



# Centro de Instrução Almirante Wandenkolk - CIAW Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA



## Curso de Aperfeiçoamento Avançado em Sistemas de Armas



**SAB:** Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

Introdução



Jozias **Del Rios** Cap Eng



[delriosjdrvgs@fab.mil.br](mailto:delriosjdrvgs@fab.mil.br)



(12) 98177-9921

Abril 2018



INSTITUTO DE AERONÁUTICA E ESPAÇO



# AA-811

## SIMULAÇÃO E CONTROLE DE ARTEFATOS BÉLICOS

Cap Eng Jozias **DEL RIOS**  
rev. 04.mai.2016

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## OBJETIVOS

Capacitar os alunos a implementar e analisar  
simulações de artefatos bélicos  
balísticos e controlados.

Em aproveitamento, apresentar noções de  
guiamento e controle de mísseis.

## TÓPICOS DO CURSO

1. Descrição e **propósito** de simulação e controle.
2. **Métodos numéricos** para simuladores.
3. Simulação balística de **3** graus de liberdade.
4. Simulação em **6** graus de liberdade. **Monte Carlo**.
5. Guiamento, Navegação e Controle (**GNC**) de mísseis.

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dinâmica, Aerodinâmica e Geodésia:

Stevens, Lewis, Johnson

[Aircraft Control and Simulation](#) 3ed (2016)

Simuladores:

Jeffrey Strickland

[Missile Flight Simulation](#) 2ed (2012)

Variação de Massa:

Cornelisse, Schöyer, Wakker

[Rocket Propulsion and Spaceflight Dynamics](#) (1979)

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Modelagem matemática da Dinâmica:

Peter H Zipfel

Modeling and Simulation of Aerospace Vehicle Dynamics  
2ed (2007)

Leis de guiamento:

Rafael Yanushevsky

Modern Missile Guidance (2008)

N A Shneydor

Missile Guidance and Pursuit (1998)

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Paul Zarchan

Tactical and Strategic Missile Guidance (2012)

George M Siouris

Missile Guidance and Control Systems (2004)

Modelagem matemática para navegação:

Wei Quan, Jianli Li, Xiaolin Gong, Jiancheng Fang

INS CNS GNSS Integrated Navigation Technology (2015)

Notações de aula:

AA-298 – “Simulações Balísticas” (Schamedecke/Machado)

EC-213 – “Introdução ao Controle de Mísseis”

## PROGRAMAÇÃO

Qualquer linguagem de programação será admitida, porém o curso será orientado para a plataforma **MATLAB** devido à versatilidade de funções prontas e exibição de gráficos.

Opcionalmente, as simulações do curso também poderão ser apresentadas em linguagem **C++**, de onde tira-se proveito de melhor desempenho computacional.



# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## POR QUE SIMULAR?

Resposta da negação:

Se um veículo e o seu ambiente puderem ser modelados completamente, no seu único ou no pior caso, e for resolvido por uma fórmula fechada, então **não** será necessário simular.

Mas se o sistema...

...for muito complexo, ou

...contém muitas variáveis, ou

...os componentes interagem excessivamente entre si, ou

...contém variáveis que se relacionam de forma não-linear, ou

...tem modelos que apresentam variáveis aleatórias,

então podemos ensaiar ou simular.

## POR QUE NÃO EXPERIMENTAR?

Mas não convém experimentar se ...

- ... as entradas tem condições **inexcitáveis**
- ... as saídas forem **inacessíveis**
- ... existe muita variação de **perturbação** dos parâmetros
- ... tiver um **custo** muito elevado
- ... for muito **arriscado** (perigoso) (safety)
- ... a **duração** ou o **tamanho** forem intratáveis

Enfim ...

- ...se for **inviável**
- ...ou ainda se o sistema ainda **não existir**

## PARA QUÊ SIMULAR? - MOTIVOS

### **Simulação...**

- ...auxilia a definição dos requisitos de desempenho do sistema, possibilitando o balanceamento e otimização global.
- ...antevê resultados de propostas de soluções de projeto.
- ...prevê comportamento/desempenho dos componentes de um sistema quando forem integrados entre si.
- ...prevê desempenho nos ambientes propostos de operação.
- ...possibilita o treinamento de operadores (pilotos) do sistema.
- ... valida o propósito da missão no cenário de emprego.

## PARA QUÊ SIMULAR? - MOTIVOS

### **Simulação...**

- ...reduz a quantidade de ensaios reais, pois uma simulação que foi validada pode investigar outros pontos no envelope.
- ...investiga condições ambientais inacessíveis, ex.: Marte.
- ...prática de procedimentos perigosos, tais como falhas de sistema, emergências, condições extremas.
- ...ferramenta laboratório para determinar aplicabilidade, efetividade, confiabilidade, sobrevivibilidade, vulnerabilidade, letalidade, ...

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## PARA QUÊ SIMULAR? - VERIFICAÇÃO

Simulação é uma forma de verificação antecipada da operação.

Exemplo: Substituição da Lei de Guiamento de um míssil em desenvolvimento de “proporcional” para “perseguição”.

Motivo: simplificar a implementação.

O guiamento por perseguição é simulado nos cenários de emprego utilizando o ambiente de operação previsto.

A análise estatística dos resultados das simulações demonstra que a efetividade do armamento ainda atende às expectativas de projeto.

Portanto: a alteração poderá ser tecnicamente aceita.

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## PARA QUÊ SIMULAR? - VALIDAÇÃO

Simulação é um meio para validação dos propósitos do sistema.

Exemplo: O simulador do novo míssil é integrado ao programa planejador de missão do teatro de operações.

