

Calidad

Evaluación no destructiva y Calidad de Estructuras

Guillermo Rus

Universidad de Granada

2023



ugr

Universidad
de Granada

LABORATORIO
EVALUACIÓN NO DESTRUCTIVA

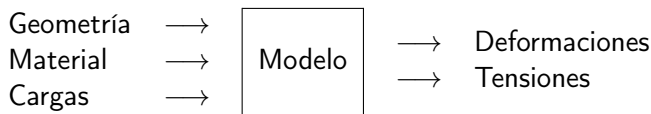


Índice

- 1 Diseño de calidad
 - Concepto de calidad
 - Diseño
 - Métodos
- 2 Optimización de estructuras
 - Optimalidad
 - Algoritmos de optimización
 - Sensibilidad e incertidumbre
- 3 Control de estructuras
 - Teoría de decisiones

Sistema estructural

Modelo:



Modos de fallo:

- Rotura $\sigma > \sigma^{ELU}$.
- Pandeo.
- Colapso plástico.
- Fatiga.
- Corrosión.
- Servicio $\delta > \delta^{ELS}$.

Tacoma Narrows

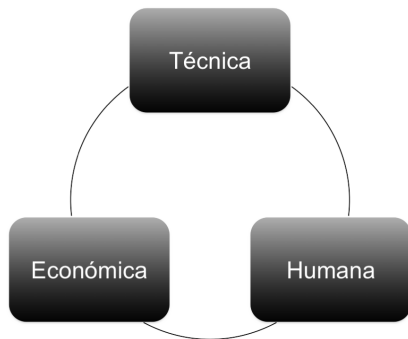
(loading...)

Concepto de calidad

Philip Crosby	Cumplimiento de requisitos
Joseph Juran	Adecuación al uso del cliente
Armand Feigenbaum	Satisfacción de las expectativas del cliente
Genichi Taguchi	Minimizar la perdida para la sociedad
William Deming	Satisfacción del cliente
Walter Shewhart	Interacción entre dimensión subjetiva (lo que el cliente quiere) y objetiva (lo que se ofrece)
ISO 9000	Grado en el que un conjunto de características inherentes cumple con los requisitos



Concepto de calidad



Criterios técnicos:

- No falla.
- Fiabilidad.
- Mantenibilidad.
- Servicio (vibraciones, flechas).
- Ambiental (huella de CO₂, impactos ambientales).

Diseño

Teorías de diseño:

- Modelo racional.
- Modelo centrado en la acción.

Métodos:

- Theory of Inventive Problem Solving (TIPS).
- Diseño axiomático.
- Método Taguchi.

Diseño: modelos top-down vs. bottom-up

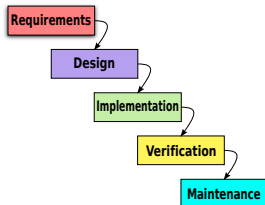
Top-down Se formula un resumen del sistema. Cada parte se refina diseñando con mayor detalle, hasta que la especificación completa valida el modelo. Ejemplo: École des Beaux-Arts (diseño comienza con un *parti*, plano general).

Bottom-up Las partes individuales se diseñan con detalle y luego se enlazan para formar componentes, hasta formar el sistema completo. Ejemplo: Bauhaus (traslada sistemas de pequeña escala a grande).



Teoría de diseño: modelo racional

- El ingeniero trata de optimizar el diseño a partir de un candidato, objetivo y restricciones
- el proceso de diseño está gobernado por un plan.
- el proceso se interpreta mediante etapas.



Ventajas: corrección de errores en etapas previas ahorra costes.
Inconvenientes: en la práctica es difícil separar entre etapas. A veces conviene la retroalimentación. Los objetivos pueden modificarse conforme se visualizan prototipos.

Teoría de diseño: modelo centrado en la acción

- El ingeniero usa la **creatividad** para generar diseños candidatos.
- El proceso de diseño se improvisa.
- Las etapas "Análisis - Diseño - Implementación" están mezcladas.

