

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS EM INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA**

**GILBERTO BENEDET JÚNIOR**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)**

**2007**

**GILBERTO BENEDET JÚNIOR**

**AVALIAÇÃO DE INCERTEZAS EM INVENTÁRIOS DO CICLO DE VIDA**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Ambiental.**

**Orientador: Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)**

**2007**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental pela oportunidade concedida.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro que tornou possível meus estudos e pesquisas.

Ao Prof. Dr. Sebastião Roberto Soares, meu orientador, pela paciência e inúmeras contribuições que engrandeceram este estudo.

Aos meus amigos do LARESO, professores, alunos e pesquisadores, que sempre me apoiaram durante todo o processo.

A minha família: meus pais, Gilberto Benedet e Sirlei Vieira Benedet, cujo apoio nos estudos foi fundamental para que eu chegasse até aqui; e meus irmãos Alex Vieira Benedet e Giuliano Vieira Benedet.

E a Deus por tudo.

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>III</b>
<b>LISTA DE QUADROS .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VIII</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>X</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>XI</b>
<b>1. INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTO E IMPORTÂNCIA DO TRABALHO .....	3
1.2. OBJETIVOS .....	5
1.3. HIPÓTESE, PREMISSAS, DELIMITAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	6
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>8</b>
2.1. NOÇÕES BÁSICAS SOBRE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	8
2.1.1. <i>Estrutura Metodológica da ACV</i> .....	9
2.1.2. <i>Normatização</i> .....	10
2.2. INCERTEZA E AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA.....	11
2.2.1. <i>Tipos e Fontes de Incertezas</i> .....	11
2.2.2. <i>Incertezas e as Fases da ACV</i> .....	13
2.3. TÉCNICAS UTILIZADAS PARA ANÁLISE DE INCERTEZAS .....	14
2.4. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	17
2.5. QUALIDADE DE DADOS .....	19
2.5.1. <i>Coleta de dados</i> .....	20
2.5.2. <i>Indicadores de Qualidade de Dados</i> .....	20
2.5.3. <i>Matriz de Qualidade de Dados (Matriz Pedigree)</i> .....	22
2.6. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.....	26
2.6.1. <i>Principais modelos de distribuição de probabilidade</i> .....	27
2.6.2. <i>Amostragem Aleatória em Populações Normais</i> .....	30
2.6.3. <i>Descrição Matemática do Método de Monte Carlo</i> .....	32
2.6.4. <i>Funcionamento do Método de Monte Carlo</i> .....	33
2.6.5. <i>Aplicativos que Suportam a Simulação de Monte Carlo</i> .....	34
2.6.6. <i>Crystal Ball®</i> .....	35
<b>3. PROPOSIÇÃO DO MODELO .....</b>	<b>44</b>
3.1. COMPILAÇÃO DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA .....	45
3.2. ESCOLHA DO ASPECTO AMBIENTAL PARA AVALIAÇÃO .....	46

3.3.	DEFINIÇÃO DAS UNIDADES DE PROCESSO RELACIONADAS.....	46
3.4.	ANÁLISE DE IMPORTÂNCIA DA INCERTEZA.....	47
3.5.	AValiação QUALITATIVA DAS INCERTEZAS .....	48
3.6.	MODELAGEM ESTOCÁSTICA.....	50
3.7.	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	51
<b>4.</b>	<b>APLICAÇÃO DO MODELO.....</b>	<b>52</b>
4.1.	ESTUDO DE CASO.....	52
4.2.	APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO .....	54
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>72</b>
<b>6.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>74</b>

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Tipos e fontes de incertezas.....	12
Quadro 2: Relação entre as fases de uma ACV e possíveis tipos de incertezas e suas fontes.....	13
Quadro 3: Matriz de qualidade de dados (Matriz Pedigree).....	23
Quadro 4: Exemplo: indicadores de qualidade de dados e respectivas notas de qualidade.....	49
Quadro 5: Aspectos do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) sob estudo (SO <sub>2</sub> ).....	56
Quadro 6: Indicadores de qualidade de dados e respectivas notas de qualidade (SO <sub>2</sub> ). ....	56
Quadro 7: Aspectos do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) sob estudo (CO). ....	65
Quadro 8: Indicadores de qualidade de dados e respectivas notas de qualidade (CO).....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Técnicas disponíveis para reduzir e/ou demonstrar tipos de incerteza na ACV.....	15
Tabela 2: Fatores de incerteza aplicados à pontuação pela qualidade do dado. ....	24
Tabela 3: Fatores básicos de incerteza (sem dimensão) aplicados as entradas e saídas para os fluxos elementares; c: emissões de combustíveis; p: emissões de processos; a: emissões na agricultura.....	25
Tabela 4: Exemplo: notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza.....	49
Tabela 5: Exemplo: fator básico de incerteza.....	49
Tabela 6: Unidades de processo avaliadas e suas respectivas contribuições (SO <sub>2</sub> ).....	55
Tabela 7: Notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza (SO <sub>2</sub> ). ....	57
Tabela 8: Fator básico de incerteza (SO <sub>2</sub> ). ....	57
Tabela 9: Valores da média e desvio padrão (SO <sub>2</sub> ). ....	58
Tabela 10: Novas notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza (SO <sub>2</sub> ).....	61
Tabela 11: Unidades de processo avaliadas e suas respectivas contribuições (CO).....	64
Tabela 12: Notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza (CO). ....	66
Tabela 13: Fator básico de incerteza (CO). ....	66
Tabela 14: Valores da média e desvio padrão (CO). ....	68
Tabela 15: Novas notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza (CO).....	69

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Relação entre as alternativas com a aplicação da gestão de incertezas.....	3
Figura 2 – Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida (NBR ISO 14040:2001).....	9
Figura 3 – Histograma normal e curvas de tendência.....	30
Figura 4 – Probabilidades associadas à distribuição normal.....	31
Figura 5 – Software Crystal Ball® associado ao programa Microsoft Excel®.....	35
Figura 6 – Algumas das distribuições de probabilidade do Software.....	36
Figura 7 – Exemplo: Definição da média e desvio padrão para a variável em análise.....	36
Figura 8 – Exemplo: Determinação dos novos dados com base na distribuição utilizada.....	37
Figura 9 – Média, desvio padrão e distribuição de probabilidade dos dados.....	38
Figura 10 – Localização do ícone de definição da distribuição de probabilidade dos dados.....	38
Figura 11 – Definição da distribuição de probabilidade dos dados.....	38
Figura 12 – Definição da média, desvio padrão e intervalo de variação dos dados.....	39
Figura 13 – Inclusão de características dos dados.....	39
Figura 14 – Localização do ícone de definição da nomenclatura da célula.....	40
Figura 15 – Definição da nomenclatura da célula.....	40
Figura 16 – Indicação da inclusão da nomenclatura dos dados.....	40
Figura 17 – definição do número de simulações e outras características desejáveis.....	41
Figura 18 – Definição do número de simulações.....	41
Figura 19 – Localização do ícone de início da simulação de Monte Carlo.....	42
Figura 20 – Geração de números aleatórios e as variações do histograma.....	42
Figura 21 – Término da simulação.....	43
Figura 22 – Resultados obtidos com a simulação de Monte Carlo.....	43

Figura 23 – Fluxograma do modelo proposto e suas etapas.....	45
Figura 24 – Fluxograma das entradas e saídas do processo (PEREIRA, 2004). .....	53
Figura 25 – Resultado da simulação para a unidade de processo Extração e Transp. da Argila (SO <sub>2</sub> ). ...	59
Figura 26 – Resultado da simulação para a unidade de processo Atomização (SO <sub>2</sub> ).....	60
Figura 27 – Resultado da simulação para a unidade de processo Queima (SO <sub>2</sub> ). .....	60
Figura 28 – Resultado da simulação para a unidade de processo Atomização (CO).....	68

## RESUMO

Este trabalho propõe um modelo sistemático e simplificado para avaliar as incertezas geradas na modelagem do Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Trata da integração de alguns procedimentos isolados existentes em um único método. Para tanto, é utilizada a análise da sensibilidade dos parâmetros utilizados no ICV; a verificação da qualidade destes parâmetros; a determinação do seu grau de incerteza, e a modelagem estocástica dos mesmos.

A validação do modelo proposto foi feita através de sua aplicação em um estudo de caso anteriormente publicado. Os resultados mostraram a redução da incerteza vinculada aos indicadores de qualidade de dados Completeza e Número de Amostras para praticamente zero, devido à grande quantidade de novos valores gerados. Porém, a incerteza relativa à Confiança na Fonte aumentou, devido à inclusão de dados gerados através de informações teóricas. Já os indicadores Correlação Temporal, Correlação Geográfica e Correlação Tecnológica mantiveram-se inalterados, isto porque a redução destas incertezas está diretamente ligada à coleta dos dados do Inventário do Ciclo de Vida, portanto não podem ser reduzidas através de simulações.

Mesmo com o aumento da incerteza em um dos indicadores de qualidade de dados e a redução em apenas dois, dos cinco outros indicadores, através da aplicação do modelo proposto, os resultados obtidos foram significativos para os parâmetros avaliados do inventário. Ao final, foram obtidos novos valores, mais precisos, para o estudo de caso avaliado, devido ao menor grau de incerteza dos mesmos.

Palavras-Chave: Avaliação de Ciclo de Vida, Qualidade de dados, Incerteza, Sensibilidade, Simulação de Monte Carlo.

## ABSTRACT

This work proposes a systematic and simplified procedure to evaluate the uncertainties generated in a Life Cycle Inventory (LCI) modeling. It deals with the joint utilization of some existing isolated procedures in one only method. For that, sensitivity analysis of the LCI data is used; the verification of these data quality; the determination of the degree of data uncertainties, and the data random modeling.

The validation of the considered model was carried out by means of its application in a previously published case study. The results showed an uncertainty reduction, related to the Completeness and Number of Samples data quality indicators, for almost zero, due to the great amount of new values generated through the simulation. However, the degree of uncertainty of the Reliability of the Source increased, due to the inclusion of data generated through theoretical information. Already the pointers Temporal Correlation, Geographical Correlation and Technological Correlation indicators remained unaltered, because the reduction of these uncertainties is directly related to the life cycle inventory data gathering, and therefore cannot be reduced by means of simulation.

Even with the uncertainties reduction within only two of the six data quality indicators, through the application of the considered method, the obtained results were significant for the inventory assessed emissions. At the end, more precise new values were obtained for the life cycle inventory of the case study, due to their lower uncertainty degree.

**Keywords:** Life Cycle Assessment, Data Quality, Uncertainty, Sensitivity, Monte Carlo Simulation.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica importante no apoio à tomada de decisões de cunho ambiental, que permite a caracterização dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um produto ou serviço ao longo do seu ciclo de vida, também conhecido pelo termo “do berço ao túmulo”. Logo, a qualidade das informações utilizadas na ACV é tão importante quanto às decisões tomadas, baseadas nos resultados desta avaliação.

A estrutura metodológica para avaliação do ciclo de vida consiste em abordar quatro fases fundamentais: definição do objetivo e escopo; análise de inventário; avaliação de impactos e interpretação. Cada qual sujeita a incertezas que, acumuladas ou não, podem levar a conclusões que não interpretam adequadamente o sistema em estudo quanto aos impactos potenciais do produto ou serviço sob avaliação.

Embora as normas da série ISO 14040, referências para ACV, recomendem a análise de sensibilidade e avaliação de incertezas nestes estudos, a utilização destes procedimentos dispõe de poucas ferramentas formais. Assim, a aplicação da análise de sensibilidade e da avaliação de incertezas não é comum em estudos de ciclo de vida. Uma análise adequada destes fatores seria possível identificando os tipos de incerteza existentes em cada fase de uma ACV e quais técnicas seriam mais adequadas para tratá-las.

Este estudo apresenta um modelo sistemático simplificado para identificação das incertezas na modelagem do Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Considera ainda o erro gerado por estes fatores. Trata-se da conjunção de procedimentos existentes integrados em um novo método. Para tanto, é utilizada a análise da sensibilidade dos dados utilizados no ICV; a verificação da qualidade destes dados, através de uma matriz de avaliação proposta por outro autor; a determinação do grau de incertezas dos mesmos, e a modelagem dos dados, através da geração de números aleatórios.

Também são abordadas as incertezas encontradas na definição do objetivo e escopo da ACV e na análise dos seus impactos. São mencionadas finalmente, técnicas adequadas

para avaliação de cada tipo de incerteza encontrada na modelagem de todas as fases de um estudo de ciclo de vida.

Atualmente o aplicativo SimaPro7, software que auxilia na realização da ACV, fornece a opção de inclusão do valor do grau incerteza para cada parâmetro avaliado do inventário. O aplicativo também utiliza a Simulação de Monte Carlo (MC) para a análise de diferentes cenários.

A grande diferença entre a aplicação do SimaPro7 e do método proposto por este estudo, está na análise do grau de incerteza dos parâmetros utilizados na ACV. Enquanto o software trata apenas de incluir o grau de incerteza dos parâmetros avaliados e modelar cenários com a aplicação de MC, este estudo identifica a origem das incertezas e propõe, através da geração de números aleatórios, um dos princípios de MC, um procedimento para reduzir algumas das incertezas identificadas.

Tanto no aplicativo SimaPro7, quanto no método proposto, a determinação do grau de incerteza dos parâmetros avaliados é feita com base na Matriz de Qualidade de Dados proposta por Weidema e Wesneis (1996) e alguns fatores de conversão propostos por Althaus et. al (2004), métodos abordados em detalhes por este estudo.

Este estudo insere-se na linha de pesquisa “gestão ambiental de organizações” do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA). Ele integra um conjunto de trabalhos realizados e em andamento voltados particularmente ao desenvolvimento de metodologias para a avaliação do ciclo de vida.

Apesar de estarem associados a um contexto específico de gestão ambiental, as discussões e os resultados nele propostos são aplicáveis e importantes para qualquer projeto que dependa de levantamento e tratamento de dados.

## 1.1. Contexto e importância do trabalho

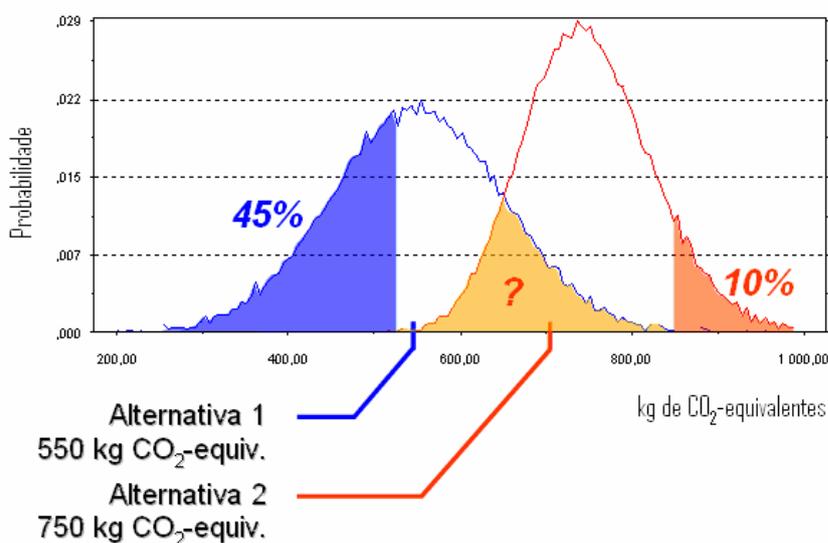
A gestão de incertezas na ACV permite uma melhor caracterização e interpretação dos resultados do estudo e, conseqüentemente, uma escolha mais precisa sobre alternativas avaliadas. Por exemplo, supondo a necessidade de escolha entre duas alternativas que contribuem para o aumento do Efeito Estufa (Potencial de Aquecimento Global) do planeta.

- Alternativa 1, com emissão de 550 kg de CO<sub>2</sub>-equivalentes;
- Alternativa 2, com emissão de 750 kg de CO<sub>2</sub>-equivalentes.

Em princípio, a alternativa 1 aparenta ser mais atraente que a alternativa 2, pois emite uma menor quantidade de CO<sub>2</sub>-equivalentes, sendo menos impactante do ponto de vista ambiental.

A **Figura 1** apresenta a aplicação da gestão das incertezas, através da análise das distribuições de probabilidade dos dados e o respectivo desvio padrão.

- Alternativa 1, com emissão de 550 kg, desvio padrão de 100 kg e distribuição normal;
- Alternativa 2, com emissão de 750 kg, desvio padrão de 75 kg e distribuição lognormal.



**Figura 1** – Relação entre as alternativas com a aplicação da gestão de incertezas.

Fonte: Bage e Sansom (2004).

Feita esta análise, pode-se constatar que a alternativa 1 emite menos CO<sub>2</sub> (equivalentes) em apenas 45% dos casos que a alternativa 2. Já a alternativa 2 emite mais CO<sub>2</sub> (equivalentes) em apenas 10% dos casos. Em 55% dos casos da alternativa 1 e 90% dos casos da alternativa 2, há uma igualdade das emissões de CO<sub>2</sub> (equivalentes). Do mesmo modo, qual a certeza para um usuário de um dado oriundo de duas ou três medições de campo reproduzir com fidelidade um procedimento operacional?

## **1.2. Objetivos**

### **Objetivo geral**

Desenvolver conhecimentos específicos sobre a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) associados a técnicas de análise de sensibilidade e avaliação de incerteza dos resultados. Mais precisamente, definir um modelo sistemático e simplificado para tratar as incertezas geradas na modelagem do Inventário do Ciclo de Vida (ICV).

### **Objetivos específicos**

Caracterizar as incertezas associadas à avaliação ambiental de um produto;

Prover informações de como o perfil ambiental de um produto pode variar com as incertezas no sistema, particularmente as associadas ao seu inventário;

Identificar possibilidades de melhoria em relação à qualidade dos dados utilizados em estudos de ACV.

### 1.3. Hipótese, premissas, delimitação e estrutura do trabalho

#### Hipótese

- É possível o desenvolvimento de um modelo simplificado para a avaliação de incertezas geradas na modelagem de inventários em qualquer estudo de Avaliação de Ciclo de Vida.

#### Premissas

- Incerteza gera dúvidas em relação à credibilidade do resultado de estudos de Avaliação de Ciclo de Vida e a qualquer tipo de estudo;
- Poucos estudos de ACV trazem informações a respeito do grau de incerteza dos dados utilizados (*ver página 11*);
- A incerteza das informações de uma ACV deve constar nos resultados do estudo (norma NBR ISO 14040, 2001<sup>1</sup>).

#### Delimitação do estudo

Para a consecução dos objetivos propostos, o estudo limitar-se-á à identificação dos tipos de incertezas que surgem durante a modelagem do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e às técnicas mais adequadas para identificá-las e avaliá-las.

#### Estrutura do trabalho

O capítulo 1 introduz os elementos norteadores da pesquisa. O capítulo 2 procura apresentar as noções básicas sobre Avaliação de Ciclo de Vida e contextualizar as incertezas com cada uma das fases de uma ACV. Procura ainda desenvolver, ao longo do capítulo, a metodologia que será aplicada para a consecução dos objetivos propostos, através da demonstração de algumas técnicas podem ser utilizadas para avaliar as incertezas que surgem durante a modelagem do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), e de exemplos das suas aplicações e finalidades.

---

<sup>1</sup> Esta norma foi substituída pela ISO 14040:2006, no Brasil será substituída pela NBR ISO 14040:xx.

O capítulo 3 refere-se à proposição do modelo, onde se justifica a adoção do modelo proposto para avaliação das incertezas geradas na modelagem do inventário de qualquer ACV. Trata-se da verificação dos dados do inventário mais sensíveis aos resultados finais do estudo, da determinação do grau de qualidade dos mesmos e, por fim, da redução das incertezas identificadas.

No capítulo 4, são expostos os resultados obtidos através da aplicação do modelo proposto no capítulo anterior, em um estudo de caso previamente realizado. Foram identificadas todas as unidades do processo inventariado, para o estudo de caso. Com base nesta análise, foi determinado o fluxo elementar para dois aspectos ambientais escolhidos (separadamente), a sensibilidade e a qualidade dos dados utilizados no inventário, seus graus de incerteza e então, aplicada à geração de números aleatórios para redução das incertezas identificadas.

No capítulo 5, são apresentadas as conclusões finais e algumas sugestões para trabalhos futuros. E finalmente, no capítulo 6, as referências bibliográficas.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Noções Básicas Sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV)

Segundo a NBR ISO 14040 (2001), a avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma técnica que avalia os aspectos ambientais e impactos potenciais associados a uma categoria de produto<sup>2</sup> ao longo do seu ciclo de vida (do “berço ao túmulo”), desde a extração de matérias primas e obtenção de recursos energéticos até a disposição final do produto após seu uso, mediante:

- A compilação de um inventário<sup>3</sup> de entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto;
- A avaliação dos impactos ambientais potenciais, associados a essas entradas e saídas;
- A interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos dos estudos.

As categorias gerais de impactos ambientais que necessitam ser consideradas incluem o uso de recursos naturais, a saúde humana e as conseqüências ecológicas.