Disparo do míssil simulado contra um alvo fictício, em cenário de emprego típico da aplicação do míssil.

Expectativa de neutralização do alvo, causando efeitos taticamente favoráveis no cenário da batalha, apreciáveis numericamente e visualmente.

Adicionalmente, o piloto poderá ser treinado.

(simulador como produto)

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## MODALIDADES DE SIMULAÇÃO para TREINAMENTO

### **Simulação Virtual:** “[Man-in-the-Loop](#)”

- [Pessoas reais](#); Equipamentos simulacros; [Mundo virtual](#).
- [Cockpit](#) em tamanho e aspectos reais (botões, visores etc).
- Janelas substituídas por monitores / projetores.



# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## MODALIDADES DE SIMULAÇÃO para TREINAMENTO

### Simulação Viva:

- **Pessoas reais**; Equipamentos reais; Mundo real.
- Acessórios designadores/apontadores e crítica-vídeo.
- Tiros simulados; Efeitos dos engajamentos são extrapolados.



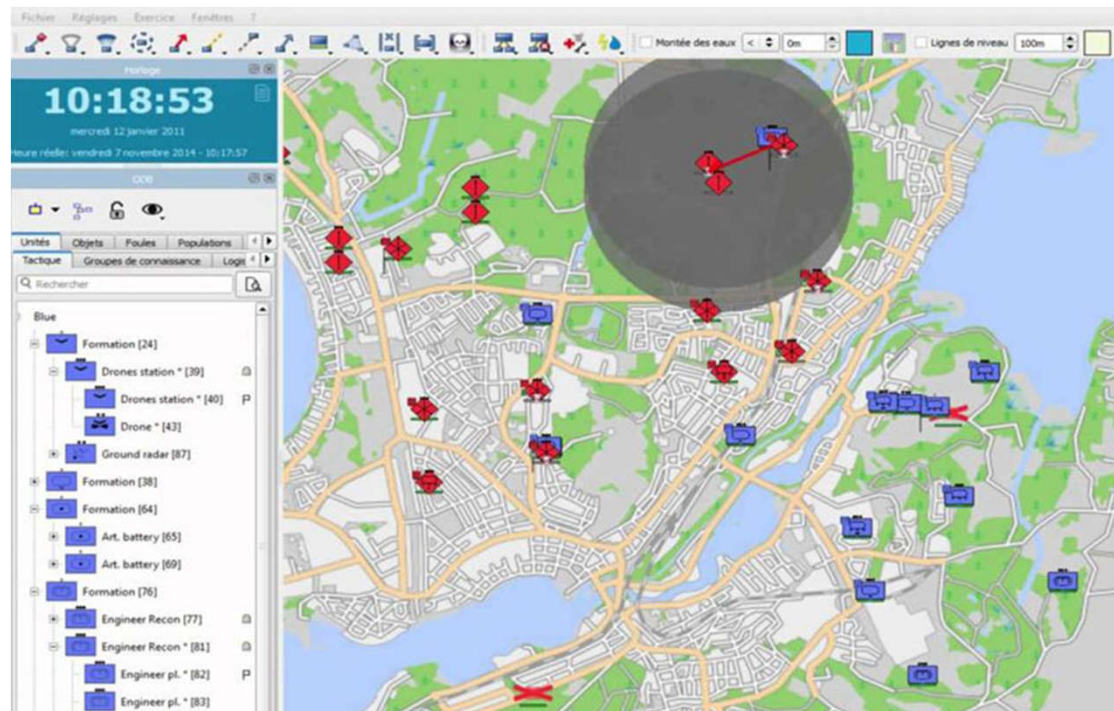


# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## MODALIDADES DE SIMULAÇÃO para TREINAMENTO

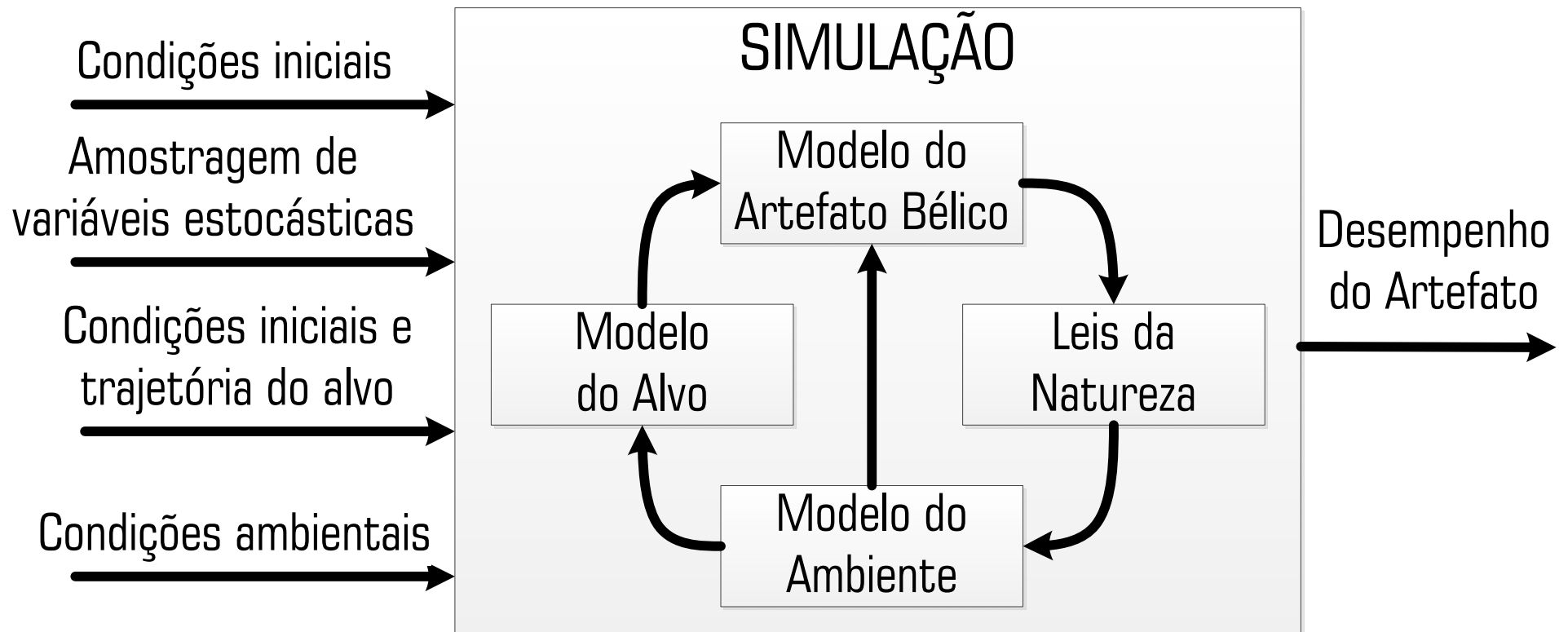
### Simulação Construtiva:

- Wargames: Planejamento estratégico e ensaios de táticas.
- Emprego e posicionamento de forças representativas.
- Simulação do combate completo em tempo virtual.



# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## PARA QUÊ SIMULAR? – CAIXA PRETA



# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## COMO SIMULAR? - ADERÊNCIA

Uma simulação é a imitação do comportamento e operação abstratas de um sistema ao longo de um tempo virtual.

Para ser útil, deve ter aderência à realidade (verossímil).

Sistemas e fenômenos físico/químico/elétrico/eletromagnéticos devem ser modelados matematicamente.

Comportamentos e aparências simulados devem se parecer com o produto real, como se estivesse operando no ambiente real.

Modelos matemáticos podem originar de...

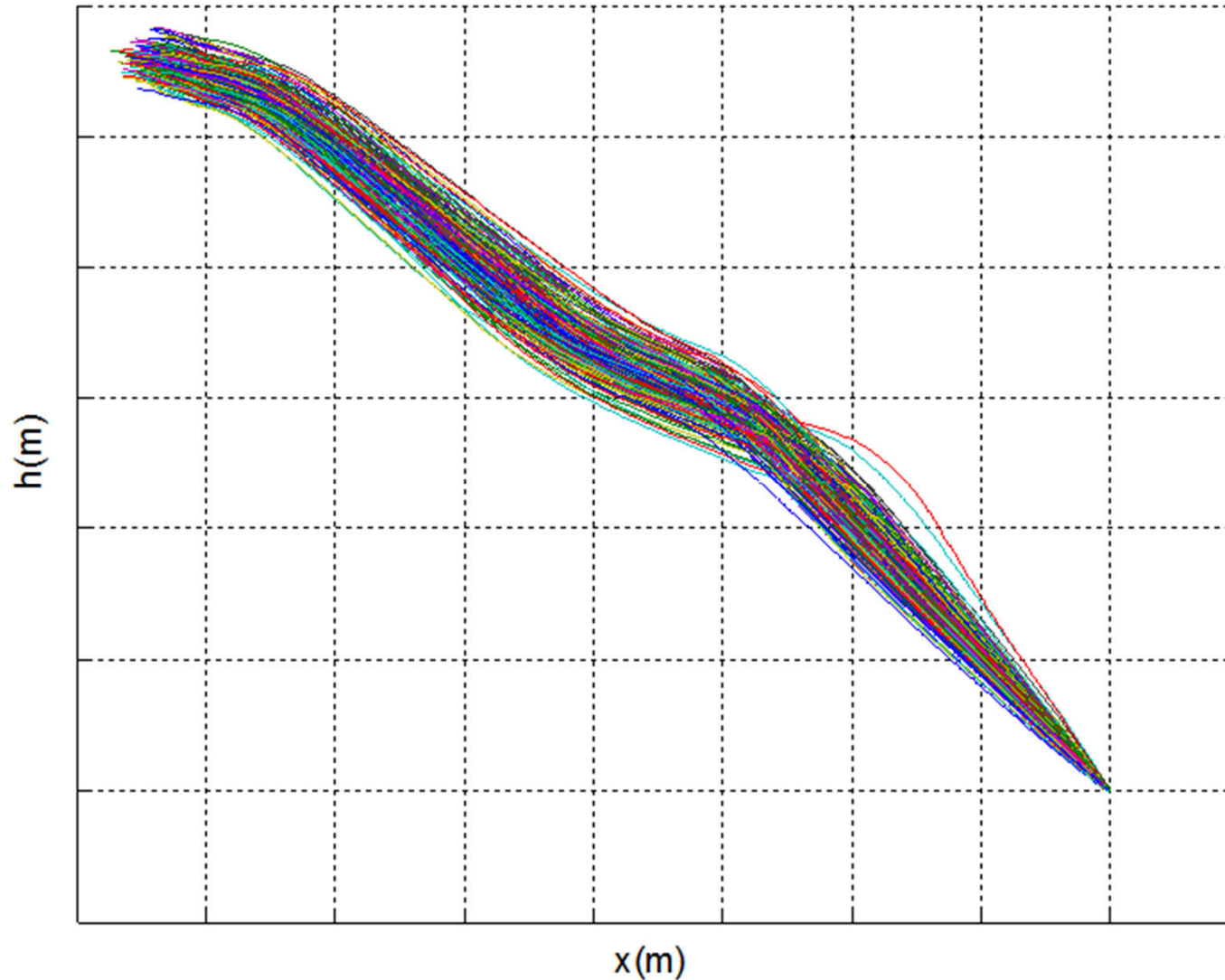
...Leis da natureza (**Teoria**, por exemplo:  $\text{Peso} = \text{Massa} \times g$ ).