Esquema "Reflexión en acción":

- Conceptualizar
- Hacer un movimiento
- Evaluar el movimiento

Esquema:

- Sensemaking (conciencia situacional)
- Coevolution
- Implementation

Diseño: teoría C-K (A. Hatchuel, 1996)

Introduce el concepto como punto de partida del diseño, además del conocimiento del ingeniero. Conceptos:

- K Espacio de conocimiento, definido como conjunto de proposiciones con estatus lógico.
- C Espacio de conceptos, proposiciones sin estatus lógico ($\in K$).

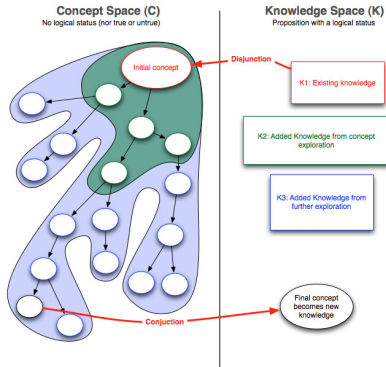
Explica la invención y el descubrimiento en el mismo marco teórico del diseño.

Shai, O; Reich, Y; Hatchuel, A; and Subrahmanian, E. (2009) Creativity Theories and Scientific Discovery: a Study of C-K Theory and Infused Design., International Conference on Engineering Design, ICED'09, 24-27 August 2009, Stanford CA.

Diseño: teoría C-K (A. Hatchuel, 1996)

Operadores:

- $K \rightarrow C$ Disjunción:
el concepto se
particiona a partir de
proposiciones de K .
- $C \rightarrow C$ Expansión:
creación de nuevos
conceptos en C .
- $C \rightarrow K$ Conjunción,
que puede provocar
la expansión de K :
- $K \rightarrow K$ Expansión de
 K , descubrimiento de
nuevo conocimiento lógico.



Teoría de diseño: creatividad

Proceso según Graham Wallas, 1926:

- Preparación** preparatorio sobre un problema en el cual se enfoca la mente y explora sus dimensiones.
- Incubación** el problema es interiorizado en el hemisferio derecho y parece que nada pasa externamente.
- Intimación** la persona creativa "presiente" que una solución esta próxima. En muchas publicaciones, el modelo de Wallas es modificado a cuatro etapas, donde "intimación" es visto como una sub-etapa.
- Iluminación** cuando la idea creativa salta del procesamiento interior al consciente.
- Verificación** cuando la idea es conscientemente verificada, elaborada y luego aplicada.

Diseño: simplicidad

- KISS: Keep it simple stupid (Kelly Johnson: Lockheed U-2)
- Cuchilla de Occam: "lex parsimoniae", cuando dos teorías tienen las mismas consecuencias, la teoría más simple tiene más probabilidades de ser la correcta.
- Albert Einstein: "everything should be made as simple as possible, but no simpler"
- Leonardo Da Vinci: "Simplicity is the ultimate sophistication"
- Antoine de Saint Exupéry "It seems that perfection is reached not when there is nothing left to add, but when there is nothing left to take away"

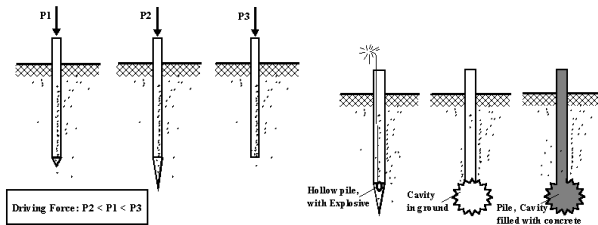
All human activities must be first properly planned and then executed

Prof. Gunnar Sohlenius

Métodos: Theory of Inventive Problem Solving (TIPS)

- La evolución en ingeniería no es aleatoria; sigue leyes objetivas.
- La tradición y la visión de túnel obstaculizan el desarrollo.
- Necesitamos apoyos para pensar distinto: no un conjunto de soluciones, sino de principios fundamentales.

Ejemplo: diseño de un pilote de cimentación.

