



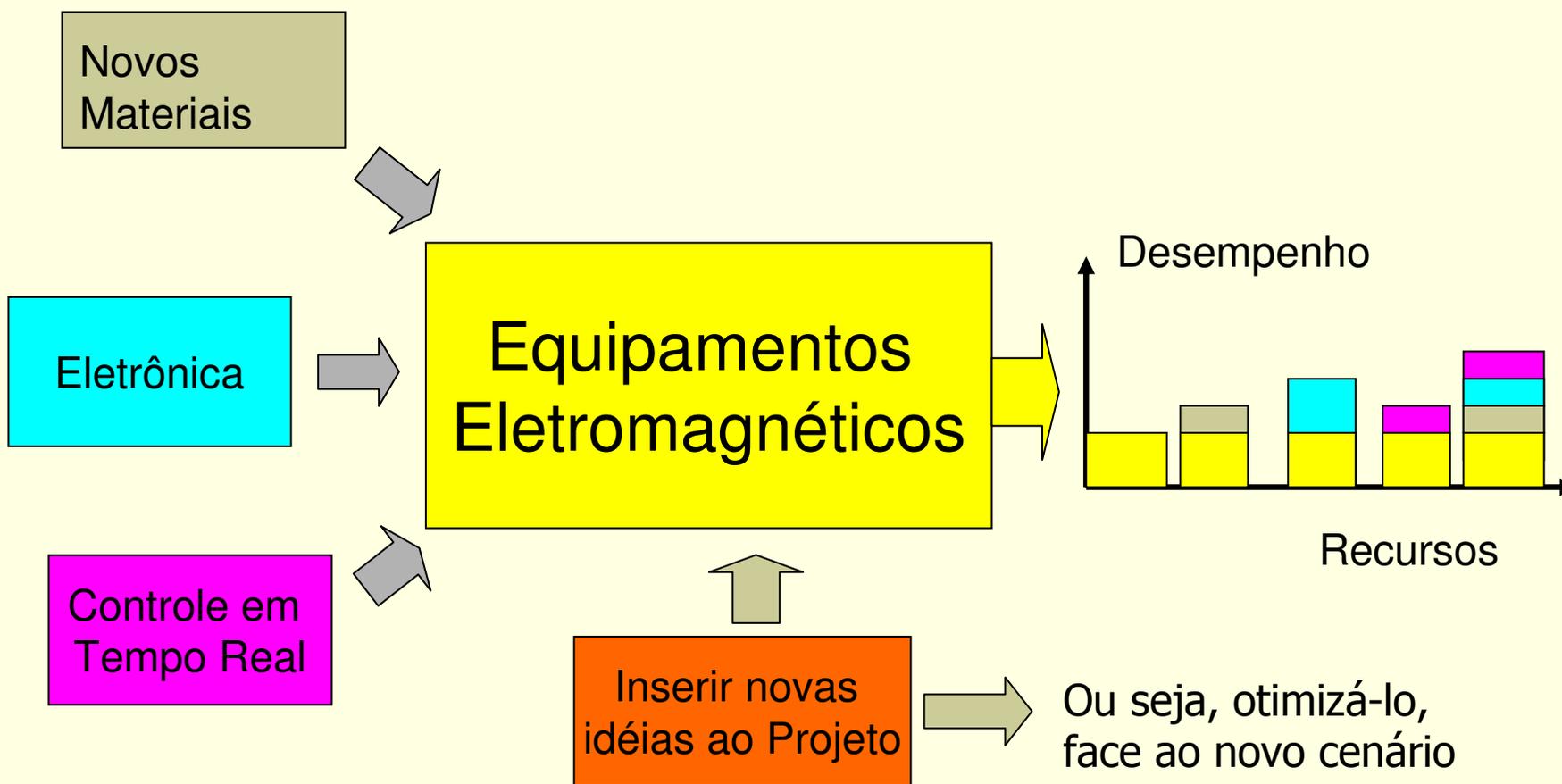
Ferramentas e Metodologias para o Projeto Ótimo de Equipamentos Eletromagnéticos