Seus resultados são úteis para uma variedade de processos de tomada de decisão. A ACV pode ajudar (NBR ISO 14040, 2001):

- Na identificação de oportunidades para melhorar os aspectos ambientais dos produtos em vários pontos de seu ciclo de vida;
- Na tomada de decisões na indústria, organizações governamentais ou não-governamentais (por exemplo, planejamento estratégico, definição de prioridades, projeto ou re-projeto de produtos ou processos);
- Na seleção de indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição;

---

<sup>2</sup> O termo “produto” usado isoladamente não inclui somente sistemas de produto, mas pode também incluir sistemas de atividades e serviços.

<sup>3</sup> Um inventário pode incluir aspectos ambientais que não são diretamente relacionados às entradas e saídas do sistema (p.ex.: a eficiência de um produto).

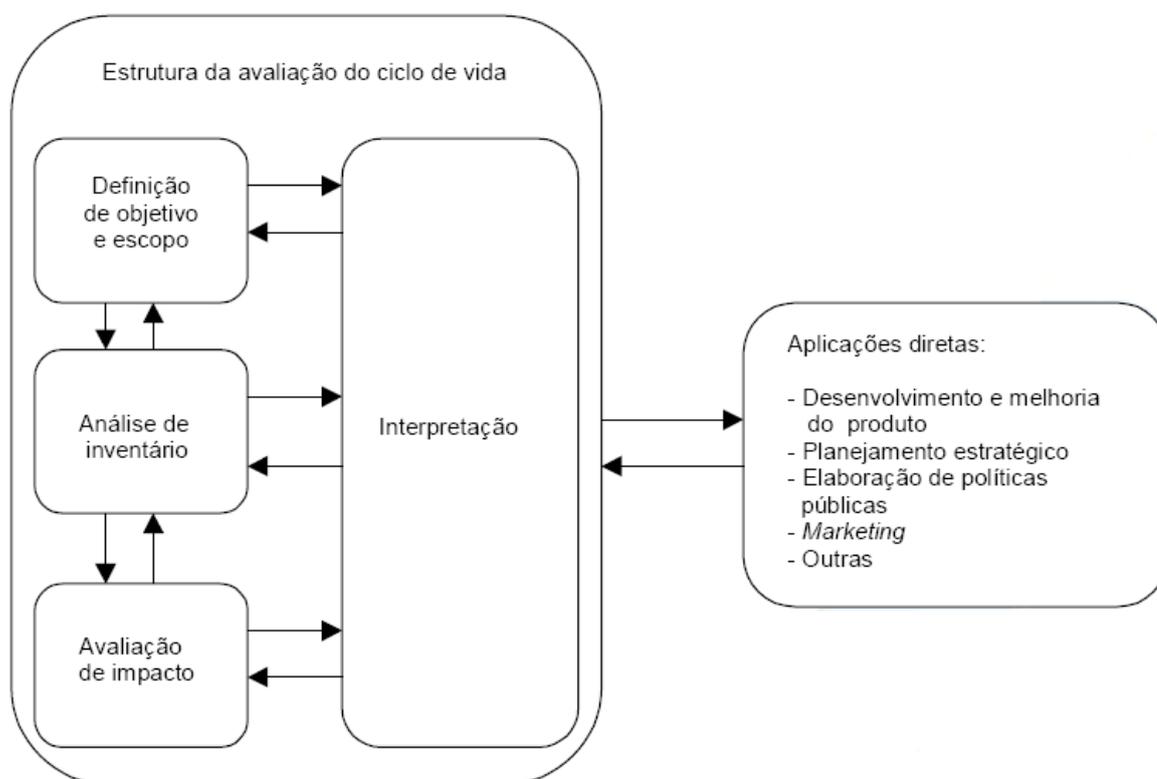
- No marketing (por exemplo, uma declaração ambiental, um programa de rotulagem ecológica ou uma declaração ambiental de produto).

### 2.1.1. Estrutura Metodológica da ACV

A estrutura metodológica para avaliação do ciclo de vida consiste em definir quatro fases fundamentais:

- Definição de objetivo e escopo;
- Análise de inventário;
- Avaliação de impacto;
- Interpretação.

A **Figura 2** relaciona cada uma destas fases:



**Figura 2** – Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida (NBR ISO 14040:2001).

A definição de cada uma das etapas e exemplos de aplicação pode ser encontrada nas normas da família ISO 14040.

### 2.1.2. Normatização

Quanto à sua padronização, a *International Organization for Standardization* – ISO trabalha em torno da Avaliação de Ciclo de Vida desde 1993, referenciando-a a família 14040. Atualmente as seguintes normas encontram-se publicadas:

- ISO 14040            Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – *Princípios e Estrutura;*
- ISO 14041            Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – *Objetivo, Escopo e Análise do Inventário;*
- ISO 14042            Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – *Avaliação de Impactos Ambientais;*
- ISO 14043            Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – *Interpretação do Ciclo de Vida.*
- ISO 14044            Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – *Requisitos e Diretrizes.*

A norma NBR ISO 14040:2001 será substituída pela nova edição de 2006. Já as normas NBR ISO 14041, 14042 e 14043 serão canceladas e substituídas por uma só norma, a NBR ISO 14044:xxx. Ambas ainda não estão disponíveis sob a forma NBR ISO.

Além destas normas, foram publicados dois Relatórios Técnicos (Technical Report) e uma Especificação Técnica (Technical Specification):

- ISO TR 14047            Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – *Exemplos de Aplicação da ISO 14042;*
- ISO TS 14048            Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – *Formato da Apresentação de Dados;*
- ISO TR 14049            Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – *Exemplos de Aplicação da ISO 14042 para a definição de objetivos e escopo e análise de inventário.*

## 2.2. Incerteza e Avaliação de Ciclo de Vida

Para Magalhães e Lima (2002), a incerteza é a falta de conhecimento *a priori* referente ao resultado de uma ação ou ao efeito de uma condição. Segundo Björklund (2002), a incerteza propriamente dita surge devido à falta de conhecimento sobre o verdadeiro valor de uma quantidade ou de sua qualidade, podendo ser reduzida através de medidas mais exatas e precisas.

A norma NBR ISO 14040 (2001) cita que a incerteza das informações de uma Avaliação de Ciclo de Vida deve ser catalogada, a fim de estimar o grau de incerteza gerado pelos diversos fatores que podem influenciar a qualidade do estudo e possibilitar que os objetivos e o escopo do estudo da ACV sejam alcançados.

Segundo esta mesma norma, a análise de incertezas deve ser um procedimento sistemático para verificar e quantificar a incerteza introduzida nos resultados de uma análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Porém, as “*incertezas*” não se limitam apenas ao inventário, podendo surgir em outras fases da ACV, como na definição das metas e do escopo e na avaliação dos impactos.

Muitos autores, nas últimas décadas, têm levantado a questão que incertezas trazem dúvidas aos estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) e realmente, a qualquer tipo de estudo, citam-se nomes como o holandês Mark A. J. Huijbregts (1998, 2001, 2003 e 2004) e o dinamarquês Bo P. Weidema (1996, 1998 e 2002). Porém, somente há pouco tempo estudos de casos começaram a abordar a análise de incertezas (Ross, Evans e Webber, 2002). Isso se deu principalmente pelo desenvolvimento de aplicativos<sup>4</sup> que possibilitam o uso de cálculos, simulações e modelos mais complexos.

### 2.2.1. Tipos e Fontes de Incertezas

Existem diferentes tipos e fontes de incertezas que podem surgir durante um estudo de ACV. Uma descrição mais detalhada destes tipos e fontes encontrados durante a modelagem do estudo é descrita a seguir:

---

<sup>4</sup> Estas ferramentas serão abordadas no item 2.6.5.

**Quadro 1:** Tipos e fontes de incertezas

<b>Incerteza de Parâmetro</b>	<b>Imprecisão de dados</b>	Os instrumentos utilizados para análise dos processos estudados podem gerar imprecisão nos resultados coletados.
	<b>Falta de dados</b>	A maioria dos estudos de ACV engloba muitas etapas e processos que vão além do alcance do pesquisador, gerando assim, a falta de diversos dados necessários ao estudo.
	<b>Lacuna de dados</b>	Vinculado à falta de dados, a lacuna nos dados ocorre devido à variação do período de amostragem, no qual, são coletados os dados relevantes ao estudo de ACV. Pode também aparecer na perda ou descarte de dados por algum motivo.
	<b>Dados não representativos</b>	Dados que não representam completamente a realidade do estudo. Quando são utilizados dados de processos semelhantes para preencher a falta de dados, estes podem ser não representativos por serem muito antigos, de origem geográfica diferente, ou desempenho técnico inadequado.
<b>Variabilidades</b>	<b>Variabilidade temporal</b>	Dados de alguns anos atrás podem não representar o atual sistema avaliado tão bem, quanto à utilização de dados mais recentes.
	<b>Variabilidade espacial</b>	Dados de regiões diferentes das do estudo em questão podem possuir características diferentes, mesmo que para parâmetros iguais.
	<b>Variabilidade tecnológica</b>	Relativo às tecnologias utilizadas no estudo e diferenças no desempenho entre processos equivalentes ao do sistema estudado (p. ex: variações específicas em processos técnicos comparáveis).
<b>Incerteza de modelo</b>	Utilização de modelos impróprios podem não representar a realidade do estudo.	

<b>Incerteza devido às escolhas</b>	Quando se lida com escolhas, estas geram incerteza nos resultados finais, por exemplo, escolha dos limites do sistema, métodos de distribuição, metas de qualidade, etc.
<b>Incerteza subjetiva</b>	Também conhecida como Epistemológica, surge por não saber realmente o que irá acontecer. É uma falta de conhecimento no sistema comportamental ou de aspectos relevantes ao sistema estudado, por exemplo, a previsão do comportamento ao longo do tempo ou a caracterização de impactos potenciais.
<b>Enganos</b>	Em qualquer fase de uma ACV, ou qualquer outro estudo, enganos podem ocorrer e isto gera incerteza.

Fonte: Baseado em Björklund (2002); Heijungs e Huijbregts (2004); Huijbregts (1998b); Huijbregts et al. (2001); Huijbregts et al. (2003); Notten e Petrie (2003); Steen (1997); Von Bahr e Steen (2004).

### 2.2.2. Incertezas e as Fases da ACV

Como visto no *item 2.1.1*, a avaliação do ciclo de vida deve incluir a definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados. O *Quadro 2* apresenta uma relação entre estas fases da ACV e tipos e fontes de incertezas encontradas em cada uma delas.

**Quadro 2:** Relação entre as fases de uma ACV e possíveis tipos de incertezas e suas fontes.

Tipos de Incertezas		Fase da ACV			
		Objetivo e Escopo	Inventário	Impacto	Interpretação
Incertezas de Parâmetro	Imprecisão de dados	-	Imprecisão na medida da emissão	Incerteza nos tempos de vida de substâncias e relativas contribuições para os impactos	-
	Falta de dados	-	Algum parâmetro não avaliado	Algum impacto não avaliado	-
	Lacuna de dados	-	Variação no período de amostragem dos dados do inventário	-	-

	Dados não representativos	-	Utilização de banco de dados para suprir a falta de dados do inventário; pouca quantidade de dados amostrada.	-	-
Variabilidades	Variabilidade espacial	-	Diferenças regionais nos inventários de emissão	Diferenças regionais na sensibilidade ambiental	-
	Variabilidade temporal	-	Diferenças nos inventários anuais de emissão	Mudanças nas características ambientais ao longo do tempo	-
	Variabilidade tecnológica	-	Diferenças no desempenho entre processos equivalentes	Diferenças nas características ambientais e humanas	-
Incertezas de modelo		-	Modelagem estática ao invés de dinâmica; modelagem linear ao invés de não-linear	Utilização de modelos de impacto inadequados	-
Incertezas devido a escolhas		Escolha da unidade funcional, fronteiras do sistema, metas de qualidade, etc.	Escolhas de métodos de alocação, modelos de agregação, etc.	Deixando de fora categorias de impacto conhecidas; escolha do método de caracterização	-
Incerteza subjetiva		Ignorância sobre aspectos relevantes do sistema estudado	Desconhecimento sobre processos modelados	Categorias de impacto, contribuição e fatores de caracterização não são conhecidos	-
Enganos		Quaisquer	Quaisquer	Quaisquer	Quaisquer

Fonte: adaptado de Björklund (2002).

### 2.3. Técnicas Utilizadas para Análise de Incertezas

Existem diferentes tipos de técnicas que podem ser utilizadas tanto para demonstrar, como reduzir, os possíveis tipos de incerteza encontrados em uma ACV. Podem-se citar: padronização, metas de qualidade de dados, base de dados, medidas adicionais, análise de sensibilidade, simulação probabilística, etc.

A **Tabela 1** mostra estas técnicas e os diferentes tipos de incerteza cada uma delas pode abordar, reduzindo ou apenas demonstrando.

**Tabela 1:** Técnicas disponíveis para reduzir e/ou demonstrar tipos de incerteza na ACV.

	Imprecisão de dados	Falta de dados	Lacuna de dados	Dados não representativos	Variabilidade espacial	Variabilidade temporal	Variabilidade entre fontes e objetos	Incerteza de modelo	Incerteza devido a escolhas	Incerteza subjetiva	Enganos
Padronização									x		x
Base de dados		x	x	x							
Metas de qualidade de dados	x			x							
Indicadores de qualidade de dados	x			x							
Validação dos dados											x
Estimativa de parâmetros		x	x								
Medidas adicionais	x	x	x	x			x				
Modelos de alta resolução					x	x		x			
Revisão crítica		x	x	x					x	x	x
Análise de sensibilidade	x			x	x	x	x	x	x		
Análise de importância de incerteza	x			x	x	x	x	x	x		
Análise estatística clássica	x				x	x	x				
Análise estatística Bayesiana	x				x	x	x				
Simulação probabilística	x						x				
Modelagem de cenário				x	x	x	x	x	x		

Fonte: baseado em Björklund (2002).

No modelo proposto, serão abordados somente a análise de sensibilidade, especificamente a análise de importância de incerteza (*Item 2.4.*), os indicadores de qualidade de dados (*Item 2.5.*) e a simulação probabilística (*Item 2.6.*), pois são suficientes para alcançar os objetivos deste estudo. Uma abordagem sucinta, sobre os outros tipos de ferramentas, pode ser vista a seguir:

- Padronização: Seguir um padrão pré-determinado (p. ex: uma norma técnica), pode aumentar a credibilidade do estudo, pela demonstração de como foram elaboradas suas etapas e/ou por evitar possíveis enganos que venham ocorrer.

- Base de Dados: Podem tornar mais fácil a obtenção de alguns dados necessários ao estudo. Porém, os dados utilizados de uma base de dados devem incluir a qualidade dos mesmos para amenizar as possíveis incertezas.

- Metas de Qualidade de Dados: Especifica em termos gerais as características desejáveis para os dados que serão utilizados no estudo.
- Indicadores de Qualidade de Dados: São características utilizadas para determinar a qualidade dos dados, como método de coleta, sua fonte, possíveis incertezas (Weidema e Wesneus, 1996).
- Validação de Dados: Pode ser obtida através do balanço de massa e energia do sistema inventariado (NBR ISO 14041, 2004).
- Estimativa de Parâmetros: A falta dos dados pode ser tratada estimando valores baseados nos valores obtidos por análise ou por valores de processos similares.
- Medidas Adicionais: Quanto maior o número de medidas para um parâmetro mensurado, melhor é a qualidade dos dados utilizados devido à diminuição do erro gerado.
- Modelos de alta definição: O uso de modelos não lineares e modelos dinâmicos podem reduzir a incerteza de modelo e ilustrar variabilidades, como a temporal e espacial (Huijbregts, 1998a).
- Revisão Crítica: Assegurando que os métodos, dados e interpretações utilizadas na ACV são apropriados e refletem os objetivos do estudo.
- Análise Estatística Clássica: Utilizada para determinação de distribuições de probabilidade, médias e desvios no padrão dos dados, variâncias, etc.
- Análise Estatística Bayesiana: É baseada na suposição de que estimativas subjetivas de incerteza, que ocorrem com frequência na prática, podem ser tratadas por meio da análise estatística clássica (Petersen, 1997).
- Modelagem de Cenário: Através do cálculo de diferentes cenários, podem-se analisar as variações devido às escolhas feitas, como em uma análise de sensibilidade (Huijbregts, 1998a).

## 2.4. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade é um procedimento utilizado para estimar os efeitos dos métodos e dados selecionados, nos resultados de um estudo (NBR ISO 14041, 2004). Estima quanto uma modificação no modelo ou dado utilizado, pode resultar em uma modificação no inventário, no perfil ambiental ou em qualquer outro resultado da ACV.

Para Björklund (2002), a sensibilidade é a influência que um parâmetro (variável independente) tem sob outro valor (variável dependente). As variáveis independentes de uma ACV podem ser os valores de parâmetros de entrada, as fronteiras do sistema, regras de alocação, modelos ou processos utilizados. As variáveis dependentes podem ser os valores de parâmetros de saída ou prioridades entre alternativas em um estudo comparativo.

Esta análise consiste usualmente em alterar os valores dos parâmetros, modelos ou métodos utilizados e observar as alterações ocorridas nos resultados finais, avaliando as alternativas. Possibilita também verificar a influência de determinados pontos do estudo nos seus resultados finais. A atual NBR ISO 14043 prescreve que a análise de sensibilidade deverá estar focada nos assuntos mais significativos para determinar a influência na variação de suposições, métodos e dados utilizados.

Neste estudo, a análise de sensibilidade está relacionada à Análise de Importância da Incerteza, e permitirá identificar pontos do inventário que possuem uma grande influência nos valores do resultado final, logo, pontos de alta sensibilidade às possíveis incertezas geradas na modelagem do inventário do ciclo de vida sob estudo.

Segundo Schwartz et al. (2000), esta análise é obtida identificando-se todos os pontos que contribuem para um determinado fator, e expressando o grau de contribuição, em porcentagem, de cada parte em relação ao todo.

Um exemplo da aplicação da análise de importância da incerteza pode ser visto a seguir (baseado em Schwartz et al., 2000):

Considerando a emissão de CO<sub>2</sub> na produção de 1 GWh em uma Usina de Energia a base de carvão mineral. Onde o fluxo elementar “g” é a emissão de CO<sub>2</sub>, a unidade funcional “UF” é GWh e “T” significa total.

$$C_{barco,1GWh,CO_2} = \frac{a_{T,barco}(Tkm / GWh) \times b_{barco,CO_2}(kg / Tkm)}{b_{T,1GWh,CO_2}(kg / GWh)} \quad \text{Equação 1}$$

Na equação acima é avaliada a unidade do processo “transporte marítimo do carvão” em relação aos resultados acumulados da emissão de CO<sub>2</sub>, na produção de 1 GWh (unidade funcional), onde:

- “ $a_{T,barco}$ ” representa a quantidade de quilômetros percorridos a barco por GWh produzido;
- “ $b_{barco,CO_2}$ ” a massa, em kg, de CO<sub>2</sub> emitida por quilômetro percorrido;
- “ $b_{T,1GWh,CO_2}$ ” é a massa total, em kg, de CO<sub>2</sub> emitida para a produção de 1 GWh;
- “ $C_{barco, 1GWh, CO_2}$ ” é a importância da incerteza na unidade sob estudo, em relação à unidade funcional (1 GWh) e o aspecto ambiental (emissão de CO<sub>2</sub>) definidos.

Aplicada à equação, tem-se a classificação desta unidade “ $C_{barco,1GWh,CO_2}$ ” de acordo com sua parte nos resultados acumulados. Isto mostra o quanto à emissão de CO<sub>2</sub> desta unidade de processo (transporte marítimo do carvão) é sensível (sua contribuição) em relação à emissão total de CO<sub>2</sub> no Inventário do Ciclo de Vida (ICV).

É importante observar que nenhum valor utilizado no ICV é descartado, apenas é avaliado se a unidade de processo sob avaliação tem, ou não, grande influência no valor acumulado do fluxo elementar para aspecto ambiental em análise. A utilização deste procedimento é abordada com mais detalhes no *item 3.4.*

## 2.5. Qualidade de Dados

Como visto em tópicos anteriores, a Avaliação do Ciclo de Vida é dividida em quatro fases principais: Definição de Objetivo e Escopo; Análise de Inventário; Avaliação de Impacto e Interpretação.

Durante a fase de definição de objetivo e escopo devem ser estabelecidas *Metas de Qualidade de Dados* que, em termos gerais, são as características desejáveis dos dados necessários para o estudo de uma ACV.

Os requisitos da qualidade dos dados devem ser definidos para possibilitar que os objetivos e o escopo do estudo da ACV sejam alcançados. Para tanto, convém que eles abordem (NBR ISO 14040, 2001):

- Período de tempo coberto (ano de coleta do dado);
- Área geográfica coberta (região do planeta pertencente ao dado);
- Tecnologia utilizada (nível tecnológico do processo onde fora coletado o dado, p.ex.: especificação técnica do maquinário);
- Precisão, completeza e representatividade dos dados (número de pontos coletados, número de amostras em cada ponto e seu período de coleta);
- Consistência e reprodutibilidade dos métodos usados ao longo da ACV (métodos de medição, alocação e agregação utilizados);
- Fontes dos dados e sua representatividade (dado coletado in loco ou utilizado de banco de dados);
- Incerteza da informação (grau de incerteza gerada pelos diversos fatores que podem influenciar a qualidade do estudo).

