

**Aspectos do Processo de Desenvolvimento de Satélites
Artificiais**

Petrônio Noronha de Souza

**Coordenação Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial – ETE
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
São José dos Campos, SP
Novembro de 2002**

2.9.1 – Garantia do Produto

2.9.1 – Garantia do Produto: Conceitos básicos (*)

- A **Garantia do Produto** (ou Garantia da Qualidade) cuida de assegurar que a manufatura e os testes de um satélite foram realizados em concordância com a documentação de engenharia. Também pode ser definida como o conjunto de atividades implementadas no sistema da qualidade para verificar a conformidade entre as características do produto e os requisitos estabelecidos pelo cliente.
- Um aspecto chave do processo é a realização de inspeções ao longo da produção como forma de evitar que uma discrepância passe desavisada e só venha a ser detectada durante os testes finais (“Mandatory Inspection Point” – MIP).
- É essencial garantir que os fornecedores também tenham sistemas da qualidade implantados e que eles sejam submetidos a auditorias periódicas.
- O acompanhamento “in-loco” dos testes também é atividade essencial, bem como atestar que os equipamentos de teste estão adequadamente preparados e calibrados. Os responsáveis devem manter registros dos testes realizados e de todas as falhas detectadas. Com isso é possível colaborar para o aperfeiçoamento dos projetos e melhorar a seleção das partes a serem adquiridas.
- As áreas de atuação da Garantia do Produto são:
 - Gerenciamento do Programa da Qualidade, das instalações e das normas adotadas.
 - Supervisão da aquisição de partes e materiais.
 - Supervisão das atividades de manufatura, integração e testes.

2.9.1 – Garantia do Produto: Definições

- **Qualidade**

- É a característica de satisfazer aos requisitos do produto.

- **Política da Qualidade**

- Intenções e diretrizes globais de uma organização relativas à qualidade e formalmente expressas pela alta administração. Exemplos:
 - Satisfazer aos clientes a custos competitivos, com a remuneração adequada dos recursos envolvidos.
 - Considerar os clientes e fornecedores como parceiros nos negócios.
 - Manter os profissionais tecnologicamente atualizados, conscientes de seu papel na empresa, motivados e adequadamente remunerados.

- **Manual da Qualidade**

- Documento que declara a política da qualidade e descreve o sistema da qualidade de uma organização.

- **Gestão da Qualidade**

- Todas as atividades da função gerencial que determinam a política da qualidade, os objetivos e as responsabilidades e respectivas implementações.

- **Sistema da Qualidade**

- Estrutura organizacional, procedimentos, processos e recursos necessários para implementar a gestão da qualidade.

- **Aspectos da contratação de um projeto de engenharia de interesse da qualidade**

- Especificações do desempenho funcional.
- Especificações do ambiente de operação.
- Regras para o desenvolvimento do trabalho.
- Cronograma para a entrega.
- Documentação a ser gerada.

- **Como atestar que um produto tem qualidade?**

- Quando as características do produto atendem aos requisitos estabelecidos pelo cliente.

2.9.1 – Garantia do Produto: Atividades em um Projeto/Programa

- **Atividades preliminares (antes do contrato):**
 - Definição dos requisitos para o sistema da qualidade do fornecedor.
 - Participação na preparação da Descrição dos Trabalhos.
 - Definição dos requisitos para aquisição e uso de componentes, partes e materiais.
 - Definição dos requisitos de confiabilidade.
 - Definição dos requisitos de configuração.
 - Participação na elaboração das seguintes especificações:
 - Plano de desenvolvimento e testes.
 - Requisitos de projeto e fabricação.
 - Requisitos dos testes ambientais.
- **Atividades na fase de licitação:**
 - Auditoria dos fornecedores.
 - Julgamento do sistema da qualidade dos fornecedores.
- **Fase de Desenvolvimento do Projeto/Programa**
 - Aprovação do plano de Garantia do Produto.
 - Aprovação do plano de Controle da Configuração.
 - Revisão do contrato.
 - Revisões de Projeto (Preliminar/PDR e Crítica/CDR).
 - Aprovação da configuração de referência (“baseline”).
 - Previsões de confiabilidade.
 - FMEA/FMECA (Métodos de determinação e análise dos modos de falha e suas conseqüências).
 - Segurança (“Safety”).
 - Identificação e controle dos itens críticos.

2.9.1 – Garantia do Produto: Atividades em um Projeto/Programa (cont.)