Luiz Lebensztajn

PEA3422

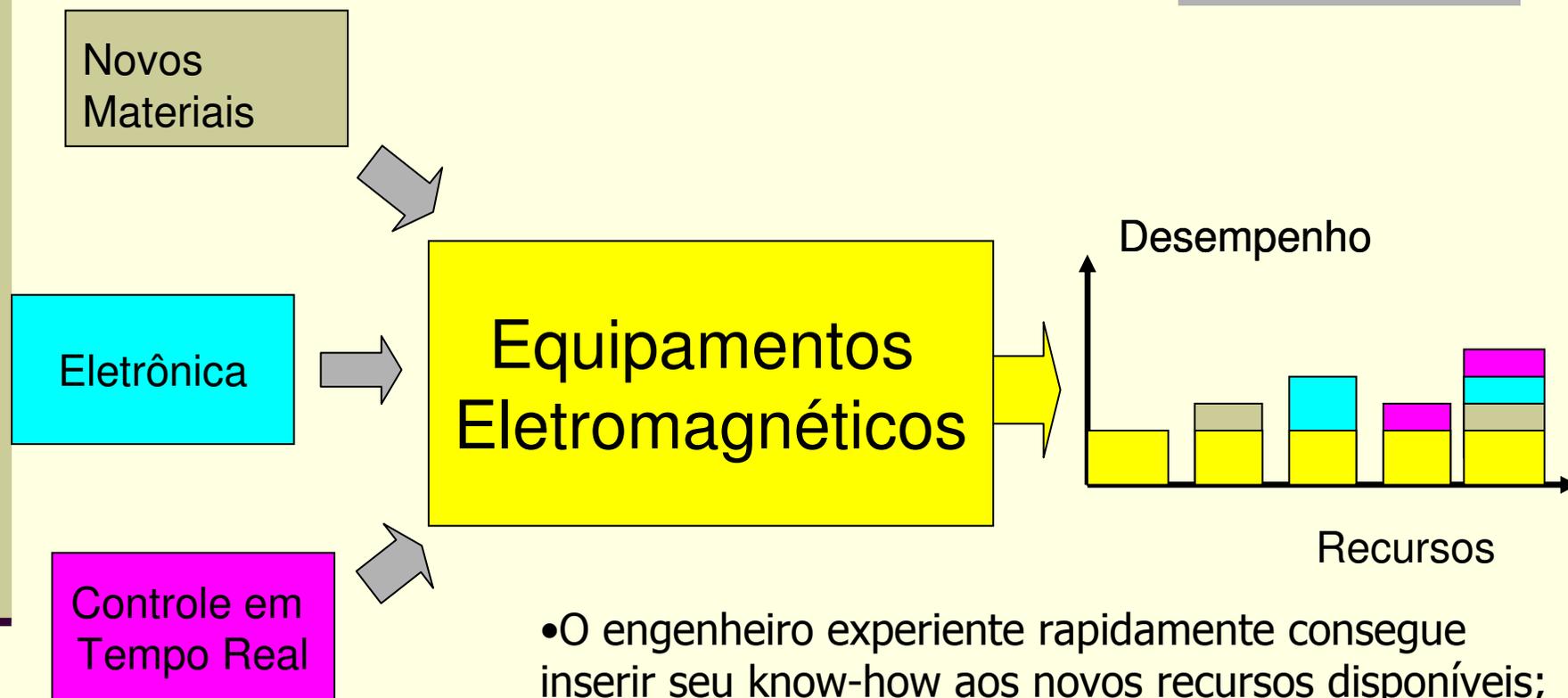


Otimização de Equipamentos Elétricos





O valor agregado da Otimização de Projetos de Equipamentos Eletromagnéticos



- O engenheiro experiente rapidamente consegue inserir seu know-how aos novos recursos disponíveis;
- O engenheiro debutante ganha aprendizado sobre a solução de problemas. Ele pode inclusive verificar a diferença entre soluções ditas tradicionais e aquelas obtidas com novos recursos.

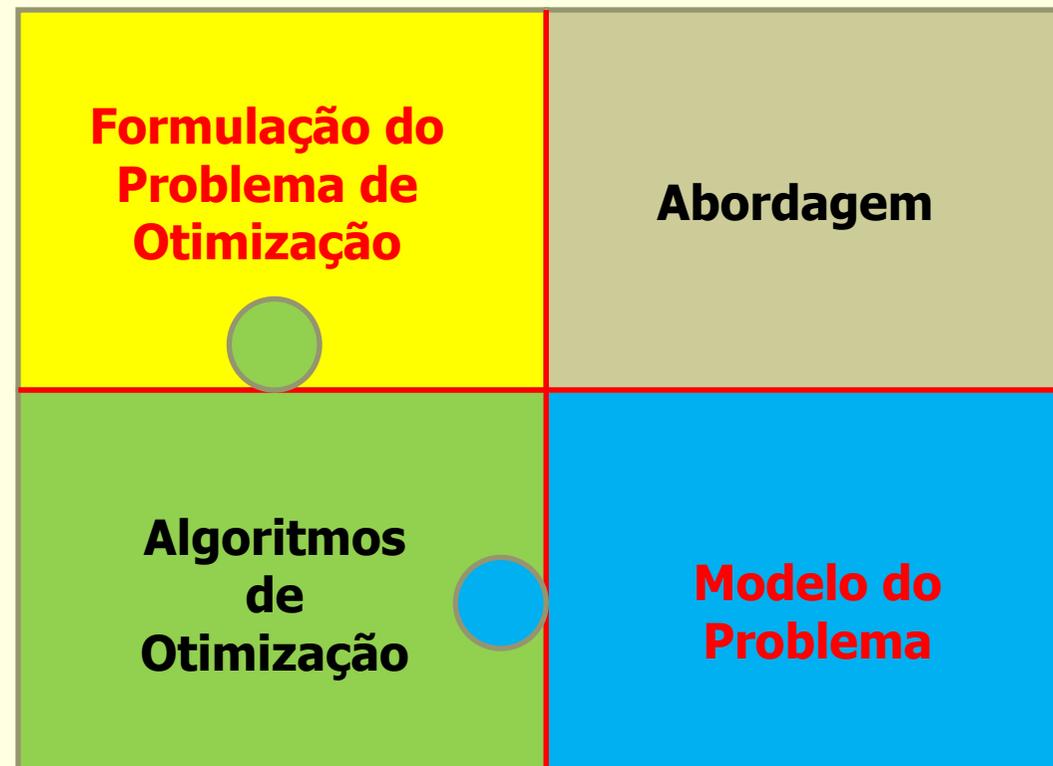


Projeto Ótimo de Equipamentos Eletromagnéticos

- É o balanço adequado entre quatro elementos:
 - Modelos que possam fornecer informações sobre os critérios de Projeto;
 - Algoritmos de otimização que possam maximizar ou minimizar esses critérios;
 - Formulações matemáticas nas quais se possam traduzir os problemas de projeto de equipamentos eletromagnéticos;
 - Abordagem para a resolução de problemas de projeto.



Visão Esquemática do Projeto Ótimo de Equipamentos Eletromagnéticos





Abordagem do Projeto

O Processo Sequencial



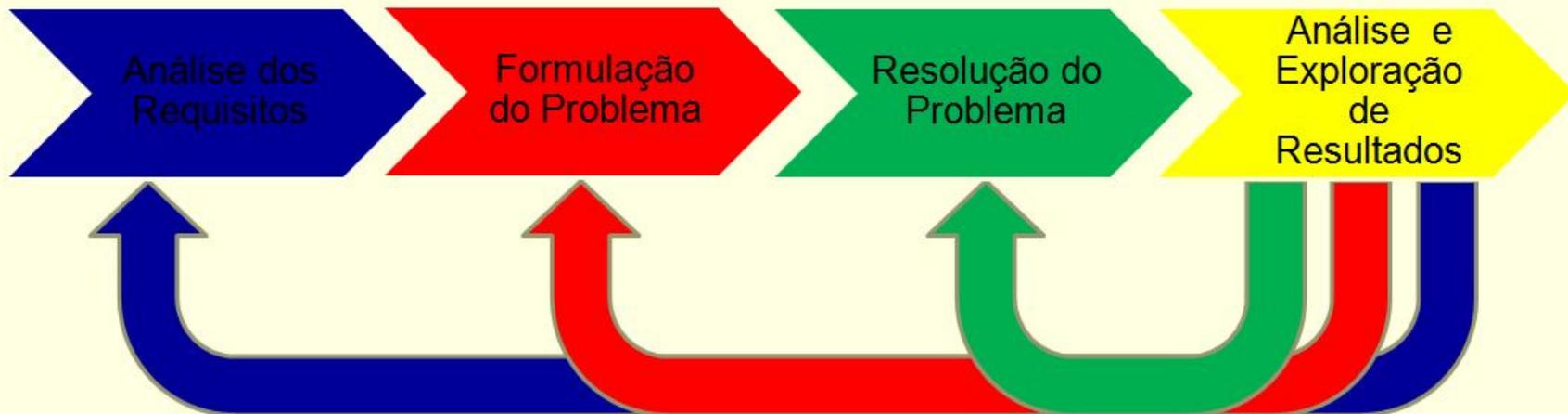


Abordagem do Projeto

O processo tem limitações observáveis somente ao final, quando da Análise e Exploração de Resultados.