...Comportamentos previstos (**Análise**, ex.: Curva de Empuxo).

...Comportamentos experimentos (**Empírico**, ex.: Túnel de Vento).

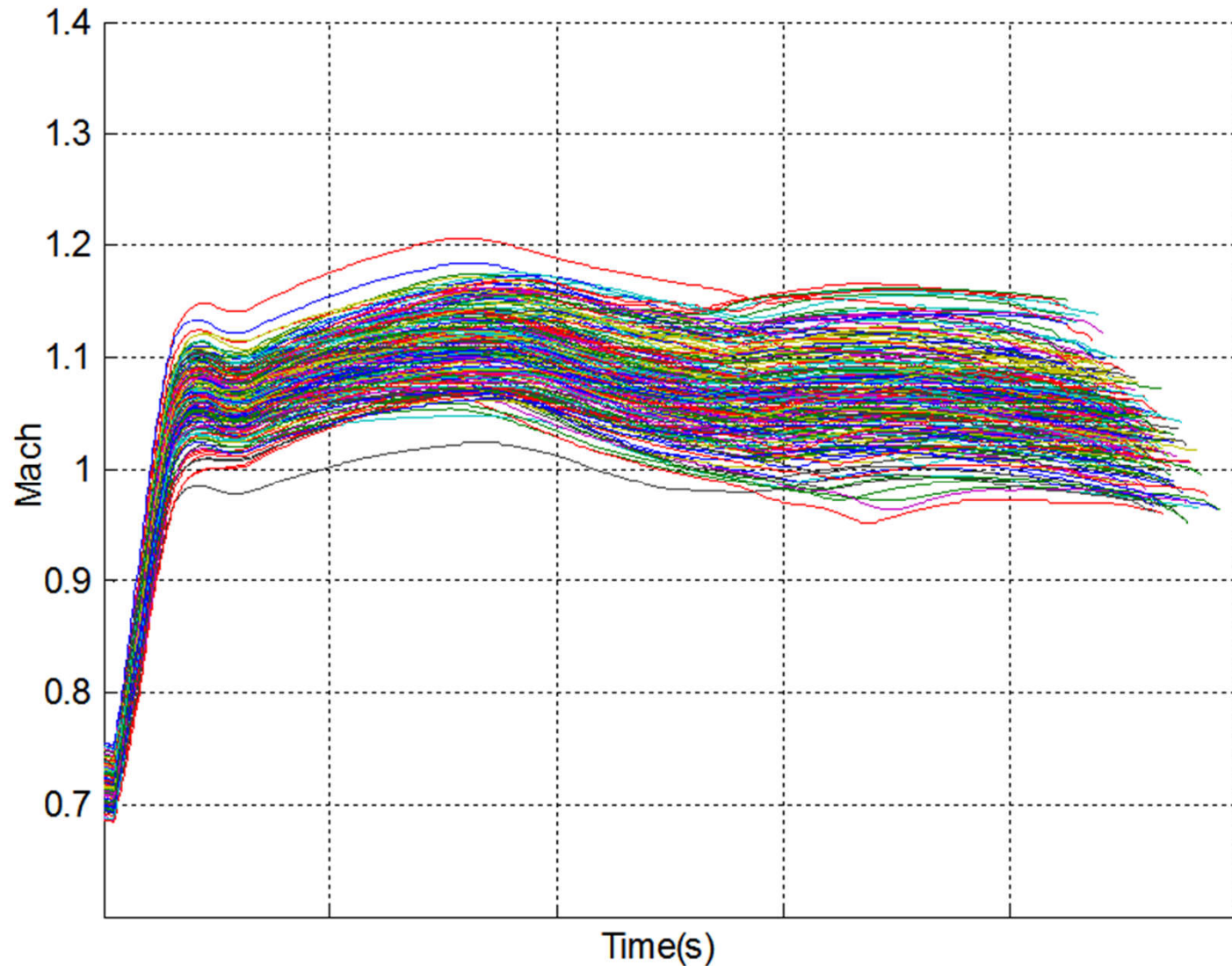
# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## COMO SIMULAR? – MONTE CARLO



# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

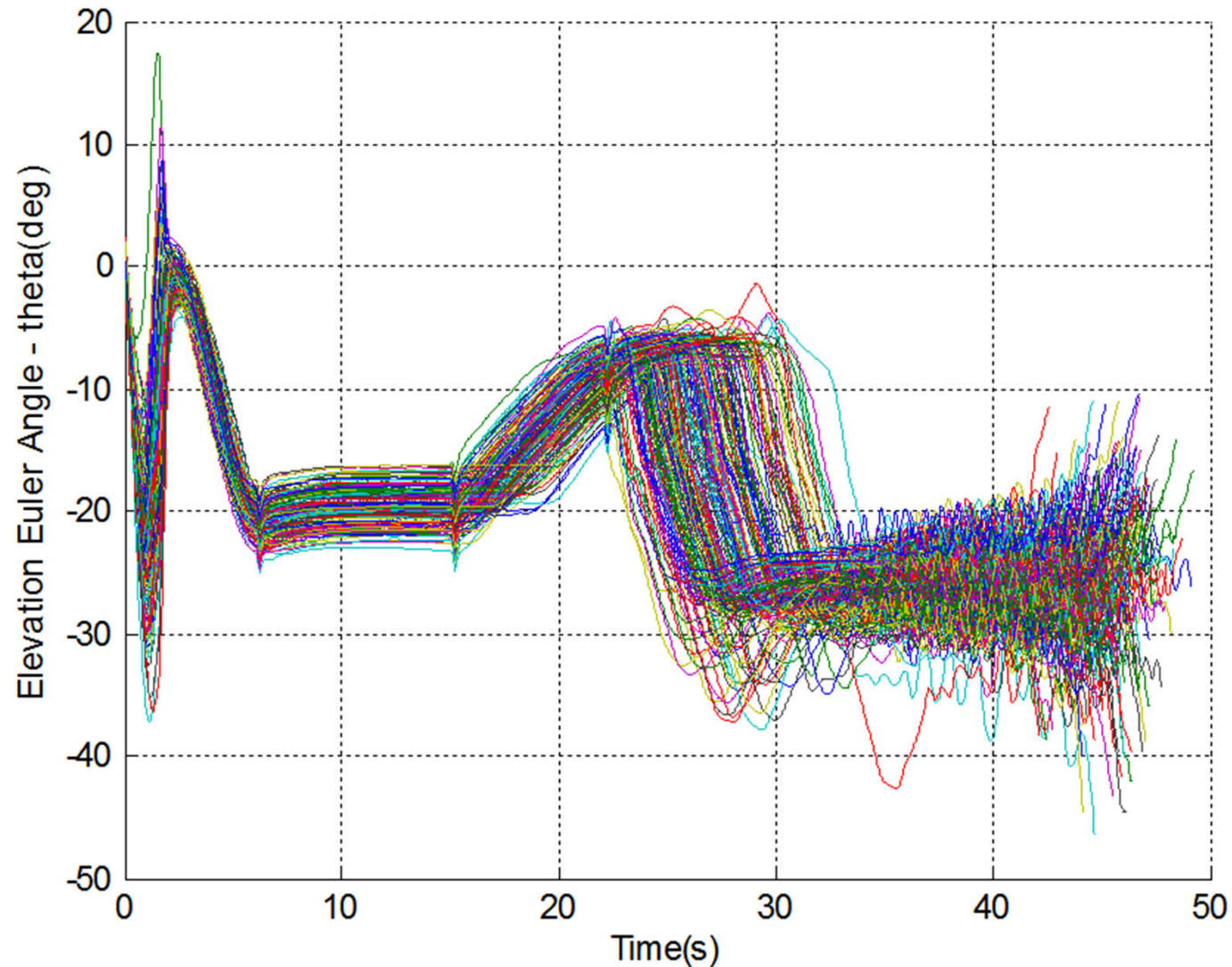
## COMO SIMULAR? – MONTE CARLO





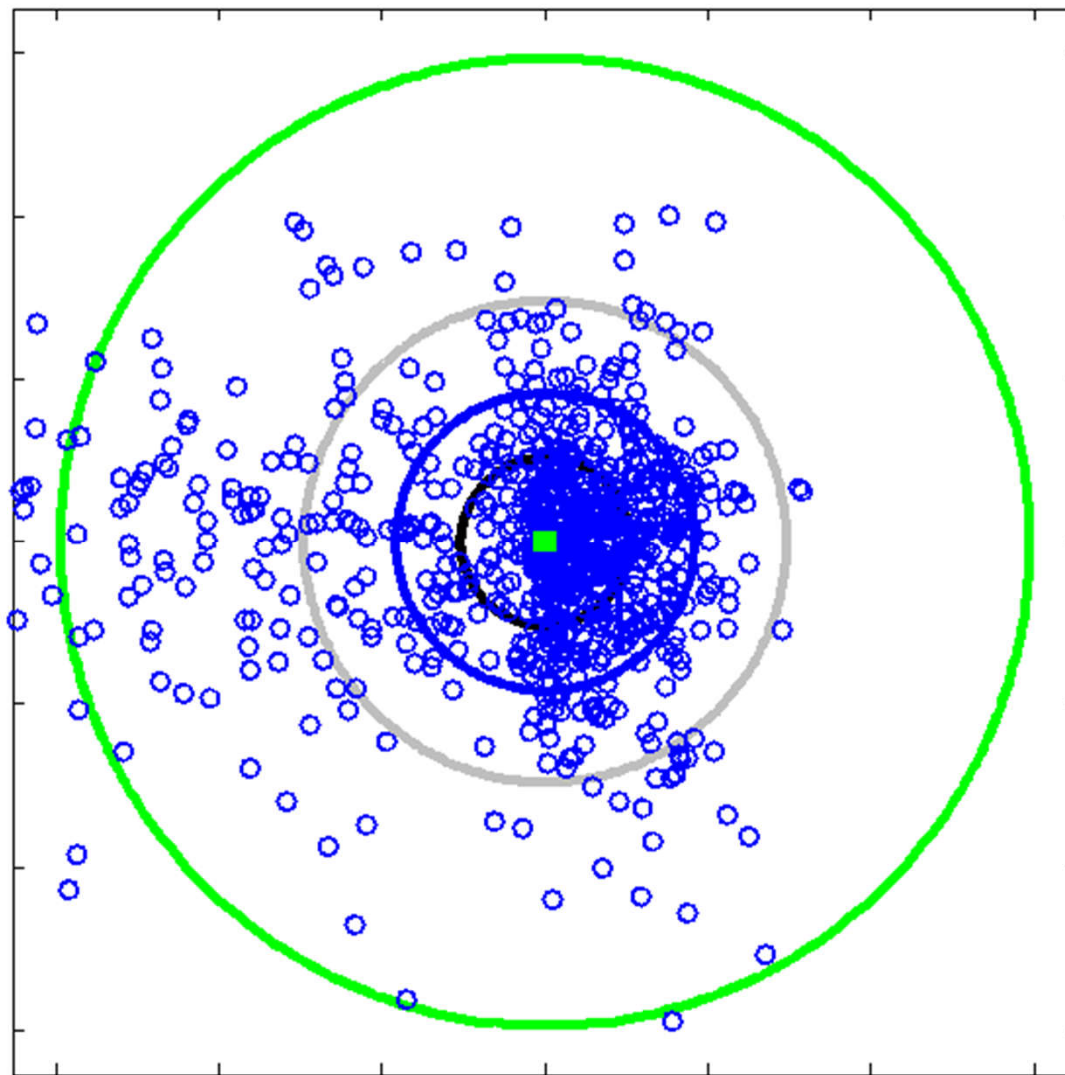
# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## COMO SIMULAR? – MONTE CARLO



# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## COMO SIMULAR? – PONTOS DE IMPACTO



## COMO SIMULAR? - ADERÊNCIA

Ferramentas estatísticas de avaliação quantitativa:

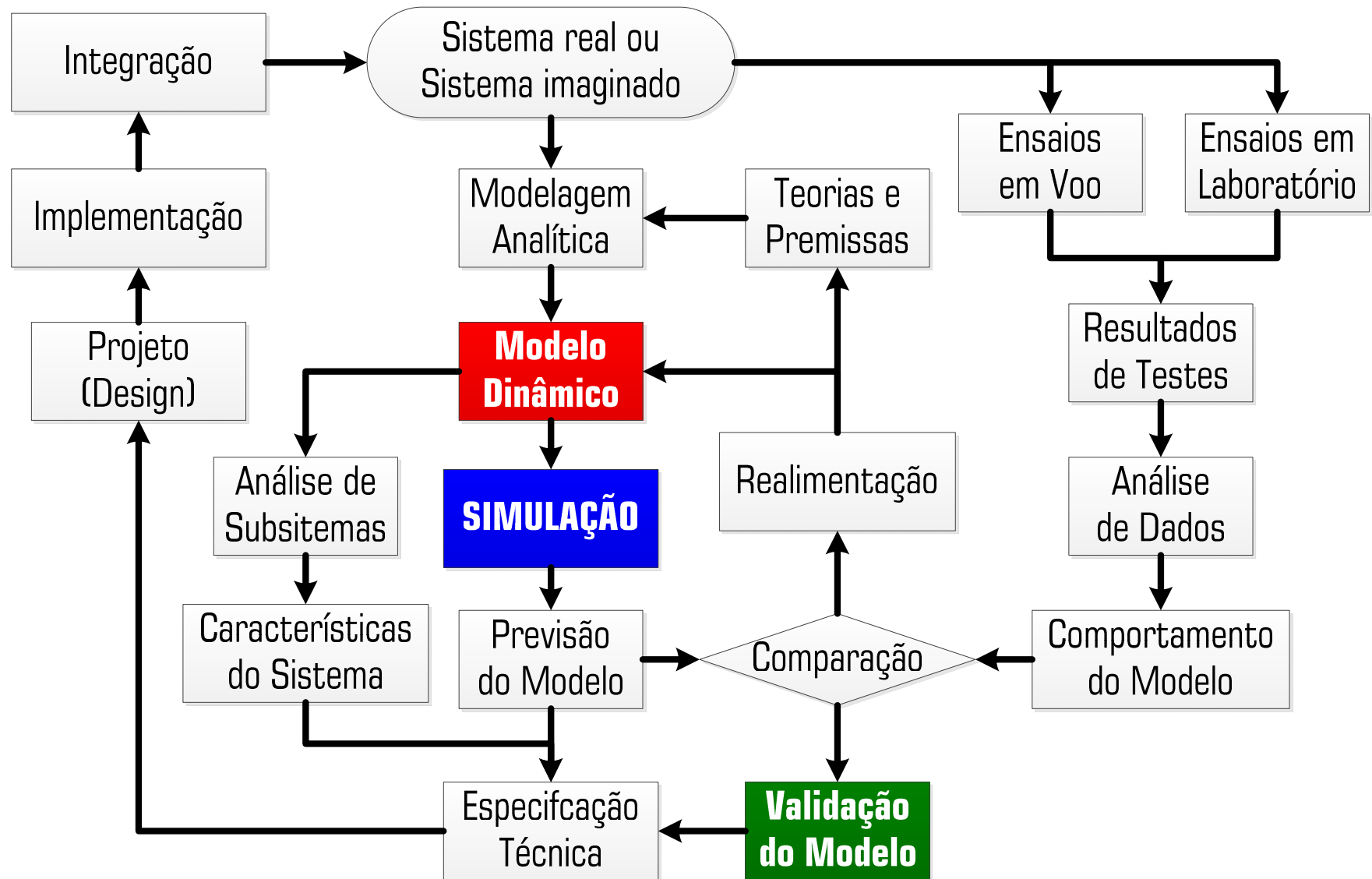
- Análise de variância (sigmas);
- Teste estatístico Chi-Quadrado;
- Teste Kolmogorov-Smirnov;
- Análise espectral (resposta dinâmica);
- Análise de regressão (casamento de curvas);

...



# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

# PROCESSO DE DESENVOLVIMENTO COM SIMULAÇÃO



# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## COMO SIMULAR? - ITERAÇÃO

Acreditar no simulador é um esforço iterativo:

→ Simulador prevê o comportamento do sistema integrado por componentes individuais (modelos simples e analíticos).

→ Componentes são desenvolvidos e experimentados, calibrando empiricamente as variáveis dos modelos matemáticos.

→ Se o comportamento do modelo não puder reproduzir o experimento, a teoria será reinterpretada e o modelo substituído.

Exemplo: um polinômio nunca vai aderir à exponencial, por mais que se ajuste o grau e os coeficientes.

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## COMO SIMULAR? - ESFORÇO

Comparação entre o simulado e o experimentado é subjetiva.

Tradeoff: esforço de engenharia vs.  
aceitabilidade de riscos de projeto.

Feeling para incluir no simulador apenas o que realmente afeta o desempenho do sistema, no nível de detalhamento necessário.

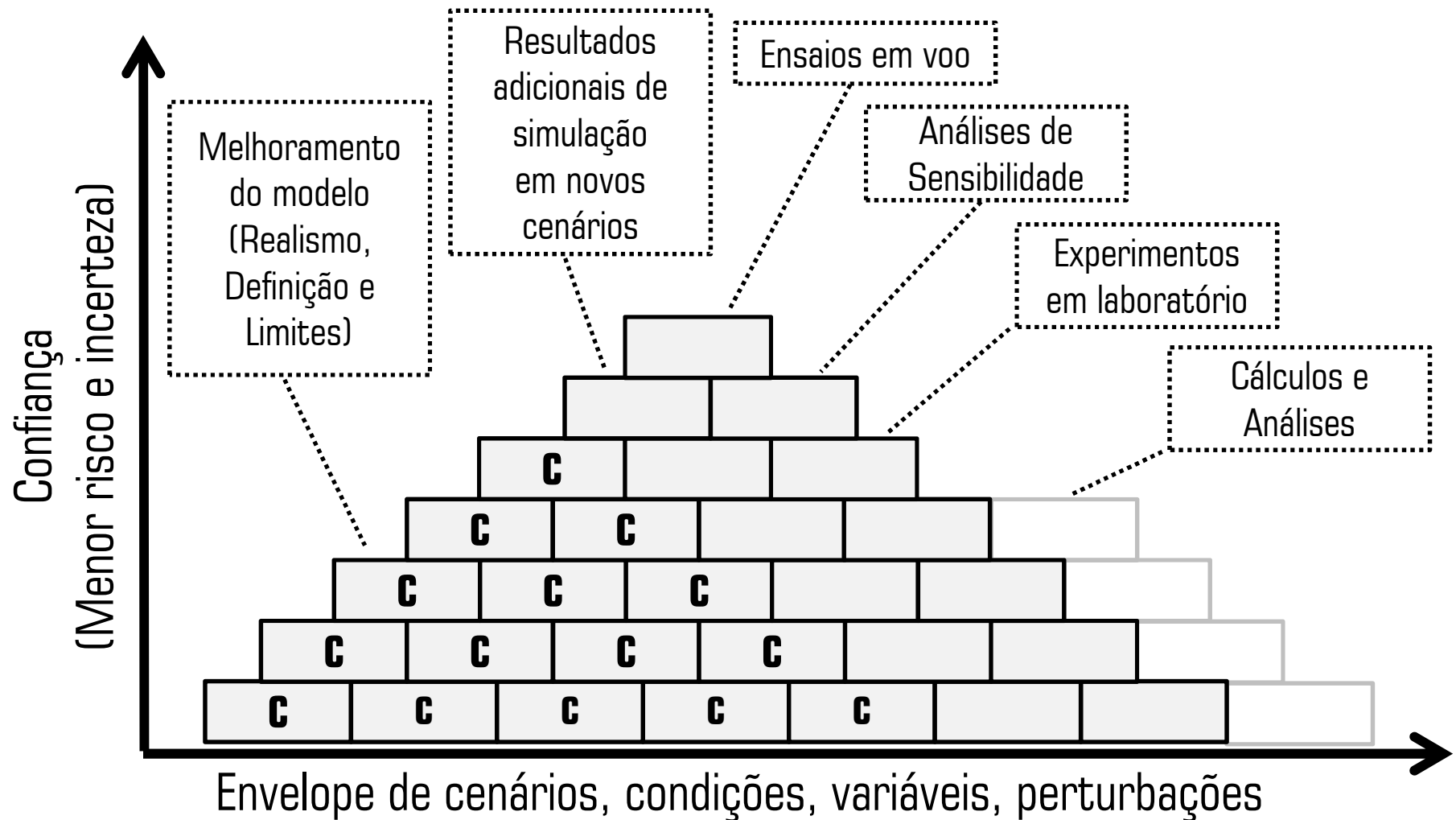
...Pecando por falta → Conclusões erradas sem suspeitar.

...Pecando por excesso → Complica e desperdiçar recursos.

Dificuldade por envolver aerodinâmica, estruturas, explosivos, propulsão, eletrônica, guiamento, navegação, controle, ...