Os subitens a seguir apresentam alguns pontos a serem considerados para garantir a identificação das características e o atual grau de qualidade dos dados utilizados no estudo.

### 2.5.1. Coleta de dados

A correta coleta de dados é fundamental para o sucesso de um estudo de avaliação de ciclo de vida. Segundo Weidema e Wesneae (1996), preferencialmente, as seguintes características devem ser catalogadas para os parâmetros utilizados no estudo, durante o levantamento do Inventário do Ciclo de Vida (ICV):

- Método de aquisição (método de medição dos dados, método de estimativa das estatísticas em estudo, feitas para dados estimados);
- Os métodos utilizados para verificação da consistência dos dados (p. ex: balanço de massa e energia);
- O número de pontos de dados coletados, período coberto e sua representatividade em relação à população total;
- A idade do dado expressa como o ano em que foi feita a medição;
- A área geográfica no qual o dado é representativo;
- O processo ou nível tecnológico para o qual o dado representa.

Alguns aspectos da qualidade de dados (p. ex: a idade do dado e as especificações geográficas e tecnológicas), são tipicamente relacionados ao processo como um todo (dados do sistema) e podendo ser catalogados na descrição geral do processo (Weidema e Wesnaes, 1996).

### 2.5.2. Indicadores de Qualidade de Dados

Weidema e Wesnaes (1996) definiram alguns indicadores para a qualidade de dados, usados para julgar a relação entre as metas de qualidade de dados especificadas e a atual qualidade dos dados coletados e propuseram uma Matriz Pedigree (*item 2.5.3*) para avaliar a qualidade dos mesmos. Na seqüência, Althaus et al. (2004) incluíram mais um indicador aos propostos anteriormente, o Número de Amostras. Assim, os seguintes indicadores são necessários e suficientes para descrever aqueles aspectos da qualidade do dado, que influenciam a confiança no resultado do estudo:

- Confiança na fonte;
- Completeza;
- Número de amostras;
- Correlação temporal;
- Correlação geográfica;
- Correlação tecnológica.

Estes indicadores foram divididos em dois grupos: o dos indicadores independentes às metas de qualidade, que são aqueles que independem da finalidade específica do estudo no qual os dados são utilizados; e o dos indicadores dependentes, relativos às condições de validade de produção e tecnologias na qual os dados são produzidos, e então dependem das metas de qualidade de dados para o estudo no qual são aplicados.

- ***Indicadores independentes***

### **Confiança na fonte**

Relaciona os métodos de aquisição e os procedimentos de verificação, que foram utilizados para obtenção dos dados relevantes ao estudo. Segundo Weidema (1998), a verificação aborda, por exemplo, limites físicos, balanço de massa, repetições, comparações com medidas anteriores ou outros dados, e revisão por outra pessoa que o responsável pela aquisição do dado.

### **Completeza**

Descreve se partes dos dados estão faltando e o quanto do domínio “natural” das variáveis em estudo é representado nos dados amostrais.

### **Número de Amostras**

Representa a quantidade de amostras feitas para um determinado ponto inventariado. Quanto maior o número de dados coletados menor a chance das variações naturais influenciarem os resultados.

- ***Indicadores dependentes***

### **Correlação Temporal**

Expressa o grau de relação entre o ano do estudo (como declarado nas metas de qualidade de dados) e o ano de coleta dos dados utilizados.

### **Correlação Geográfica**

Expressa o grau de relação entre as condições de produção na área relevante para o estudo (como declarado nas metas de qualidade de dados) e na área geográfica relacionada aos dados obtidos.

### **Correlação Tecnológica**

Aborda aspectos de correlação específicos de empreendimentos, processos ou materiais relevantes aos dados obtidos, em relação ao nível tecnológico sob estudo.

#### **2.5.3. Matriz de Qualidade de Dados (Matriz Pedigree)**

Os seis indicadores de qualidade de dados foram expostos em uma Matriz de Qualidade de Dados (*Quadro 3*). Cada indicador recebe uma avaliação de 1 a 5, sendo que 1 representa o melhor grau de qualidade do indicador e 5 o pior caso encontrado.

O uso da matriz de qualidade de dados irá necessariamente envolver julgamentos subjetivos, que irão depender da base de conhecimentos da pessoa realizando a pontuação. Por exemplo, a informação da qualidade do dado em um estudo pode ser tão carente que isto, com uma interpretação literal, justifique uma pontuação 5 (qualidade de dado desconhecida), mas se você sabe com seus conhecimentos que para este tipo de processo a pontuação nunca pode ser pior que 3 (por exemplo, para correlação temporal se a tecnologia é recente), tal conhecimento deve ser usado ao pontuar. Assim é obtida uma pontuação mais correta. Quando tal conhecimento é aplicado mais explicitamente (deste modo divergindo de uma interpretação literal da matriz), este conhecimento pode ser documentado em uma explicação para a pontuação. Outra expectativa pode ser levantada para o leitor da pontuação, que a qualidade do dado é atualmente documentada na informação da qualidade do dado original para o processo (Weidema, 1998).

**Quadro 3:** Matriz de qualidade de dados (Matriz Pedigree).

Pontuação do Indicador	1	2	3	4	5
<b>Indicadores, que são independentes do estudo no qual os dados são aplicados:</b>					
Confiança na fonte	Dados verificados <sup>a</sup> baseados em medidas <sup>b</sup>	Dados verificados parcialmente baseados em estimativas ou dados não verificados baseados em medidas	Dados não verificados parcialmente baseados em estimativas qualificadas ou informações teóricas	Estimativa qualificada (p.ex. perito industrial); Dados derivados de informações teóricas	Estimativa não qualificada
Completeza	Dados representativos de todos os locais relevantes para o aspecto e com período adequado para compensar flutuações normais	Dados representativos de > 50% dos locais relevantes para o aspecto considerado com períodos adequados para compensar flutuações normais	Dados representativos de somente alguns locais (<< 50%) relevantes para o aspecto considerado ou > 50% dos locais mas com períodos curtos	Dados representativos de apenas um local representativo para o aspecto considerado ou alguns locais com períodos curtos	Representatividade desconhecida ou dados de um pequeno número de locais e períodos curtos
Número de amostras	> 100, medidas contínuas	> 20	> 10	≥ 3	Desconhecido
<b>Indicadores relativos as condições naturais de produção e tecnológicas na qual os dados são válidos, e então dependem das metas de qualidade de dados para o estudo no qual os dados são aplicados:</b>					
Correlação Temporal	Menos de 3 anos de diferença para o ano do estudo	Menos de 6 anos de diferença	Menos de 10 anos de diferença	Menos de 15 anos de diferença	Idade do dado desconhecida ou mais de 15 anos de diferença
Correlação Geográfica	Dados da área em estudo	Dados médios da grande área na qual a área sob estudo está incluída	Dados de uma área menor que área do estudo, ou de área similar		Dados de área desconhecida ou área com muita diferença nas condições de produção
Correlação Tecnológica	Dados de empreendimentos, processos e materiais em estudo (p.ex.: tecnologia idêntica)		Dados de processos ou materiais relacionados mas com mesma tecnologia, ou dados de processos e materiais em estudo mas de diferente tecnologia	Dado de processos ou materiais em estudo mas tecnologias diferentes, ou dados em processos em escala laboratorial de mesma tecnologia	Dados de processos ou materiais relacionados, mas em escalala laboratorial de diferente tecnologia

<sup>a</sup>Verificação pode se dar em diversas maneiras, ex: pela checagem in-loco, pelo recálculo, por balanço de massa ou checagem cruzada com outras fontes.

<sup>b</sup>Inclui dados calculados (ex: emissões calculadas de entradas no processo), quando a base para o cálculo é medida (ex: entradas medidas). Se o cálculo é baseado parcialmente de suposições, a pontuação deve ser dois ou três.

Fonte: Baseado em Althaus et al. (2004)

Portanto, as incertezas podem ser caracterizadas por diferentes indicadores. Porém, a matriz de qualidade de dados ainda não determina o grau de incerteza dos dados coletados, apenas gera um pontuação destes dados. A **Tabela 2** mostra os fatores de incerteza a serem aplicados na matriz de qualidade de dados:

**Tabela 2:** Fatores de incerteza aplicados à pontuação pela qualidade do dado.

<b>Pontuação do indicador</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Confiança na fonte	1,00	1,05	1,10	1,20	1,50
Completeza	1,00	1,02	1,05	1,10	1,20
Número de amostras	1,00	1,02	1,05	1,10	1,20
Correlação temporal	1,00	1,03	1,10	1,20	1,50
Correlação geográfica	1,00	1,01	1,02	-	1,10
Correlação tecnológica	1,00	-	1,20	1,50	2,00

Fonte: Althaus et al. (2004)

Foi atribuído a cada um dos seis indicadores de qualidade de dados um fator de incerteza (expresso como seu grau de contribuição da incerteza acumulada em todos os indicadores) relacionado à pontuação do indicador. Estes fatores de incerteza foram baseados em julgamentos feitos por peritos no assunto (Althaus et al. 2004). Percebe-se que os indicadores apresentam fatores diferenciados, o que caracteriza níveis de importância distintos.

Com base no pressuposto que emissões de CO<sub>2</sub>, em geral, possuem menor grau de incerteza quando comparadas a emissões de CO, Althaus et al. (2004), também baseado em julgamentos feitos por peritos no assunto, criaram fatores básicos de incerteza relativos as entradas e saídas para diferentes fluxos elementares (aspecto ambiental) considerados. Estes fatores podem ser vistos na **Tabela 3**.

**Tabela 3:** Fatores básicos de incerteza (sem dimensão) aplicados as entradas e saídas para os fluxos elementares; c: emissões de combustíveis; p: emissões de processos; a: emissões na agricultura.

<b>Grupo de entradas / saídas</b>	<b>c</b>	<b>p</b>	<b>a</b>
<b>Demanda de:</b>			
Energia térmica, eletricidade, produtos semi-terminados, material trabalhado, serviços de tratamento de resíduos	1,05	1,05	1,05
Serviços de transporte	2,00	2,00	2,00
Infra-estrutura	3,00	3,00	3,00
<b>Recursos:</b>			
Energia primária transportada, metais, sais	1,05	1,05	1,05
Uso do solo, ocupação	1,50	1,50	1,50
Uso do solo, transformação	2,00	2,00	2,00
<b>Poluentes emitidos na água:</b>			
DBO, OD, COD, COT, compostos inorgânicos (NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Cl, Na etc.)	-	1,50	-
Hidrocarbonetos individuais, HPA	-	3,00	-
Metais pesados	-	5,00	1,80
Pesticidas	-	-	1,50
NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>	-	-	1,50
<b>Poluentes emitidos no solo:</b>			
Óleo, hidrocarboneto total	-	1,50	-
Metais pesados	-	1,50	1,50
Pesticidas	-	-	1,20
<b>Poluentes emitidos no ar:</b>			
CO <sub>2</sub>	1,05	1,05	-
SO <sub>2</sub>	1,05	-	-
Compostos orgânicos voláteis (não metano)	1,50	-	-
NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> O	1,50	-	1,40
CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub>	1,50	-	1,20
Hidrocarbonetos individuais	1,50	2,00	-
Material particulado (MP>10)	1,50	1,50	-
Material particulado (MP10)	2,00	2,00	-
Material particulado (MP2.5)	3,00	3,00	-
Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA)	3,00	-	-
CO, metais pesados	5,00	-	-
Emissões inorgânicas, outros	-	1,50	-
Radionuclídeos (p.ex.: Radon - 222)	-	3,00	-

Fonte: Althaus et al. (2004)

Uma vez avaliada a pontuação do indicador (**Quadro 3**), seu respectivo fator de incerteza e o fator básico de incerteza (entrada ou saída do sistema) podem ser determinados através das **Tabelas 2 e 3**. Então, o respectivo grau de incerteza (intervalo de 95% -  $SD_{g95}$ ) é calculado através da **Equação 2**:

$$SD_{g95} = \exp^{\sqrt{[\ln(U_1)]^2 + [\ln(U_2)]^2 + [\ln(U_3)]^2 + [\ln(U_4)]^2 + [\ln(U_5)]^2 + [\ln(U_6)]^2 + [\ln(U_b)]^2}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$U_1$  = Fator de incerteza do indicador Confiança na Fonte;

$U_2$  = Fator de incerteza do indicador Completeza;

$U_3$  = Fator de incerteza do indicador Número de Amostras;

$U_4$  = Fator de incerteza do indicador Correlação Temporal;

$U_5$  = Fator de incerteza do indicador Correlação Geográfica;

$U_6$  = Fator de incerteza do indicador Correlação Tecnológica;

$U_b$  = Fator de incerteza básico.

Por exemplo, uma pontuação de  $SD_{g95}$  igual a 1,53 representa 53% de incerteza para o aspecto ambiental avaliado. Um exemplo prático da aplicação deste procedimento pode ser visto no **item 3.5.**

## 2.6. Simulação de Monte Carlo

De acordo com Costa e Azevedo (1996) o método de Monte Carlo é uma técnica de amostragem artificial empregada para operar numericamente sistemas complexos que tenham componentes aleatórios.

As bases para a aplicação da Simulação de Monte Carlo no cálculo da incerteza consistem em selecionar aleatoriamente um número de uma distribuição de possíveis valores, para uma grandeza de entrada, e repetir o procedimento para as outras grandezas de entrada. Cada valor obtido aleatoriamente é considerado no modelo

matemático da medição e um resultado é, então, obtido para a grandeza de saída. Este passo é repetido  $n$  vezes, de forma independente, a fim de avaliar a função densidade de probabilidade (pdf) do mensurando (BIPM, 2004).

Segundo Moscati, Mezzalana e dos Santos (2004), a função densidade de probabilidade (pdf) do valor da grandeza de saída é obtida a partir da pdf das grandezas de entrada. Dela são extraídos os valores da média, do desvio padrão, dos limites do intervalo correspondente ao nível de confiança requerido e outros parâmetros.

Cita ainda, que a técnica de Simulação de Monte Carlo é apresentada como procedimento geral para se obter numericamente uma aproximação da propagação das pdf's. Pressupõe a premissa de que cada possível valor obtido da distribuição, de modo aleatório, como grandeza de entrada, é tão legítimo como qualquer outro valor.

Sua maior inconveniência está no número de simulações necessárias para se reduzir o erro da estimativa da solução procurada, pelo menos 10.000 (dez mil) vezes segundo Sonnemann, Schuhmacher e Castells (2003), o que tende na prática a torná-lo muito lento. Porém, o uso de computadores e aplicativos que suportam a simulação tem tornado o método popular e de fácil aplicação.

É importante salientar que, a Simulação de Monte Carlo, trata apenas da avaliação quantitativa dos dados, cabe aos indicadores de qualidade (*Quadro 3*) a avaliação qualitativa dos mesmos, entre outros. Para melhorar seu entendimento, são abordados nos tópicos que seguem os modelos de distribuição de probabilidade que serão utilizados, a amostragem aleatória em populações normais e a descrição matemática do método de MC.

### **2.6.1. Principais modelos de distribuição de probabilidade**

Conhecer a distribuição de seus dados é essencial para o correto funcionamento do modelo estatístico. Se conduzirmos uma análise que assume que os dados seguem uma

distribuição normal, mas de fato os dados são não normais, seus resultados serão equivocados. Para evitar este tipo de erro, deve-se determinar a curva de distribuição dos dados, isto pode ser feito, analisando-se histogramas dos mesmos.

A determinação do modelo de distribuição depende das características de cada parâmetro em estudo e do julgamento baseado na análise estatística. A seguir são expostos os dois tipos mais comuns de distribuição de probabilidade (baseado em Heijungs e Frischknecht, 2005).

### ***- Distribuição normal***

A distribuição normal ou também conhecida como Gaussiana, é uma função de densidade de probabilidade (pdf) baseada na equação:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde  $\mu$  é a média e  $\sigma$  o respectivo desvio padrão, com  $\sigma > 0$ .

A estimativa de sua média amostral é dada por:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad \text{Equação 4}$$

E a estimativa da variância amostral por:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N - 1} \quad \text{Equação 5}$$

### - Distribuição lognormal

A distribuição lognormal é calculada assumindo o logaritmo da variável com distribuição normal, não admitindo valores negativos. É uma função de densidade de probabilidade (pdf) baseada na equação:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x) - \mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{Equação 6}$$

Com  $\sigma > 0$ . O valor de sua média amostral é dado por:

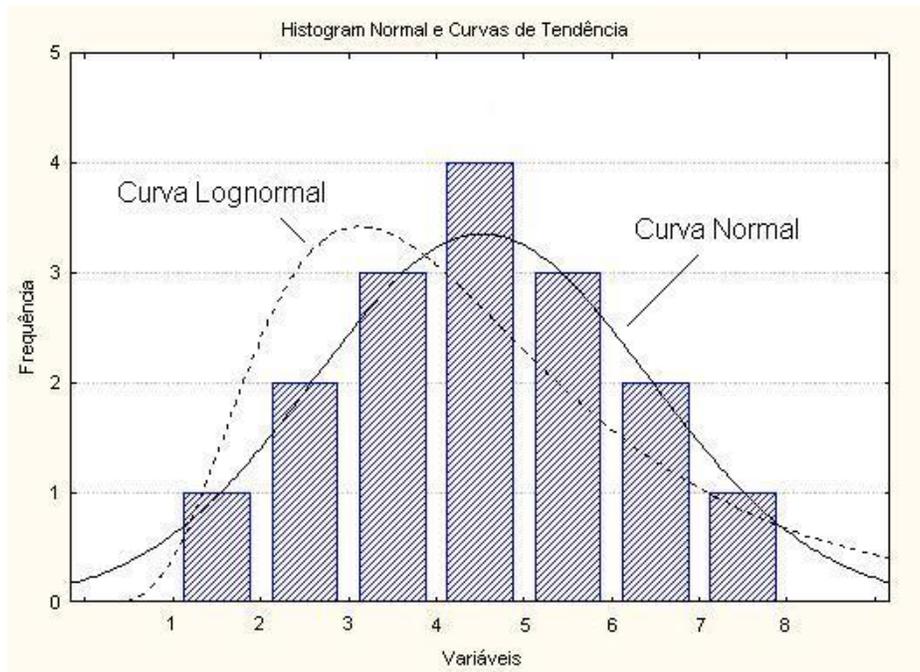
$$\bar{x} = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad \text{Equação 7}$$

E da variância amostral por:

$$s^2 = e^{(\sigma^2)} \cdot \left(e^{(\sigma^2)} - 1\right) \cdot e^{(2\mu)} \quad \text{Equação 8}$$

A determinação da curva de distribuição de cada parâmetro depende dos dados coletados e do julgamento baseado na análise estatística, do histograma destes dados.

A **Figura 3** mostra as diferenças nas densidades de probabilidade normal e lognormal e o histograma de comportamento de dados ditos normais.



**Figura 3** – Histograma normal e curvas de tendência.

### 2.6.2. Amostragem Aleatória em Populações Normais

Considerando amostras de  $N$  elementos extraídos aleatoriamente de uma população distribuída normalmente  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , com média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$ . Os valores amostrais  $\bar{x}$  e  $s^2$ . Obedecem ao seguinte padrão:

As médias amostrais  $\bar{x}$  também se distribuem normalmente, com a mesma média  $\mu$ , porém com variância  $\frac{\sigma^2}{N}$ .

Supondo que uma distribuição com média  $\bar{x}$ , que se distribui normalmente, ao subtrair a média populacional  $\mu$  e dividir o resultado pelo desvio padrão da média populacional  $\frac{\sigma}{\sqrt{N}}$ , tem-se uma variável normal padronizada, dada pela equação:

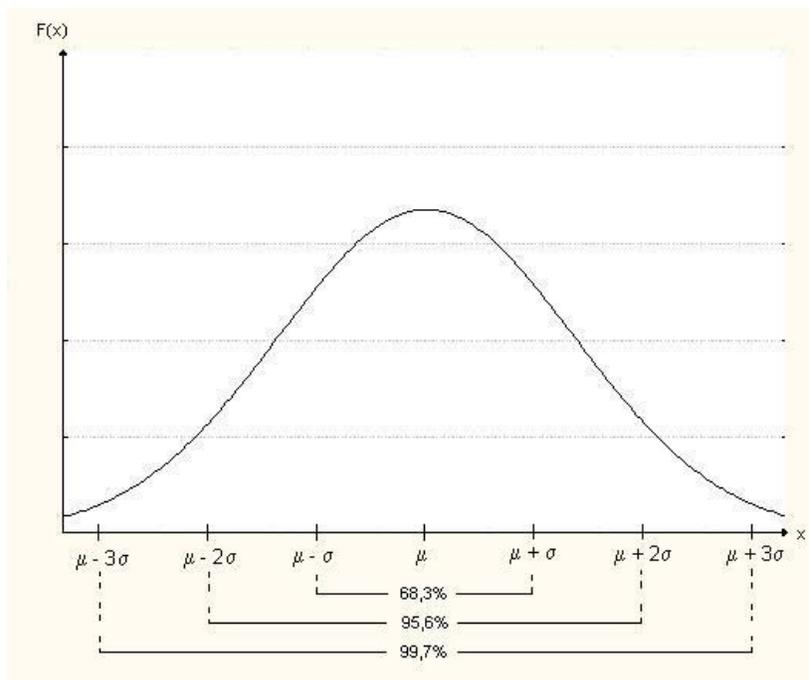
$$\frac{(\bar{x} - \mu) \cdot \sqrt{N}}{\sigma} = z = N(0,1)$$

Equação 9

É uma hipótese perfeitamente admissível em muitas situações de interesse prático, em decorrência do Teorema do Limite Central.