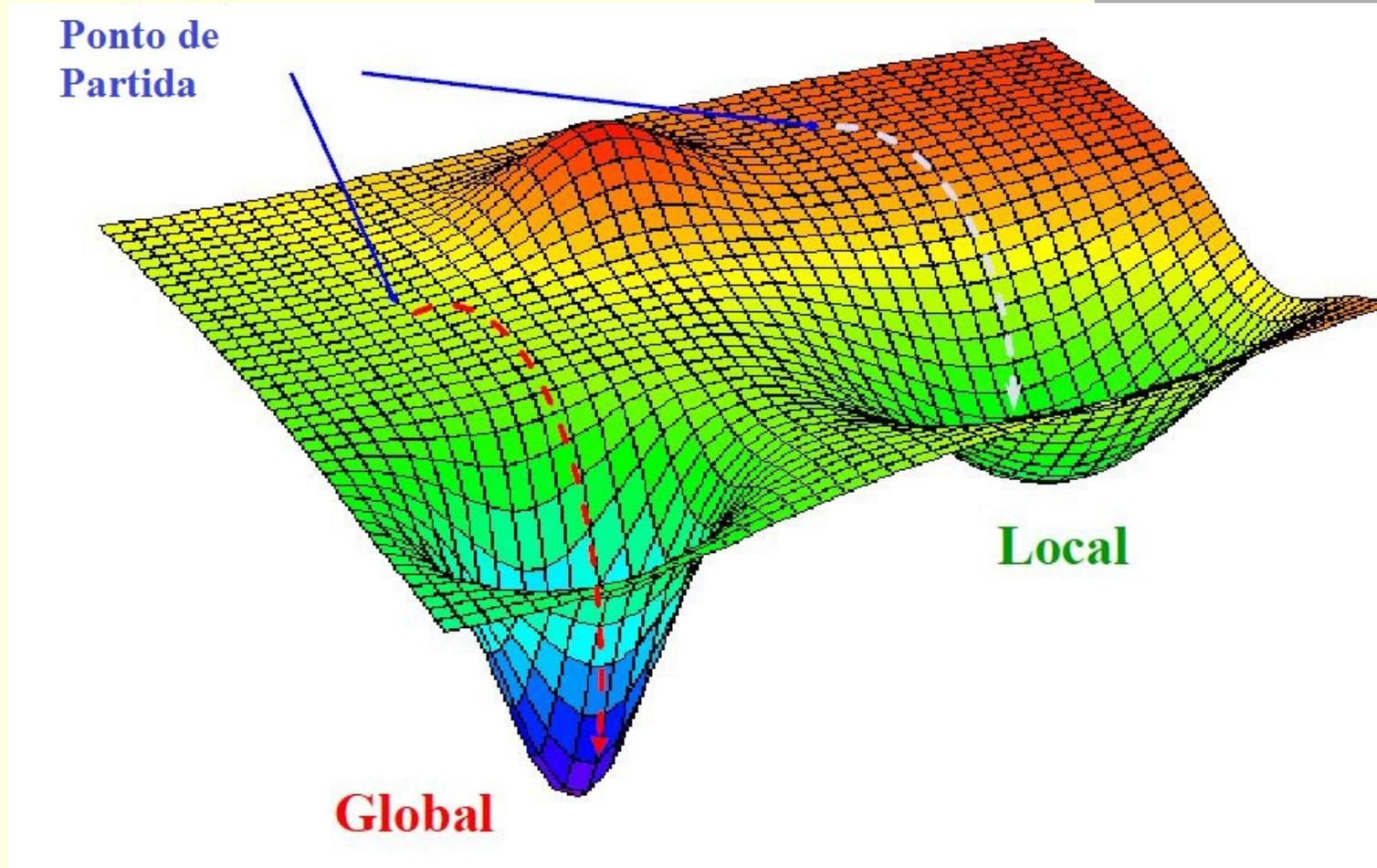
As razões são de várias categorias:

- Objetivos mal definidos, nenhuma solução possível ou ausência de restrições
 - Erro ou Imprecisão do Modelo
- Problemas de Convergência, Ótimo Local ou Ponto de Partida





Exemplificando...





O Papel do Projetista (I)

- **Problemas de Convergência, Ótimo Local ou Ponto de Partida**
 - Recomeçar a resolução do problema a partir de vários pontos ou
 - buscar um algoritmo de otimização mais adequado ao Problema.
- **Erro ou Imprecisão do Modelo**
 - Incrementar a qualidade do Modelo, mas levar em conta o custo computacional associado.
- **Objetivos mal definidos, nenhuma solução possível ou ausência de restrições**
 - O projetista deve relaxar as restrições para alcançar soluções factíveis ou
 - caso existam vários objetivos, então talvez seja mais prudente criar um cenário que permita uma escolha posterior dentre diversas soluções de alta qualidade.



O papel do projetista (II)

- Os modelos e os algoritmos não o substituem:
 - Retiram dele as tarefas tediosas;
 - Devem melhorar sua produtividade;
 - Potencialmente novas soluções para o problema podem ser encontradas.
- Ao projetista cabe:
 - A escolha de uma formulação adequada para o problema de otimização;
 - A escolha de um bom método de otimização;
 - A escolha de um bom modelo do problema físico.
- Ou seja:
 - O projeto ótimo somente existe após diversas escolhas por parte do projetista, que durante o processo pode perceber que alguns dos componentes não estão adequados.