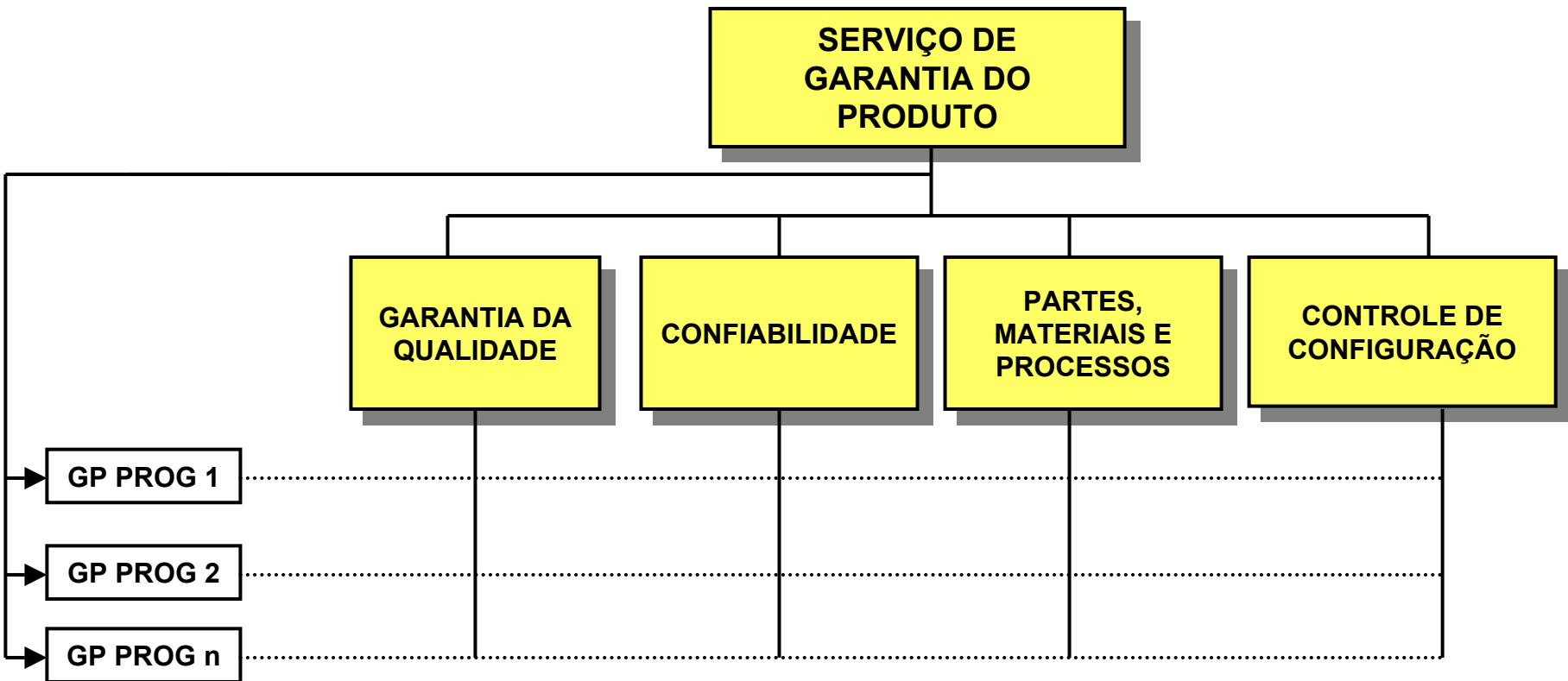
● Fase de Fabricação

- Inspeção de recebimento de componentes/materiais.
- Aprovação da documentação de fabricação.
- Supervisão da fabricação.
- Inspeção “in-process”.
- Não-conformidades:
 - Abertura.
 - Procedimentos administrativos iniciais.
 - Disposições.
 - Convocação de MRB (“Material Review Board”).
 - Concessão de waiver/desvio.
 - Implementação de ações.
 - Procedimentos administrativos para fechamento.
- Supervisão do ambiente industrial.
- Auditorias da qualidade.
- Supervisão do treinamento e da recertificação de pessoal.
- Verificação dos registros da qualidade.
- Rastreabilidade.
- Inspeção do sistema de estocagem de componentes e materiais.

● Fase de AIT (Montagem, Integração e Testes)

- Acompanhamento das atividades de montagem, integração e testes.
- Revisão de aceitação.
- Tratamento de não-conformidades.
- Bancas revisoras de teste – TRRB/TRB (“Test Readiness Review Board/Test Review Board”).
- Revisão Crítica do Projeto.
- Aprovação da EIDP (“End Item Data Package”).
- Julgamento de “Waivers”/Desvios.

2.9.1 – Garantia do Produto: Exemplo de estrutura organizacional – ETE/INPE



2.9.1 – Garantia do Produto: Elementos do Plano da Qualidade (ISO 9001)

1. Quality program management and planning (roles, responsibilities, authority and reporting).
2. Design and development controls.
3. Purchasing/procurement controls.
4. Quality requirements for subcontractors & suppliers.
5. Approval, surveillance and auditing of subcontractors.
6. Source evaluation.
7. Residency at major subcontractors.
8. Receiving inspection.
9. Inspection.
10. Planning.
11. Process controls (procedures and Assembly Inspection Data Sheets [AIDS]).
12. Workmanship standards.
13. Test surveillance: environmental and final acceptance.
14. Post test hardware inspection.
15. Control of non-conforming material.
16. Records and reporting.
17. Hardware reviews.
18. Spacecraft operations.
19. Handling, storage, packaging, preservation, and delivery/shipping controls.
20. Quality Assurance (QA) verification of Safety requirements.
21. QA verification of Configuration Management controls.
22. Control of inspection, measuring and test equipment / metrology controls.
23. Training and certification.

2.9.2 – Gestão da Configuração

2.9.2 – Gestão da Configuração: Definições (*)

- **Configuração**

- É o conjunto de características físicas e/ou funcionais de um hardware ou software descritas pelos documentos técnicos.

- **Identificação da Configuração**

- É o conjunto de documentos selecionados para compor a configuração de referência do produto.
- Todos os designadores usados para identificar documentos e o produto.
- Todas as mudanças aprovadas na configuração de referência.

- **Configuração de Referência (“Baseline”)**

- São os documentos que compõem a primeira identificação da configuração e que são formalmente designados pelo cliente em um dado instante do ciclo de vida do produto.

- **Gestão da Configuração**

- São procedimentos técnicos e administrativos para:
 - Realizar a identificação da configuração de referência do produto.
 - Fazer auditorias no produto para verificar conformidade com sua configuração ou com os requisitos contratuais.
 - Controlar a configuração.
 - Gerenciar o status da configuração.