Teorema do Limite Central - “Qualquer que seja a distribuição da variável de interesse, para um grande número de amostras, geradas aleatoriamente, as distribuições das médias amostrais serão aproximadamente normalmente distribuídas, e tenderão a uma distribuição normal à medida que o tamanho de amostra tende ao infinito”. (Magalhães e Lima, 2002)

Têm-se, para uma variável  $x$  com distribuição normal, média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ , os respectivos intervalos de confiança (**Figura 4**):



**Figura 4** – Probabilidades associadas à distribuição normal.

E, função de probabilidade Normal, Média e Desvio Padrão, dado respectivamente por:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \therefore \quad \mu = E[F(x)] \quad \therefore \quad \sigma^2 = \text{Var}[F(x)]$$

### 2.6.3. Descrição Matemática do Método de Monte Carlo

Baseado nas considerações de autores como Vose (1997); Saliby e Araújo (2001); Sonnemann, Schuhmacher e Castells (2003); Kulay e Pla (2004); dentre outros, segue a descrição matemática do método de MC.

Considerando a seguinte integral definida  $\int_a^b g(x) \cdot f(x) dx = \overline{g(x)}$ , onde  $g(x)$  é uma função qualquer definida no intervalo  $a < x < b$ , e  $f(x)$  é a função de densidade de probabilidade, sendo que  $\int_a^b f(x) = 1$ .

Resolvendo a integral  $\int_a^b g(x) \cdot f(x) dx = \overline{g(x)}$  pelo método de Monte Carlo, toma-se um número  $N$  de valores amostrais ( $x_i$ ), gerados aleatoriamente, com a distribuição de probabilidade  $f(x)$ . Com esses dados, a estimativa de  $\overline{g(x)}$  é dada por  $\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N g(x_i)$  e o

respectivo desvio padrão pode ser obtido por  $\sqrt{\frac{1}{(N-1)} \cdot \sum_{i=1}^N [g(x_i) - \mu]^2}$ .

Para um valor  $N$  grande,  $\frac{(\mu - \bar{x}) \cdot \sqrt{N}}{\sigma} = z$  se aproxima de uma distribuição normal padrão. Desta forma, podem-se construir intervalos de confiança e realizar testes de hipóteses. Logo, o intervalo de confiança (IC) com 99,7% de probabilidade ( $z = \pm 3$ ), no qual  $\bar{g}$  esteja contido, é dado por:

$$-3 < z < 3 \quad \therefore \quad -3 < \frac{(\bar{x} - \mu) \cdot \sqrt{N}}{\sigma} < 3 \quad \therefore \quad \frac{-3\sigma}{\sqrt{N}} < (\bar{x} - \mu) < \frac{3\sigma}{\sqrt{N}}$$

$$\mu - \frac{3\sigma}{\sqrt{N}} < \bar{x} < \mu + \frac{3\sigma}{\sqrt{N}} \quad \therefore \quad IC(\bar{x}; 99,7\%) = \mu \pm \frac{3\sigma}{\sqrt{N}}$$

Analisando a equação deduzida, é preciso aumentar o número de simulações ( $N$ ) ou reduzir o desvio padrão  $\sigma$ , para diminuir o erro gerado, o que justifica a utilização de um grande número de simulações, 10.000 (dez mil) como citado anteriormente, para redução do erro gerado.

#### 2.6.4. Funcionamento do Método de Monte Carlo

Para descrição do funcionamento da Simulação de Monte Carlo são supostos “n” dados quaisquer ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) obtidos através de medições *in loco*. Com base em uma análise estatística simples nos mesmos obtém-se sua distribuição de probabilidade e respectiva média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ .

O que o método de Monte Carlo faz é gerar um novo dado aleatoriamente ( $x_{n+1}$ ), dentro do intervalo da curva de distribuição de probabilidade definida pela função  $F(x)$  que representa os dados obtidos ( $x_1, x_2, \dots, x_N$ ). Com estes novos dados ( $x_1, x_2, \dots, x_{n+1}$ ), é gerada uma nova distribuição de probabilidade  $F(x)$  destes dados, média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$ .

Assim, sucessivamente, a simulação gera um novo dado aleatoriamente ( $x_{n+2}$ ), dentro do intervalo da curva de distribuição de probabilidade definida pela função  $F(x)$  que representa os dados obtidos até então ( $x_1, x_2, \dots, x_{n+2}$ ), até que o número total de simulações (adotado) seja atingido. Por fim, é obtida a nova média e o respectivo desvio padrão para os dados simulados.

#### Exemplo numérico do método

Foram obtidos 5 (cinco) valores através de medições *in loco* (9,1; 10,2; 11,7; 10,5 e 10,4 kg). Supondo que os mesmos comportam-se normalmente com média  $m = 10,4$  kg e desvio padrão  $s = 2,98$  kg definidos com a aplicação das *Equações 3, 4 e 5*.

Aplicando a simulação de Monte Carlo aos dados, tem-se a geração da variável aleatória de valor 9,6 kg dentro do intervalo definido pela função

$F(x) = 0,13387 \cdot e^{-\frac{(x^2 - 2,98x + 8,88)}{216,32}}$ , obtida com base na média  $m = 10,4$  kg e desvio padrão  $s = 2,98$  kg.

Obtidos os novos dados (9,1; 10,2; 11,7; 10,5; 10,4 e 9,6 kg) são definidos sua nova média  $m = 10,2$  kg e desvio padrão  $s = 3,43$  kg, e a respectiva função

$F(x) = 0,03911 \cdot e^{-\frac{(x^2 - 3,43x + 11,765)}{208,08}}$  que representa estes valores.

É então gerado um novo valor aleatório (p.ex.: 11,3 kg) e feitos novos cálculos de média  $m$ , desvio padrão  $s$  e da nova função  $F(x)$  até que se atinja o número de simulações definido (p.ex.: 10.000). No final é apresentado a nova média  $m$  e o novo desvio padrão  $s$  dos dados. Por ser um método repetitivo que envolve inúmeros cálculos matemáticos, o uso de aplicativos que suportam a simulação de Monte Carlo é fundamental para sua aplicação prática.

### 2.6.5. Aplicativos que Suportam a Simulação de Monte Carlo

Como visto no tópico anterior, a Simulação de Monte Carlo gera variáveis aleatórias dentro de uma distribuição de probabilidade pré-definida, reduzindo o erro gerado pela análise de poucas amostras. Pode-se fazer Monte Carlo escrevendo o código em qualquer linguagem computacional, FORTRAN, BASIC, C++, etc. Dentre os aplicativos desenvolvidos para realizar a Simulação de Monte Carlo, destacam-se:

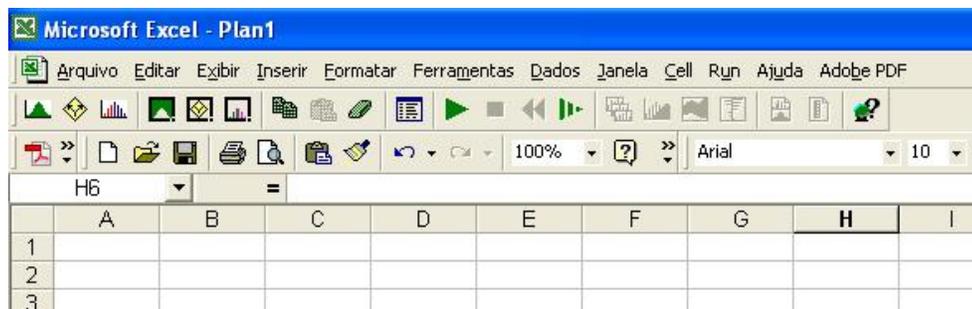
- Crystal Ball<sup>®</sup>, produzido por Decisioneering, Inc.;
- SimaPro<sup>®</sup>, produzido por PRé Consultants;
- @Risk<sup>®</sup>, produzido por Palisade Corporation;
- Analytica<sup>®</sup>, produzido por Lumina Decision Systems, Inc.;
- Stella II<sup>®</sup>, produzido por High Performance System, Inc.;

- PRISM<sup>®</sup>, produzido por Gardner, R.H. et al.;
- SusaPC<sup>®</sup>, produzido por Hofner, E. et al.; GRS-Garching.

Este estudo utiliza apenas o software Crystal Ball<sup>®</sup>, pelo acesso ao aplicativo e por mesmo ser de fácil utilização. Detalhes sobre seu funcionamento são abordados no próximo tópico.

### 2.6.6. Crystal Ball<sup>®</sup>

Anexado ao programa Microsoft Excel<sup>®</sup>, o Crystal Ball<sup>®</sup> cria novos ícones com os quais são acessadas suas funções (*Figura 5*).



**Figura 5** – Software Crystal Ball<sup>®</sup> associado ao programa Microsoft Excel<sup>®</sup>.

Ao inserir os dados a serem analisados pelo software em qualquer célula do Microsoft Excel<sup>®</sup>, deve ser definida a distribuição de probabilidade dos mesmos, que será utilizada para descrever a incerteza contida na célula, para isto, o programa disponibiliza uma galeria de tipos de distribuição (*Figura 6*).

Para os dados com muitas avaliações, deve-se apenas calcular a média e o respectivo desvio padrão, dentro de sua distribuição de probabilidade definida. Para os dados com poucas avaliações, deve-se primeiramente estimar sua distribuição de probabilidade e dentro desta distribuição, definir sua média e desvio padrão.

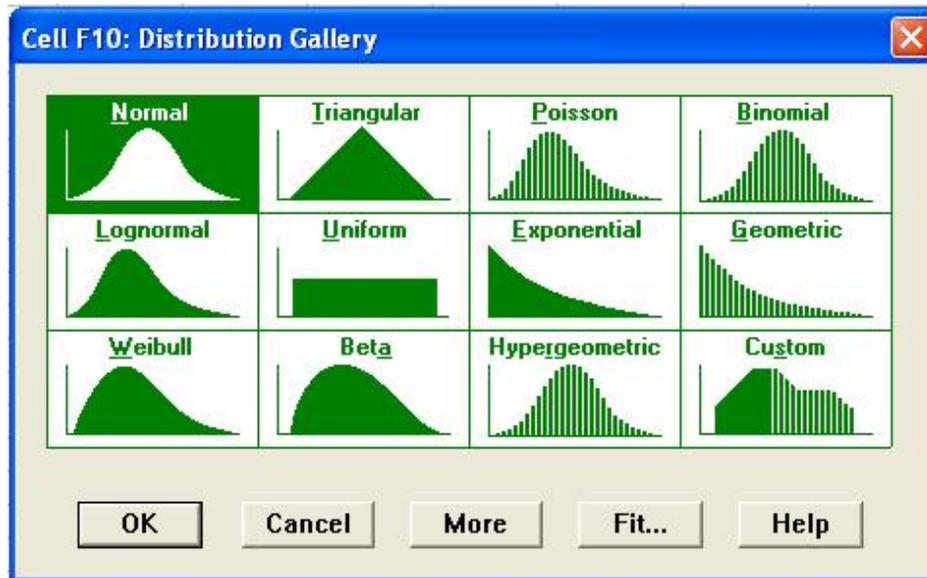


Figura 6 – Algumas das distribuições de probabilidade do Software

Ao definir a distribuição de probabilidade dos dados, uma nova janela (**Figura 7**) surge no qual é definido a média, desvio padrão e se necessário, também é possível limitar o intervalo de variação dos dados em análise.

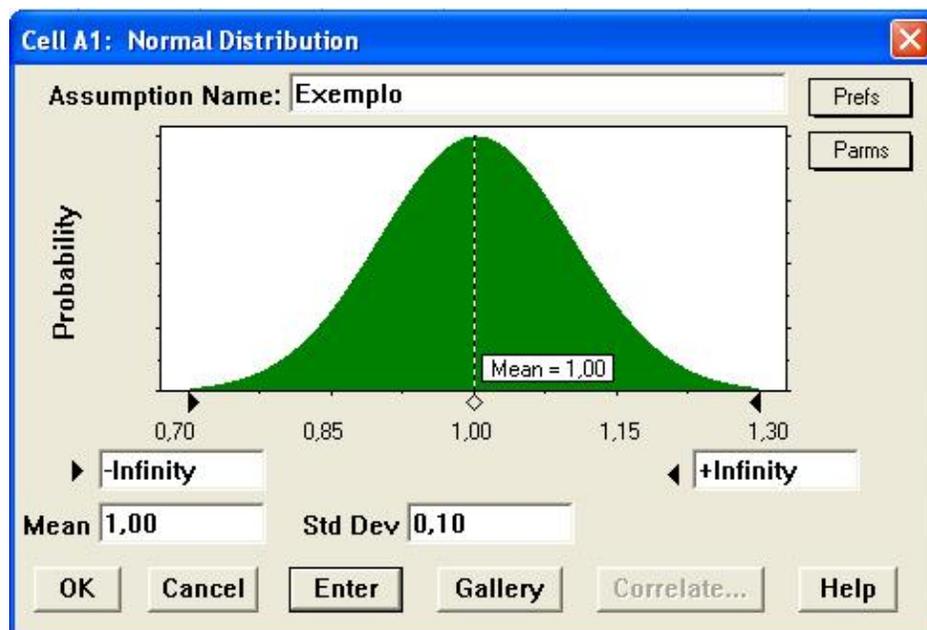
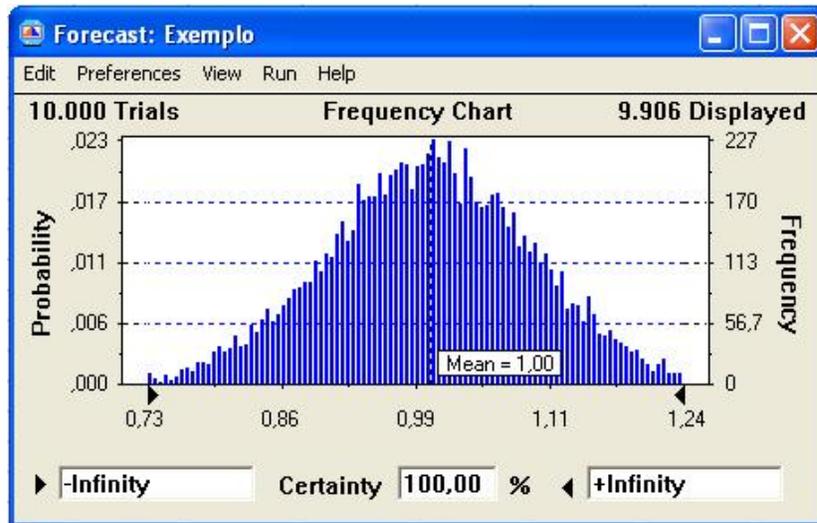


Figura 7 – Exemplo: Definição da média e desvio padrão para a variável em análise

Uma vez que o usuário do programa definiu a variação para cada parâmetro incerto da tabela (Microsoft Excel<sup>®</sup>), o programa usa esta informação para realizar a simulação de

Monte Carlo. Neste estudo serão adotadas 10.000 (dez mil) simulações, todas dentro da função de probabilidade pré-definida. Por fim, a simulação calcula o novo resultado e apresenta os valores obtidos através de um gráfico, como mostra a **Figura 8**:



**Figura 8** – Exemplo: Determinação dos novos dados com base na distribuição utilizada

Terminada a simulação, a análise dos novos valores obtidos pode ser feita a fim de determinar as variações ocorridas nos dados selecionados. Um exemplo numérico da aplicação do programa é descrito no próximo tópico.

### Exemplo de Aplicação do Software

Supondo a aplicação da simulação de Monte Carlo, através do Crystal Ball<sup>®</sup>, em uma unidade de processo em estudo, com emissão definida por “Consumo de Água”. Os valores obtidos para a média, desvio padrão e a distribuição de probabilidade dos dados são apresentados na **Figura 9**.

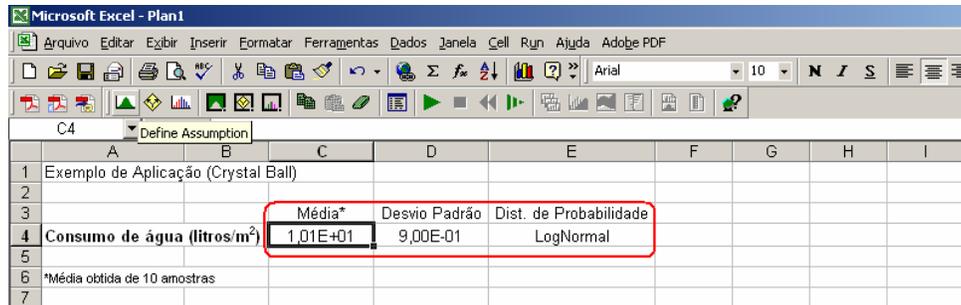


Figura 9 – Média, desvio padrão e distribuição de probabilidade dos dados

Inseridos os dados na planilha do Microsoft Excel<sup>®</sup>, deve então ser selecionada a célula onde esta definida a média dos mesmos e em seguida sua distribuição de probabilidade, conforme as *Figuras 10 e 11*.

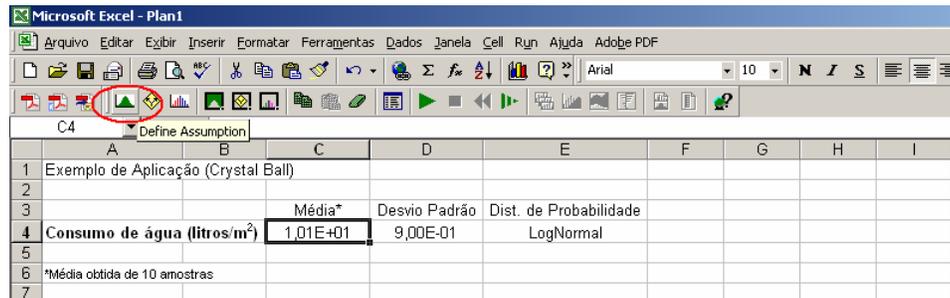


Figura 10 – Localização do ícone de definição da distribuição de probabilidade dos dados.