Formulação do Problema de Otimização (I)

- Problema sem Restrições

$$\min f(x)$$

- $f(x) \rightarrow$ Massa, Campo Elétrico

- Variáveis Contínuas, Discretas e Mistas
 - Exemplos: Diâmetro Externo, Número de Ranhuras



Formulação do Problema de Otimização (II)

■ Problema **com Restrições**

$\min f(x)$

$$\text{submetido a } \begin{cases} x_L \leq x \leq x_U \\ g_i(x) \leq 0 & i = 1 \rightarrow m \\ h_j(x) = 0 & j = 1 \rightarrow n \end{cases}$$

- $f(x) \rightarrow$ Massa
- $g(x) \rightarrow$ Rendimento_{mínimo} ou Temperatura_{máxima}
- $h(x) \rightarrow$ Energia Magnética Armazenda = ...
...= Energia Magnética Armazenda_{prescrita}



Formulação do Problema de Otimização (III)

- Problemas a Múltiplos Objetivos
- São utilizados quando os objetivos são conflitantes

$$\min F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_p(x) \end{bmatrix}$$

$$\textit{submetido a} \begin{cases} x_L \leq x \leq x_U \\ g_i(x) \leq 0 & i = 1 \rightarrow m \\ h_j(x) = 0 & j = 1 \rightarrow n \end{cases}$$

- $f(x)$ → Flutuação do Torque, Torque Médio
- $g(x)$ → $\text{Rendimento}_{\text{mínimo}}$
- $h(x)$ → Energia Magnética Armazenda = ...
... = Energia Magnética Armazenda_{prescrita}

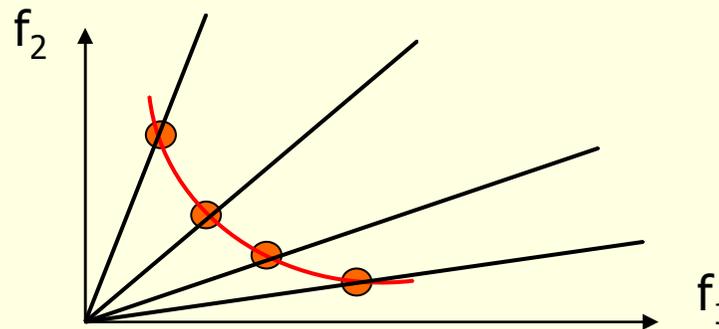


Formulação do Problema de Otimização (IV)

- Problemas a Múltiplos Objetivos
- a solução intuitiva consiste em utilizar de ponderações e resolver o problema vetorial com métodos escalares

$$\min F(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \\ \vdots \\ f_p(x) \end{bmatrix} \Rightarrow \min \{w_1 f_1(x) + w_2 f_2(x) + w_3 f_3(x) + \dots + (1 - w_3 - w_2 - w_1) f_p(x)\}$$

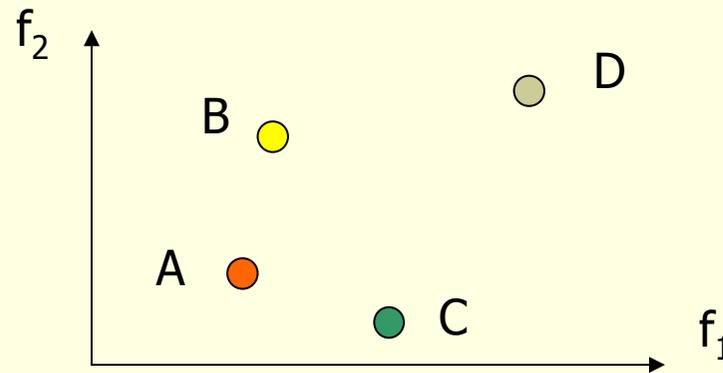
- Como encontrar w_i ? Importância dos requisitos?
- Em duas dimensões: (minimizar f_1 e f_2)





Formulação do Problema de Otimização (V)

- Critério de ótimo segundo Pareto
 - Minimização de f_1 e f_2



	Domina	É indiferente	Solução
A	B, D	C	Não-dominada
B	D	C	
C	D	A,B	Não-dominada
D	-----	-----	



Formulação do Problema de Otimização (VI)

- Transformação de um problema com restrições em um sem restrição → funções de penalidade

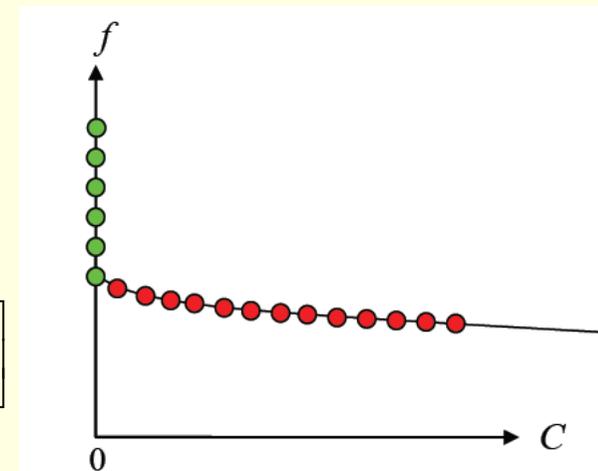
$$\min f(x)$$

$$\text{submetido a } \begin{cases} x_L \leq x \leq x_U \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{cases} \Rightarrow \min f(x) + \alpha \max(0, g(x)) + \beta \max(0, (h(x))^2)$$

- Transformação de um problema com restrições em um problema a múltiplos objetivos