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## COMO SIMULAR? – PIRÂMIDE DE CONFIANÇA



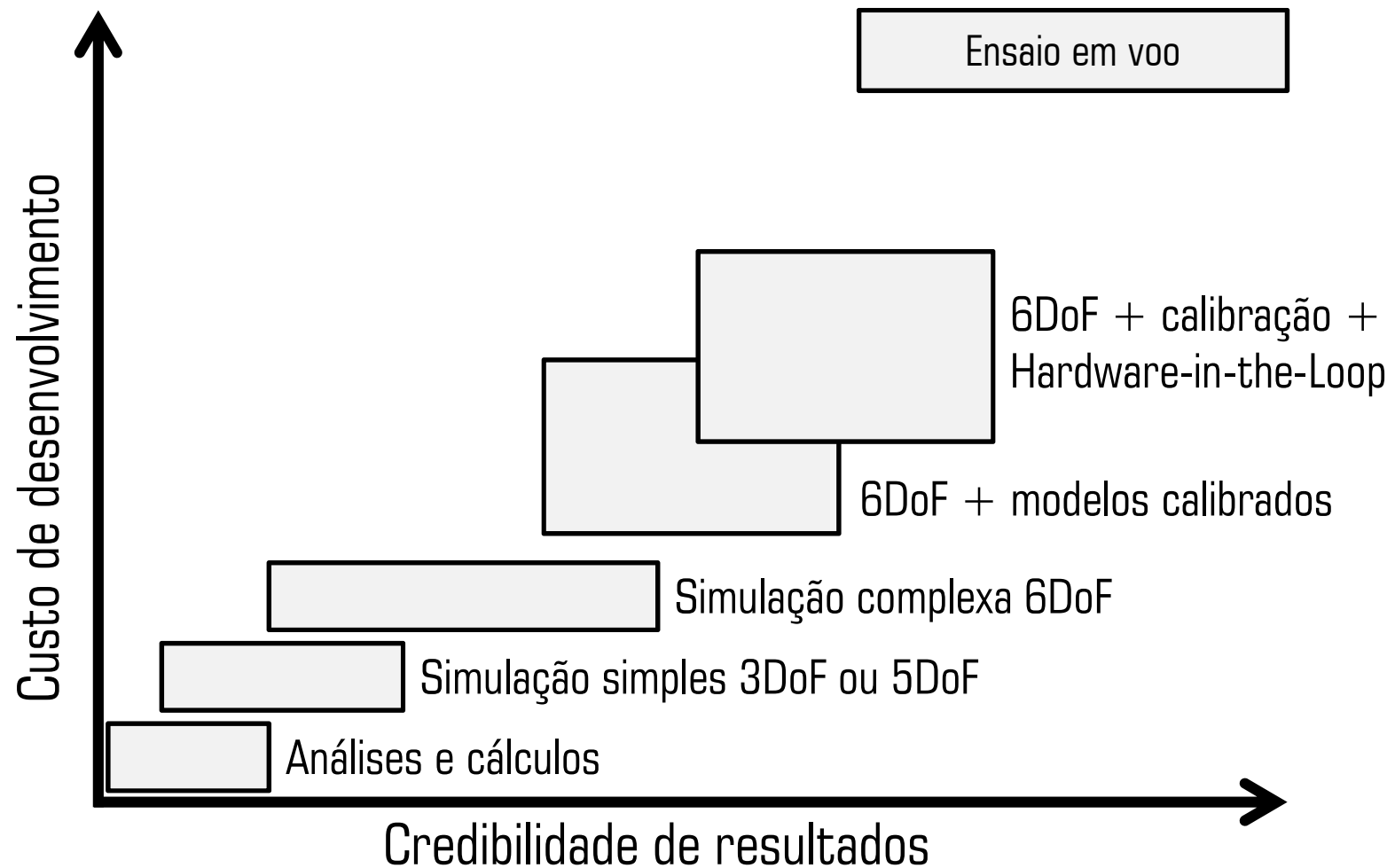
# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## COMO SIMULAR? – CONDIÇÕES INICIAIS

- Posição e orientação do **lançador** e do **alvo**.
  - Velocidade linear e angular do lançador.
  - Aceleração do lançador.
- Condições atmosféricas: temperatura, vento, turbulência, ...
- Erros dos sensores: bias, escala, desalinhamentos, ruídos, ...
- Erros dos atuadores: atritos, folgas, parâmetros, ...
- Erros geométricos: posição do **CG**, desalinhamento, ...
- Erros químicos: curva de empuxo, tensão da bateria, ...

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## RELAÇÃO SIMULADOR e CUSTO



# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## TIPOS DE ARTEFATOS BÉLICOS

Artefato Bélico	Propulsão?	Guiamento?	Cabeça-de-guerra?
Projétil			
Bomba burra			<b>X</b>
Bomba guiada		<b>X</b>	<b>X</b>
Foguete	<b>X</b>		<b>X</b>
Míssil	<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## POR QUE GUIAR ARTEFATOS BÉLICOS?

Finalidade principal de um sistema de **guiamento**:

“Levar uma espoleta e uma cabeça-de-guerra a uma **posição relativa ao alvo** de tal forma que a detonação resulte em um máximo efeito destrutivo do alvo.”

(Miscow)

### É o fechamento da malha

Melhora a acurácia, a precisão, e possibilita a navegação:

- Segurança: ampliação de distância de stand-off (planeio)
- Furtividade: lançamento à baixa altura (perfil de voo)
- Efetividade: aumento do Single-Shot-Kill-Probability (**SSKP**)
- Razoabilidade: redução de dano colateral (precisão).



# AA-811 - Simulação e Controle de Artefatos Bélicos

## RELAÇÃO SIMULADOR e CONTROLE

Simulador ajuda o projeto e a análise de controladores:

- Sintonia de controladores clássicos (ex.: **PID**, **LQR**)
- Estimação de variáveis não-mensuráveis diretamente.
- Verificação das margens de estabilidade do controle frente à perturbações do sistema.
- Verificação da sensibilidade de parâmetros dos modelos.
- Detecção de erros (bugs) de implementação e depuração.
- Verificação do cumprimento da efetividade do armamento.