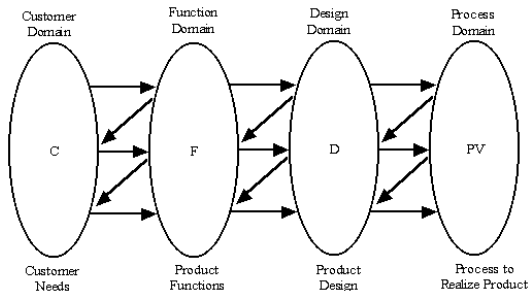


Aportaciones TIPS: (1) la visión túnel obstaculiza la alternativa del explosivo, (2) clarificar función última: fácil de hincar + estable tras instalación. (3) la contradicción es una oportunidad de invención.

Métodos: diseño axiomático (Suh, 1980)

Transforma mediante matrices las necesidades de usuario en requisitos funcionales (Dr. Nam P. Suh, 1990).

- 1 El diseño se mapea en cuatro dominios: Cliente - Función - Diseño - Proceso. Se descompone en un árbol, por niveles. Cada rama depende de DP (parámetros de diseño), FR (requisitos funcionales) y PV (variables de proceso).



Product Design (source: Nam P. Suh)

Métodos: diseño axiomático (Suh, 1980)

- 2 Los FR son el mínimo número de parámetros que responden a la pregunta "¿cómo satisfacer al cliente?". Han de ser cuantificados con una tolerancia.
- 3 La pregunta "¿cómo?" relaciona $FR \rightarrow DP \rightarrow PV$, y la pregunta "¿porqué?" relaciona $FR \leftarrow DP \leftarrow PV$.
- 4 Según la selección de DP, los FR pueden ser independientes (matriz diagonal), desacoplado (matriz triangular) o acoplado (requiere cálculo iterativo). Los acoplamientos se visualizan en la matrix de diseño (FR-DP):

$$\Delta FR_i = \frac{dFR_i}{dDP_j} \Delta DP_j$$

Axioma 1: "Mantener independencia entre FR". Existe la misma relación entre DP y PV.

Métodos: diseño axiomático (Suh, 1980)

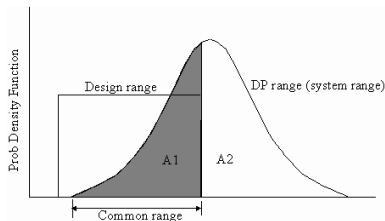
- 5 Un diseño definido por DP tiene cierta probabilidad P de éxito en cumplir FR con tolerancia dada. Axioma 2: "Minimizar contenido de información". Contenido de información

$$I = \log\left(\frac{1}{P}\right).$$

Cálculo de P : supongamos un problema con una FR y una DP. Llamamos rango de diseño a las soluciones admisibles de FR.

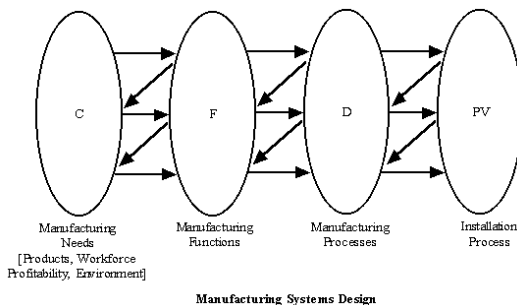
$P = \frac{A1}{A1+A2}$. Si la distribución de DP es uniforme,

$P = \frac{\text{tolerancia}}{\text{rango}}$. Si hay varias DP independientes, $P = \prod P_i$.



Métodos: diseño axiomático (Suh, 1980)

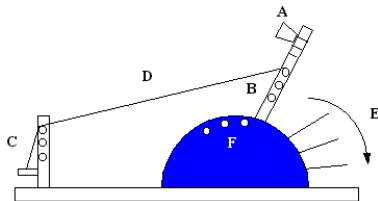
- 6 Cada nivel en el árbol FR está controlado por el nivel superior en el árbol DP. Idem entre DP y PV. Por tanto es necesario un movimiento zig-zag para diseñar los árboles de diseño.



- The Principles of design, Suh, N.P., Oxford Univ Press.
- Axiomatic Design – A Brief Introduction, Kaiser, J.
- Axiomatic Design of Manufacturing Systems, Cochran, D.S., Reynal, V.A.