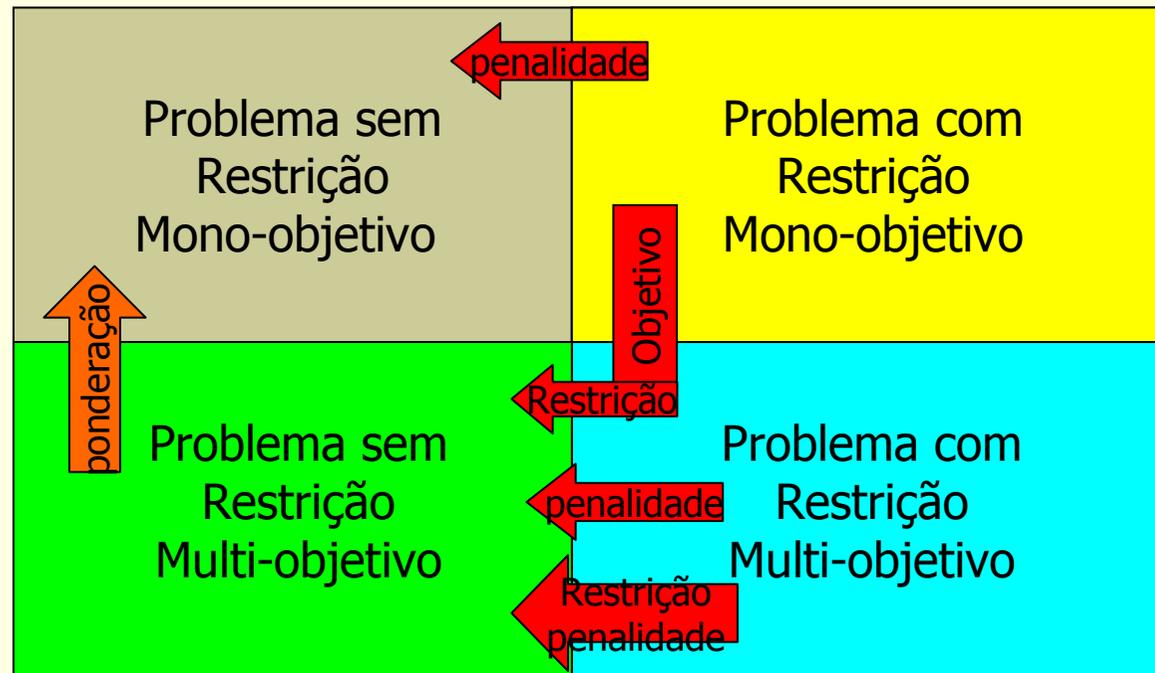
$$\min f(x)$$

$$\text{submetido a } \begin{cases} x_L \leq x \leq x_U \\ g(x) \leq 0 \\ h(x) = 0 \end{cases} \Rightarrow \min F(x) = \begin{bmatrix} f(x) \\ C(x) = \max(0, g(x)) + h(x) \end{bmatrix}$$





Transformações das Formulações de Problemas de Otimização

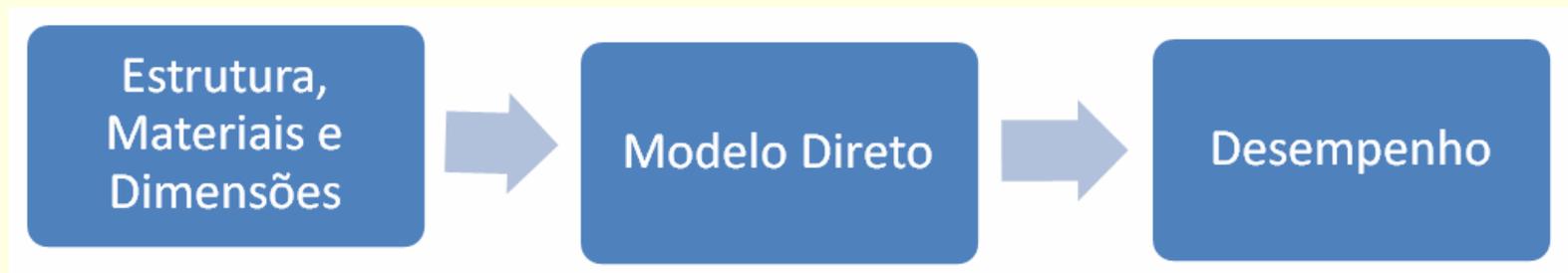




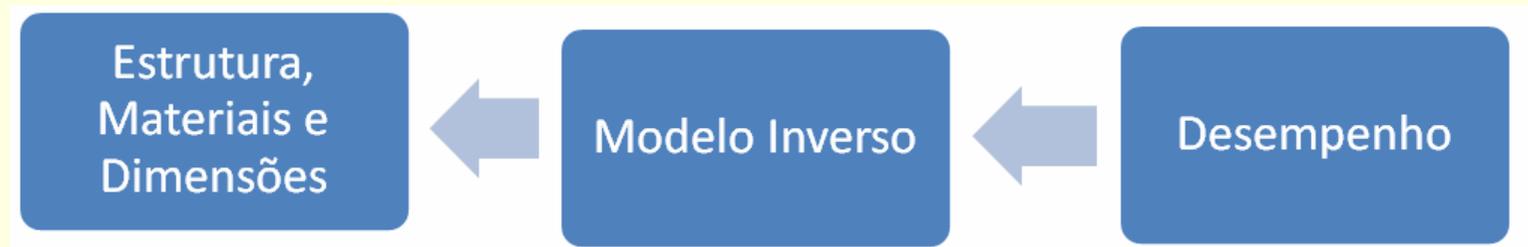
Modelos Utilizados em Projetos de Equipamentos Eletromagnéticos

