERSTOK, A.; ESQUERRE, K.; QUEIROZ, L. Propagação de incertezas em reconciliação de dados sem redundância de medição. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METROLOGIA, 6, 2011, Natal. **Anais...Natal: SBM**, 2011.

SOUZA, L. S. **Propagação da incerteza na reconciliação de dados com restrições lineares**. 2011. Monografia (Especialização em Automação Industrial com ênfase em Informática Industrial, Instrumentação, Controle e Otimização de Processos Contínuos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

TAM, C. M.; TAM, V. W. Y.; TSUI, W. S. Green construction assessment for environmental management in the construction industry of Hong Kong. **International Journal of Project Management**, v. 22, n. 7, p. 563–571, 2004.

TAN, R. R.; FOO, D. C. Y.; MANAN, Z. A. Assessing the sensitivity of water networks to noisy mass loads using Monte Carlo simulation. **Computers and Chemical Engineering**, v. 31, n. 10, p. 1355–1363, 2007.

TSOULFAS, G. T.; PAPPIS, C. P. A model for supply chains environmental performance analysis and decision making. **Journal of Cleaner Production**, v. 16, n. 15, p. 1647–1657, 2008.

TURKI, M.; MEDHIOUB, E.; KALLEL, M. Evaluation of a national food industry based on environmental performance and condition indicators: critical success and barriers of EMS implementation in Tunisia. **Environment Systems and Decisions**, v. 37, n. 4, p. 423–434, 2017.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. **Guidance Manual: How to establish and operate Cleaner Production Centres**. Vienna: UNIDO, UNEP, 2004a.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP. **Voluntary environmental initiatives for sustainable industrial development: concepts and applications**. 1. ed. Manama: UNEP, 2004b.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME – WWAP. **The United Nations World Water Development Report 2017: Wasterwater: The Untapped Resource**. Paris: UNESCO, 2017.

UNITED NATIONS WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME – WWAP. **The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water**. Paris: UNESCO, 2018.

VALLE, E. C. **Desenvolvimento de uma metodologia para avaliação e monitoramento de sistemas de medição de águas industriais, sujeitos a baixa qualidade de informação**. 2013. 256 f. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador.

VAN DER BRUGGEN, B.; BRAEKEN, L. The challenge of zero discharge: from water balance to regeneration. **Desalination**, v. 188, n. 1–3, p. 177–183, 2006.

VELEVA, V.; ELLENBECKER, M. Indicators of sustainable production: framework and methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 9, n. 6, p. 519–549, 2001.

VIEIRA, D.; BATISTA, T.; KIPERSTOK, A.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K. P.; KALID, R. Desenvolvimento do Sistema de Informações Geográficas (SIG) em projetos de uso racional de água em plantas industriais. In: CONGRESSO BAIANO DE ENGENHARIA

SANITÁRIA E AMBIENTAL, 1, 2010, Salvador. **Anais...Salvador: COBESA, 2010.**

WALKER, M. E.; LV, Z.; MASANET, E. Industrial steam systems and the energy-water nexus. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 22, p. 13060–13067, 2013.

WALSH, B. P.; CUSACK, D. O.; O’SULLIVAN, D. T. J. An industrial water management value system framework development. **Sustainable Production and Consumption**, v. 5, p. 82–93, 2016.

WALSH, B. P.; BRUTON, K.; O’SULLIVAN, D. T. J. The true value of water: a case-study in manufacturing process water-management. **Journal of Cleaner Production**, v. 141, p. 551–567, 2017.

WEISE, K.; WOGER, W. A Bayesian theory of measurement uncertainty. **Measurement Science and Technology**, v. 3, n. 1, p. 1–11, 1992.

WILSON, G. A.; BULLER, H. The use of socio-economic and environmental indicators in assessing the effectiveness of EU agri-environmental policy. **European Environment**, v. 11, n. 6, p. 297–313, 2001.

WORLD ECONOMIC FORUM – WEF. **The Global Risks Report 2018**. 13th Edition. Geneva: WEF, 2018.

YANG, C. J.; JACKSON, R. B. China’s growing methanol economy and its implications for energy and the environment. **Energy Policy**, v. 41, p. 878–884, 2012.

YANG, Y.; SHI, L. Integrating environmental impact minimization into conceptual chemical process design – a process systems engineering review. **Computers & Chemical Engineering**, v. 24, n. 2–7, p. 1409–1419, 2000.

ZAIDEN, J.; CRUZEIRO, B. S.; SOUZA, D. S. T.; FURLAN, L. T.; SCHEEFFER, M.; MODENESI, C. R.; BEZERRA, F. B.; BLOOMFIELD, T.; ARAÚJO, P. Diagnóstico de balanço hídrico em usinas termelétricas e unidades de tratamento de gás da Petrobras. In: XXIV SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 24, 2017, Curitiba. **Anais...Curitiba: SNPTEE, 2017.** p. 1–9.

APÊNDICE A

Restrições do balanço hídrico da planta de metanol

$$F01 - F02 - F03 - F04 = 0$$

$$F02 - F15 = 0$$

$$F05 + F06 + F15 - F07 - F08 - F09 = 0$$

$$F07 - F16 = 0$$

$$F10 - F11 = 0$$

$$F11 - F12 - F13 - F14 = 0$$

$$F12 - F18 = 0$$

$$F67 + F68 - F66 = 0$$

$$F18 + F48 + F49 + F62 + F65 - F27 - F43 - F46 - F52 - F60 - F66 - F69 - F74 = 0$$

$$F66 - F20 - F42 - F44 - F50 = 0$$

$$F20 - F19 - F51 = 0$$

$$F50 - F21 - F53 - F71 = 0$$

$$F52 + F71 - F72 = 0$$

$$F72 - F22 - F54 - F55 = 0$$

$$F22 + F74 - F73 = 0$$

$$F54 - F23 - F77 = 0$$

$$F55 - F56 - F57 = 0$$

$$F56 + F73 - F24 - F25 - F45 - F58 - F59 = 0$$

$$F57 + F58 + F59 + F77 - F64 - F75 = 0$$

$$F60 + F75 - F76 = 0$$

$$F61 - F28 - F29 - F30 - F31 - F32 - F33 - F65 = 0$$

$$F76 - F61 - F62 - F63 = 0$$

$$F64 + F69 - F26 = 0$$

$$F53 - F47 - F48 = 0$$

$$F47 + F51 + F63 - F49 = 0$$

$$F25 - F39 - F40 = 0$$

$$F32 + F40 - F06 = 0$$

$$F16 + F34 - F35 = 0$$

$$F19 + F24 + F31 + F44 + F45 + F46 - F41 = 0$$

$$F04 - F17 = 0$$

$$F17 + F37 + F41 + F70 - F36 = 0$$

$$F38 - F34 - F37 = 0$$

APÊNDICE B

Informações iniciais					Para $M = 10^2$ e QI com distribuição normal				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão u_R / (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,94	5,3E-02	9,85	10,02	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,48	9,2E-02	8,36	8,67	1,1%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	6,5E-03	0,57	0,59	1,1%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,87	6,1E-02	0,77	0,96	7,0%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,32	1,9E-01	15,09	15,63	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,94	6,7E-02	10,81	11,04	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	3,1E-02	2,63	2,73	1,2%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,56	3,0E-01	31,12	32,04	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	1,7E-03	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,29	7,2E-02	34,14	34,39	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,29	7,2E-02	34,14	34,39	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,76	7,2E-02	28,61	28,85	0,3%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	6,8E-03	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	3,7E-03	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,48	9,2E-02	8,36	8,67	1,1%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	3,1E-02	2,63	2,73	1,2%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,87	6,1E-02	0,77	0,96	7,0%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,76	7,2E-02	28,61	28,85	0,3%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	5,8E-03	0,16	0,18	3,4%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	4,3E-03	0,37	0,39	1,1%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	4,7E-04	1,76	1,76	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	9,5E-03	0,11	0,14	7,5%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	3,4E-04	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	2,6E-03	0,11	0,12	2,3%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,32	4,8E-02	16,25	16,40	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,54	9,9E-02	3,37	3,70	2,8%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	5,0E-05	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	2,6E-02	2,86	2,93	0,9%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	7,9E-03	0,35	0,38	2,2%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	4,9E-02	0,98	1,14	4,6%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	8,7E-04	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	2,1E-02	0,27	0,34	6,7%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,57	1,7E-02	0,55	0,60	2,9%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,75	4,0E-02	1,68	1,81	2,3%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	2,0E-02	4,39	4,46	0,5%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	2,5E-02	3,46	3,54	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	4,1E-02	0,15	0,27	19,6%