- **Controle da Configuração**

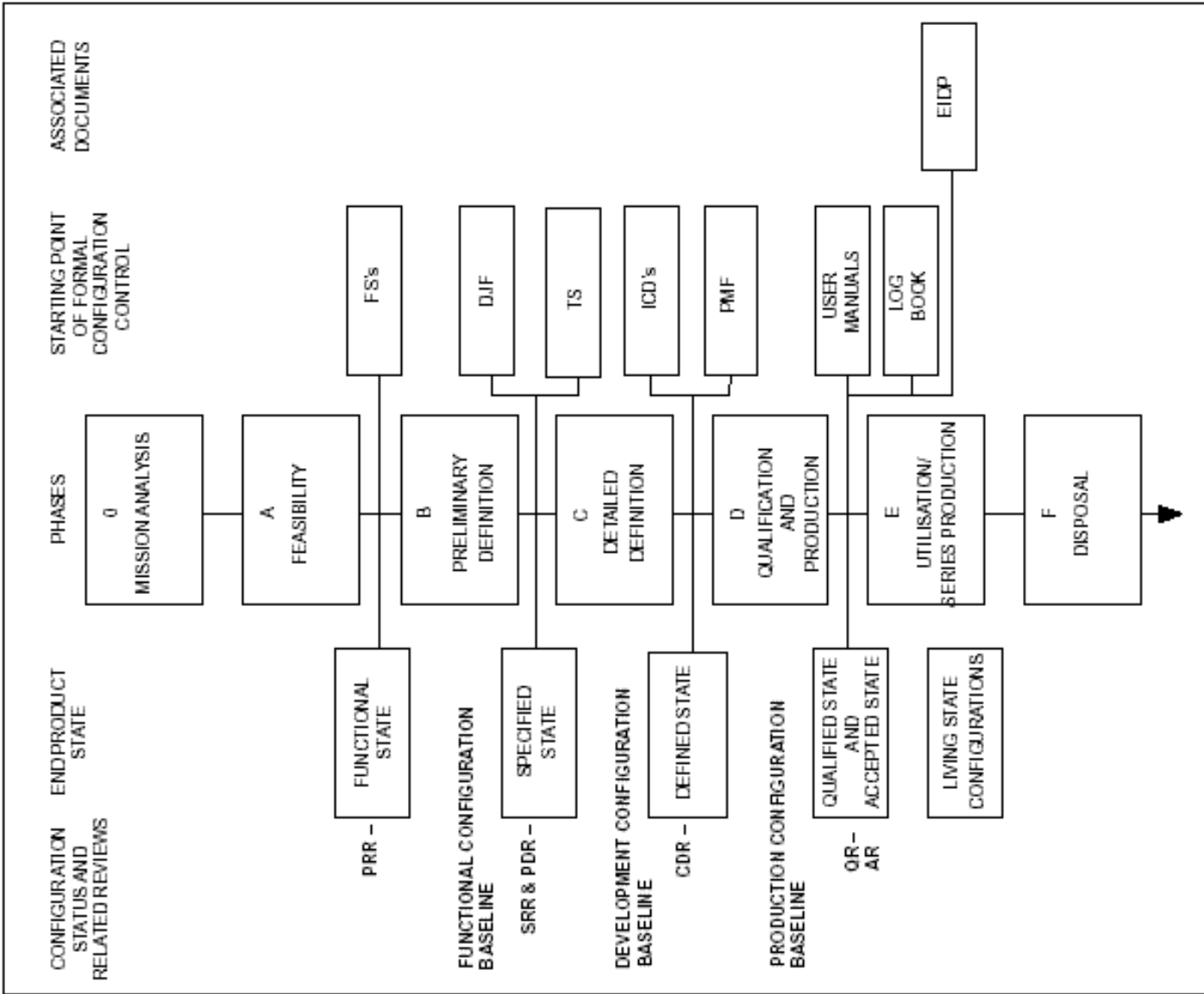
- É a sistemática que coordena e avalia as mudanças propostas para a configuração e faz as respectivas atualizações, quando aprovadas.

- **Gerenciamento do “status” da Configuração**

- É o processo de registrar e relatar as informações necessárias para a efetiva gestão da configuração. Exemplos:
 - Lista do status da identificação da configuração – CIDL (“Configuration Item Data List”).
 - Lista de status dos pedidos de modificação, desvios e “waivers” propostos para a configuração.
 - Status de implementação na configuração das modificações aprovadas.

- **Um Plano de Configuração para o Projeto/Programa é elaborado e imposto ao INPE e às empresas contratadas. Este plano estabelece as regras a serem seguidas por todos os participantes e é normalmente elaborado por consenso entre as partes. Nele são estabelecidas sistemáticas para:**
 - Codificar documentos.
 - Elaborar árvore do produto.
 - Gerar “Part Numbers” para identificar o hardware.
 - Identificar a configuração (na Revisão Preliminar do Projeto).
 - Atualizar a configuração.
 - Preparar a CIDL.
 - Preparar as pastas para fabricação do hardware.

2.9.2 – Gestão da Configuração: Fluxo de atividades, [13]



NOTE

- AR=Acceptance Review
- DJF=Design Justification File
- FS=Functional Specification
- ICD=Interface Control Document
- PDR=Preliminary Requirements Review
- PMF=Production Master File
- PRR=Preliminary Requirements Review
- QR=Qualification Review
- SRR=System Requirement Review
- TS=Technical Specification
- CDR=Critical Design Review
- EIDP=End Item Data Pack

2.9.3 – Confiabilidade

- **Confiabilidade:** É a *probabilidade* de um produto *funcionar de acordo com as especificações*, sob *condições estabelecidas* e por um determinado intervalo de *tempo*.
 - “**Probabilidade**”: É a função que mede a possibilidade do evento ocorrer (assume valores entre 0 e 1).
 - “**Funcionar de acordo com as especificações**”: São os critérios que definem claramente o que é considerado um produto conforme.
 - “**Condições estabelecidas**”: São as condições ambientais sob as quais o cliente espera que o produto funcione.
 - “**Tempo**”: É o intervalo em que o cliente espera que o produto funcione corretamente.

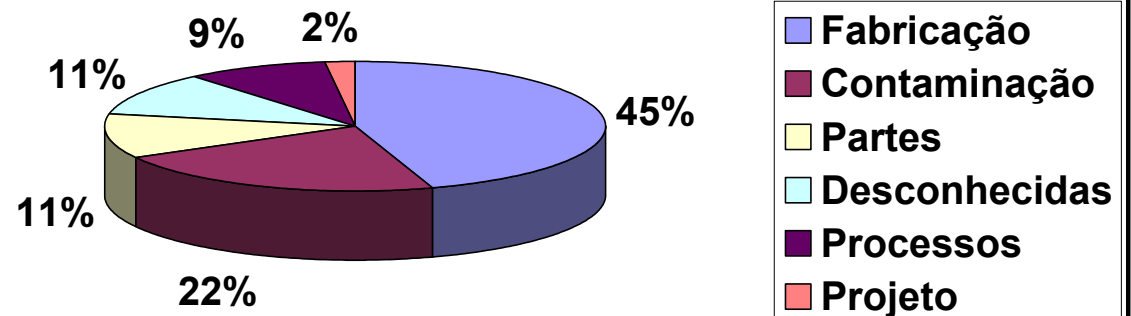
2.9.3 – Confiabilidade: Definições (cont.)