- Orientação dos Modelos

- Modelo Direto → Análise



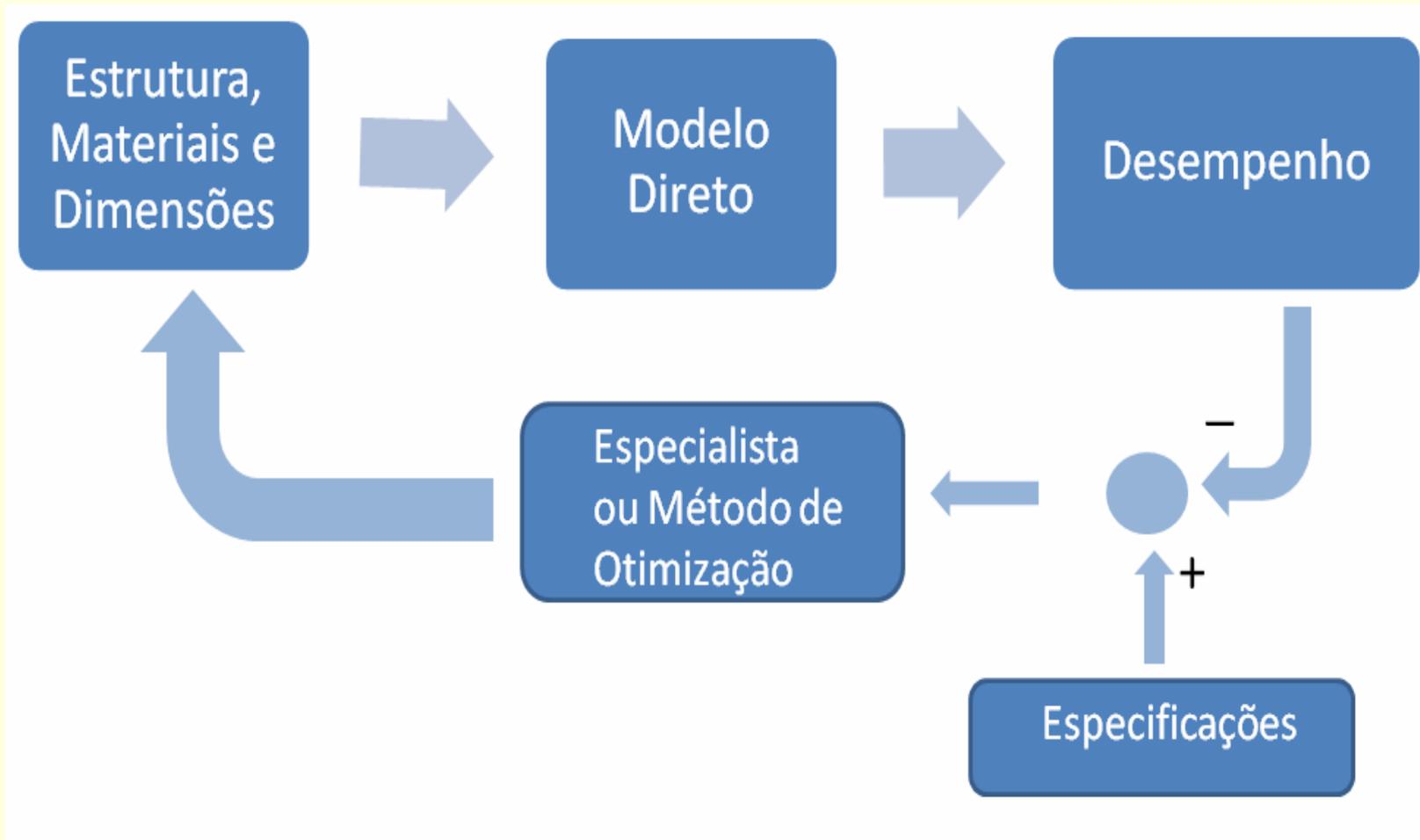
- Modelo Inverso → Síntese



- Por natureza é sub-determinado...



Pode-se fazer Síntese com um Modelo Direto?





Modelos Analíticos

Características Principais:

- Flexíveis;
- Podem ser utilizados na solução de Problemas Multidisciplinares (Elétrico, Magnético, Térmico, Mecânico);
- São Métodos Diretos e eventualmente Inversos;
- Não há qualquer ruído de natureza numérica;
- Mas qualquer extrapolação do Modelo é pouco evidente: tem-se diversas equações de natureza empírica;
- São extremamente eficientes na etapa de ante-projeto do equipamento, mas perdem esta característica quando do refinamento do projeto.



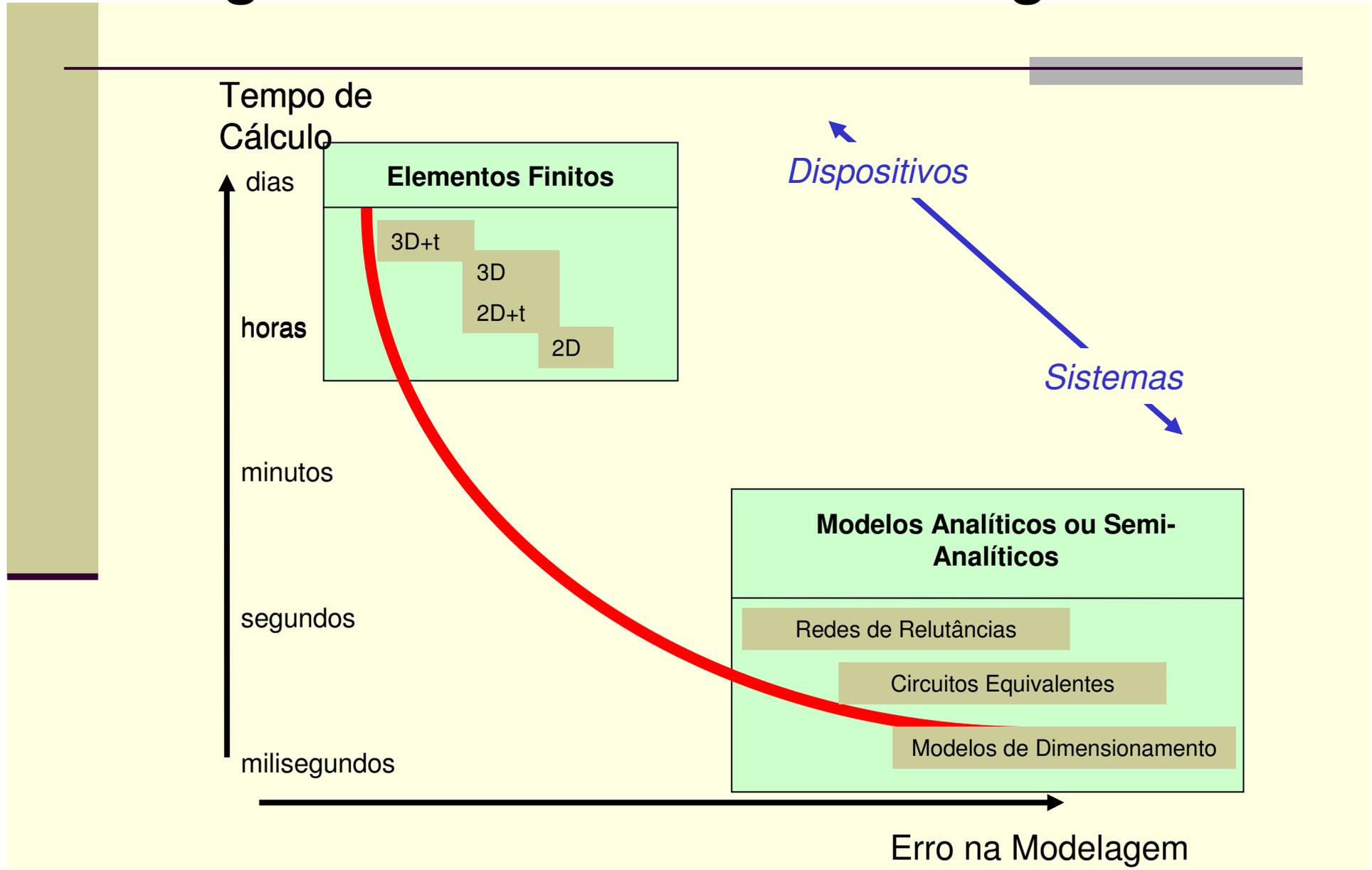
Modelos Numéricos

- Método dos Elementos Finitos;
- Métodos Integrais
 - Método dos Momentos
 - Método dos Elementos de Fronteira

- Características Gerais:
 - Precisos;
 - Podem ser utilizados na solução de Problemas Multidisciplinares → **Aumento de tempo computacional.**
 - São Métodos Diretos;
 - Melhoria no Modelo → **Aumento de tempo computacional**
 - Podem ter ruído numérico.
 - São pouco eficientes na etapa de ante-projeto do equipamento.
 - São extremamente eficazes no refinamento do projeto.