Informações iniciais					Para $M = 10^2$ e QI com distribuição normal				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão u_R / (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,95	5,5E-02	1,87	2,04	2,8%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	1,2E-02	5,67	5,71	0,2%
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,63	5,6E-02	10,54	10,73	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,86	2,4E-02	0,82	0,90	2,8%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	7,3E-03	0,31	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	3,1E-03	0,48	0,49	0,6%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	1,6E-02	0,24	0,29	6,1%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	1,9E-02	0,06	0,13	19,6%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	2,2E-02	0,05	0,12	27,8%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	4,3E-03	0,17	0,19	2,4%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	7,6E-02	2,77	3,02	2,6%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	1,5E-02	6,70	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,33	1,9E-01	33,97	34,64	0,6%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	2,6E-03	0,21	0,21	1,2%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,15	2,2E-01	2,83	3,59	7,1%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	7,6E-02	2,95	3,20	2,5%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	2,3E-02	2,57	2,64	0,9%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,89	9,9E-02	29,72	30,04	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	4,2E-02	20,45	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,38	1,0E-01	9,22	9,54	1,1%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	4,8E-02	3,03	3,18	1,6%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	8,1E-03	1,02	1,05	0,8%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,96	2,2E-01	2,66	3,40	7,6%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	1,6E-02	6,86	6,91	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	2,1E-03	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	1,6E-02	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,84	1,5E-01	2,65	3,17	5,3%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,53	1,8E-02	1,51	1,57	1,2%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,30	1,9E-01	35,03	35,66	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	8,8E-03	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,75	1,9E-01	22,47	23,10	0,8%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,70	2,1E-01	0,40	1,06	29,3%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	3,4E-03	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,48	2,0E-01	29,22	29,90	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,63	1,2E-01	32,41	32,79	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	9,5E-03	0,15	0,19	5,6%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	1,0E-03	0,04	0,05	2,3%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,11	2,1E-01	12,63	13,32	1,6%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	2,5E-02	16,03	16,10	0,2%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	2,3E-02	2,37	2,45	0,9%

Informações iniciais					Para $M = 10^3$ e QI com distribuição normal				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,93	4,9E-02	9,85	10,00	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,49	8,9E-02	8,34	8,63	1,0%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	5,9E-03	0,57	0,59	1,0%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	6,7E-02	0,76	0,98	7,8%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,31	1,9E-01	14,99	15,59	1,3%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	6,7E-02	10,82	11,04	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	3,0E-02	2,64	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,54	2,9E-01	31,12	32,05	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	1,6E-03	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	7,2E-02	34,18	34,42	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	7,2E-02	34,18	34,42	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	7,1E-02	28,66	28,89	0,2%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	7,9E-03	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	3,3E-03	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,49	8,9E-02	8,34	8,63	1,0%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	3,0E-02	2,64	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	6,7E-02	0,76	0,98	7,8%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	7,1E-02	28,66	28,89	0,2%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	5,6E-03	0,16	0,18	3,3%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	4,3E-03	0,37	0,39	1,1%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	4,7E-04	1,76	1,77	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	9,8E-03	0,11	0,15	7,7%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	3,3E-04	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	2,3E-03	0,11	0,12	2,0%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,31	4,7E-02	16,24	16,39	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,55	1,0E-01	3,38	3,71	2,9%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	5,2E-05	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	2,1E-02	2,86	2,93	0,7%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	6,9E-03	0,36	0,38	1,9%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	4,3E-02	1,00	1,14	4,1%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	8,8E-04	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,30	2,3E-02	0,27	0,34	7,5%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	1,7E-02	0,55	0,60	2,9%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,75	3,7E-02	1,69	1,80	2,1%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	2,1E-02	4,40	4,46	0,5%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	2,6E-02	3,46	3,54	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	4,3E-02	0,15	0,28	20,2%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,96	5,7E-02	1,87	2,05	2,9%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	1,3E-02	5,67	5,71	0,2%

Informações iniciais					Para $M = 10^3$ e QI com distribuição normal				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	5,5E-02	10,53	10,70	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,87	2,6E-02	0,82	0,91	3,0%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	7,3E-03	0,32	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	4,0E-03	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	1,7E-02	0,24	0,29	6,6%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	1,8E-02	0,07	0,13	18,6%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	2,2E-02	0,05	0,12	26,3%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	4,7E-03	0,17	0,19	2,6%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	8,1E-02	2,78	3,04	2,8%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	1,6E-02	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,33	1,9E-01	34,05	34,66	0,5%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	2,3E-03	0,21	0,21	1,1%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,16	2,2E-01	2,77	3,47	6,9%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	8,2E-02	2,97	3,23	2,6%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	2,7E-02	2,57	2,65	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,90	1,0E-01	29,75	30,07	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	4,3E-02	20,44	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,39	1,1E-01	9,21	9,57	1,2%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	4,6E-02	3,05	3,19	1,5%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	9,5E-03	1,02	1,05	0,9%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,94	2,3E-01	2,57	3,32	7,9%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	1,2E-02	6,86	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	1,7E-03	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	1,8E-02	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,83	1,6E-01	2,59	3,12	5,7%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,54	1,9E-02	1,51	1,57	1,2%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,30	1,9E-01	34,99	35,60	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	7,9E-03	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,74	1,9E-01	22,46	23,08	0,8%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,72	2,1E-01	0,39	1,06	29,0%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	3,2E-03	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,47	2,0E-01	29,12	29,76	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,64	1,2E-01	32,43	32,82	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	9,8E-03	0,15	0,19	5,7%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	1,1E-03	0,04	0,04	2,5%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,13	2,2E-01	12,75	13,47	1,7%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	2,2E-02	16,03	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	2,7E-02	2,37	2,45	1,1%

Informações iniciais					Para $M = 10^4$ e QI com distribuição normal				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,93	5,0E-02	9,84	10,01	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,49	9,0E-02	8,34	8,63	1,1%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	6,2E-03	0,57	0,59	1,1%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	6,6E-02	0,74	0,96	7,7%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,30	1,9E-01	15,02	15,60	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	6,4E-02	10,82	11,03	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	3,0E-02	2,63	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,54	2,8E-01	31,07	31,99	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	1,6E-03	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,2%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	7,2E-03	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	3,1E-03	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,49	9,0E-02	8,34	8,63	1,1%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	3,0E-02	2,63	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	6,6E-02	0,74	0,96	7,7%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,2%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	5,9E-03	0,16	0,18	3,5%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	4,6E-03	0,37	0,39	1,2%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	4,8E-04	1,76	1,77	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	1,0E-02	0,11	0,14	7,9%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	3,4E-04	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	2,2E-03	0,11	0,12	1,9%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,32	4,6E-02	16,24	16,39	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,55	1,0E-01	3,39	3,72	2,9%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	5,5E-05	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	2,2E-02	2,86	2,93	0,8%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	6,8E-03	0,36	0,38	1,9%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	4,3E-02	0,99	1,13	4,0%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	8,5E-04	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	2,1E-02	0,27	0,34	6,9%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	1,7E-02	0,55	0,60	3,0%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,74	3,6E-02	1,69	1,81	2,1%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	2,0E-02	4,40	4,46	0,5%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	2,6E-02	3,46	3,54	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	4,3E-02	0,15	0,28	20,3%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,96	5,6E-02	1,87	2,05	2,9%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	1,3E-02	5,67	5,71	0,2%