Métodos: diseño axiomático - ejemplo

Problema: diseñar una catapulta que alcance cierto objetivo.



Parámetros de diseño DP:

- A Posición de copa (controla el brazo de lanzamiento).
- B Punto de anclaje de la goma (controla la energía).
- C Número de gomas.
- D Elasticidad de la goma
- E Punto de anclaje del brazo.
- F Ángulo de retroceso.

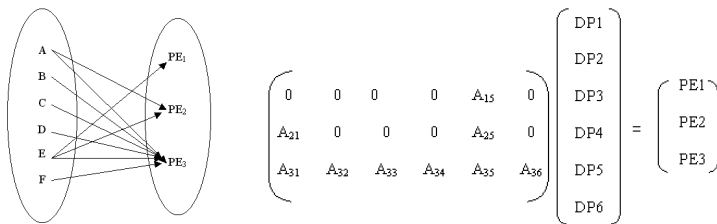
Métodos: diseño axiomático - ejemplo

Requisitos funcionales FR (efectos físicos PE):

PE₁ Ángulo.

PE₂ Altura.

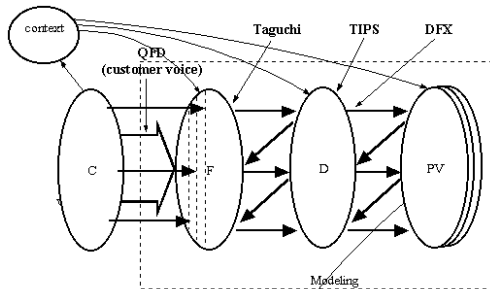
PE₃ Velocidad.



Reto: redefinir diseño para reducir acoplamiento (pista: altura de la catapulta).

Métodos: Taguchi, 1950

- 1 Factores:
señal (SF), respuesta (RF), influenciados
por control (CF) y ruido (noise, NF).

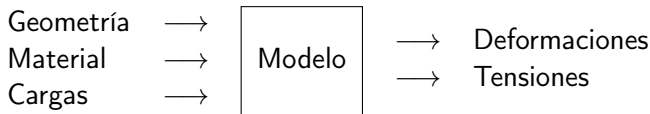


Primera diferencia con Axiomático:

Taguchi introduce el **Quality Function Deployment**
para captar la percepción del cliente como requisitos.

Métodos: Taguchi, 1950

Ejercicio: identificar abajo los Factores: señal (SF), respuesta (RF), influenciados por control (CF) y ruido (noise, NF).

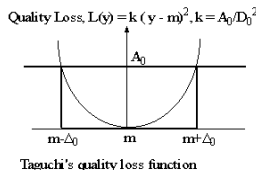
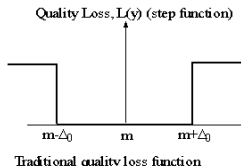


Criterios técnicos de calidad estructural:

- No falla.
- Fiabilidad.
- Mantenibilidad.
- Servicio (vibraciones, flechas).
- Ambiental (huella de CO₂, impactos ambientales).

Métodos: Taguchi, 1950

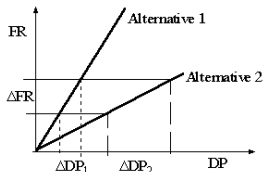
- 2 El ideal de robustez consiste en que RF cumpla los requisitos en función de SF, controlados por CF e independientes de NF.
- 3 La robustez se incrementa eligiendo valores para SF y CF (diseño paramétrico) tales que RF no se desvíe de la tolerancia.
- 4 Función de pérdida de calidad (quality **loss function**):
cuantifica la desviación de RF (diseño por tolerancia).



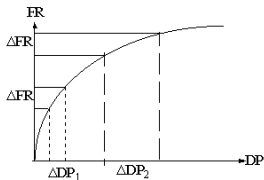
Ejemplo de Loss Function cuadrática para caso de objetivo mínima variabilidad (por su simetría y correlación con la varianza). Si el objetivo es maximizar o minimizar, la Loss Function será una curva monótonica.

Métodos: Taguchi, 1950

- 5 Coste = coste principal (CF) + función pérdida de calidad (NF).