- **Falha**
 - É a ocorrência de anomalia no funcionamento do produto que o impede de cumprir sua especificação.
- **Taxa de Falha**
 - É o número de falhas ocorridas no produto por unidade de tempo.
- **Erro (“error”)**
 - É parte do estado do sistema que pode levar à **Falha**.
- **Falta (“faut”)**
 - É a suposta causa do **Erro**.
- **Acidente**
 - **Evento indesejável** e não planejado que resulte em danos materiais, ao ambiente ou à vida.
- **Perigo (“hazard”)**
 - É uma situação (estado interno + ambiente) que pode levar a um **Acidente**.
- **Risco (“risk”)**
 - É função da freqüência da ocorrência do **evento indesejável** e da severidade potencial das conseqüências resultantes deste evento.
- **Segurança (“safety”)**
 - É a propriedade do sistema estar livre de condições de **Perigo**.

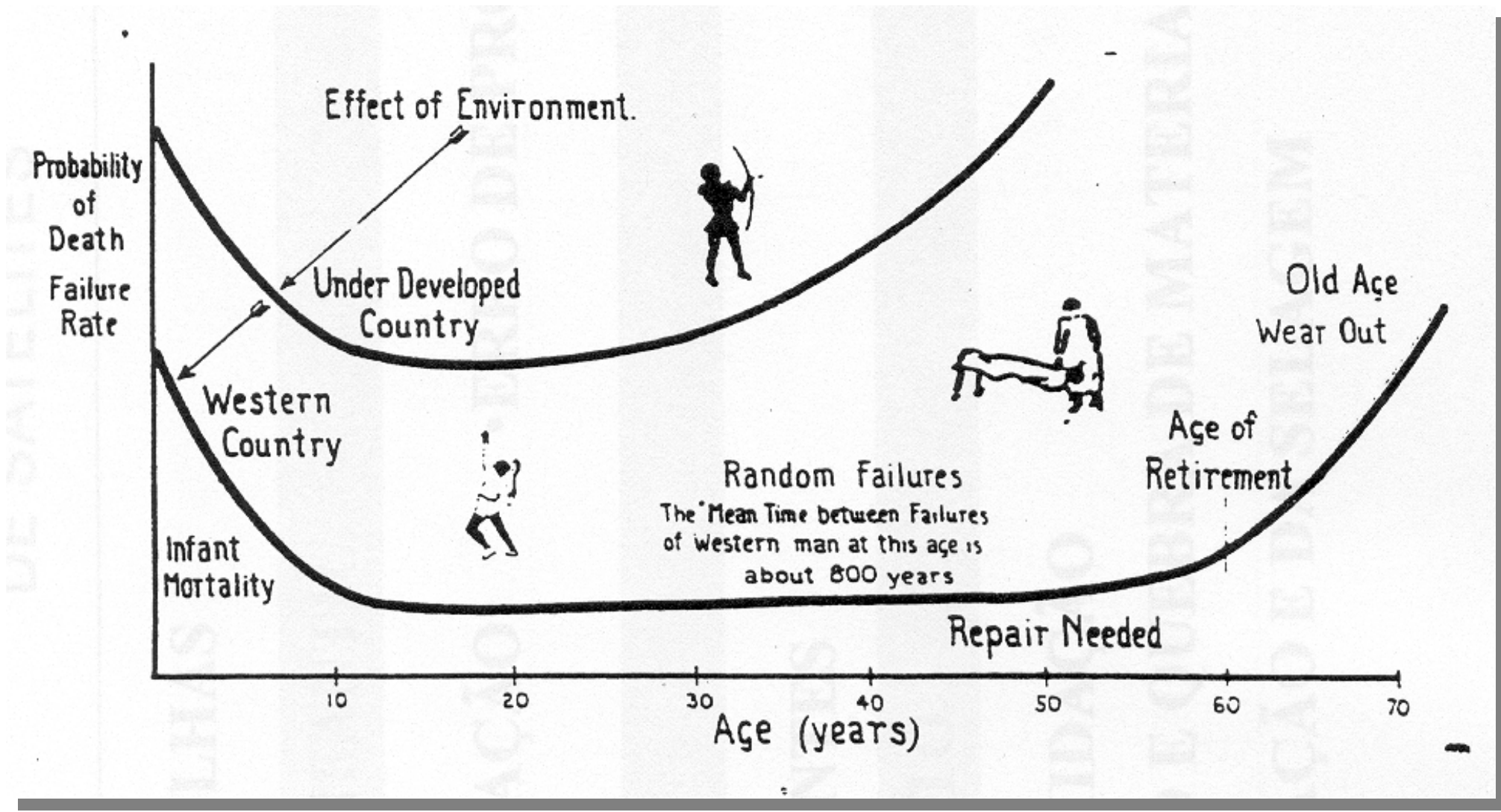
2.9.3 – Confiabilidade: Causas das Falhas

- Durante a fase de **Mortalidade Infantil**:
 - Erros de fabricação e/ou de projeto.
- Durante a fase da **Vida Útil**:
 - Defeitos latentes.
- Durante a fase de **Envelhecimento**:
 - Corrosão e Oxidação.
 - Encolhimento e quebra de materiais.
 - Perda da isolação e selagem.
 - Fadiga.