Informações iniciais					Para $M = 10^4$ e QI com distribuição normal				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	5,3E-02	10,54	10,71	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,87	2,6E-02	0,82	0,91	3,0%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	7,3E-03	0,32	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	3,9E-03	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	1,7E-02	0,23	0,29	6,7%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	1,9E-02	0,07	0,13	19,0%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	2,2E-02	0,05	0,12	26,1%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	4,8E-03	0,17	0,19	2,7%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	7,7E-02	2,78	3,03	2,6%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	1,6E-02	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,34	1,9E-01	34,02	34,65	0,6%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	2,4E-03	0,21	0,22	1,1%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,16	2,2E-01	2,80	3,53	7,1%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	7,8E-02	2,96	3,21	2,5%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	2,6E-02	2,57	2,66	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,90	9,8E-02	29,74	30,06	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	4,2E-02	20,45	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,39	1,1E-01	9,22	9,56	1,1%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	4,7E-02	3,05	3,20	1,5%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	9,0E-03	1,02	1,05	0,9%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,93	2,3E-01	2,58	3,31	7,7%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	1,3E-02	6,86	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	1,7E-03	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	1,7E-02	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,83	1,6E-01	2,56	3,09	5,7%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,54	1,9E-02	1,50	1,57	1,3%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,31	1,9E-01	34,99	35,62	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	7,8E-03	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,75	1,9E-01	22,44	23,07	0,9%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,72	2,1E-01	0,38	1,08	29,3%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	3,2E-03	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,49	2,0E-01	29,16	29,82	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,64	1,2E-01	32,45	32,85	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	1,0E-02	0,16	0,19	5,9%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	1,1E-03	0,04	0,04	2,5%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,13	2,2E-01	12,77	13,48	1,7%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	2,3E-02	16,02	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	2,6E-02	2,37	2,46	1,1%

Informações iniciais					Para $M = 10^5$ e QI com distribuição normal				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,93	5,1E-02	9,85	10,01	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,49	9,1E-02	8,34	8,63	1,1%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	6,2E-03	0,57	0,59	1,1%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	6,7E-02	0,75	0,97	7,8%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,30	1,9E-01	15,02	15,60	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	6,5E-02	10,82	11,03	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	3,0E-02	2,63	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,54	2,9E-01	31,07	32,00	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	1,7E-03	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,3%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	7,1E-03	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	3,0E-03	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,49	9,1E-02	8,34	8,63	1,1%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	3,0E-02	2,63	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	6,7E-02	0,75	0,97	7,8%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,3%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	5,9E-03	0,16	0,18	3,5%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	4,6E-03	0,37	0,39	1,2%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	4,9E-04	1,76	1,77	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	1,0E-02	0,11	0,14	7,9%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	3,4E-04	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	2,2E-03	0,11	0,12	1,9%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,32	4,6E-02	16,24	16,39	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,55	1,0E-01	3,38	3,72	2,9%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	5,5E-05	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	2,2E-02	2,86	2,93	0,8%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	6,8E-03	0,36	0,38	1,9%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	4,3E-02	0,99	1,13	4,0%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	8,5E-04	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	2,1E-02	0,27	0,34	7,0%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	1,7E-02	0,55	0,60	3,0%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,74	3,6E-02	1,69	1,80	2,1%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	2,0E-02	4,40	4,46	0,5%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	2,6E-02	3,46	3,54	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	4,3E-02	0,14	0,28	20,6%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,96	5,6E-02	1,86	2,05	2,9%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	1,3E-02	5,67	5,71	0,2%

Informações iniciais					Para $M = 10^5$ e QI com distribuição normal				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	5,4E-02	10,54	10,71	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,87	2,6E-02	0,82	0,91	3,0%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	7,3E-03	0,32	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	3,8E-03	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	1,8E-02	0,23	0,29	6,7%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	1,9E-02	0,07	0,13	19,1%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	2,1E-02	0,05	0,12	25,9%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	4,7E-03	0,17	0,19	2,6%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	7,7E-02	2,78	3,03	2,6%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	1,6E-02	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,34	1,9E-01	34,03	34,66	0,6%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	2,4E-03	0,21	0,21	1,1%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,16	2,2E-01	2,79	3,51	7,0%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	7,8E-02	2,96	3,21	2,5%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	2,7E-02	2,57	2,66	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,90	1,0E-01	29,74	30,07	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	4,3E-02	20,44	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,39	1,1E-01	9,22	9,57	1,1%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	4,6E-02	3,04	3,19	1,5%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	9,1E-03	1,02	1,05	0,9%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,93	2,3E-01	2,57	3,31	7,8%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	1,3E-02	6,86	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	1,7E-03	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	1,7E-02	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,82	1,6E-01	2,56	3,09	5,7%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,54	1,9E-02	1,50	1,57	1,3%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,31	1,9E-01	35,00	35,63	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	7,8E-03	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,75	1,9E-01	22,44	23,08	0,9%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,73	2,1E-01	0,38	1,08	29,4%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	3,2E-03	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,49	2,0E-01	29,17	29,82	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,64	1,2E-01	32,44	32,85	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	1,0E-02	0,15	0,19	5,9%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	1,1E-03	0,04	0,05	2,5%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,13	2,2E-01	12,77	13,49	1,7%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	2,3E-02	16,03	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	2,7E-02	2,37	2,46	1,1%

Informações iniciais					Para $M = 10^6$ e QI com distribuição normal				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,93	5,1E-02	9,85	10,01	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,49	9,1E-02	8,34	8,63	1,1%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	6,2E-03	0,57	0,59	1,1%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	6,7E-02	0,75	0,97	7,8%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,30	1,9E-01	15,01	15,60	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	6,5E-02	10,83	11,03	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	3,0E-02	2,64	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,54	2,9E-01	31,08	32,01	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	1,7E-03	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,3%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	7,1E-03	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	3,1E-03	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,49	9,1E-02	8,34	8,63	1,1%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	3,0E-02	2,64	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	6,7E-02	0,75	0,97	7,8%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,3%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	5,9E-03	0,16	0,18	3,5%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	4,6E-03	0,37	0,39	1,2%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	4,9E-04	1,76	1,77	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	1,0E-02	0,11	0,14	7,9%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	3,4E-04	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	2,2E-03	0,11	0,12	1,9%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,32	4,6E-02	16,24	16,39	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,55	1,0E-01	3,38	3,72	2,9%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	5,5E-05	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	2,2E-02	2,86	2,93	0,8%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	6,8E-03	0,36	0,38	1,9%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	4,3E-02	0,99	1,13	4,0%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	8,5E-04	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	2,1E-02	0,27	0,34	7,0%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	1,7E-02	0,55	0,60	3,0%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,74	3,6E-02	1,69	1,80	2,1%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	2,0E-02	4,40	4,46	0,5%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	2,6E-02	3,46	3,54	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	4,3E-02	0,14	0,28	20,6%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,96	5,6E-02	1,86	2,05	2,9%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	1,3E-02	5,67	5,71	0,2%

Informações iniciais					Para $M = 10^6$ e QI com distribuição normal				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	5,4E-02	10,54	10,71	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,87	2,6E-02	0,82	0,91	3,0%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	7,3E-03	0,32	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	3,8E-03	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	1,7E-02	0,23	0,29	6,7%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	1,9E-02	0,07	0,13	19,0%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	2,2E-02	0,05	0,12	26,1%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	4,7E-03	0,17	0,19	2,6%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	7,7E-02	2,79	3,04	2,6%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	1,6E-02	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,34	1,9E-01	34,03	34,66	0,6%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	2,4E-03	0,21	0,21	1,1%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,16	2,2E-01	2,80	3,52	7,0%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	7,8E-02	2,96	3,22	2,5%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	2,7E-02	2,57	2,66	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,90	1,0E-01	29,74	30,07	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	4,2E-02	20,45	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,39	1,1E-01	9,21	9,56	1,1%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	4,6E-02	3,04	3,19	1,5%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	9,1E-03	1,02	1,05	0,9%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,93	2,3E-01	2,56	3,31	7,8%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	1,3E-02	6,86	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	1,7E-03	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	1,7E-02	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,82	1,6E-01	2,56	3,09	5,7%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,54	1,9E-02	1,50	1,57	1,3%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,31	1,9E-01	34,99	35,62	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	7,8E-03	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,75	1,9E-01	22,43	23,07	0,9%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,72	2,1E-01	0,38	1,08	29,4%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	3,2E-03	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,49	2,0E-01	29,16	29,81	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,64	1,2E-01	32,44	32,85	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	1,0E-02	0,15	0,19	5,9%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	1,1E-03	0,04	0,05	2,5%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,13	2,2E-01	12,77	13,48	1,7%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	2,3E-02	16,03	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	2,7E-02	2,37	2,46	1,1%