Obsérvese que la alternativa 2 facilita el diseño, al permitir mayor rango de DP.



Métodos: Taguchi, 1950

- ⑥ Para encontrar las relaciones $SF \leftrightarrow RF \leftrightarrow CF$ se evalúan modelos computacionales, prototipos o estructuras reales. Para reducir su número, es necesario que revelen relaciones independientes, para lo que se diseñan matrices ortogonales de ensayos (innovación en **diseño experimental**).

Sohlenius, G. "The Manufacturing System - Our Motor of Welfare", KTH (2000).

Tragedia de los comunes

Taguchi propuso incluir el coste para la sociedad en la optimización.



Supuesto problema que se popularizó a partir de un dilema descrito por Garret Hardin (Science, 1968). Varios individuos motivados solo por el interés personal, actuando independiente pero racionalmente, terminan por destruir un recurso compartido limitado (el común) aun cuando claramente no es en el interés de ellos (ya sea como individuos o en conjunto) que tal destrucción suceda.

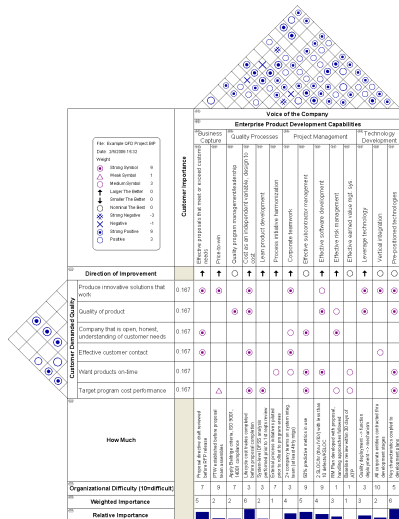
Métodos: Taguchi, 1950

Quality function deployment (QFD)

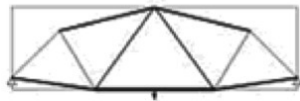
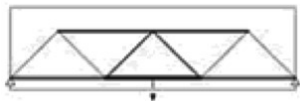
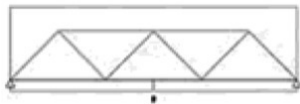
Transforma: demanda de usuario
⇒ calidad de diseño ⇒ funciones formadoras de calidad ⇒ componentes (Dr. Yoji Akao, 1966).

Relacionado con la gestión por objetivos (MBO).

Ejemplo: House of Quality



Optimización

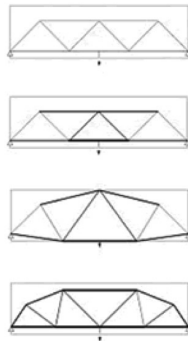


Variables de diseño

Optimization of:

- **member cross-section**
(size and section profile)
- **shape**
(nodal positioning, surfaces, curves and lines that define structural form).
- **topology**
(placement of members and material)
- *plan layout, load carrying system etc.*

Increased Generality
↓



↑
Refinement in Design Process
Increased ease of formulation

Criterio de optimalidad

Objetivo: aprovechar del mejor modo los recursos naturales y humanos disponibles.

Criterio de optimalidad: minimizar el coste. El coste de una estructura es una compleja interacción entre el coste de los materiales básicos con el coste de su manipulación, montaje y gestión. Habitualmente se puede simplificar a:

$$C = c_1 + c_2 P$$

C Coste.

P Pesto de material.

c_1 Coste fijo.

c_2 Coste variable unitario.

Función objetivo: es la formulación del criterio de optimalidad. Habitualmente es un coste. Nótese que puede ser equivalente a minimizar el peso.

Formulación del problema

Supongamos que la estructura depende de unos parámetros de diseño x_i , y que la función objetivo es f . El problema de minimización no lineal con restricciones se puede formular como:

Optimización

$$\begin{array}{ll} \min_{x_i} & f(x_i) \\ \text{sujeto a} & g_j(x_i) \leq 0, \quad h_k(x_i) = 0 \end{array}$$

x parámetros de diseño x_i ($i = 1, \dots, n$).

f función objetivo a ser minimizada $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$.

g restricciones de desigualdad $g_j(x)$ ($j = 1, \dots, m$).

h restricciones de igualdad $h_k(x)$ ($k = 1, \dots, l$).