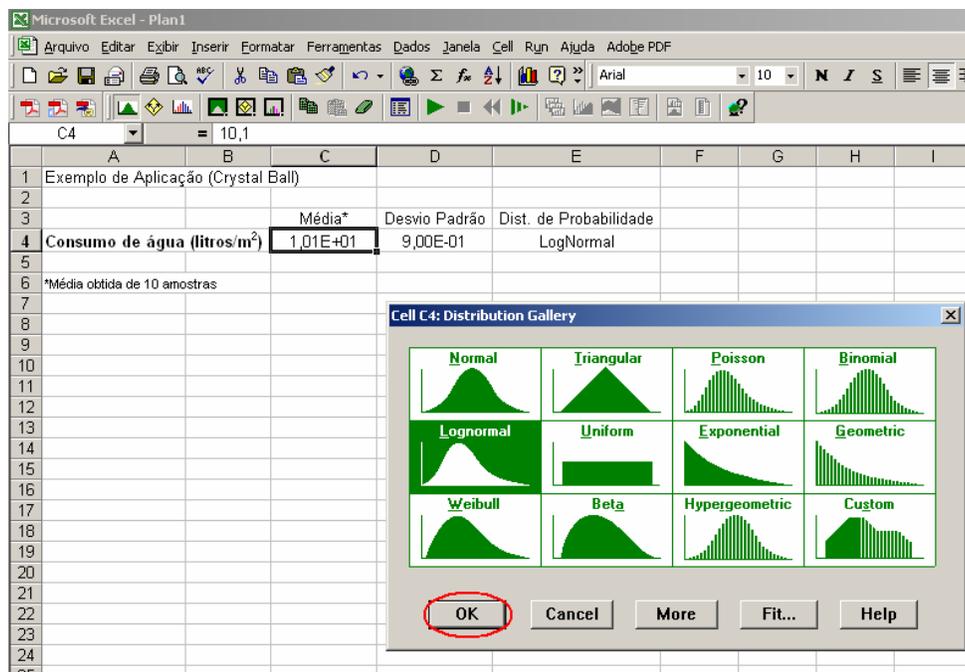
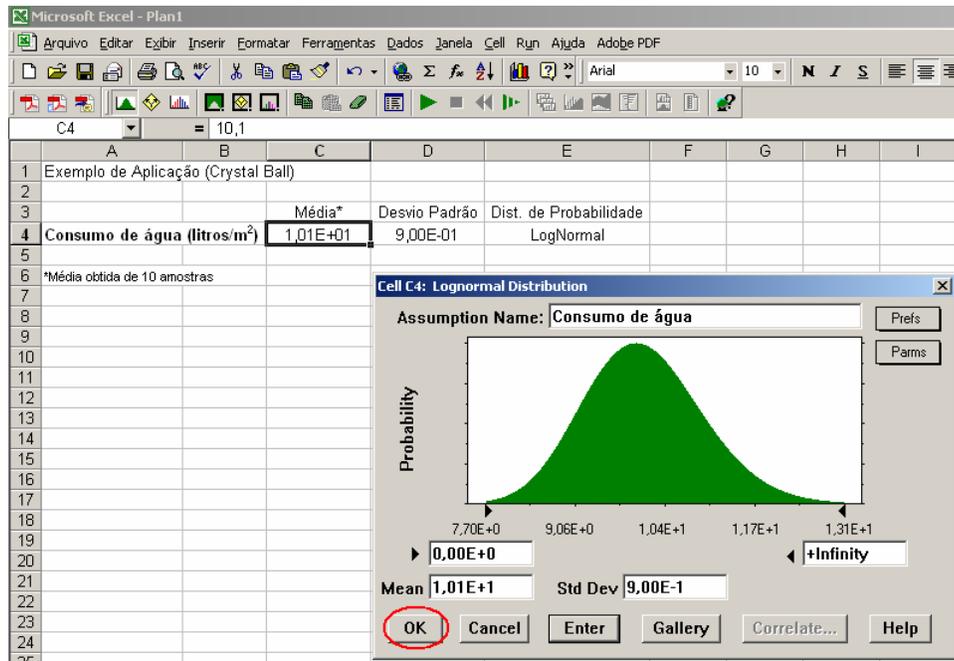


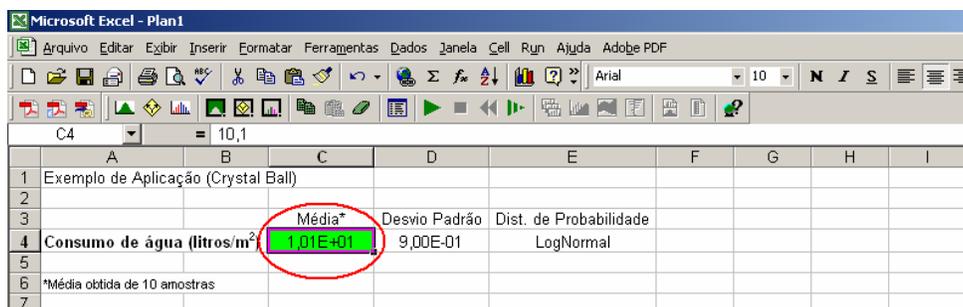
Figura 11 – Definição da distribuição de probabilidade dos dados.

Uma vez selecionada a distribuição de probabilidade dos dados, lognormal na **Figura 11**, deve-se inserir a média, o desvio padrão e se necessário também o limite do intervalo de variação dos dados em análise na nova janela (**Figura 12**).



**Figura 12** – Definição da média, desvio padrão e intervalo de variação dos dados.

Com a média, desvio padrão e o intervalo de variação dos dados inseridos e confirmados há uma mudança na cor da célula do Microsoft Excel<sup>®</sup> para verde, indicando a inclusão das características dos dados na célula (**Figura 13**).



**Figura 13** – Inclusão de características dos dados.

O próximo passo é a definição da nomenclatura da célula conforme indicado nas **Figuras 14 e 15**.

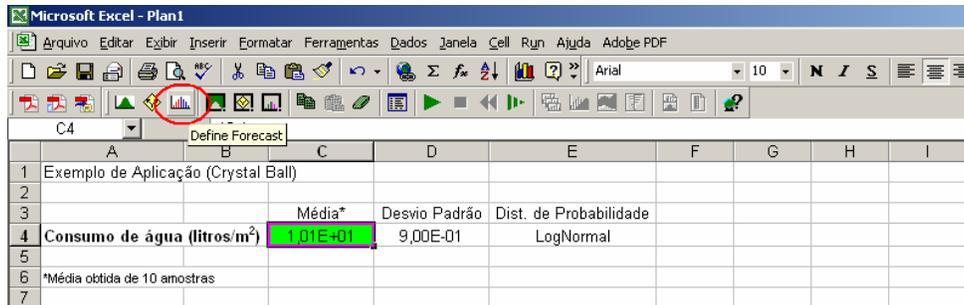


Figura 14 – Localização do ícone de definição da nomenclatura da célula.

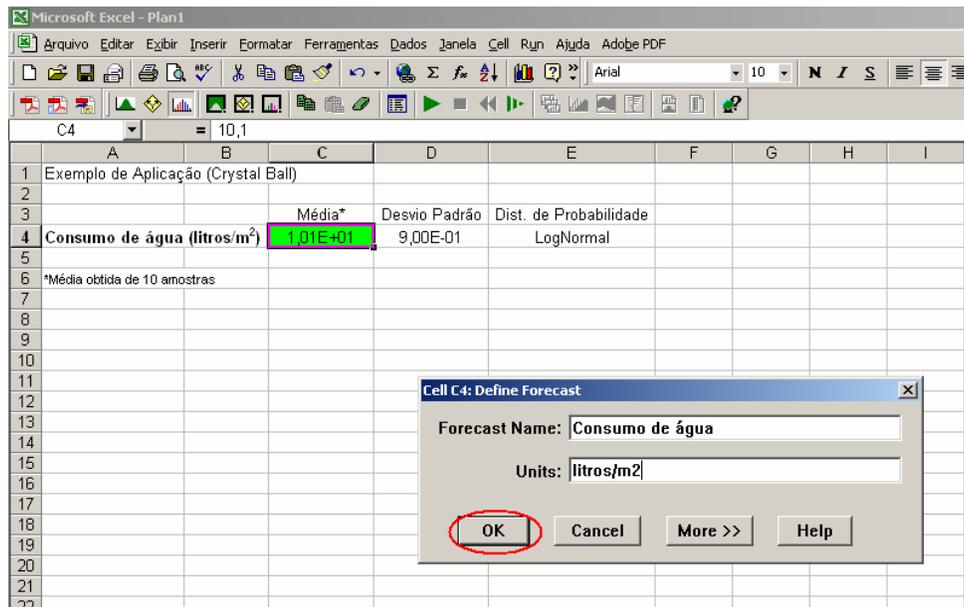


Figura 15 – Definição da nomenclatura da célula.

Com a definição da nomenclatura dos dados, há uma nova mudança na cor da célula do Microsoft Excel® para azul, indicando a confirmação da operação (Figura 16).

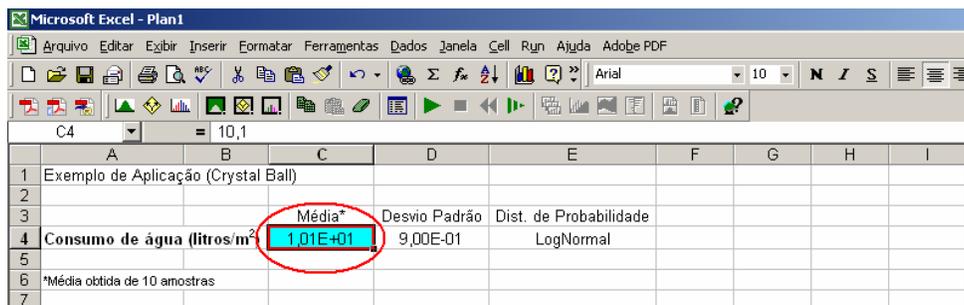
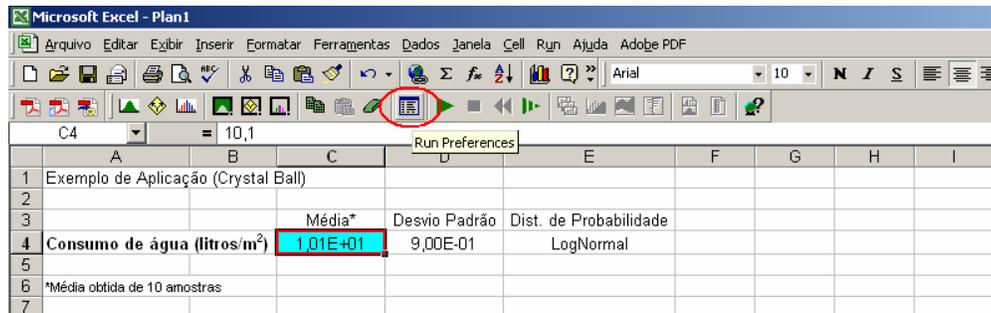
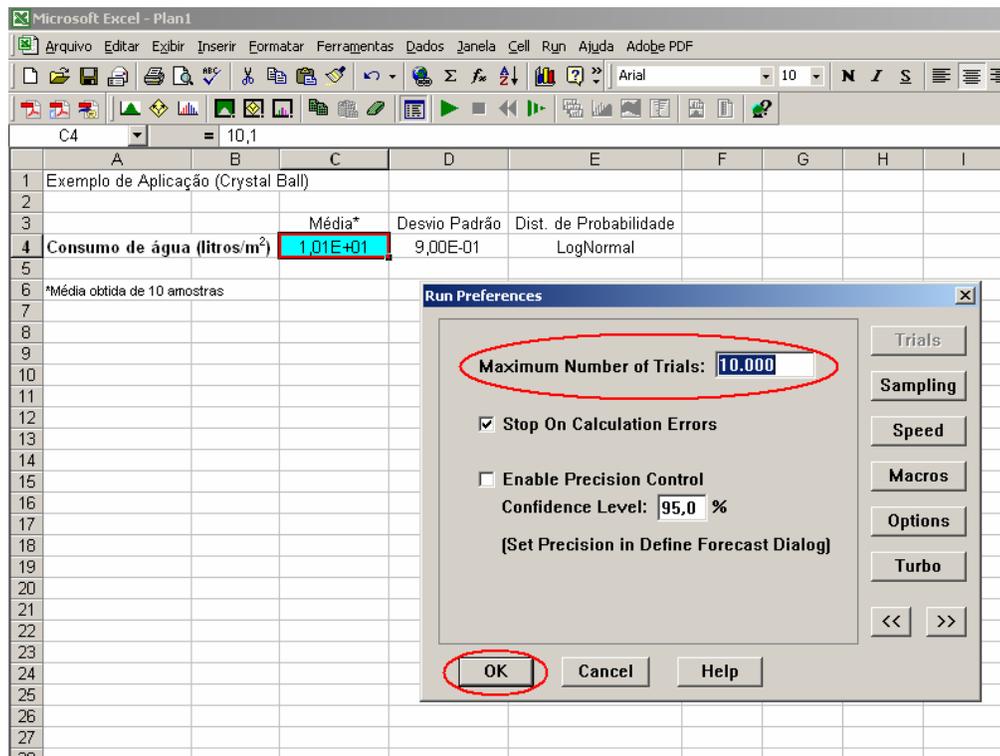


Figura 16 – Indicação da inclusão da nomenclatura dos dados.

O próximo passo é a definição do número de simulações desejadas para a simulação de Monte Carlo. É possível modificar outras características da simulação, como nível de precisão e que o programa pare de rodar se houver algum erro (*Figuras 17 e 18*).



**Figura 17** – definição do número de simulações e outras características desejáveis.



**Figura 18** – Definição do número de simulações.

Com todas as características introduzidas na célula de avaliação, a simulação de Monte Carlo pode ser iniciada (*Figura 19*). A simulação de Monte Carlo e seus resultados podem ser vistos nas *Figuras 20, 21 e 22*.

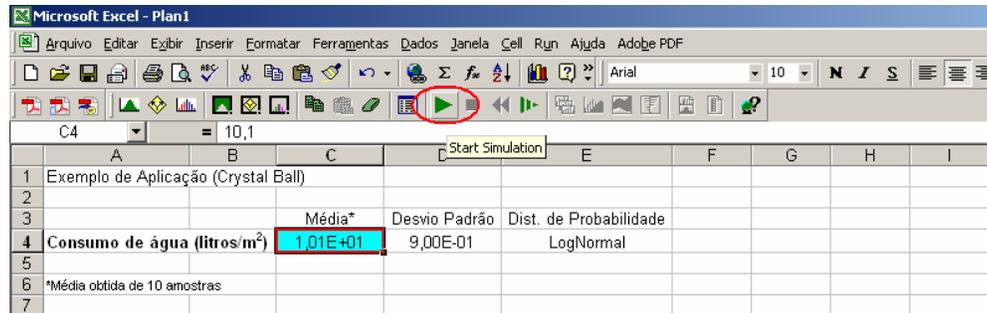


Figura 19 – Localização do ícone de início da simulação de Monte Carlo.

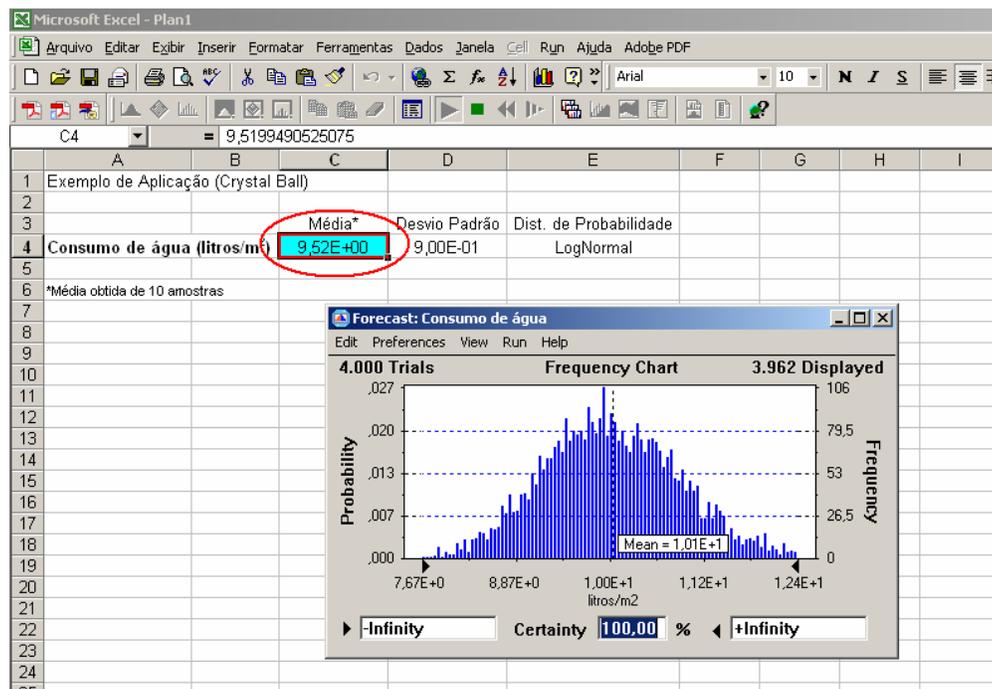


Figura 20 – Geração de números aleatórios e as variações do histograma.

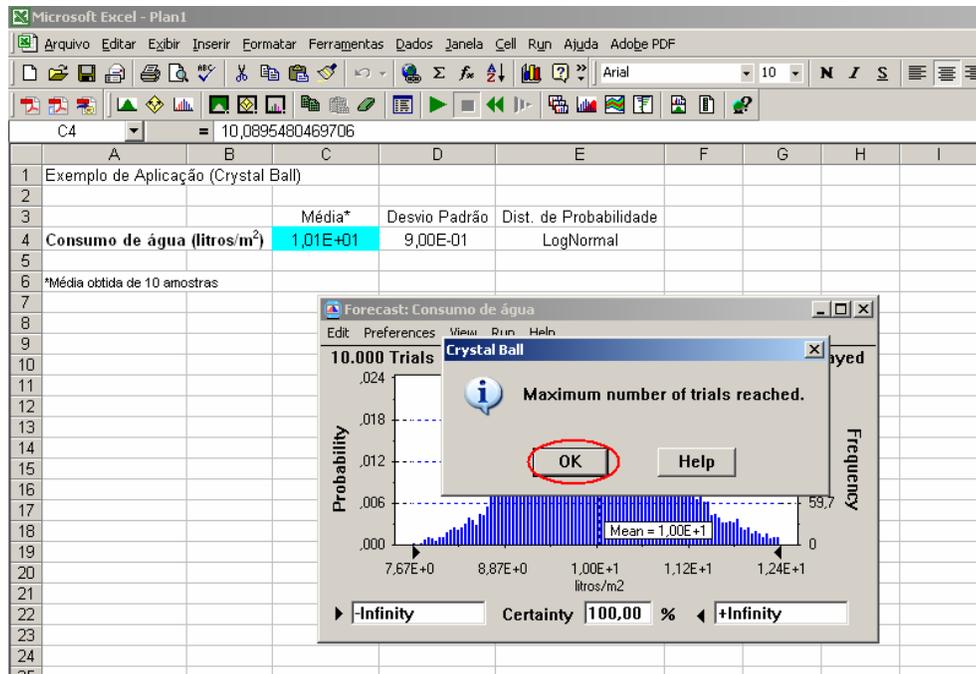


Figura 21 – Término da simulação.

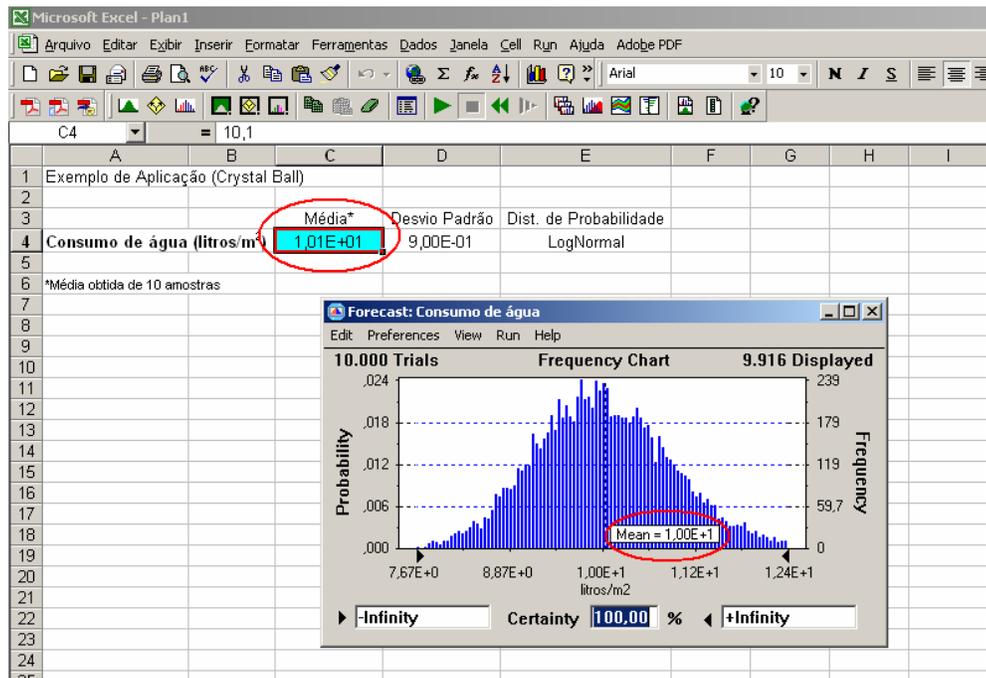


Figura 22 – Resultados obtidos com a simulação de Monte Carlo.

Terminada a simulação, cabe ao responsável pelo estudo a interpretação dos novos resultados obtidos.