Informações iniciais					Para $M = 10^2$ e QI com distribuição uniforme				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,92	5,0E-02	9,84	9,99	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,48	8,0E-02	8,34	8,62	0,9%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	6,5E-03	0,58	0,60	1,1%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	6,1E-02	0,77	0,95	7,0%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,28	1,8E-01	15,04	15,63	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	6,5E-02	10,83	11,04	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,69	3,0E-02	2,63	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,51	2,8E-01	31,03	31,93	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	1,7E-03	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	7,2E-02	34,20	34,40	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	7,2E-02	34,20	34,40	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	7,2E-02	28,67	28,88	0,3%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	6,8E-03	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	2,9E-03	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,48	8,0E-02	8,34	8,62	0,9%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,69	3,0E-02	2,63	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	6,1E-02	0,77	0,95	7,0%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	7,2E-02	28,67	28,88	0,3%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	5,5E-03	0,16	0,18	3,3%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	4,2E-03	0,37	0,39	1,1%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	4,6E-04	1,76	1,76	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	1,1E-02	0,11	0,15	8,5%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	3,5E-04	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	2,0E-03	0,11	0,12	1,7%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,32	4,8E-02	16,23	16,40	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,54	1,0E-01	3,41	3,73	2,8%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	4,6E-05	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	2,1E-02	2,87	2,93	0,7%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	6,2E-03	0,36	0,38	1,7%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	3,9E-02	0,99	1,11	3,7%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	8,7E-04	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	2,0E-02	0,28	0,34	6,6%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	1,7E-02	0,55	0,60	2,9%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,74	3,5E-02	1,68	1,80	2,0%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,42	1,8E-02	4,40	4,46	0,4%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	2,7E-02	3,46	3,54	0,8%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	3,8E-02	0,15	0,28	18,0%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,95	5,4E-02	1,83	2,01	2,8%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	1,3E-02	5,67	5,71	0,2%

Informações iniciais					Para $M = 10^2$ e QI com distribuição uniforme				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	5,4E-02	10,52	10,70	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,86	2,7E-02	0,82	0,91	3,1%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	6,8E-03	0,32	0,34	2,1%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	3,7E-03	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	1,8E-02	0,23	0,28	7,0%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	1,7E-02	0,07	0,13	16,3%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	2,3E-02	0,05	0,11	27,8%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	4,6E-03	0,17	0,19	2,6%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	8,9E-02	2,77	3,04	3,1%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	1,5E-02	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,36	1,8E-01	34,01	34,62	0,5%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	2,4E-03	0,21	0,21	1,2%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,12	2,2E-01	2,81	3,54	6,9%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	8,9E-02	2,95	3,22	2,9%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	2,6E-02	2,57	2,65	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,89	9,0E-02	29,70	30,00	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,52	4,5E-02	20,45	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,37	9,8E-02	9,22	9,52	1,0%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	4,4E-02	3,06	3,18	1,4%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	7,8E-03	1,02	1,05	0,8%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,96	2,1E-01	2,59	3,27	7,2%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	1,1E-02	6,87	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	1,5E-03	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	1,6E-02	6,31	6,36	0,2%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,84	1,7E-01	2,50	3,06	5,9%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,53	1,8E-02	1,50	1,56	1,1%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,32	1,9E-01	35,01	35,61	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	7,8E-03	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,77	1,9E-01	22,45	23,06	0,8%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,70	2,2E-01	0,38	1,10	31,6%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	2,8E-03	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,50	1,9E-01	29,24	29,84	0,6%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,63	1,1E-01	32,38	32,75	0,3%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	1,1E-02	0,16	0,19	6,4%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	1,1E-03	0,04	0,05	2,4%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,10	2,1E-01	12,85	13,50	1,6%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	2,1E-02	16,03	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	2,6E-02	2,37	2,45	1,1%

Informações iniciais					Para $M = 10^3$ e QI com distribuição uniforme				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,93	4,8E-02	9,84	10,00	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,49	8,8E-02	8,35	8,64	1,0%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	5,9E-03	0,57	0,59	1,0%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	6,6E-02	0,75	0,96	7,7%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,30	1,8E-01	15,02	15,59	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	6,4E-02	10,82	11,03	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	2,9E-02	2,64	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,54	2,8E-01	31,09	31,99	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	1,6E-03	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	7,3E-02	34,19	34,43	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	7,3E-02	34,19	34,43	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,3%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	6,7E-03	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	3,0E-03	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,49	8,8E-02	8,35	8,64	1,0%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	2,9E-02	2,64	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	6,6E-02	0,75	0,96	7,7%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,3%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	5,9E-03	0,16	0,18	3,5%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	4,6E-03	0,37	0,39	1,2%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	5,1E-04	1,76	1,77	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	1,0E-02	0,11	0,14	7,9%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	3,5E-04	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	2,2E-03	0,11	0,12	1,9%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,31	4,6E-02	16,24	16,39	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,55	1,0E-01	3,37	3,70	2,8%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	5,2E-05	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	2,2E-02	2,86	2,93	0,8%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	6,5E-03	0,36	0,38	1,8%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	4,3E-02	0,99	1,13	4,0%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	8,2E-04	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	2,1E-02	0,27	0,34	6,9%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	1,7E-02	0,55	0,60	2,9%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,74	3,5E-02	1,69	1,80	2,0%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	2,0E-02	4,40	4,46	0,4%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	2,5E-02	3,45	3,53	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	4,2E-02	0,15	0,28	19,6%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,96	5,5E-02	1,86	2,04	2,8%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	1,3E-02	5,67	5,71	0,2%

Informações iniciais					Para $M = 10^3$ e QI com distribuição uniforme				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	5,3E-02	10,53	10,70	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,87	2,6E-02	0,82	0,91	3,0%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	7,2E-03	0,32	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	3,7E-03	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	1,7E-02	0,23	0,29	6,5%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	1,9E-02	0,07	0,13	19,0%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	2,2E-02	0,05	0,12	26,2%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	4,6E-03	0,17	0,19	2,5%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	7,5E-02	2,78	3,02	2,6%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	1,5E-02	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,34	1,9E-01	34,03	34,63	0,5%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	2,4E-03	0,21	0,21	1,1%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,16	2,2E-01	2,80	3,50	6,8%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	7,5E-02	2,96	3,21	2,4%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	2,7E-02	2,57	2,66	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,90	9,9E-02	29,74	30,07	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	4,2E-02	20,45	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,39	1,1E-01	9,23	9,58	1,1%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	4,6E-02	3,04	3,19	1,5%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	8,7E-03	1,02	1,05	0,8%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,93	2,3E-01	2,56	3,28	7,7%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	1,2E-02	6,86	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	1,7E-03	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	1,6E-02	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,83	1,6E-01	2,54	3,07	5,8%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,53	1,9E-02	1,50	1,57	1,2%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,31	1,9E-01	34,98	35,59	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,55	7,8E-03	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,75	1,9E-01	22,43	23,04	0,8%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,72	2,1E-01	0,42	1,12	29,1%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	3,2E-03	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,49	1,9E-01	29,18	29,81	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,65	1,2E-01	32,45	32,85	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	1,0E-02	0,16	0,19	5,9%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	1,0E-03	0,04	0,04	2,4%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,13	2,2E-01	12,79	13,48	1,7%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	2,2E-02	16,03	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	2,7E-02	2,37	2,46	1,1%