Formulación del problema

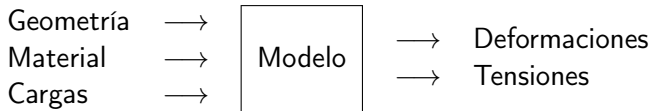
Preguntas previas:

- ¿Es posible cumplir las restricciones?
- ¿Existe un óptimo? Th. Weierstrass.
- ¿Cómo encontrarlo? Th. Fermat de puntos estacionarios.
Condiciones de Karun-Kuhn-Tucker.

Ejemplo

Ejercicio: identificar abajo x , f , g , h .

$$\begin{array}{ll} \min_{x_i} & f(x_i) \\ \text{sujeto a} & g_j(x_i) \leq 0, \quad h_k(x_i) = 0 \end{array}$$

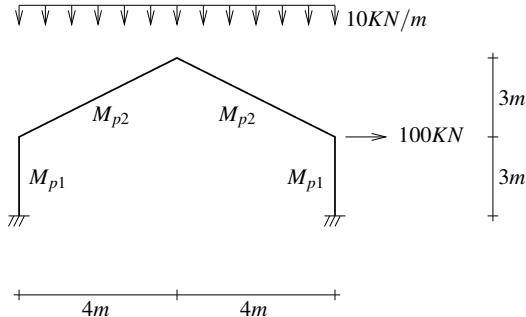


Criterios técnicos de calidad estructural:

- No falla.
- Fiabilidad.
- Mantenibilidad.
- Servicio (vibraciones, flechas).
- Ambiental (huella de CO₂, impactos ambientales).

Ejemplo

¿Qué secciones de barras del siguiente pórtico minimizan su coste ante criterio de colapso plástico?



Ejemplo

Criterio de optimalidad:

El coste total C es la suma del fijo y del proporcional al peso P de acero $C = c_1 P + c_2$. El peso total P es la suma del de cada barra $P = \sum_b \rho L_b A_b$, y el área A_b de una sección es aproximadamente linealmente proporcional a su momento plástico $A = c_3 M_{pb} + c_4$. Sustituyendo,

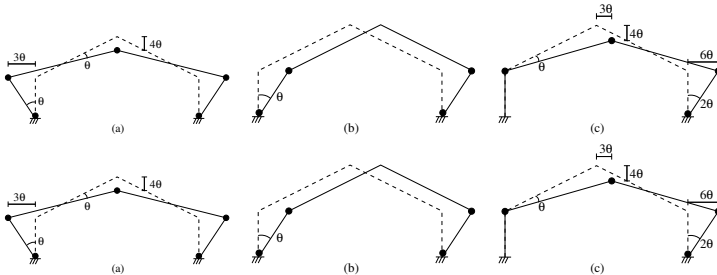
$$C = c_5 \sum_b M_{pb} L_b + c_6 \sum_b L_b + c_2$$

Puesto que las variables para optimizar C son $M_{pb} = \{M_{p1}, M_{p2}\}$ (simétrica), y el resto es constante, minimizar C equivale a minimizar Z ,

$$Z = \sum_b M_{pb} L_b = 6M_{p1} + 10M_{p2}$$

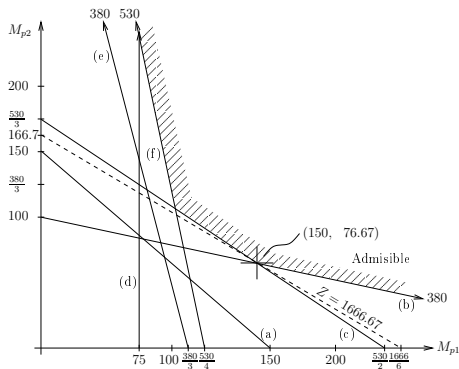
Ejemplo

Recordando cálculo plástico de pórticos, es necesario comprobar para todos los posibles mecanismos de colapso (modos de fallo i) que los momentos flectores en rótulas plásticas M_b no alcanzan M_{pb} . Se puede determinar que existen $i = 1 \dots 6$ mecanismos de colapso, que dan 6 ecuaciones de equilibrio entre cargas y M_b .