### 3. PROPOSIÇÃO DO MODELO

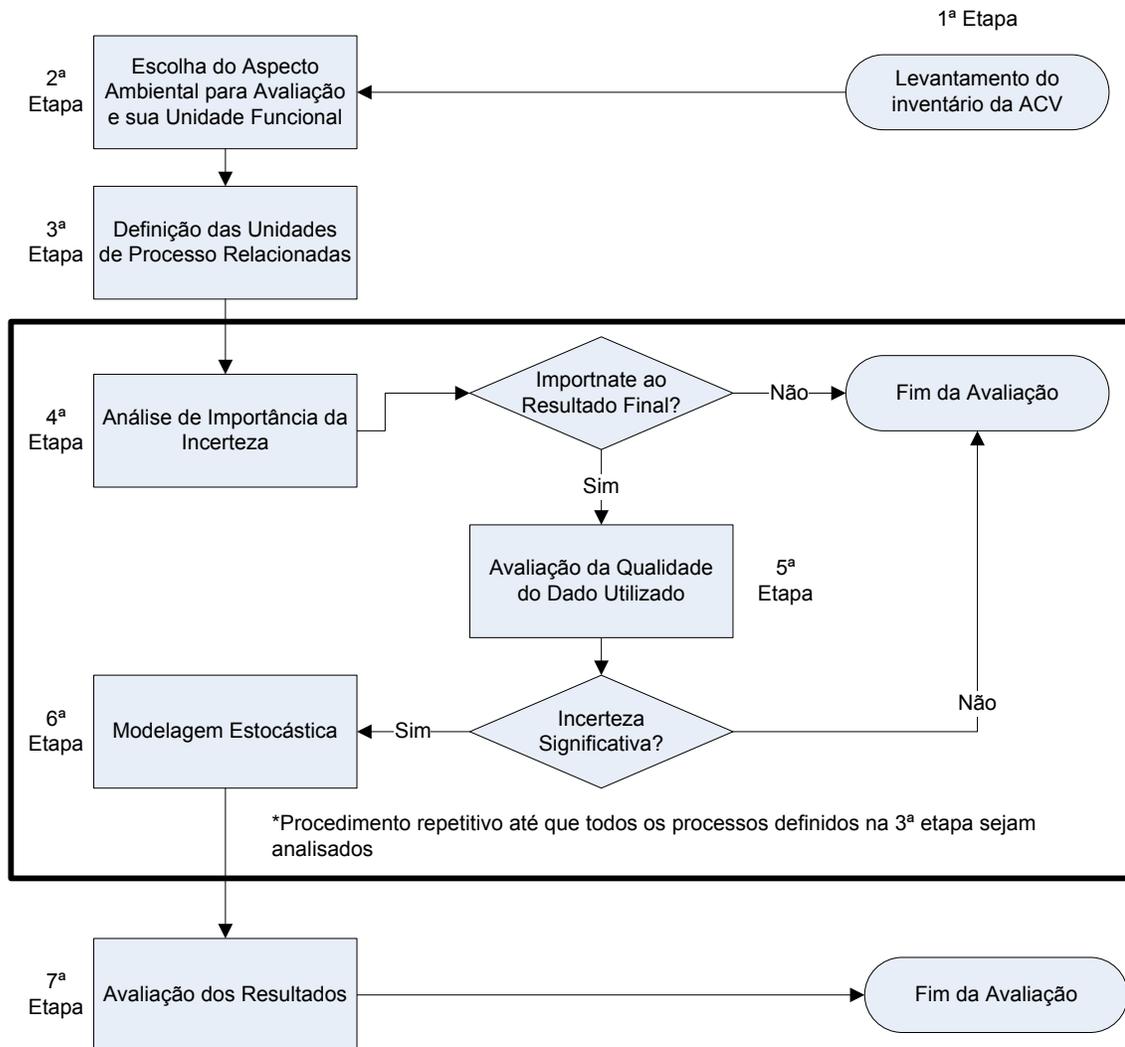
O modelo proposto por este estudo, a fim de avaliar as incertezas geradas durante o levantamento do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), busca verificar quais dados são sensíveis aos resultados finais de uma ACV e como as incertezas geradas podem ser identificadas e reduzidas, a fim de garantir resultados mais precisos.

Trata-se da conjunção de procedimentos isolados existentes, integrados em um novo método. Para tanto, é utilizada a análise da sensibilidade dos parâmetros utilizados no inventário da ACV; a verificação da qualidade destes parâmetros, através de uma matriz de avaliação; a determinação dos seus graus de incerteza, e a modelagem matemática dos mesmos, através da geração de números aleatórios.

O modelo se concentra em duas, das quatro fases da ACV (Definição do objetivo e escopo e Análise do inventário) e pode ser aplicado tanto aos parâmetros de entrada, como aos de saída do sistema (separadamente). É dividido em 7 (sete) etapas:

- 1ª etapa: Compilação do Inventário do Ciclo de Vida (ICV);
- 2ª etapa: Escolha do aspecto ambiental para avaliação;
- 3ª etapa: Definição das unidades de processo relacionadas;
- 4ª etapa: Análise de importância da incerteza;
- 5ª etapa: Avaliação qualitativa das incertezas;
- 6ª etapa: Modelagem estocástica;
- 7ª etapa: Avaliação dos resultados.

A **Figura 23** define o fluxograma, com cada uma das etapas, do modelo proposto por este estudo para avaliação das incertezas geradas na modelagem do Inventário do Ciclo de Vida (ICV).



**Figura 23** – Fluxograma do modelo proposto e suas etapas.

É importante salientar que o modelo proposto avalia apenas os parâmetros utilizados durante o levantamento do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) e não considera a potencialidade de impacto ambiental dos mesmos, ou seja, avalia-se o dado e não a emissão. Cada uma das 7 (sete) etapas do modelo é descrita nos tópicos que seguem.

### 3.1. Compilação do inventário do ciclo de vida

Trata-se de um levantamento normal de ACV, analisando os parâmetros de entrada e saída do sistema inventariado sob estudo. Contendo:

- Definição da unidade funcional e escopo do estudo;
- Escolha das unidades do processo adequadas ao estudo;

Alguns cuidados devem ser tomados, com relação à coleta de dados, catalogando os seguintes aspectos:

- Método de aquisição (método de medição dos dados, método de cálculo de parâmetros inferidos dos dados, suposições feitas para dados estimados, etc.);
- Os métodos utilizados para verificação dos dados (balanço de massa e energia, agregação, alocação, etc.);
- O número de pontos de dados coletados, período coberto e sua representatividade em relação à população total;
- A idade do dado expressa como o ano em que foi feita sua medição;
- A área geográfica da qual o dado é representativo;
- O processo ou nível tecnológico para o qual o dado representa;
- Incerteza das informações.

### **3.2. Escolha do aspecto ambiental para avaliação**

Escolha do aspecto ambiental no qual serão examinadas as possíveis incertezas geradas, nos dados, durante o levantamento do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) (p.ex: potencial de aquecimento global), e a definição da unidade funcional para o aspecto escolhido (p.ex: kg de CO<sub>2</sub>-equivalentes/GWh produzido).

### **3.3. Definição das unidades de processo relacionadas**

Delineação das unidades de processo relacionadas ao aspecto ambiental escolhido (*item 3.2.*) para o estudo das incertezas. São consideradas as unidades de processo onde o aspecto está presente, tendo como base o escopo do estudo de ACV em análise.

### 3.4. Análise de importância da incerteza

É feita a avaliação da importância da incerteza do aspecto analisado em relação a sua contribuição acumulada dentro do escopo do estudo, para as unidades de processo selecionadas (*item 3.3.*). Esta avaliação é feita pela relação dos seguintes fatores:

- Fluxo elementar (material ou energia que entra ou deixa o sistema sob estudo) na unidade de processo a ser avaliada;
- Soma dos fluxos elementares da unidade funcional da emissão.

A *Equação 1* permite a primeira aproximação sobre a importância da incerteza do parâmetro:

$$C_{i,UF,g} = \frac{a_{T,i} \times b_{i,g}}{b_{T,UF,g}} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

- “a” representa uma quantidade qualquer;
- “b” representa a emissão ou consumo por unidade de processo da quantidade estabelecida em “a”;
- “i” representa a unidade de processo em avaliação;
- “g” representa o fluxo elementar em avaliação (aspecto ambiental);
- “UF” é a unidade funcional do estudo;
- “T” significa total.

Um exemplo da aplicação desta equação foi descrito no *item 2.4.* Unidades de processo sensíveis aos resultados finais no inventário, ou seja, com contribuição maior que 1% (valor tipicamente adotado em ACV), em relação à soma do fluxo elementar (em avaliação) em todas as unidades de processo do inventário, onde o aspecto está presente, são importantes, logo, seguem para a próxima etapa (*item 3.5.*).

Os demais não possuem grande influência no resultado final e não são considerados para a próxima etapa. Caso isto ocorra, o procedimento chega ao fim para a unidade de processo em avaliação, isto porque não há necessidade de se deter à análise de um dado que não tem grande contribuição ao resultado do estudo (menor que 1% da contribuição acumulada). Estes dados são mantidos no novo Inventário do Ciclo de Vida (ICV) (ver *item 3.7*).

### 3.5. Avaliação qualitativa das incertezas

Com base nas características dos parâmetros utilizados no estudo, catalogadas durante o levantamento do Inventário de Ciclo de Vida (ICV), como exposto no *item 2.5.1*.; nos indicadores independentes e dependentes às metas de qualidade de dados, contidos na matriz de qualidade de dados (*Quadro 3*); e os fatores de incerteza aplicados a esta matriz (*Tabela 2*), e o fator básico de incerteza do aspecto ambiental (*Tabela 3*), será determinado o grau de incerteza, expresso em percentual, para os parâmetros utilizados no estudo em avaliação.

Na matriz de qualidade de dados (*Quadro 3*) são pontuados, com nota de 1 (um) a 5 (cinco), todos os 6 (seis) indicadores de qualidade dos dados para os parâmetros utilizados no inventário, com base nas características catalogadas no ICV. Depois, esta pontuação é cruzada com a *Tabela 2* e o grau de incerteza do indicador é determinado. Em seguida é determinado o fator básico de incerteza, relativo ao fluxo elementar (aspecto ambiental) sob avaliação.

Por exemplo, considerando a emissão de CO<sub>2</sub> na produção de 1 GWh em uma Usina de Energia a base de carvão mineral. Para uma unidade de processo qualquer, definida dentro do escopo do estudo, São obtidos os seguintes valores para os indicadores de qualidade de dados:

**Quadro 4:** Exemplo: indicadores de qualidade de dados e respectivas notas de qualidade.

Indicador	Nota	Observação
Confiança na fonte	1	Dados verificados baseados em medidas
Completeza	5	Representatividade desconhecida
Número de amostras	2	>20
Correlação temporal	1	< 3 anos em relação ao ano do estudo
Correlação geográfica	1	Dados da área do estudo
Correlação tecnológica	1	Dados de processos em estudo

Cruzando estas notas com a **Tabela 2** (fatores de incerteza) é obtido o fator de incerteza para cada um dos indicadores:

**Tabela 4:** Exemplo: notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza.

Indicador	Nota	Fator de incerteza
Confiança na fonte	1	1,00
Completeza	5	1,20
Número de amostras	2	1,02
Correlação temporal	1	1,00
Correlação geográfica	1	1,00
Correlação tecnológica	1	1,00

É determinado também o fator básico de incerteza (**Tabela 3**) para o aspecto ambiental em avaliação, neste caso o a emissão de CO<sub>2</sub>:

**Tabela 5:** Exemplo: fator básico de incerteza.

Aspecto Ambiental	Fator básico de incerteza
CO <sub>2</sub>	1,05

Então, o respectivo grau de incerteza (intervalo de 95% - SD<sub>g95</sub>) é calculado pela **Equação 2:**

$$SD_{g95} = \exp^{\sqrt{[\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,20)]^2 + [\ln(1,02)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,05)]^2}}$$

$$SD_{g95} = 1,21$$

Este fator de incerteza obtido para o exemplo avaliado, 1,21, representa um grau de incerteza de 21%.

Determinado o grau de incerteza dos indicadores dependentes e independentes, é então avaliado se a incerteza contida é significativa, ou não, para o estudo de ACV. Caso seja significativa, o modelo segue para próxima etapa (Modelagem Estocástica).

A incerteza é significativa se a soma dos fatores de incerteza, para os indicadores independentes Completeza e Número de Amostras, atingir ou ultrapassar 1,05 (valor adotado com base nas características da Matriz de Qualidade de Dados), no exemplo a soma destes dois valores representa um fator de incerteza de 1,22. Foi adotado este procedimento porque apenas estes indicadores independentes (Completeza e Número de Amostras) podem ser reduzidos através de modelagem matemática.

A Confiança na fonte e as Correlações Temporal, Geográfica e Tecnológica dependem de alternativas (p.ex.: medidas *in loco*) diferentes à modelagem matemática (**item 2.6.**), para redução dos erros gerados. Isto porque a redução destas incertezas está diretamente ligada à coleta dos dados do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), portanto não podem ser reduzidas através de simulações. Por este motivo, serão utilizados no estudo apenas para estimar o grau de incerteza vinculada a estes fatores. Ou seja, a incerteza é estimada, mas sua correção depende de procedimentos mais complexos.

### 3.6. Modelagem Estocástica

O primeiro passo para a modelagem estocástica (aleatória) é a seleção da distribuição de probabilidade dos dados. A aproximação para escolha da distribuição de probabilidade dos dados apropriada varia de acordo com o comportamento dos parâmetros da unidade de processo em estudo, deve ser feito através de um histograma dos valores obtidos e de sua linha de tendência. São necessários, no mínimo, 3 valores

amostrados para que possa ser realizada. Caso contrário, o procedimento segue para a próxima etapa. Isto porque são necessários 3 valores amostrados para definição da função de distribuição de probabilidade, sua média e o respectivo desvio padrão, necessários a geração de números aleatórios.

Uma vez que a distribuição de probabilidade dos dados selecionados foi determinada, uma nova distribuição de probabilidade é calculada por meio da geração de números aleatórios. Para isto será utilizado um aplicativo de computador, Crystal Ball® (*item 2.6.5.*), a fim de facilitar os cálculos da simulação.

Cada vez que um novo valor das variáveis aleatórias é selecionado uma nova estimativa do resultado final é gerada. No final, o resultado dos cálculos é revelado em um único histograma dos valores gerados, com nova média e desvio padrão.

### **3.7. Análise dos resultados**

Ao final, é feita a análise dos novos valores obtidos com a aplicação modelagem matemática. Com isto, tem-se uma visão das variações ocorridas com o tratamento dos parâmetros utilizados no estudo de ACV, em relação aos valores propostos inicialmente no estudo.

Estes novos resultados, ligados ao tratamento dos indicadores independentes as metas de qualidade de dados, são mais precisos, pois reduzem a incerteza gerada por fatores como a imprecisão e representatividade dos dados utilizados.

Uma vez determinado o grau das incertezas do parâmetro em avaliação, o procedimento chega ao seu final e a análise e discussão dos resultados pode ser realizada. Estes novos valores obtidos com a aplicação do modelo, junto ao novo grau de incerteza dos mesmos, são então incluídos no novo Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Os valores anteriormente utilizados são descartados por serem menos precisos (maior grau de incerteza) que os atuais.

## 4. APLICAÇÃO DO MODELO

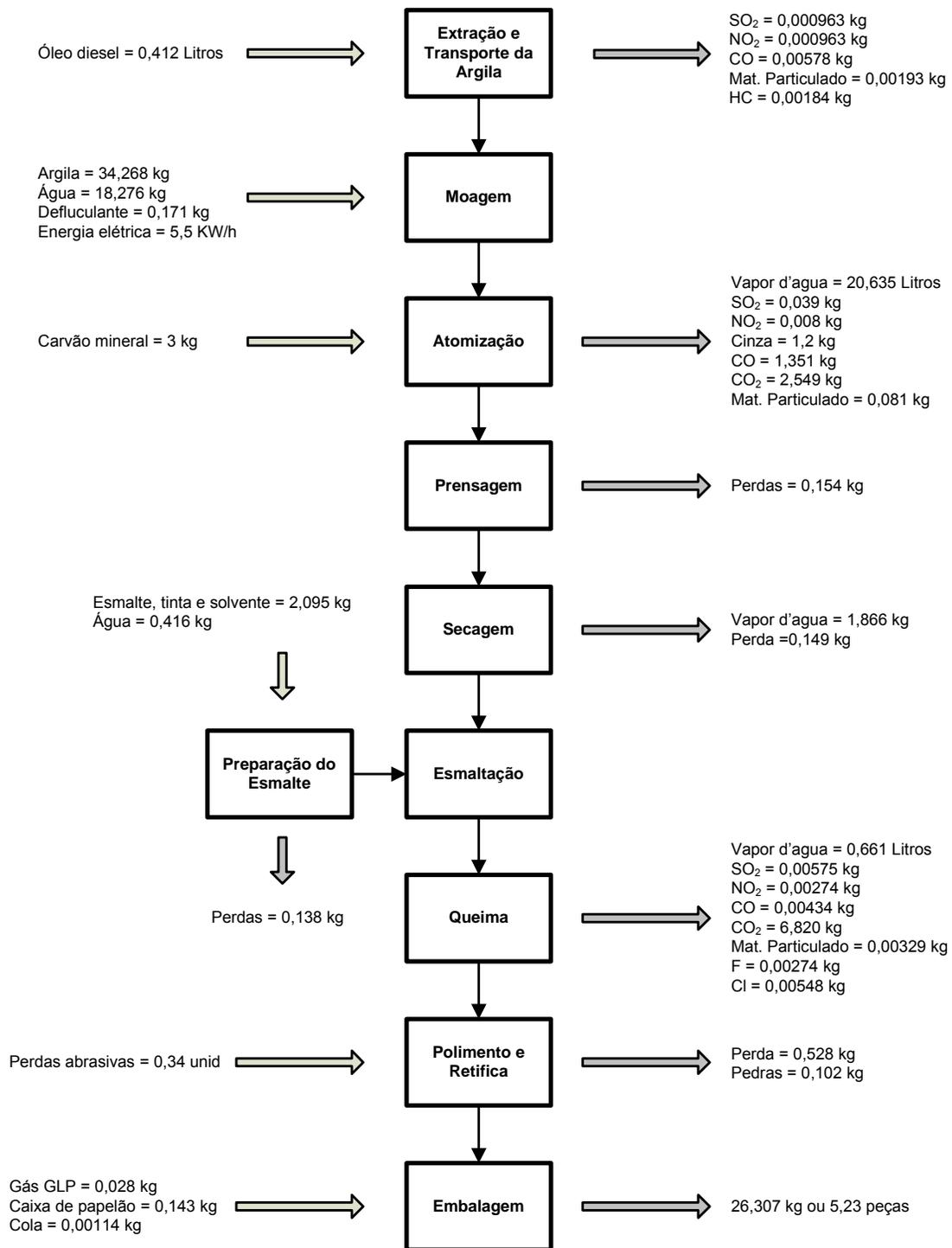
### 4.1. Estudo de Caso

A validação do modelo proposto foi feita através de sua aplicação em um estudo de caso anteriormente publicado. Para isto, será utilizada a análise das incertezas geradas na modelagem do inventário do Ciclo de Vida de pisos cerâmicos, realizado por PEREIRA em 2004.

O estudo identificou as principais unidades de processo na produção de pisos cerâmicos e teve como unidade funcional a produção de 1 m<sup>2</sup> de piso colocado. Os limites do sistema definem onde se encerram as medições de entradas e saídas de materiais e energias que compõem o processo de produção em questão, neste caso o limite abrange a Extração da Matéria Prima, seu Transporte e a Manufatura (produção). Compõem o sistema inventariado as seguintes unidades de processo:

- *Unidade de processo: Extração e Transporte da Argila;*
- *Unidade de Processo: Manufatura (produção)*
  - *Unidade de processo: Moagem;*
  - *Unidade de processo: Atomização;*
  - *Unidade de processo: Prensagem;*
  - *Unidade de processo: Secagem;*
  - *Unidade de processo: Preparação do esmalte;*
  - *Unidade de processo: Esmaltação;*
  - *Unidade de processo: Queima;*
  - *Unidade de processo: Polimento e Retífica;*
  - *Unidade de processo: Embalagem.*

O fluxograma de entradas e saídas para cada unidade de processo do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), para produção de pisos cerâmicos, é descrito a seguir:



**Figura 24** – Fluxograma das entradas e saídas do processo (PEREIRA, 2004).

## 4.2. Aplicação do modelo proposto

### 1ª Etapa – Compilação do inventário do ciclo de vida

Como exposto no fluxograma do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) sob estudo (*item 4.1.*), esta etapa já foi realizada. Utilizando os parâmetros disponíveis no estudo em análise serão abordadas as próximas etapas, a fim de avaliar as incertezas contidas nos parâmetros do estudo.

### 2ª Etapa – Escolha do aspecto ambiental para avaliação

Entre os parâmetros presentes no inventário proposto para estudo das incertezas, será abordado a *Emissão de Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)* com unidade funcional definida por *kg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> de piso colocado*.

### 3ª Etapa – Definição das unidades de processo relacionadas

O aspecto ambiental escolhido na etapa anterior, *emissão de SO<sub>2</sub>*, ocorre nos seguintes unidades de processo produtivo de revestimentos cerâmicos (fluxo elementar):

- *Unidade de processo: Extração e Transporte da argila, com emissão de 0,000963 kg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>;*
- *Unidade de processo: Manufatura (produção)*
  - *Unidade de processo: Atomização, com emissão de 0,039 kg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>;*
  - *Unidade de processo: Queima, com emissão de 0,00575 kg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.*

É importante ressaltar que os valores acima se referem a 1 m<sup>2</sup> de piso colocado (Unidade Funcional).

#### 4ª Etapa – Análise de importância da incerteza

Esta análise de sensibilidade trata da avaliação da contribuição que o aspecto analisado (*emissão de SO<sub>2</sub>*) tem na unidade de processo definida, em relação a sua contribuição acumulada dentro do escopo do estudo. Conforme a *Equação 1*:

$$C_{i,UF,g} = \frac{a_{T,i} \times b_{i,g}}{b_{T,UF,g}} \quad \text{Equação 1}$$

Aplicando-se a *Equação 1* as unidades de processo em avaliação, tem-se:

**Tabela 6:** Unidades de processo avaliadas e suas respectivas contribuições (SO<sub>2</sub>).

<b>Unidade de Processo</b>	<b>Contribuição</b>
<i>Extração e Transporte da Argila</i>	<i>2,1%</i>
<i>Atomização</i>	<i>85,3%</i>
<i>Queima</i>	<i>12,6%</i>

A contribuição das unidades de processo, em relação ao resultado acumulado dos valores do inventário e seu fluxo elementar, são:

- *Unidade de processo: Extração e Transporte da Argila, com 2,1 % de contribuição;*
- *Unidade de processo: Manufatura (produção)*
  - *Unidade de processo: Atomização, com 85,3% de contribuição;*
  - *Unidade de processo: Queima, com 12,6% de contribuição.*

Todas com valores de contribuição maiores que o estipulado como limite, 1% (*item 3.4*). Logo, possuem significativa influência no resultado final do estudo e devem ser avaliadas quanto à qualidade dos dados utilizados no inventário.