Alguns Modelos em Eletromagnetismo





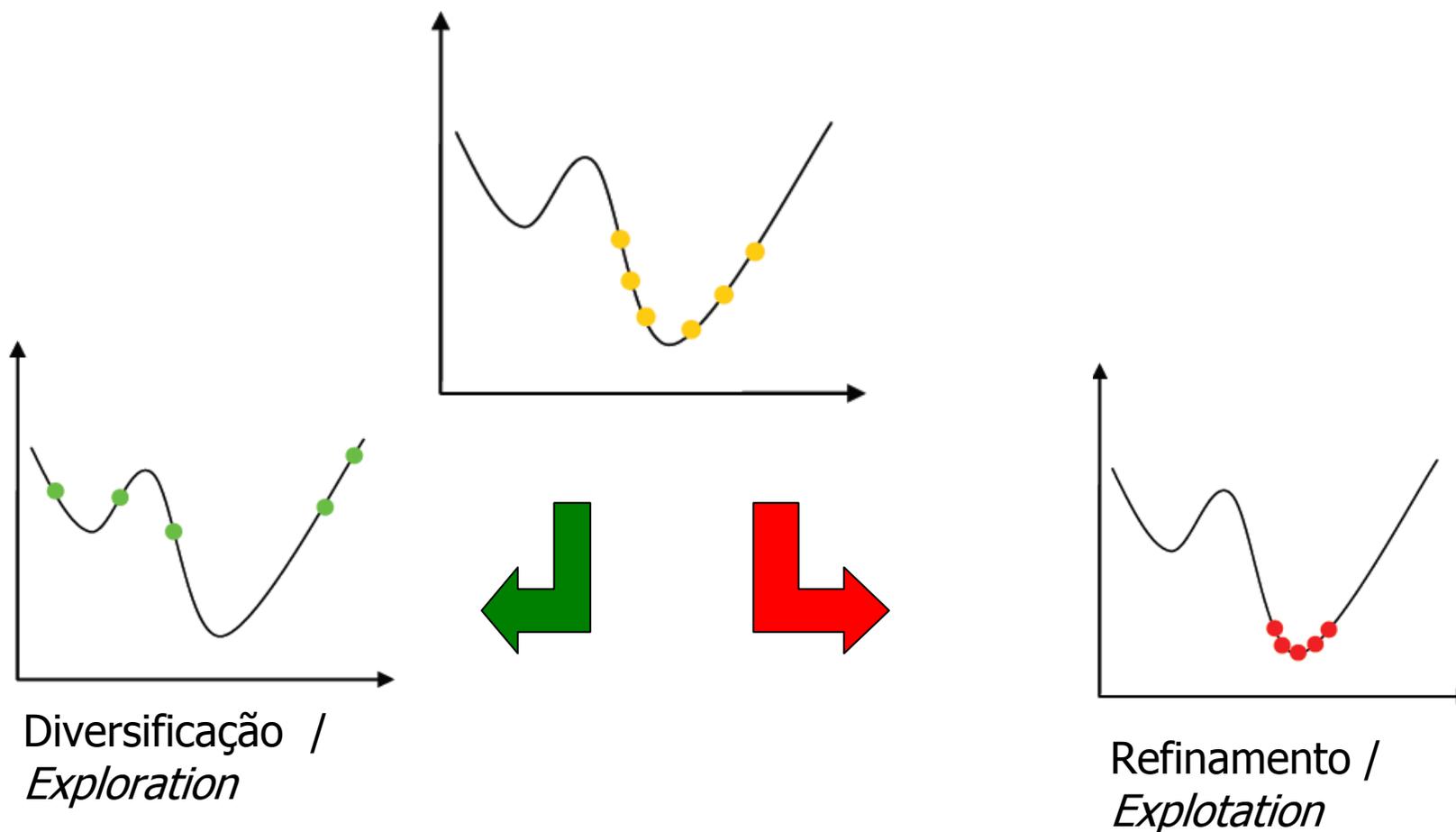
Algoritmos de Otimização

- O que é Otimizar?
 - *Otimizar é melhorar até onde pudermos. No ideal, melhorar até o máximo. Até aquela situação ideal na qual, como vulgarmente se diz, "se mexer mais, piora".*

Jocelyn Freitas Bennaton (04/2001)



Os Métodos de Otimização e suas formas de busca (ou suas formas de impor melhoria)



O bom método deve **Explorar** e **Refinar**



Uma Classificação Usual dos Métodos de Otimização

Determinísticos

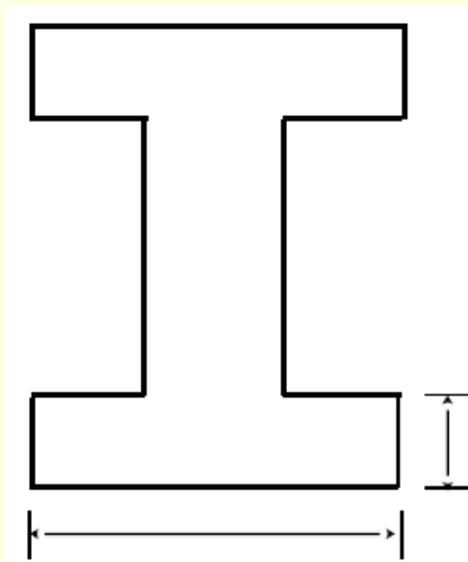
- Em geral, utilizam de derivadas (algoritmos de ordem 1);
- Número pequeno de avaliações da função objetivo;
- Podem se estagnar em mínimo local.
- Fazem uso apenas de mecanismo de busca de refinamento;
- Tem alta robustez: encontram sempre o mesmo valor se os parâmetros de controle e o ponto de partida não se alteram.