Informações iniciais					Para $M = 10^4$ e QI com distribuição uniforme				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,93	5,1E-02	9,85	10,01	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,49	9,1E-02	8,35	8,65	1,1%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	6,2E-03	0,57	0,59	1,1%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	6,6E-02	0,75	0,97	7,7%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,31	1,8E-01	15,02	15,61	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	6,4E-02	10,83	11,03	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	3,0E-02	2,63	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,54	2,8E-01	31,10	32,01	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	1,6E-03	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	7,3E-02	28,66	28,89	0,3%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	6,9E-03	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	3,0E-03	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,49	9,1E-02	8,35	8,65	1,1%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	3,0E-02	2,63	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	6,6E-02	0,75	0,97	7,7%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	7,3E-02	28,66	28,89	0,3%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	5,8E-03	0,16	0,18	3,4%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	4,5E-03	0,37	0,39	1,2%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	4,8E-04	1,76	1,77	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	9,9E-03	0,11	0,14	7,7%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	3,4E-04	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	2,1E-03	0,11	0,12	1,9%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,32	4,6E-02	16,24	16,39	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,55	1,0E-01	3,38	3,72	2,9%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	5,3E-05	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	2,1E-02	2,86	2,93	0,7%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	6,7E-03	0,36	0,38	1,8%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	4,2E-02	0,99	1,13	4,0%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	8,2E-04	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	2,1E-02	0,27	0,34	6,8%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	1,7E-02	0,55	0,60	2,9%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,74	3,5E-02	1,69	1,80	2,0%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	1,9E-02	4,40	4,46	0,4%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	2,5E-02	3,46	3,54	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	4,3E-02	0,14	0,28	20,2%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,95	5,6E-02	1,86	2,05	2,9%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	1,3E-02	5,67	5,71	0,2%

Informações iniciais					Para $M = 10^4$ e QI com distribuição uniforme				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	5,3E-02	10,54	10,71	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,87	2,6E-02	0,82	0,91	3,0%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	7,1E-03	0,32	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	3,7E-03	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	1,7E-02	0,23	0,29	6,5%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	1,9E-02	0,07	0,13	18,7%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	2,1E-02	0,05	0,12	25,5%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	4,5E-03	0,17	0,19	2,5%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	7,7E-02	2,78	3,03	2,6%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	1,5E-02	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,34	1,9E-01	34,02	34,65	0,6%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	2,3E-03	0,21	0,21	1,1%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,16	2,2E-01	2,81	3,53	7,0%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	7,8E-02	2,97	3,22	2,5%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	2,6E-02	2,57	2,66	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,90	9,9E-02	29,73	30,06	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	4,2E-02	20,45	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,39	1,1E-01	9,21	9,55	1,1%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	4,6E-02	3,04	3,19	1,5%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	8,8E-03	1,02	1,05	0,9%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,93	2,3E-01	2,56	3,28	7,7%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	1,2E-02	6,86	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	1,6E-03	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	1,7E-02	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,83	1,6E-01	2,55	3,08	5,7%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,54	1,9E-02	1,50	1,56	1,2%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,30	1,9E-01	34,99	35,63	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	7,6E-03	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,75	1,9E-01	22,44	23,07	0,9%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,72	2,1E-01	0,35	1,05	29,4%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	3,1E-03	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,49	2,0E-01	29,15	29,81	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,64	1,2E-01	32,44	32,84	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	9,9E-03	0,15	0,19	5,8%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	1,0E-03	0,04	0,04	2,4%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,13	2,2E-01	12,78	13,48	1,7%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	2,2E-02	16,03	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	2,6E-02	2,37	2,46	1,1%

Informações iniciais					Para $M = 10^5$ e QI com distribuição uniforme				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,93	5,1E-02	9,85	10,01	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,49	9,1E-02	8,34	8,63	1,1%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	6,2E-03	0,57	0,59	1,1%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	6,7E-02	0,75	0,97	7,8%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,30	1,8E-01	15,01	15,60	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	6,4E-02	10,83	11,03	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	3,0E-02	2,64	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,54	2,9E-01	31,08	32,00	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	1,6E-03	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,3%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	6,9E-03	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	2,9E-03	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,49	9,1E-02	8,34	8,63	1,1%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	3,0E-02	2,64	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	6,7E-02	0,75	0,97	7,8%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,3%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	5,8E-03	0,16	0,18	3,4%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	4,5E-03	0,37	0,39	1,2%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	4,8E-04	1,76	1,77	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	1,0E-02	0,11	0,14	7,9%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	3,4E-04	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	2,1E-03	0,11	0,12	1,9%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,32	4,6E-02	16,24	16,39	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,55	1,0E-01	3,38	3,72	2,9%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	5,3E-05	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	2,1E-02	2,86	2,93	0,7%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	6,6E-03	0,36	0,38	1,8%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	4,3E-02	0,99	1,13	4,0%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	8,2E-04	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	2,1E-02	0,27	0,34	6,8%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	1,7E-02	0,55	0,60	2,9%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,74	3,5E-02	1,69	1,80	2,0%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	2,0E-02	4,40	4,46	0,4%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	2,5E-02	3,46	3,54	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	4,3E-02	0,14	0,28	20,3%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,96	5,6E-02	1,86	2,05	2,9%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	1,3E-02	5,67	5,71	0,2%

Informações iniciais					Para $M = 10^5$ e QI com distribuição uniforme				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	5,3E-02	10,54	10,71	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,87	2,6E-02	0,82	0,91	3,0%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	7,1E-03	0,32	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	3,7E-03	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	1,7E-02	0,23	0,29	6,5%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	1,9E-02	0,07	0,13	18,7%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	2,1E-02	0,05	0,12	25,6%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	4,6E-03	0,17	0,19	2,5%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	7,6E-02	2,79	3,04	2,6%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	1,5E-02	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,34	1,9E-01	34,03	34,66	0,6%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	2,3E-03	0,21	0,21	1,1%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,16	2,2E-01	2,80	3,51	7,0%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	7,7E-02	2,97	3,21	2,5%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	2,7E-02	2,57	2,66	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,90	1,0E-01	29,74	30,07	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	4,2E-02	20,45	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,39	1,1E-01	9,21	9,56	1,1%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	4,6E-02	3,04	3,19	1,5%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	8,8E-03	1,02	1,05	0,9%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,93	2,3E-01	2,56	3,28	7,7%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	1,2E-02	6,86	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	1,6E-03	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	1,7E-02	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,82	1,6E-01	2,55	3,08	5,7%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,54	1,9E-02	1,50	1,57	1,2%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,31	1,9E-01	34,99	35,62	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	7,6E-03	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,75	1,9E-01	22,44	23,07	0,8%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,73	2,1E-01	0,39	1,09	29,3%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	3,2E-03	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,49	2,0E-01	29,16	29,81	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,64	1,2E-01	32,44	32,84	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	1,0E-02	0,15	0,19	5,9%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	1,0E-03	0,04	0,04	2,4%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,13	2,2E-01	12,79	13,49	1,7%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	2,2E-02	16,03	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	2,7E-02	2,37	2,46	1,1%