## 5ª etapa – Avaliação qualitativa das incertezas

São identificados os seguintes aspectos relativos à qualidade dos dados (*item 2.5.1.*) do estudo realizado por PEREIRA em 2004, para as unidades de processo em avaliação, *Extração e Transporte da Argila, Atomização e Queima (Quadro 5)*:

**Quadro 5:** Aspectos do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) sob estudo (SO<sub>2</sub>).

- Ano em que os dados foram coletados:	<i>2003-2004</i>
- Origem geográfica:	<i>Local (Santa Catarina - Brasil)</i>
- Tecnologia coberta:	<i>Semelhantes para o estudo de comparação</i>
- Fonte dos dados:	<i>Coletados in-loco</i>
- Como foram coletados os dados:	<i>Dados baseados em medidas</i>
- Número de pontos coletados:	<i>Não especificado</i>
- Número de amostras coletadas:	<i>Não especificado</i>
- Período de coleta dos dados:	<i>Não especificado</i>
- Métodos utilizados:	<i>Média Aritmética dos dados; não foram especificadas a distribuição de probabilidade dos dados nem outros métodos utilizados</i>
- Incerteza da informação:	<i>Não especificado (será determinada por este estudo)</i>

Fonte: Baseado em Pereira (2004).

Com base nos indicadores independentes e dependentes às metas de qualidade de dados, contidos na matriz de qualidade de dados (*Quadro 3*), os parâmetros das unidades do processo do aspecto ambiental em análise (*emissão de SO<sub>2</sub>*) apresentam as seguintes notas (*Quadro 6*):

**Quadro 6:** Indicadores de qualidade de dados e respectivas notas de qualidade (SO<sub>2</sub>).

<b>Indicador</b>	<b>Nota</b>	<b>Observação</b>
Confiança na fonte	2	Dados não verificados baseados em medidas

Completeza	5	Representatividade desconhecida
Número de amostras	5	Desconhecido
Correlação temporal	1	< 3 anos em relação ao ano do estudo
Correlação geográfica	1	Dados da área do estudo
Correlação tecnológica	1	Dados de processos em estudo

Cruzando estas notas com a **Tabela 2** (fatores de incerteza) é obtido o fator de incerteza para cada um dos indicadores (**Tabela 7**):

**Tabela 7:** Notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza (SO<sub>2</sub>).

Indicador	Nota	Fator de incerteza
Confiança na fonte	2	1,05
Completeza	5	1,20
Número de amostras	5	1,20
Correlação temporal	1	1,00
Correlação geográfica	1	1,00
Correlação tecnológica	1	1,00

É determinado também o fator básico de incerteza (**Tabela 3**) para o aspecto ambiental em avaliação, neste caso a emissão de SO<sub>2</sub>:

**Tabela 8:** Fator básico de incerteza (SO<sub>2</sub>).

Aspecto Ambiental	Fator básico de incerteza
SO <sub>2</sub>	1,05

Então, o respectivo grau de incerteza (intervalo de 95% - SD<sub>g95</sub>) é calculado pela **Equação 2**:

$$SD_{g95} = \exp^{\sqrt{[\ln(1,05)]^2 + [\ln(1,20)]^2 + [\ln(1,20)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,05)]^2}}$$

$$SD_{g95} = 1,31$$

Este fator de incerteza, 1,31, representa um grau de incerteza de 31%. Ao analisar a incerteza vinculada apenas aos indicadores independentes Completeza e Número de Amostras (indicadores que podem ser tratados pela modelagem estocástica), estes representam um fator de incerteza total de 1,40. Esse fator de incerteza ultrapassa o valor estipulado no *item 3.5.*, que é de 1,05 (valor adotado). Deve-se então seguir para a próxima etapa (Modelagem Estocástica).

### 6ª Etapa – Modelagem Estocástica

O primeiro passo é seleccionar a distribuição de probabilidade dos parâmetros para o aspecto ambiental *Emissão de SO<sub>2</sub>*. Como visto na etapa anterior, o estudo de caso não dispõe do número de amostras realizadas nem o modelo de distribuição dos dados, apenas um valor referente à média aritmética dos mesmos. Assim, serão supostos 3 valores, com base na média definida pelo estudo, a fim de aplicar a geração de números aleatórios (isto foi aplicado apenas para exemplificar o procedimento, caso não se disponha de 3 valores, ou mais, não há como definir corretamente a base estatística dos dados). Utilizando as equações referentes à distribuição normal (Gaussiana),

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \therefore \quad m = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad \therefore \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N x_i \cdot (x_i - \mu)^2}{N - 1}}$$

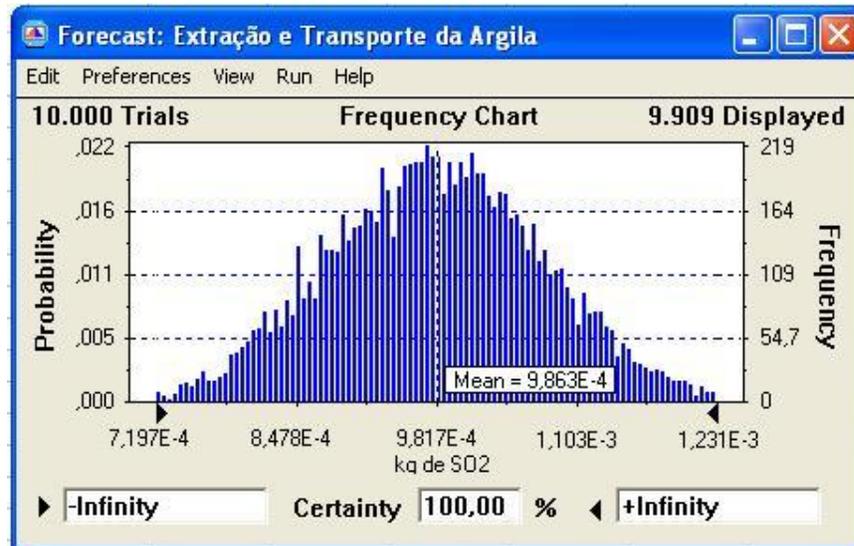
Tem-se:

**Tabela 9:** Valores da média e desvio padrão (SO<sub>2</sub>).

Unidade de processo	Média ( $\mu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma$ )
Extração e Transporte de Argila	0,000963 kg	$9,63 \times 10^{-5}$
Atomização	0,039 kg	$3,9 \times 10^{-3}$
Queima	0,00575 kg	$5,75 \times 10^{-4}$

Como próximo passo foi utilizado a geração de números aleatórios, com base na distribuição de probabilidade dos dados (distribuição normal), sua média e desvio

padrão. Para realizar a simulação matemática, foi utilizado o aplicativo Crystal Ball® (*item 2.6.6.*). Após gerar 10.000 (dez mil) valores aleatórios, um novo resultado para os parâmetros avaliados é apresentado em um histograma conforme as *Figuras 25, 26 e 27.*



**Figura 25** – Resultado da simulação para a unidade de processo Extração e Transp. da Argila ( $\text{SO}_2$ ).

A nova média dos valores, como mostra a figura acima, para a unidade de processo *Extração e Transporte da Argila* é de 0,0009863 kg de  $\text{SO}_2$ , acima da média anteriormente obtida, que era de 0,000963 kg de  $\text{SO}_2$ . O aumento do valor deve-se aos novos dados obtidos com a modelagem estocástica, que aproximaram a curva de tendência do histograma mais para a direita do gráfico (eixo x).

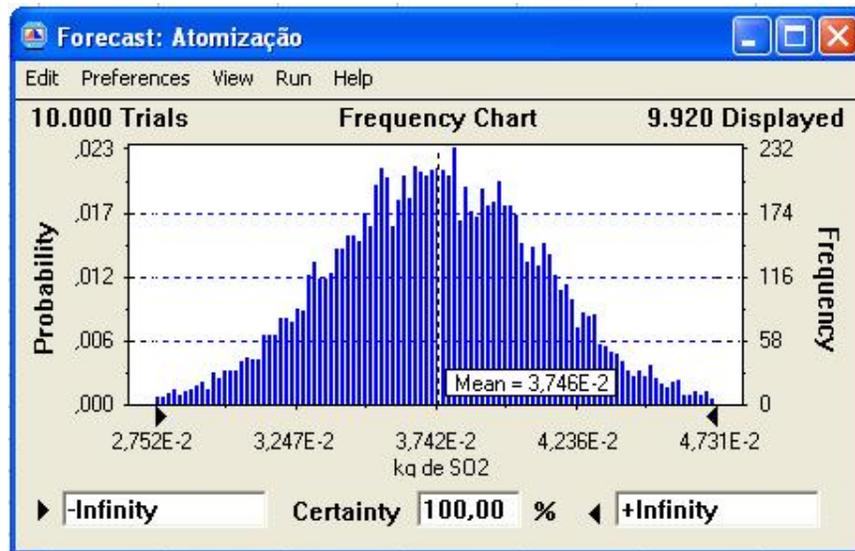


Figura 26 – Resultado da simulação para a unidade de processo Atomização (SO<sub>2</sub>).

A nova média dos valores, como mostra a figura acima, para a unidade de processo *Atomização* é de 0,003746 kg de SO<sub>2</sub>, abaixo da média anteriormente obtida, que era de 0,0039 kg de SO<sub>2</sub>. A diminuição do valor deve-se aos novos dados obtidos com a modelagem estocástica, que aproximaram a curva de tendência do histograma mais para a esquerda do gráfico (eixo x).

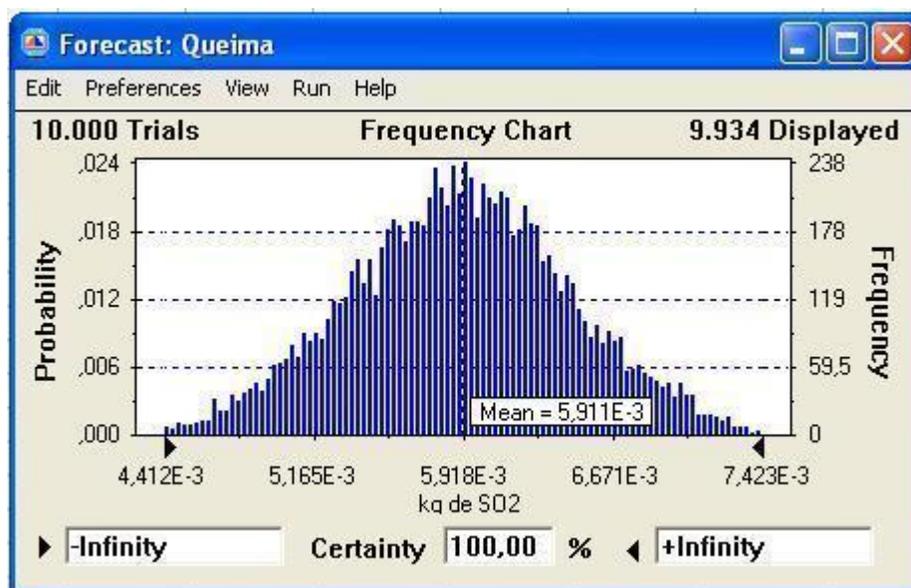


Figura 27 – Resultado da simulação para a unidade de processo Queima (SO<sub>2</sub>).

A nova média dos valores, como mostra a figura acima, para a unidade de processo *Queima* é de 0,005911 kg de SO<sub>2</sub>, acima da média anteriormente obtida, que era de 0,00575 kg de SO<sub>2</sub>. O aumento do valor deve-se aos novos dados obtidos com a modelagem estocástica, que aproximaram a curva de tendência do histograma mais para a direita do gráfico (eixo x).

### 7ª Etapa – Análise dos resultados

É feita a análise dos novos valores obtidos com a aplicação modelagem matemática. Com isto, tem-se uma visão das variações ocorridas com o tratamento dos parâmetros utilizados no estudo de ACV, em relação aos valores propostos inicialmente no estudo.

Com a aplicação do modelo proposto por este estudo, foram obtidos os seguintes novos valores para o aspecto ambiental, *emissão de SO<sub>2</sub>*, do processo produtivo de revestimentos cerâmicos:

- *Unidade de processo: Extração e Transporte da Argila, com emissão de 0,000986 kg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>;*
- *Unidade de processo: Manufatura (produção)*
  - *Unidade de processo: Atomização, com emissão de 0,0375 kg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>;*
  - *Unidade de processo: Queima, com emissão de 0,00591 kg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.*

As novas notas para os indicadores de qualidade de dados e respectivos fatores de incerteza são apresentadas (*Tabela 10*):

**Tabela 10:** Novas notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza (SO<sub>2</sub>).

<b>Indicador</b>	<b>Nova nota</b>	<b>Fator de incerteza</b>
Confiança na fonte	3	1,10
Completeza	1	1,00
Número de amostras	1	1,00
Correlação temporal	1	1,00

Correlação geográfica	1	1,00
Correlação tecnológica	1	1,00

Com o aumento do número de amostras analisadas, através da geração de números aleatórios, houve uma redução da incerteza vinculada aos indicadores Completeza e Número de Amostras para praticamente zero (Nota 1), devido à grande quantidade de novos valores. Porém, houve um aumento na nota do indicador Confiança na Fonte para 3, devido à introdução de dados parcialmente derivados de informações teóricas.

É calculado então, o novo grau de incerteza para os parâmetros avaliados através do modelo proposto (*Equação 2*).

$$SD_{g95} = \exp^{\sqrt{[\ln(1,10)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,05)]^2}}$$

$$SD_{g95} = 1,11$$

Este novo fator de incerteza obtido (1,11) representa um grau de incerteza de 11%. Logo, houve uma redução nas incertezas apresentadas de 31% para 11%. Como resultado final, os novos valores e graus de incerteza das informações dos dados, para o aspecto ambiental *emissão de SO<sub>2</sub>*, são:

- *Unidade de processo: Extração e Transporte da Argila, com emissão de 0,000986 kg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> e grau de incerteza de 11%;*
- *Unidade de processo: Manufatura (produção) - Atomização, com emissão de 0,0375 kg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> e grau de incerteza de 11%;*
- *Unidade de processo: Manufatura (produção) - Queima, com emissão de 0,00591 kg de SO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> e grau de incerteza de 11%.*

Estes novos valores para a emissão de SO<sub>2</sub> nas unidades de processo avaliadas, juntamente com os respectivos graus de incerteza, devem ser inseridos no novo Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Como dito anteriormente, estes dados são mais

precisos que os utilizados inicialmente no estudo, que devem ser descartados. A seguir, será exposta uma nova análise do modelo proposto, utilizando outro aspecto ambiental.

### **1ª Etapa – Compilação do inventário do ciclo de vida**

Não há necessidade de refazer a primeira etapa do modelo, pois o inventário da ACV em estudo foi descrito anteriormente (*item 4.1.*).

### **2ª Etapa – Escolha do aspecto ambiental para avaliação**

Como próximo exemplo de aspecto a ser analisado, dentre os presentes no inventário proposto para estudo das incertezas, será abordado a *Emissão de Monóxido de Carbono (CO)* com unidade funcional definida por *kg de CO/m<sup>2</sup> de piso produzido*.

### **3ª Etapa – Definição das unidades de processo relacionadas**

O aspecto ambiental escolhido na etapa anterior, *emissão de CO*, ocorre nas seguintes unidades de processo produtivo de revestimentos cerâmicos (fluxo elementar):

- *Unidade de processo: Extração e Transporte da Argila, com emissão de 0,00578 kg de CO/m<sup>2</sup>;*
- *Unidade de processo: Manufatura (produção)*
  - *Unidade de processo: Atomização, com emissão de 1,351 kg de CO/m<sup>2</sup>;*
  - *Unidade de processo: Queima, com emissão de 0,00434 kg de CO/m<sup>2</sup>.*

#### 4ª Etapa – Análise de importância da incerteza

Esta análise de sensibilidade trata da avaliação da contribuição que o aspecto analisado (*emissão de CO*) tem na unidade ou subunidade definida, em relação a sua contribuição acumulada dentro do escopo do estudo. Conforme a *Equação 1*:

$$C_{i,UF,g} = \frac{a_{T,i} \times b_{i,g}}{b_{T,UF,g}} \quad \text{Equação 1}$$

Aplicando-se a *Equação 1* as etapas do processo em análise, tem-se:

**Tabela 11:** Unidades de processo avaliadas e suas respectivas contribuições (CO).

Unidade de Processo	Contribuição
<i>Extração e Transporte da Argila</i>	0,42%
<i>Atomização</i>	99,26%
<i>Queima</i>	0,32%

A contribuição das unidades de processo, em relação ao resultado acumulado dos valores do inventário e seu fluxo elementar, são:

- *Unidade de processo: Extração e Transporte da Argila, com 0,42 % de contribuição;*
- *Unidade de processo: Manufatura (produção)*
  - *Unidade de processo: Atomização, com 99,26 % de contribuição;*
  - *Unidade de processo: Queima, com 0,32 % de contribuição.*

Apenas a unidade de processo *Atomização* possui resultado de contribuição maior que o estipulado como limite, 1% (*item 3.4*). Logo, é a única que possui significativa influência no resultado final do estudo e deve ser avaliada quanto à qualidade dos dados utilizados.

As unidades de processo *Extração e Transporte da Argila* e *Queimas* não têm contribuição significativa para o resultado final do estudo (contribuição menor que 1%), logo não há necessidade de se deter a um dado que não tem grande influência no resultado final, o procedimento termina aqui para estas unidades de processo. Os valores iniciais serão mantidos no novo Inventário do Ciclo de Vida (ICV).

### 5ª etapa – Avaliação qualitativa das incertezas

Como visto na etapa anterior, apenas a unidade de processo *Atomização* apresenta significativa contribuição às incertezas do estudo, sendo a única analisada desta etapa em diante (ver *Figura 23*). São identificados os seguintes aspectos relativos à qualidade dos dados (*item 2.5.1.*) utilizados no estudo realizado por PEREIRA em 2004, para a unidade de processo em avaliação (*Quadro 7*):

**Quadro 7:** Aspectos do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) sob estudo (CO).

---

- Ano em que os dados foram coletados:	<i>2003-2004</i>
- Origem geográfica:	<i>Local (Santa Catarina - Brasil)</i>
- Tecnologia coberta:	<i>Semelhantes para o estudo de comparação</i>
- Fonte dos dados:	<i>Coletados in-loco</i>
- Como foram coletados os dados:	<i>Dados baseados em medidas</i>
- Número de pontos coletados:	<i>Não especificado</i>
- Número de amostras coletadas:	<i>Não especificado</i>
- Período de coleta dos dados:	<i>Não especificado</i>
- Métodos utilizados:	<i>Média Aritmética dos dados; não foram especificadas a distribuição de probabilidade dos dados nem outros métodos utilizados</i>
- Incerteza da informação:	<i>Não especificado (será determinada por este estudo)</i>

---

Fonte: Baseado em Pereira (2004).

Com base nos indicadores independentes e dependentes às metas de qualidade de dados, contidos na matriz de qualidade de dados (*Quadro 3*), os parâmetros das unidades do processo do aspecto ambiental em análise (*emissão de CO*) apresentam as seguintes notas (*Quadro 8*):

**Quadro 8:** Indicadores de qualidade de dados e respectivas notas de qualidade (CO).

Indicador	Nota	Observação
Confiança na fonte	2	Dados não verificados baseados em medidas
Completeza	5	Representatividade desconhecida
Número de amostras	5	Desconhecido
Correlação temporal	1	< 3 anos em relação ao ano do estudo
Correlação geográfica	1	Dados da área do estudo
Correlação tecnológica	1	Dados de processos em estudo

Cruzando estas notas com a *Tabela 2* (fatores de incerteza) é obtido o fator de incerteza para cada um dos indicadores (*Tabela 12*):

**Tabela 12:** Notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza (CO).

Indicador	Nota	Fator de incerteza
Confiança na fonte	2	1,05
Completeza	5	1,20
Número de amostras	5	1,20
Correlação temporal	1	1,00
Correlação geográfica	1	1,00
Correlação tecnológica	1	1,00

É determinado também o fator básico de incerteza (*Tabela 3*) para o aspecto ambiental em avaliação, neste caso o a emissão de SO<sub>2</sub>:

**Tabela 13:** Fator básico de incerteza (CO).

Aspecto Ambiental	Fator básico de incerteza
CO	5,00

Então, o respectivo grau de incerteza (intervalo de 95% -  $SD_{g95}$ ) é calculado pela **Equação 2**:

$$SD_{g95} = \exp^{\sqrt{[\ln(1,05)]^2 + [\ln(1,20)]^2 + [\ln(1,20)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(5,00)]^2}}$$

$$SD_{g95} = 5,11$$

Este fator de incerteza, 5,11, representa um grau de incerteza de 511%. Ao analisar a incerteza vinculada apenas aos indicadores independentes Completeza e Número de Amostras (indicadores que podem ser tratados pela modelagem estocástica), estes representam um fator de incerteza de 1,40. Esse fator de incerteza ultrapassa o valor estipulado no **item 3.5.**, que é de 1,05 (valor adotado). Deve-se então seguir para a próxima etapa (Modelagem Estocástica).