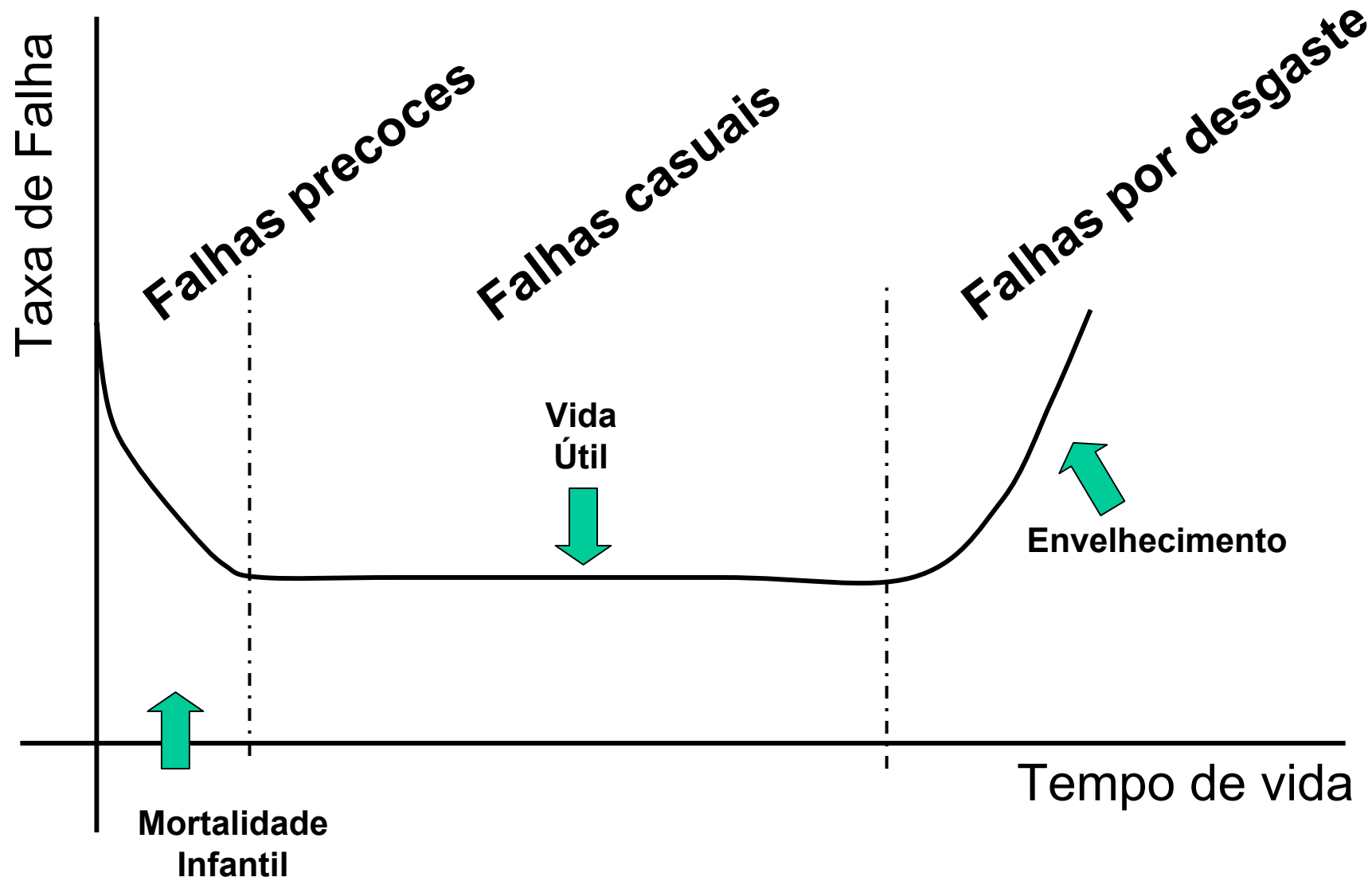
Distribuição Típica das Causas das Falhas em Nível de Sistema



2.9.3 – Confiabilidade: “The Bathtub Curve” – O caso da vida humana, [8]



2.9.3 – Confiabilidade: Taxas de Falhas x Vida – O comportamento das falhas



2.9.3 – Confiabilidade: Formulação matemática

- O modelo matemático mais comum para a determinação da confiabilidade de um único item é baseado na Taxa de Falha Constante (caso em que não se considera o desgaste):

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

- $R(t)$: probabilidade do produto operar sem falha durante o período t (geralmente expresso em horas).
- λ : é a taxa de falha do produto (normalmente expressa em falhas/hora) constante no tempo.
- e : é a base do logaritmo natural (2,7182...).

- Probabilidade de Falha: $F = 1 - R$

- Aproximação para o caso de Confiabilidade superior a 90%:

$$e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t$$

2.9.3 – Confiabilidade: Formulação matemática (cont.)

- Se um sistema é constituído por n partes em série, cada uma delas com uma confiabilidade $R_i (i = 1...n)$ ou uma taxa de falha λ_i , a confiabilidade do sistema é dada por:

$$R_s = \prod_1^n R_i = e^{-\sum \lambda_i t}$$

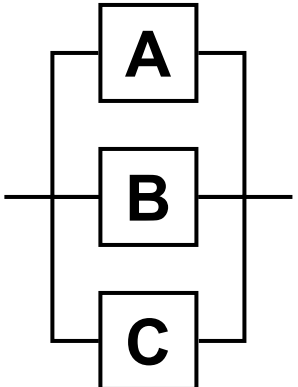
- Se um sistema é constituído por n partes em paralelo, cada uma delas com uma confiabilidade $R_i (i = 1...n)$, a confiabilidade do sistema é dada por:

$$R_p = 1 - \prod_1^n (1 - R_i)$$

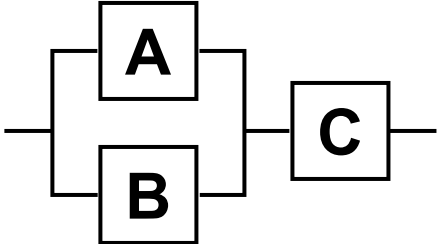
2.9.3 – Confiabilidade: Modelamento de partes em série e paralelo



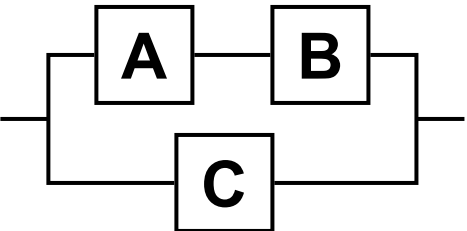
$$R_{Sist} = R_A R_B R_C \quad \text{Série}$$