Informações iniciais					Para $M = 10^6$ e QI com distribuição uniforme				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F01	9,97	0,00	infinito	6,0	9,93	5,1E-02	9,85	10,01	0,5%
F02	12,50	0,00	infinito	1,0	8,49	9,1E-02	8,34	8,64	1,1%
F03	0,58	0,00	infinito	1,0	0,58	6,2E-03	0,57	0,59	1,1%
F04	4,35	0,00	infinito	0,5	0,86	6,7E-02	0,75	0,97	7,8%
F05	16,01	0,00	infinito	6,0	15,30	1,8E-01	15,02	15,61	1,2%
F06	10,94	0,00	infinito	1,0	10,93	6,4E-02	10,83	11,03	0,6%
F07	2,29	0,00	infinito	2,0	2,68	3,0E-02	2,64	2,73	1,1%
F08	20,99	0,00	infinito	2,0	31,54	2,8E-01	31,09	32,01	0,9%
F09	0,49	0,00	infinito	2,0	0,50	1,6E-03	0,49	0,50	0,3%
F10	33,51	0,00	infinito	6,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F11	33,64	0,00	45,00	10,0	34,30	7,3E-02	34,18	34,42	0,2%
F12	29,03	25,00	40,00	8,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,3%
F13	2,42	0,00	infinito	4,0	2,39	6,9E-03	2,38	2,40	0,3%
F14	3,15	0,00	5,00	8,0	3,14	2,9E-03	3,13	3,14	0,1%
F15	9,77	0,00	infinito	2,0	8,49	9,1E-02	8,34	8,64	1,1%
F16	2,82	0,00	infinito	4,0	2,68	3,0E-02	2,64	2,73	1,1%
F17	2,65	0,00	infinito	1,0	0,86	6,7E-02	0,75	0,97	7,8%
F18	33,16	0,00	infinito	1,0	28,77	7,2E-02	28,65	28,89	0,3%
F19	0,20	0,00	0,40	1,0	0,17	5,8E-03	0,16	0,18	3,4%
F20	0,37	0,00	infinito	1,0	0,38	4,5E-03	0,37	0,39	1,2%
F21	1,76	0,00	13,06	8,0	1,76	4,8E-04	1,76	1,77	0,0%
F22	0,20	0,00	20,00	1,0	0,13	1,0E-02	0,11	0,14	7,9%
F23	0,20	0,00	10,00	1,0	0,20	3,4E-04	0,20	0,20	0,2%
F24	0,12	0,00	0,39	1,0	0,11	2,1E-03	0,11	0,12	1,9%
F25	16,46	12,00	18,60	10,0	16,32	4,6E-02	16,24	16,39	0,3%
F26	5,29	0,00	infinito	0,5	3,55	1,0E-01	3,38	3,72	2,9%
F27	0,06	0,00	3,00	1,0	0,06	5,3E-05	0,06	0,06	0,1%
F28	3,00	0,00	10,00	2,0	2,90	2,1E-02	2,86	2,93	0,7%
F29	0,40	0,00	infinito	0,5	0,37	6,6E-03	0,36	0,38	1,8%
F30	1,43	0,00	infinito	0,5	1,06	4,3E-02	0,99	1,13	4,0%
F31	0,14	0,00	infinito	2,0	0,14	8,2E-04	0,14	0,14	0,6%
F32	0,40	0,00	infinito	0,5	0,31	2,1E-02	0,27	0,34	6,8%
F33	0,65	0,00	infinito	0,5	0,58	1,7E-02	0,55	0,60	2,9%
F34	3,52	0,00	infinito	0,5	1,74	3,5E-02	1,69	1,80	2,0%
F35	4,34	0,00	infinito	4,0	4,43	2,0E-02	4,40	4,46	0,4%
F36	3,39	0,00	infinito	6,0	3,50	2,5E-02	3,46	3,54	0,7%
F37	0,39	0,00	infinito	0,5	0,21	4,3E-02	0,14	0,28	20,3%
F38	3,92	0,00	infinito	0,5	1,96	5,6E-02	1,86	2,05	2,9%
F39	5,64	0,00	18,60	8,0	5,69	1,3E-02	5,67	5,71	0,2%

Informações iniciais					Para $M = 10^6$ e QI com distribuição uniforme				
Correntes	$q_M /$ (t/h)	$lb /$ (t/h)	$ub /$ (t/h)	QI	$q_R /$ (t/h)	Incerteza- padrão $u_R /$ (t/h)	Intervalo de abrangência de 90% / (t/h)		Incerteza relativa / % [u_R/q_R]
							LI	LS	
F40	10,94	0,00	infinito	1,0	10,62	5,3E-02	10,54	10,71	0,5%
F41	0,70	0,00	infinito	1,0	0,87	2,6E-02	0,82	0,91	3,0%
F42	0,36	0,00	infinito	0,5	0,33	7,1E-03	0,32	0,34	2,2%
F43	0,50	0,00	infinito	1,0	0,48	3,7E-03	0,48	0,49	0,8%
F44	0,35	0,00	infinito	1,0	0,26	1,7E-02	0,23	0,29	6,5%
F45	0,20	0,00	infinito	0,5	0,10	1,9E-02	0,07	0,13	18,7%
F46	0,20	0,00	infinito	0,5	0,08	2,1E-02	0,05	0,12	25,7%
F47	0,20	0,00	infinito	0,5	0,18	4,6E-03	0,17	0,19	2,5%
F48	3,20	0,00	3,20	1,0	2,91	7,7E-02	2,79	3,03	2,6%
F49	6,65	4,00	8,00	8,0	6,72	1,5E-02	6,69	6,74	0,2%
F50	35,57	30,00	40,00	8,0	34,34	1,9E-01	34,02	34,65	0,6%
F51	0,22	0,00	infinito	1,0	0,21	2,3E-03	0,21	0,21	1,1%
F52	4,77	0,00	5,00	1,0	3,16	2,2E-01	2,80	3,51	7,0%
F53	2,49	0,00	infinito	1,0	3,09	7,7E-02	2,97	3,21	2,5%
F54	2,50	0,00	25,00	1,0	2,61	2,7E-02	2,57	2,66	1,0%
F55	29,85	20,00	35,00	8,0	29,90	1,0E-01	29,74	30,07	0,3%
F56	20,75	10,00	22,00	8,0	20,51	4,2E-02	20,45	20,58	0,2%
F57	9,17	0,00	infinito	0,5	9,39	1,1E-01	9,21	9,56	1,1%
F58	2,83	0,00	5,20	1,0	3,12	4,6E-02	3,04	3,19	1,5%
F59	1,00	0,00	4,00	1,0	1,04	8,8E-03	1,02	1,05	0,9%
F60	4,77	0,00	5,00	1,0	2,93	2,3E-01	2,56	3,29	7,7%
F61	6,83	3,00	8,00	8,0	6,88	1,2E-02	6,86	6,90	0,2%
F62	2,85	1,00	6,00	10,0	2,85	1,7E-03	2,85	2,86	0,1%
F63	14,76	0,00	infinito	0,5	6,33	1,7E-02	6,30	6,35	0,3%
F64	2,33	0,00	infinito	0,5	2,82	1,6E-01	2,55	3,09	5,7%
F65	1,50	0,00	5,00	1,0	1,54	1,9E-02	1,50	1,57	1,2%
F66	33,67	20,00	45,00	2,0	35,31	1,9E-01	34,99	35,62	0,5%
F67	12,58	10,00	18,00	8,0	12,56	7,6E-03	12,54	12,57	0,1%
F68	37,02	0,00	infinito	1,0	22,75	1,9E-01	22,43	23,07	0,8%
F69	4,79	0,00	infinito	0,5	0,72	2,1E-01	0,38	1,08	29,4%
F70	1,57	0,00	infinito	8,0	1,56	3,1E-03	1,56	1,57	0,2%
F71	33,76	7,50	40,74	1,0	29,49	2,0E-01	29,16	29,81	0,7%
F72	33,76	0,00	infinito	1,0	32,64	1,2E-01	32,44	32,84	0,4%
F73	0,10	0,00	infinito	0,5	0,17	1,0E-02	0,15	0,19	5,9%
F74	0,05	0,00	5,00	1,0	0,04	1,0E-03	0,04	0,04	2,4%
F75	16,83	5,00	24,00	1,0	13,13	2,2E-01	12,79	13,49	1,7%
F76	19,18	0,00	infinito	1,0	16,06	2,2E-02	16,03	16,10	0,1%
F77	2,50	0,00	25,00	1,0	2,41	2,7E-02	2,37	2,46	1,1%

APÊNDICE C

Análise da QI em relação às incertezas relativas para PDF da QI seguindo uma distribuição normal e $M = 10^4$ no MMC