Estocásticos

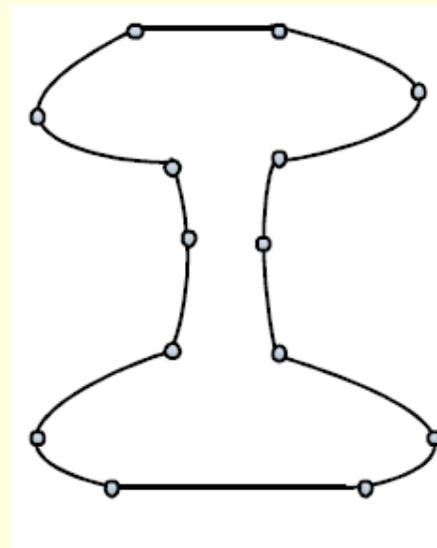
- Em geral, utilizam apenas o valor da função (“algoritmo de ordem 0”);
- Número elevado de avaliações da função objetivo;
- Possuem mecanismo de transição probabilísticos. Podem escapar de mínimos locais;
- Fazem uso tanto de mecanismos de busca de diversificação e de refinamento;
- Tem menor robustez quando comparados aos determinísticos: nem sempre encontram o mesmo valor mantidas as condições iniciais.



Classificação dos Métodos de Otimização no Contexto do Projeto



Otimização de Dimensões



Otimização de Forma



Otimização Topológica



Desafios da Otimização em Equipamentos Eletromagnéticos

- Não há um Método de Cálculo de Campo para todos os problemas: há um forte compromisso precisão-tempo;
- Raríssimas vezes será possível escrever de forma explícita a(s) função(ões) objetivo ou a(s) restrição(ões);
- Não há um Método de Otimização que supere os demais em um conjunto de problemas.



The Non-Free Lunch Theorem

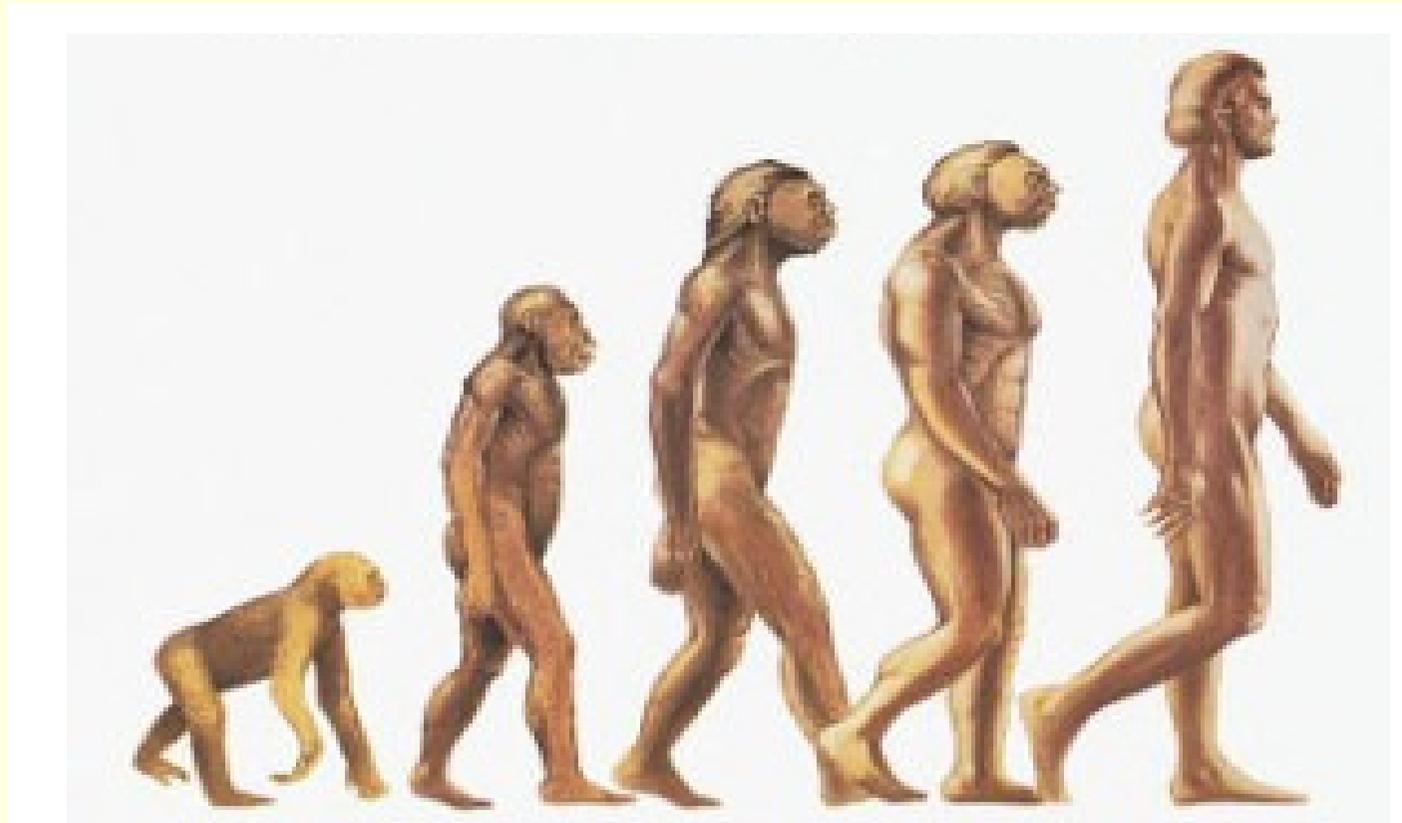


- O desempenho de dois algoritmos de otimização distintos em diferentes classes de problemas:
 - Um é altamente especializado (vermelho);
 - E o segundo é um algoritmo cujo uso é geral (azul).
- Mas o desempenho **médio** dos algoritmos é igual.

D.H.Wolpert; W.G. Macready; , "No free lunch theorems for optimization," IEEE Transactions on Evolutionary Computation"; vol.1, no.1, pp.67-82, Apr 1997



Progresso e Evolução



Evolução do Motor trifásico AEG – Relação Peso/Potência (motor trifásico de 4kW e 2 polos)
dado obtido junto a WEG SA



Algoritmos Evolucionários

- Algoritmos Genéticos
- *Particle Swarm Optimization*
- *Evolução Diferencial*

- *Em comum:*
 - *Trabalham com populações*
 - *São estocásticos*
 - *São bio-inspirados*
 - *A partir da formulação a um único objetivo pode-se alcançar a formulação a múltiplos objetivos através do conceito de Pareto otimalidade.*