$$R_{Sist} = 1 - (1 - R_A)(1 - R_B)(1 - R_C) \quad \text{Paralelo}$$



$$R_{Sist} = R_C [1 - (1 - R_A)(1 - R_B)] \quad \text{Redundância Parcial}$$



$$R_{Sist} = 1 - (1 - R_A R_B)(1 - R_C)$$

2.9.3 – Confiabilidade: A Confiabilidade ao longo do projeto

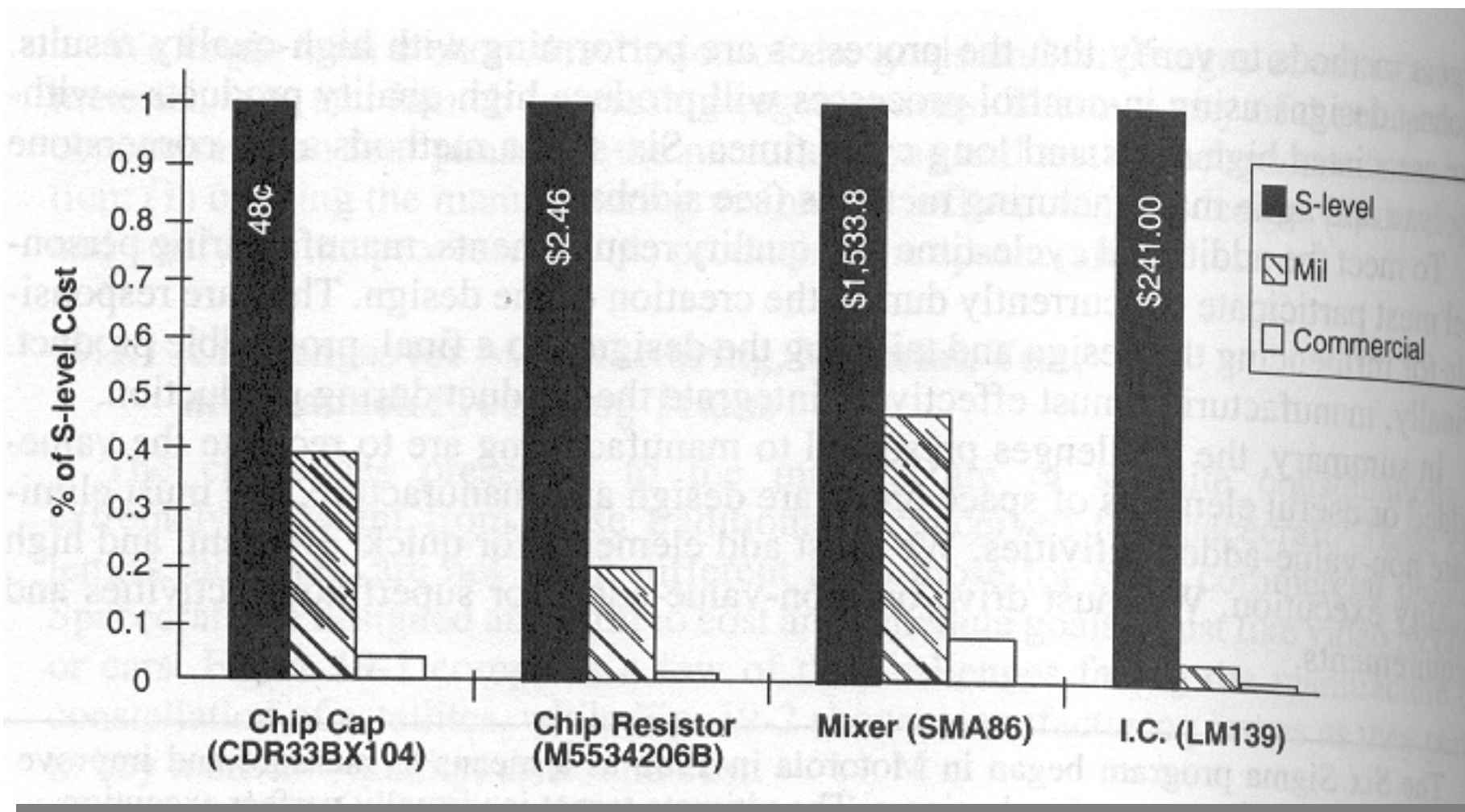
- O gerenciamento da **Confiabilidade** é realizado por meio das seguintes tarefas:
 - Alocação da Confiabilidade para o sistema, subsistemas e equipamentos.
 - Preparação dos diagramas de blocos para subsistemas e equipamentos.
 - Utilização do método da contagem de partes para calcular a confiabilidade.
 - Ajustar as alocações quando aplicável.
- Exemplo de alocação de **Confiabilidade** para equipamentos e subsistemas em série de um satélite para um dado período de operação:

– Controle Térmico	0,9980
– Estrutura	0,9990
– Subs 1	0,9840
– Subs 2	0,9918
– Subs 3	0,9485
– Subs 4	0,9635
– Subs 5	0,9530
– Subs 6	0,9800
– Subs 7	0,8271

Total 0,6869

2.9.3 – Confiabilidade: O impacto da Confiabilidade no custo, [4]

Comparação entre o custo de componentes espaciais, militares e comerciais



2.9.4 – Verificação

2.9.4 – Verificação: Definições

- **Verificação** é o processo pelo qual se determina se uma parte, um componente, um subsistema, um instrumento, ou um sistema completo satisfaz suas especificações e será capaz de operar corretamente em suporte à missão.
- O processo de **Verificação** está presente ao longo de todo o ciclo de vida do projeto e é parte integral da engenharia de sistemas.
- A cada etapa do projeto cabe ao responsável entender e avaliar os resultados de verificação e coordenar a busca de soluções para quaisquer anomalias identificadas.
- O processo de **Verificação** recorre a variados **Métodos**, que dependem do projeto, do requisito a ser verificado, de sua importância, do risco, dos custos e dos prazos associados.
- Ao longo do projeto o processo de **Verificação** avança por **Estágios** que acompanham a sua evolução natural.