Balancos	Correntes	QI	Incerteza relativa / %	Balancos	Correntes	QI	Incerteza relativa / %
Balançaço 1	F01	6,0	0,5%	Balançaço 13	F74	1,0	2,5%
	F03	1,0	1,1%		F22	1,0	7,9%
	F02	1,0	1,1%		F73	0,5	5,9%
	F04	0,5	7,7%	Balançaço 14	F23	1,0	0,2%
Balançaço 2	F15	2,0	1,1%		F54	1,0	1,0%
	F02	1,0	1,1%		F77	1,0	1,1%
Balançaço 3	F17	1,0	7,7%	Balançaço 15	F56	8,0	0,2%
	F04	0,5	7,7%		F55	8,0	0,3%
Balançaço 4	F16	4,0	1,1%		F57	0,5	1,1%
	F07	2,0	1,1%	F59	1,0	0,9%	
Balançaço 5	F05	6,0	1,2%	F77	1,0	1,1%	
	F09	2,0	0,3%	Balançaço 16	F58	1,0	1,5%
	F08	2,0	0,9%		F75	1,0	1,7%
	F07	2,0	1,1%		F57	0,5	1,1%
	F15	2,0	1,1%	F64	0,5	5,7%	
	F06	1,0	0,6%	Balançaço 17	F25	10,0	0,3%
Balançaço 6	F40	1,0	0,5%		F56	8,0	0,2%
	F06	1,0	0,6%		F59	1,0	0,9%
	F32	0,5	6,9%		F58	1,0	1,5%
Balançaço 7	F11	10,0	0,2%		F24	1,0	1,9%
	F10	6,0	0,2%		F73	0,5	5,9%
Balançaço 8	F11	10,0	0,2%	F45	0,5	19,0%	
	F14	8,0	0,1%	Balançaço 18	F25	10,0	0,3%
	F12	8,0	0,2%		F39	8,0	0,2%
	F13	4,0	0,3%		F40	1,0	0,5%
Balançaço 9	F67	8,0	0,1%	Balançaço 19	F76	1,0	0,1%
	F66	2,0	0,5%		F75	1,0	1,7%
	F68	1,0	0,9%		F60	1,0	7,7%
Balançaço 10	F21	8,0	0,03%	Balançaço 20	F62	10,0	0,1%
	F50	8,0	0,6%		F61	8,0	0,2%
	F71	1,0	0,7%		F76	1,0	0,1%
	F53	1,0	2,5%	F63	0,5	0,3%	
Balançaço 11	F72	1,0	0,4%	Balançaço 21	F49	8,0	0,2%
	F71	1,0	0,7%		F51	1,0	1,1%
	F52	1,0	7,1%		F63	0,5	0,3%
Balançaço 12	F55	8,0	0,3%	F47	0,5	2,7%	
	F72	1,0	0,4%	Balançaço 22	F51	1,0	1,1%
	F54	1,0	1,0%		F20	1,0	1,2%
F22	1,0	7,9%	F19		1,0	3,5%	

Balanços	Correntes	QI	Incerteza relativa / %
Balanço 23	F61	8,0	0,2%
	F31	2,0	0,6%
	F28	2,0	0,8%
	F65	1,0	1,3%
	F29	0,5	1,9%
	F33	0,5	3,0%
	F30	0,5	4,0%
	F32	0,5	6,9%
Balanço 24	F26	0,5	2,9%
	F64	0,5	5,7%
	F69	0,5	29,3%
Balanço 25	F12	8,0	0,2%
	F18	1,0	0,2%
Balanço 26	F62	10,0	0,1%
	F49	8,0	0,2%
	F66	2,0	0,5%
	F27	1,0	0,1%
	F18	1,0	0,2%
	F43	1,0	0,8%
	F65	1,0	1,3%
	F74	1,0	2,5%
	F48	1,0	2,6%
	F52	1,0	7,1%
	F60	1,0	7,7%
	F46	0,5	26,1%
	F69	0,5	29,3%
Balanço 27	F53	1,0	2,5%
	F48	1,0	2,6%
	F47	0,5	2,7%
Balanço 28	F31	2,0	0,6%
	F24	1,0	1,9%
	F41	1,0	3,0%
	F19	1,0	3,5%
	F44	1,0	6,7%
	F45	0,5	19,0%
	F46	0,5	26,1%
Balanço 29	F50	8,0	0,6%
	F66	2,0	0,5%
	F20	1,0	1,2%
	F44	1,0	6,7%
	F42	0,5	2,2%
Balanço 30	F70	8,0	0,2%
	F36	6,0	0,7%
	F41	1,0	3,0%
	F17	1,0	7,7%

Balanços	Correntes	QI	Incerteza relativa / %
Balanço 31	F37	0,5	20,3%
	F35	4,0	0,5%
	F16	4,0	1,1%
	F34	0,5	2,1%
Balanço 32	F34	0,5	2,1%
	F38	0,5	2,9%
	F37	0,5	20,3%

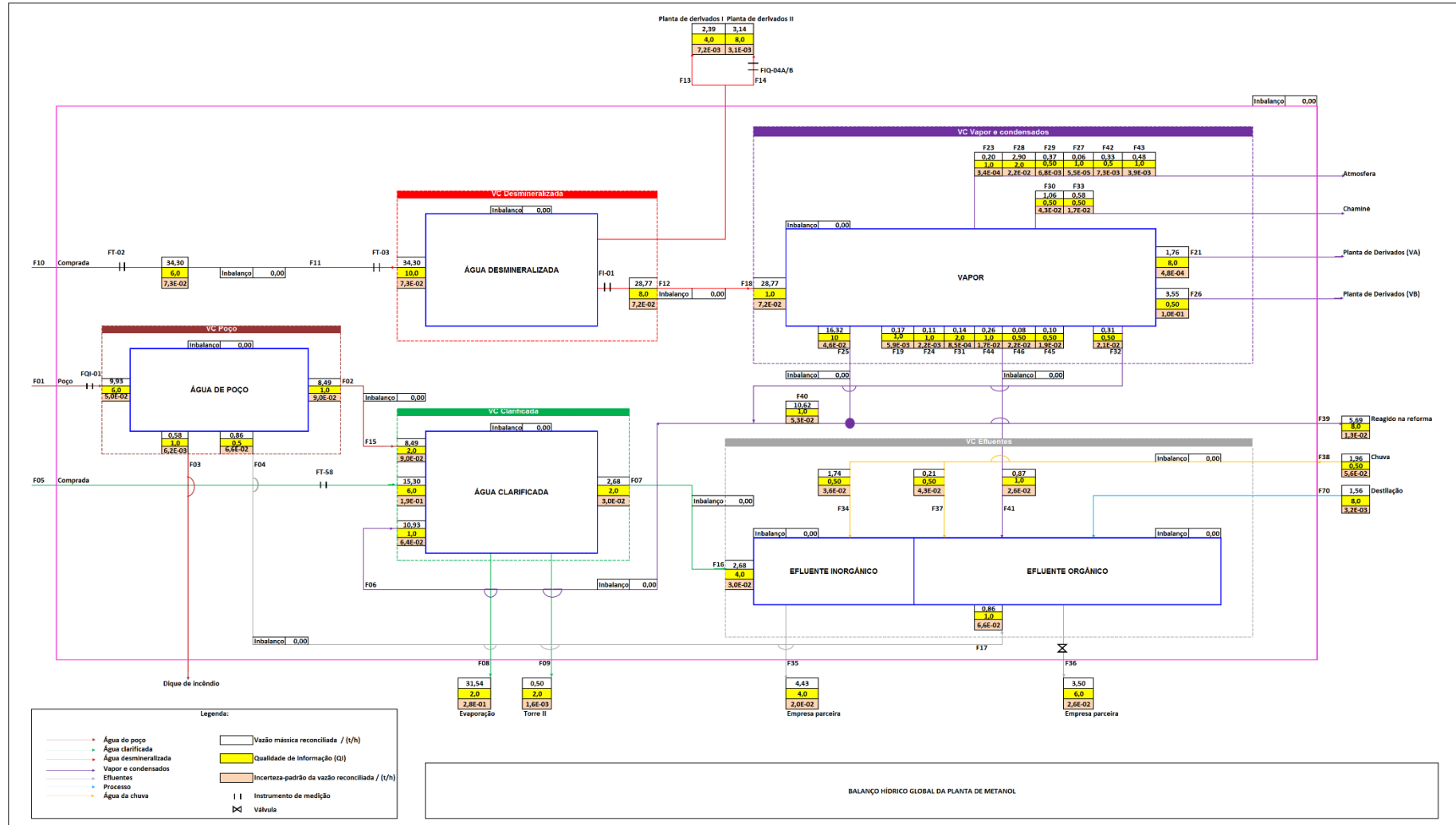
Análise da QI em relação às incertezas relativas para PDF da QI seguindo uma distribuição uniforme e $M = 10^4$ no MMC