## 6ª Etapa – Modelagem Estocástica

O primeiro passo é selecionar a distribuição de probabilidade dos parâmetros para o aspecto ambiental **Emissão de CO**. Como visto na etapa anterior, o estudo de caso não dispõe do número de amostras realizadas nem o modelo de distribuição dos dados, apenas um valor referente à média aritmética dos mesmos. Assim, serão supostos 3 valores, com base na média definida pelo estudo, a fim de aplicar a geração de números aleatórios (isto foi aplicado apenas para exemplificar o procedimento, caso não se disponha de 3 valores, ou mais, não há como definir corretamente a base estatística dos dados). Utilizando as equações referentes à distribuição lognormal,

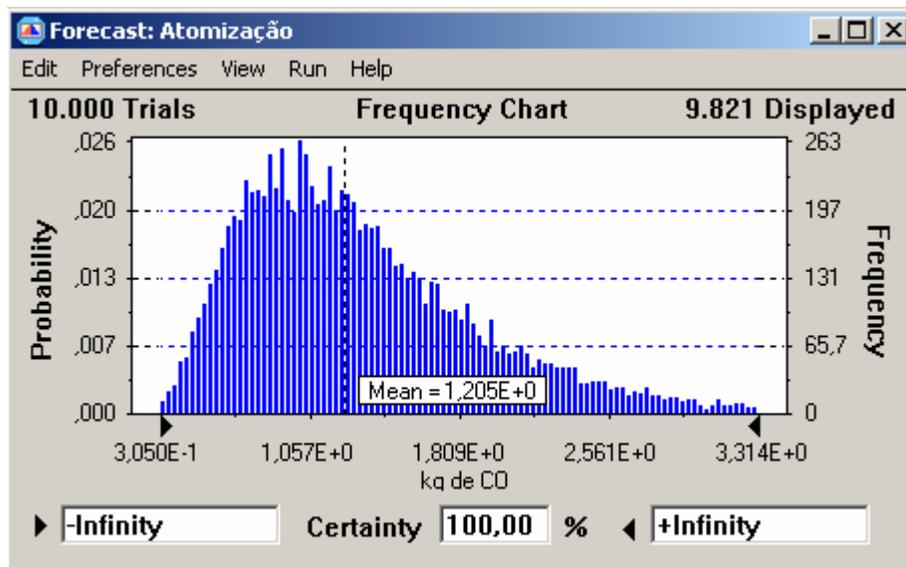
$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma x} \cdot e^{-\frac{(\ln(x)-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \therefore \quad m = e^{\left(\mu + \frac{\sigma^2}{2}\right)} \quad \therefore \quad s = \sqrt{e^{(\sigma^2)} \cdot (e^{(\sigma^2)} - 1)} \cdot e^{(2\mu)}$$

Tem-se:

**Tabela 14:** Valores da média e desvio padrão (CO).

Unidade de processo	Média ( $\mu$ )	Desvio Padrão ( $\sigma$ )
Atomização	1,351 kg	$6,755 \times 10^{-1}$

Como próximo passo, fora utilizada a geração de números aleatórios com base na distribuição de probabilidade dos dados (distribuição lognormal), sua média e desvio padrão. Para realizar simulação, foi utilizado o software Crystal Ball® (*item 2.6.1.*). Após gerar 10.000 (dez mil) valores aleatórios um novo resultado, para os dados de entrada, é apresentado em um histograma conforme a **Figura 28**.

**Figura 28** – Resultado da simulação para a unidade de processo Atomização (CO).

A nova média dos dados, como mostra a figura acima, para a unidade de processo **Atomização** é de 1,205 kg de CO, abaixo da média anteriormente obtida, que era de 1,351 kg de CO. A diminuição do valor deve-se aos novos valores obtidos com a modelagem estocástica dos dados, que aproximaram a curva de tendência do histograma mais para a esquerda do gráfico (eixo x).

## 7ª Etapa – Análise dos resultados

É feita a análise dos novos valores obtidos com a aplicação modelagem matemática. Com isto, tem-se uma visão das variações ocorridas com o tratamento dos parâmetros utilizados no estudo de ACV, em relação aos valores propostos inicialmente no estudo.

Foram obtidos os seguintes novos valores para o aspecto ambiental, *emissão de CO*, do processo produtivo de revestimentos cerâmicos:

- *Unidade de processo: Manufatura (produção)*
  - *Unidade de processo: Atomização, com emissão de 1,205 kg de CO/m<sup>2</sup>;*

Os novos valores para os indicadores de qualidade de dados e respectivos fatores de incerteza, em relação ao valor utilizado inicialmente no estudo de caso, são apresentados (*Tabela 15*):

**Tabela 15:** Novas notas de qualidade de dados e respectivos graus de incerteza (CO).

<b>Indicador</b>	<b>Nova nota</b>	<b>Fator de incerteza</b>
Confiança na fonte	3	1,10
Completeza	1	1,00
Número de amostras	1	1,00
Correlação temporal	1	1,00
Correlação geográfica	1	1,00
Correlação tecnológica	1	1,00

Com o aumento do número de amostras analisadas, através da geração de números aleatórios, houve uma redução da incerteza vinculada aos indicadores Completeza e Número de Amostras para praticamente zero (Nota 1), devido à grande quantidade de novos valores. Porém, ouve um aumento na nota do indicador Confiança na Fonte para 3, devido à introdução de dados parcialmente derivados de informações teóricas.

É calculado então, o novo grau de incerteza para os parâmetros avaliados através do modelo proposto.

$$SD_{g95} = \exp^{\sqrt{[\ln(1,10)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(1,00)]^2 + [\ln(5,00)]^2}}$$

$$SD_{g95} = 5,01$$

Este novo fator de incerteza obtido, 5,01, representa um grau de incerteza de 501%. Logo, ouve uma redução nas incertezas apresentadas de 511% para 501%. Como resultado final, os novos valores e graus de incerteza das informações dos dados, para o aspecto ambiental *emissão de CO*, são:

- *Unidade de processo: **Extração e Transporte da Argila**, com emissão de 0,00578 kg de CO/m<sup>2</sup> e grau de incerteza insignificante. Mesmo valor do estudo inicial, visto sua insignificância em relação à emissão total (como visto na etapa 4);*
- *Unidade de processo: Manufatura (produção) - **Atomização**, com emissão de 1,205 kg de CO/m<sup>2</sup> e grau de incerteza de 501%;*
- *Unidade de processo: Manufatura (produção) – **Queima**, com emissão de 0,00434 kg de CO/m<sup>2</sup> e grau de incerteza insignificante. Mesmo valor do estudo inicial, visto sua insignificância em relação à emissão total (como visto na etapa 4).*

Este novo valor para a emissão de CO na unidade de processo avaliada, juntamente com seu respectivo grau de incerteza, deve ser inserido no novo Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Como dito anteriormente, este novo dado é mais preciso que o utilizado inicialmente no estudo, que deve ser descartado. Os valores que se mantiveram inalterados permanecem constantes.

Para a completa análise do estudo, deve-se realizar o mesmo procedimento visto neste capítulo, em todos os aspectos ambientais presentes na ACV. Isto não será realizado neste estudo, pois se trata apenas de repetição dos passos e tiraria o foco do principal objetivo deste estudo, que é justificar a aplicação do modelo proposto para avaliar incertezas geradas em um Inventário de Ciclo de Vida (ICV). Com a avaliação de todas

as entradas e saídas do inventário sob estudo tem-se um novo Inventário do Ciclo de Vida (ICV), que é mais preciso devido à redução das incertezas identificadas.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este estudo descreveu ao longo do Capítulo 2, e através da aplicação do método proposto no Capítulo 3, que diversas incertezas podem ocorrer durante o levantamento do inventário de uma Avaliação de Ciclo de Vida (ACV). Estas incertezas, associadas à avaliação ambiental de um produto, estão relacionadas a aspectos qualitativos e quantitativos, que por sua vez, se relacionam às metas de qualidade de dados propostas durante a definição da fase de Objetivo e Escopo da ACV.

Propôs também, através da conjunção de alguns procedimentos isolados existentes, um método para identificar e avaliar algumas incertezas geradas durante o levantamento do inventário do ciclo de vida. Estudos voltados à gestão de incertezas em ACV's realizados até então, apenas se propuseram a abordar partes isoladas de identificação e/ou avaliação das incertezas geradas. Não foram abordados métodos utilizados para realização de uma ACV, e sim, quais fatores são importantes para que esta avaliação tenha, no seu fim, a credibilidade necessária para que seus resultados possam servir de referência em outros estudos.

Ao realizar uma ACV deve-se garantir que a coleta de dados seja precisa, tendo como base as metas de qualidade dos mesmos e catalogando todos os aspectos relevantes a confiança na fonte, representatividade dos dados e número de amostras coletadas, não deixando de fora também a outros fatores importantes como a correlação temporal, geográfica e tecnológica. Esta coleta estratégica de dados, baseada no entendimento das causas das incertezas que podem ocorrer no processo, que inclui a Avaliação do Ciclo de Vida, e a revisão por um perito, é um fator essencial para reduzir possíveis erros e incertezas nos dados da ACV, possibilitando a melhoria em relação à qualidade dos parâmetros utilizados no estudo.

Lidar com as incertezas deveria ser parte de qualquer estudo de ACV, atualmente isto não acontece. Assim, poderia fornecer informações mais confiáveis e transparentes àqueles que buscam comparar diferentes produtos, do ponto de vista ambiental.

Em relação ao modelo de avaliação proposto por este estudo, o mesmo demonstrou, através de sua aplicação prática, ser eficiente na avaliação das incertezas que surgem ao longo do Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Porém, deve contar com informações detalhadas de todos os parâmetros utilizados no ICV, para que demonstre corretamente o grau de incerteza deste tipo de estudo.

No estudo de caso analisado, o autor não catalogou alguns aspectos referentes à qualidade dos dados utilizados na ACV. Isto pode distorcer o ICV e conseqüentemente a análise dos impactos potenciais gerados, que é baseada nos resultados do inventário. Mesmo com a aplicação da modelagem estocástica, ainda restaram algumas incertezas de grande influência.

A utilização da análise de sensibilidade, através da análise de importância da incerteza, demonstrou pontos críticos no inventário da ACV em relação às entradas e saídas, que possuem pouca ou grande influência no seu resultado final, demonstrando como o perfil ambiental de um produto pode variar com as incertezas do sistema. Assim, podem ser abordadas as etapas do processo mais relevantes, com relação aos aspectos ambientais e conseqüentemente os impactos potenciais do ciclo de vida do produto em estudo. São também identificados pontos de alta sensibilidade nos resultados finais do estudo, onde se deve focar a redução das incertezas que possam surgir.

Recomenda-se para um próximo estudo, simular a variação dos impactos potenciais do sistema em um estudo de caso com inventário mais detalhado, considerando os valores obtidos através a aplicação do método. Assim, seria possível obter a influência do procedimento proposto nos resultados das categorias de impacto avaliadas.

Por fim, o método proposto apenas abordou a avaliação do Inventário do Ciclo de Vida (ICV). Procedimentos para identificar e avaliar outras fases da ACV devem ser desenvolvidos a fim de aumentar, ainda mais, a credibilidade do estudo.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ALTHAUS H., DOKA G., DONES R., HECK T., HELLWEG S., HISCHIER R., NEMECEK T., REBITZER G., SPIELMANN M. **Ecoinvent Report N° 1: Overview and Methodology**. Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, 2004.

ANDERS, S. G., MÖLLER A. P., ANDERSON, J. and LIU, J. Uncertainty Estimation by Monte Carlo Simulation Applied to Life Cycle Inventory of Cordless Phones and Microscale Metallization Processes. **IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing** 27 (4): 233. 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14040: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Princípios e estrutura**. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14041: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Definição de objetivo e escopo e análise de inventário**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14042: Gestão Ambiental – Avaliação do Ciclo de Vida – Avaliação do impacto do ciclo de vida**. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14043: Gestão Ambiental: Avaliação do Ciclo de Vida – Interpretação do ciclo de vida**. Rio de Janeiro, 2005.

BAGE G. and SANSOM R. Fiabilité et validité des données comme caractéristiques permettant de définir l'incertitude des données utilisées en ACV. **Centre Interuniversitaire de Référence sur l'Analyse, l'Interprétation et la Gestion du cycle de vie des produits, procédés et services – CIRAIG**. Canada. 2004.

BASSON, L. and PETRIE, J. G. **An Integrated Approach for the Management of Uncertainty in Decision Making Supported by LCA-Based Environmental Performance Information**. CiteSeer.IST. 2004.

BELDERRAIN M. C. N. E DA SILVA R. M. Considerações sobre Análise de Sensibilidade em Análise de Decisão. **In: XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2004, São João del Rei. Anais, 2004. v. 1.

BIPM. **Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM) - Supplement 1: Numerical methods for the propagation of distributions - Temporary ISO Guide 9998**. BIPM/JCGM-WG1-SC1-N10. 2004.

BJÖRKLUND A. E. Survey of Approaches to Improve Reliability in LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment** 7 (2): 64-72. 2002.

COSTA L. G. T. A. e AZEVEDO, M. C. L. **Análise Fundamentalista**. Rio de Janeiro: FGV/EPGE. 1996.

EHLERS, R. S. **Métodos Computacionalmente Intensivos em Estatística**. Departamento de Estatística, Universidade Federal do Paraná. 2004.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Guidelines for Assessing the Quality of Life Cycle Inventory Analysis**. EPA/530/R-95/010. Office of Solid Waste. Washington, DC. USA. 1995.

FINNVEDEN G. and LINDFORS L. G. Data Quality of Life Cycle Inventory Data – Rules of Thumb. **International Journal of Life Cycle Assessment** 3 (2): 65-66. 1998.

FRYSINGER, S. P. **Information Systems for Proactive Environmental Management**. Universidad Madison James, Harrisonburg, Virginia, USA. 2002.

HAMSEN, O. J. and ASBJSRNSEN, O. A. Statistical Properties of Emission Data in Life Cycle Assessments. **Journal of Cleaner Production** 4 (34): 149-157. 1996.

HEIJUNGS, R. Identification of Key Issues for Further Investigation in Improving the Reliability of Life-Cycle Assessments. **Journal of Cleaner Production** 4 (3-4): 159-166. 1996.

HEIJUNGS R. and HUIJBREGTS M. A. J. **A Review of Approaches to Treat Uncertainty in LCA**. Proceedings of the IEMSS conference, Osnabruck, 2004.

HEIJUNGS R. and FRISCHKNECHT R. Representing Statistical Distribution for Uncertain Parameters in LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment** 10 (4): 248-254. 2005.

HUIJBREGTS, M. A. J. Application of Uncertainty and Variability in LCA- Part I: A General Framework for the Analysis of Uncertainty and Variability in Life Cycle Assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment** 3 (5): 273-280. 1998a.

HUIJBREGTS, M. A. J. Application of Uncertainty and Variability in LCA - Part II: Dealing with Parameter Uncertainty and Uncertainty due to Choices in Life Cycle Assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment** 3 (6): 35-42. 1998b.

HUIJBREGTS M. A. J., NORRIS G., BRETZ R., CIROTH A., MAURICE B., VON BAHN B., WEIDEMA B. and DE BEAUFORT A. S. H. Framework for Modeling Data Uncertainty in Life Cycle Inventories. **International Journal of Life Cycle Assessment** 6 (3): 127-132. 2001.

HUIJBREGTS M. A. J., GILJANSE W., RAGAS A. M. J. and REIJNDERS L. Evaluating Uncertainty in Environmental Life-Cycle Assessment. A Case Study Comparing Two Insulation Options for a Dutch ne-Family Dwelling. **Environmental Science & Technology** 37: 2600-2608. 2003.

HUIJBREGTS M. A. J. Uncertainty and Variability in Environmental Life-Cycle Assessment. **International Journal of Life Cycle Assessment** 7 (3): 173. 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO TR 14047**: Environmental Management – Life Cycle Impact Assessment – Examples of application of ISO 14042. 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO TS 14048**: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Data documentation format. 2002.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO TR 14049**: Environmental Management – Life Cycle Assessment – Examples of application of ISO 14041 to goal and scope definition and inventory analysis. 2000.

MOSCATI G., MEZZALIRA L. G. e dos SANTOS F. D. **Incerteza de medição pelo Método de Monte Carlo, no Contexto do “Suplemento 1” do GUM**. ENQUALAB - Encontro para a Qualidade de Laboratórios. São Paulo, Brasil. 2004.

NETO, B. B., SCARMINIO, I. S., BRUNS R. E. **Planejamento e Otimização de Experimentos**. Campinas, São Paulo, 299 p. 1996.

NOTTEN P. and PETRIE J. G. An Integrated Approach to Uncertainty Assessment in LCA. **International Workshop on LCI-Quality**. 2003.

KULAY L. A. and PLA Y. Uncertainty Assessment by Monte Carlo Simulation. **Integrated Life Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes**. CRC Press LLC. 2004.

MAGALHÃES, M. N. e LIMA, A. C. P. **Noções de Probabilidade e Estatística**. 4a edição, Editora EDUSP, 2002.

PEREIRA S. W. **Análise Ambiental do Processo Produtivo de Pisos Cerâmicos.** Aplicação de Avaliação de Ciclo de Vida. 2004. 123 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.

PETERSEN E. B. Life Cycle Assessment of Building Components – Handling Uncertainty in LCAs. **In: Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference Buildings and the Environment**, June, 1997, Paris, France.

POHL C., ROS M., WALDECK B. and DINKEL F. **Imprecision and Uncertainty in LCA.** In: S. Schaltegger (Ed.). Life Cycle Assessment (LCA). Quo vadis? Birkhäuser Verlag, Basel, 1996.

ROSS S., EVANS D. and WEBBER M. How LCA Studies Deal with Uncertainty. **International Journal of Life Cycle Assessment** 7 (1): 47-52. 2002.

SAKAI S. and YOKOYAMA K. Formulation of Sensitivity Analysis in Life Cycle Assessment Using a Perturbation Method. **Clean Techn Environ Policy** 4: 72-78. 2002.

SALIBY E. e ARAÚJO M. M. S. **Cálculo do Valor em Risco através de Simulação Monte Carlo: uma Avaliação de Uso de Métodos Amostrais mais Eficientes em Portfólios com Opções.** In: XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2001, Campos do Jordão. Anais do XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (CD Rom). Rio de Janeiro: SOBRAPO, 2001.

SCHWIRTZ V. C., FRISCHKNECHT R., HUNGERBÜHLER K. and MAURICE B. Uncertainty Analysis in Life Cycle Inventory. Application to the Production of Electricity with French Coal Power Plants. **Journal of Cleaner Production** 8: 95-108. 2000.

SONNEMANN G. W., SCHUHMACHER M. and CASTELLS F. Uncertainty Assessment By a Monte Carlo Simulation in a Life Inventory of Electricity Produced by a Waste Incinerator. **Journal of Cleaner Production** 11: 279–292. 2003.

STEEN B. On Uncertainty and Sensitivity of LCA-based priority setting. **Journal of Cleaner Production** 5 (4): 255-262. 1997.

SU, S. H., LITTLE, R. M. and GUDKA, N. J. Characterization of Uncertainty. **Risk Assessment and Indoor Air Quality**. CRC Press, Inc.1999.

VON BAHR B. and STEEN B. Reducing Epistemological Uncertainty in Life Cycle Inventory. **Journal of Cleaner Production** 12: 369-388. 2004.

VOSE D. Monte Carlo Risk Analysis Modeling. **Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management**. CRC Press, Inc. 1997.

WEIDEMA B. P. and WESNAES M. S. Data Quality Management for Life Cycle Inventories - An Example of Using Data Quality Indicators. **Journal of Cleaner Production** 4(3-4): 167-174. 1996.

WEIDEMA B. P. Multi-user Test of the Data Quality Matrix for Product Life Cycle Inventory Data. **International Journal of Life Cycle Assessment** 3 (5): 259-265. 1998.

WEIDEMA B. P. Increasing Credibility of LCA. **International Journal of Life Cycle Assessment** 5 (2): 63-64. 2000.

WEIDEMA, B. P., FRESS, N., PETERSEN, E. H., IGAARD, H. Reducing Uncertainty in LCI - Developing a Data Collection Strategy. Environmental Project No. 862. **Danish Environmental Protection Agency**, Danish Ministry of the Environment, Ramboll, Denmark, 71 p. 2003.