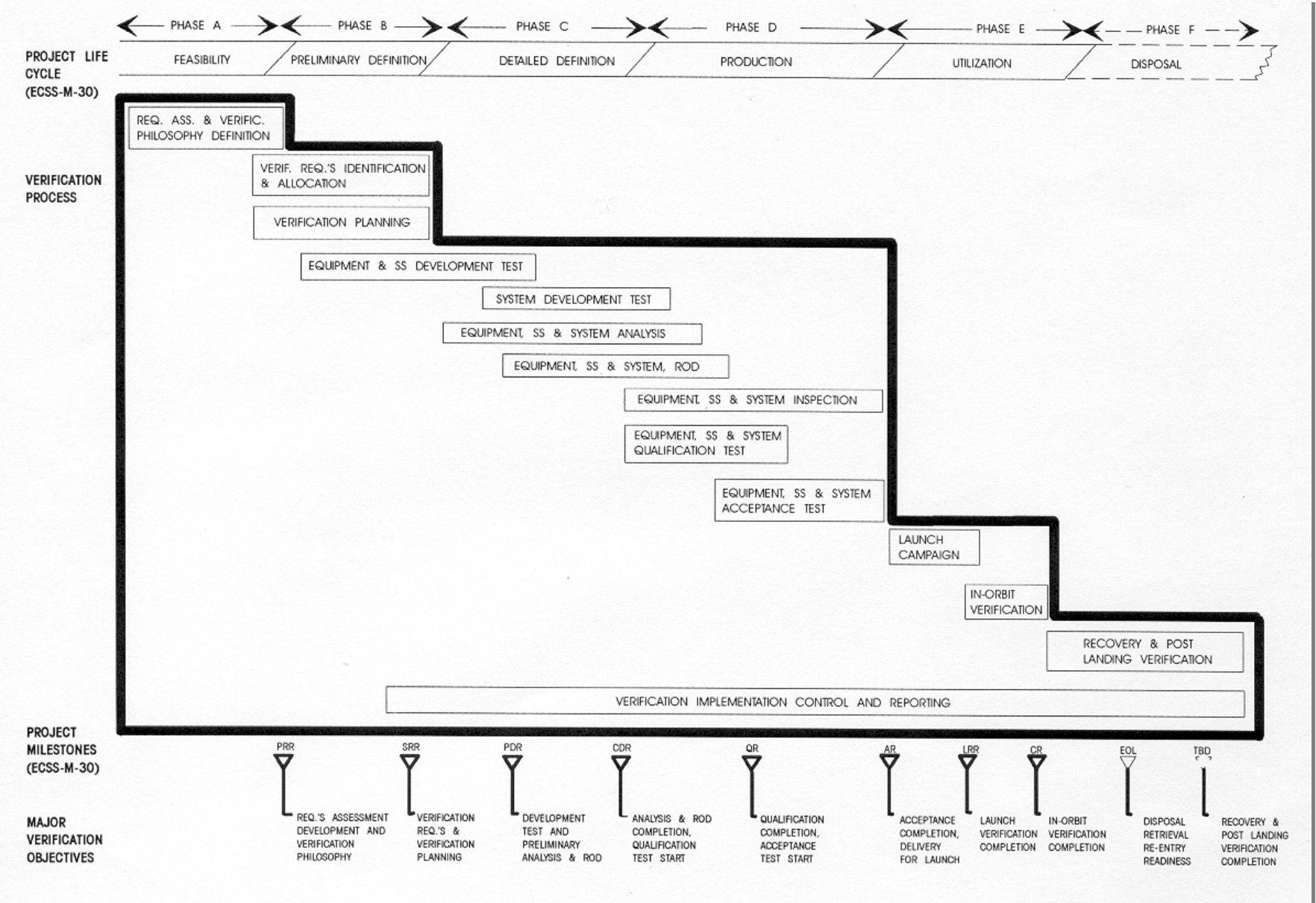
2.9.4 – Verificação: Métodos

- **Teste:** Consiste na operação do sistema real sob determinadas condições. Há duas categorias de teste: **Testes Funcionais** e **Testes Ambientais**. Os dois são realizados alternadamente ao longo de um programa de testes. Os Testes Funcionais são normalmente realizados no ambiente normal, enquanto que os Testes Ambientais demandam ambientes especiais (vibração, vácuo, temperaturas altas ou baixas, acústico).
- **Análise:** A verificação por análise é realizada no lugar ou em complemento ao Teste. As técnicas utilizadas incluem: análise de engenharia de sistemas, análises estatísticas ou qualitativas, simulações computacionais ou com equipamentos, e modelagem computacional.
- **Demonstração:** Utiliza técnicas reais de demonstração, normalmente aliadas a requisitos de manutenibilidade e “human engineering”.
- **Similaridade:** Consiste na revisão de dados de verificação coletados de um equipamento de configuração semelhante e destinado a uma aplicação também equivalente. Os dois equipamentos devem ser semelhantes ou idênticos em projeto e processo de manufatura. Nestes casos os dados são sempre de um equipamento que tenha sido qualificado em níveis idênticos ou mais rigorosos.
- **Inspeção:** Consiste na avaliação física do equipamento e/ou de sua documentação para verificar características do projeto, tais como dimensões físicas, limpeza, rugosidade, funcionamento de mecanismos, alinhamentos, etc.
- **Simulação:** Consiste na verificação baseada no uso de equipamentos e software que não sejam de vôo.
- **Validação de registros:** Consiste na verificação baseada em registros de manufatura e aceitação final com o intuito de confirmar as características construtivas e o processo de fabricação dos equipamentos de vôo.

2.9.4 – Verificação: Estágios

- **Desenvolvimento:** Neste estágio os processos de verificação objetivam auxiliar o desenvolvimento do projeto. Os resultados obtidos são apresentados nas revisões de projeto (Revisão Preliminar e Revisão Crítica).
- **Qualificação:** Neste estágio um equipamento equivalente ao de vôo é submetido a verificações com o objetivo de comprovar que ele satisfaz aos seus requisitos funcionais, que atinge o desempenho desejado e que tem as características de projeto requeridas. Os testes realizados são sempre em condições mais rigorosas que as de vôo, e têm o intuito de demonstrar que o equipamento dispõe de margens adequadas.
- **Aceitação:** Neste estágio demonstra-se que o equipamento de vôo satisfaz aos seus requisitos funcionais e de projeto. Ao final o mesmo é enviado para integração ao veículo lançador ou estocado.
- **Preparação para lançamento:** Dura ao longo do período de integração ao veículo lançador e vai até o lançamento. São verificados os requisitos de integração ao veículo lançador e centro de lançamento aplicáveis ao satélite.
- **Operação:** Ocorre durante a fase de operação e consiste em verificar que as partes do satélite operam corretamente e suportam o ambiente espacial.
- **Descarte:** Estágio opcional que é executado quando há requisitos a serem verificados antes da desativação completa.

2.9.4 – Verificação: A Verificação ao longo da vida do projeto, [13]



2.9.4 – Verificação: Modelos construídos e testados ao longo dos Estágios do projeto

- **Modelo de Engenharia** (Engineering Model)
 - Modelo para testes funcionais.
- **Modelo Estrutural** (Structural Model)
 - Modelo para testes da estrutura.
- **Modelo Térmico** (Thermal Model)
 - Modelo para testes térmicos.
- **Modelo EMI/EMC** (EMI/EMC Model)
 - Modelo para testes de compatibilidade eletromagnética.
- **Modelo de Qualificação** (Qualification Model)
 - Modelo para testes de qualificação.
- **Modelo de Vôo** (Flight Model)
 - Modelo que irá voar.
- **Modelo Sobressalente** (Spare Model)
 - Modelo sobressalente (opcional).
- **Modelo “Protoflight”** (Protoflight Model)
 - Modelo utilizado em substituição aos de Qualificação e Vôo (opcional).