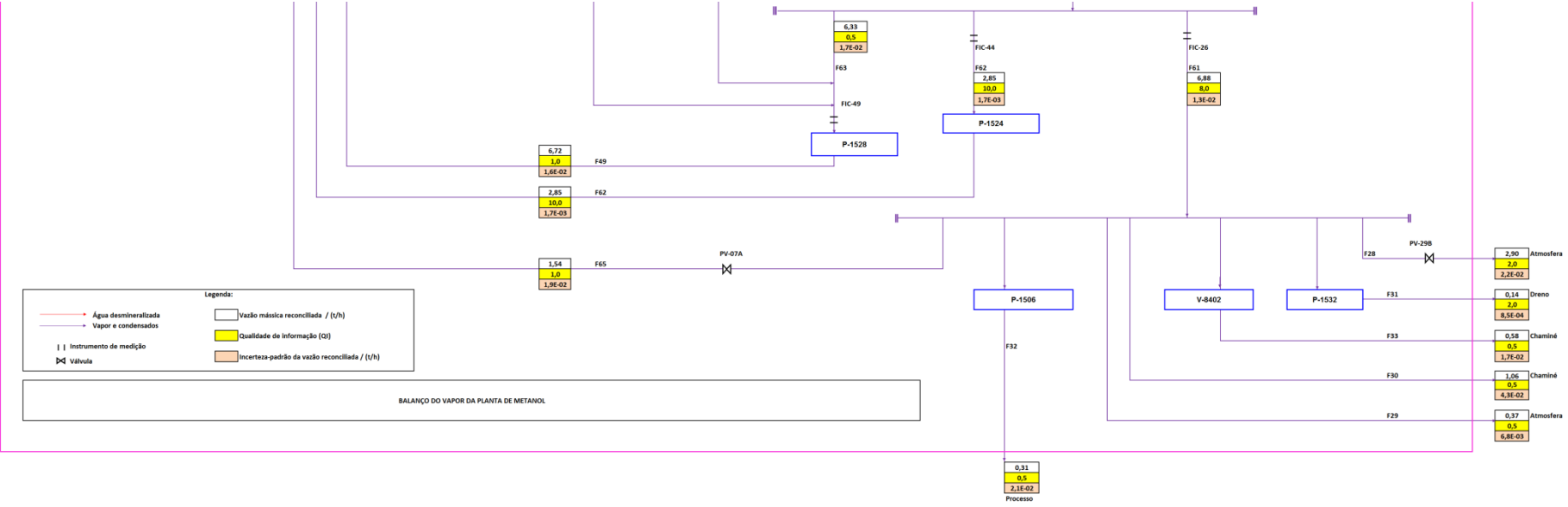
Balancos	Correntes	QI	Incerteza relativa / %	Balancos	Correntes	QI	Incerteza relativa / %	
Balanço 1	F01	6,0	0,5%	Balanço 13	F74	1,0	2,4%	
	F03	1,0	1,1%		F22	1,0	7,7%	
	F02	1,0	1,1%		F73	0,5	5,8%	
	F04	0,5	7,7%	Balanço 14	F23	1,0	0,2%	
Balanço 2	F15	2,0	1,1%		F54	1,0	1,0%	
	F02	1,0	1,1%		F77	1,0	1,1%	
Balanço 3	F17	1,0	7,7%	Balanço 15	F56	8,0	0,2%	
	F04	0,5	7,7%		F55	8,0	0,3%	
Balanço 4	F16	4,0	1,1%		F57	0,5	1,1%	
	F07	2,0	1,1%	Balanço 16	F59	1,0	0,9%	
Balanço 5	F05	6,0	1,2%		F77	1,0	1,1%	
	F09	2,0	0,3%		F58	1,0	1,5%	
	F08	2,0	0,9%		F75	1,0	1,7%	
	F07	2,0	1,1%		F57	0,5	1,1%	
	F15	2,0	1,1%	F64	0,5	5,7%		
Balanço 6	F06	1,0	0,6%	Balanço 17	F25	10,0	0,3%	
	F40	1,0	0,5%		F56	8,0	0,2%	
	F06	1,0	0,6%		F59	1,0	0,9%	
F32	0,5	6,8%	F58		1,0	1,5%		
Balanço 7	F11	10,0	0,2%		F24	1,0	1,9%	
	F10	6,0	0,2%	F73	0,5	5,8%		
Balanço 8	Balanço 8	F11	10,0	0,2%	F45	0,5	18,7%	
		F14	8,0	0,1%	Balanço 18	F25	10,0	0,3%
	F12	8,0	0,3%	F39		8,0	0,2%	
	F13	4,0	0,3%	F40		1,0	0,5%	
Balanço 9	F67	8,0	0,1%	Balanço 19	F76	1,0	0,1%	
	F66	2,0	0,5%		F75	1,0	1,7%	
	F68	1,0	0,9%		F60	1,0	7,7%	
Balanço 10	Balanço 10	F21	8,0	0,03%	Balanço 20	F62	10,0	0,1%
		F50	8,0	0,6%		F61	8,0	0,2%
		F71	1,0	0,7%		F76	1,0	0,1%
		F53	1,0	2,5%		F63	0,5	0,3%
Balanço 11	Balanço 11	F72	1,0	0,4%	Balanço 21	F49	8,0	0,2%
		F71	1,0	0,7%		F51	1,0	1,1%
		F52	1,0	7,0%		F63	0,5	0,3%
Balanço 12	Balanço 12	F55	8,0	0,3%	Balanço 22	F47	0,5	2,5%
		F72	1,0	0,4%		F51	1,0	1,1%
		F54	1,0	1,0%		F20	1,0	1,2%
		F22	1,0	7,7%		F19	1,0	3,4%

Balancos	Correntes	QI	Incerteza relativa / %
Balanco 23	F61	8,0	0,2%
	F31	2,0	0,6%
	F28	2,0	0,7%
	F65	1,0	1,2%
	F29	0,5	1,8%
	F33	0,5	2,9%
	F30	0,5	4,0%
	F32	0,5	6,8%
Balanco 24	F26	0,5	2,9%
	F64	0,5	5,7%
	F69	0,5	29,4%
Balanco 25	F12	8,0	0,3%
	F18	1,0	0,3%
Balanco 26	F62	10,0	0,1%
	F49	8,0	0,2%
	F66	2,0	0,5%
	F27	1,0	0,1%
	F18	1,0	0,3%
	F43	1,0	0,8%
	F65	1,0	1,2%
	F74	1,0	2,4%
	F48	1,0	2,6%
	F52	1,0	7,0%
	F60	1,0	7,7%
	F46	0,5	25,5%
	F69	0,5	29,4%
Balanco 27	F53	1,0	2,5%
	F48	1,0	2,6%
	F47	0,5	2,5%
Balanco 28	F31	2,0	0,6%
	F24	1,0	1,9%
	F41	1,0	3,0%
	F19	1,0	3,4%
	F44	1,0	6,5%
	F45	0,5	18,7%
Balanco 29	F46	0,5	25,5%
	F50	8,0	0,6%
	F66	2,0	0,5%
	F20	1,0	1,2%
	F44	1,0	6,5%
F42	0,5	2,2%	

Balancos	Correntes	QI	Incerteza relativa / %
Balanco 30	F70	8,0	0,2%
	F36	6,0	0,7%
	F41	1,0	3,0%
	F17	1,0	7,7%
	F37	0,5	20,2%
Balanco 31	F35	4,0	0,4%
	F16	4,0	1,1%
	F34	0,5	2,0%
Balanco 32	F34	0,5	2,0%
	F38	0,5	2,9%
	F37	0,5	20,2%

APÊNDICE D





UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA
CEP: 40.210-630
Telefone: (71) 3283-9800
E-mail: pei@ufba.br
Home page: <http://www.pei.ufba.br>