2.9.4 – Verificação: Fluxo de atividades de Integração/Testes/Lançamento, [7]

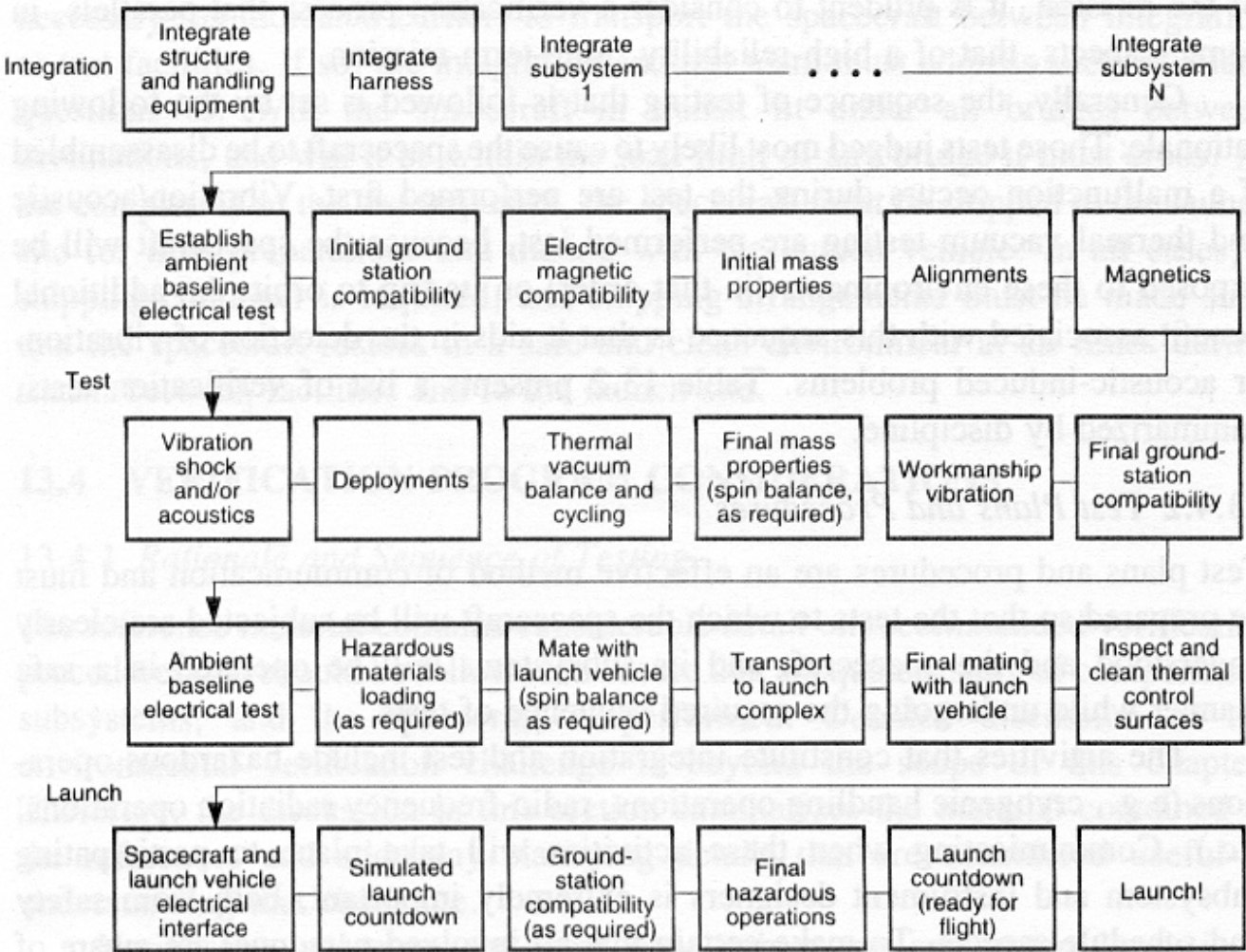


FIG. Integration and test flow.

2.9.4 – Verificação: Recursos do Laboratório de Integração e Testes (LIT)

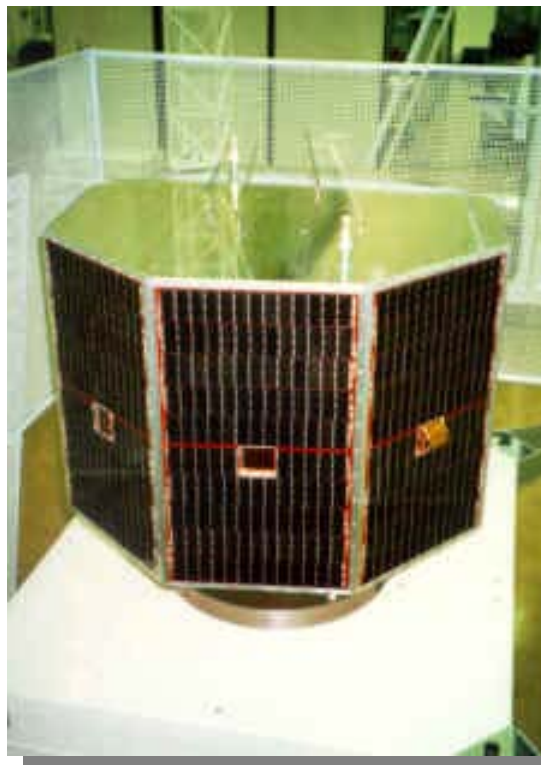


2.9.4 – Verificação: Recursos para Testes no LIT



Teste de Vibração em
Vibrador
Eletrodinâmico

Dispositivo para
Balanceamento
Dinâmico



Dispositivo para a
determinação de
Propriedades de Massa

2.9.4 – Verificação: Recursos para Testes no LIT (cont.)



Teste de Compatibilidade Eletromagnética de equipamentos em Câmara Anecóica



Teste de antenas

2.9.4 – Verificação: Recursos para Testes no LIT (cont.)



Câmara para testes
Vácuo-Térmicos



Câmara para testes de
Ciclagem Térmica