Ejemplo

La exigencia $M_b \leq M_{pb}$ las convierte en 6 desigualdades (semiespacios del espacio de soluciones $\{M_{p1}, M_{p2}\}$).



La intersección de las desigualdades (rayado) es el subconjunto de soluciones seguras, y la de menor Z la óptima.

Algoritmos de optimización

Clasificación:

- 1 objetivo f :

Restricciones	Gradiente	Aleatorio
Sin	E observación - Newton - Levenberg-Marquardt - BFGS	Simulated Annealing - Particle Swarm - Tabu
Con	Linear - Quadratic - Nonlinear programming	Algoritmos Genéticos

- multiobjetivo f_i :

	VEGA NSGA-II	-
--	-----------------	---

Optimización multiobjetivo

Se basa en criterios de utilidad: si algo genera o produce provecho, comodidad, fruto o interés sin perjudicar a otro, provocará un proceso natural de optimización hasta alcanzar el punto óptimo.



Eficiencia de Pareto

Situación en la cual se cumple que no es posible beneficiar a más f_i de un sistema sin perjudicar a otros f_j .

Óptimo = Conjunto = Frente de Pareto

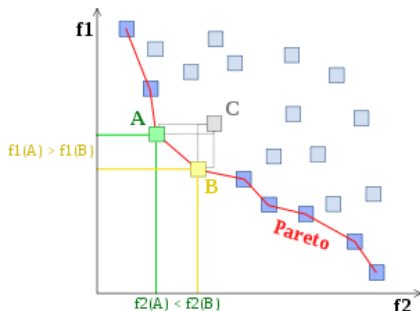
Optimización multiobjetivo

Dominancia de Pareto:

Un vector $\mathbf{u} = (u_1, \dots, u_k)$ domina a otro vector $\mathbf{v} = (v_1, \dots, v_k)$ si y sólo si: $\forall i \in \{1, \dots, k\}, u_i \leq v_i$ y $\exists i_0 \in \{1, \dots, k\} \mid u_{i_0} < v_{i_0}$

Optimalidad de Pareto:

Una solución \mathbf{x}^* es Pareto-óptima si y sólo si no existe otro vector \mathbf{x} tal que $\mathbf{v} = f(\mathbf{x}) = (v_1, \dots, v_k)$ domine a $\mathbf{u} = f(\mathbf{x}^*) = (u_1, \dots, u_k)$

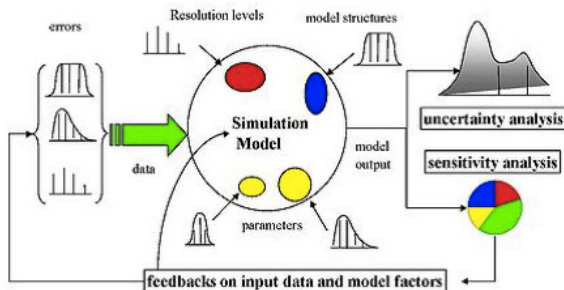


Ejemplo

Tenemos que elegir una tipología de estructura, y una calidad de acero. Cada combinación tiene un precio distinto. Posibilidades:

- 1) Tenemos dinero de sobra. Solución: elegimos la tipología y el acero de mayor calidad sin tener en cuenta el precio. En este caso estaríamos ante dos problemas mono-objetivo, es decir, el objetivo único es encontrar la tipología / acero de más prestaciones.
- 2) Tenemos un presupuesto ajustado. Estamos ante un problema multi-objetivo (1: precio, 2: calidad (coeficiente de seguridad) de la tipología, 3: calidad del acero). Se dice que la combinación tipología+acero 1 es una solución pareto-óptima cuando no existe otra combinación tipología+acero 2, tal que tenga un mejor precio que la 1 y además ofrezca mayor calidad en tipología o en acero. No hay una sola combinación tipología+acero óptima: interesa disponer, de varias, para tomar decisiones entre todas las soluciones pareto-óptimas posibles.

Análisis de sensibilidades (SA) e incertidumbre (UA)

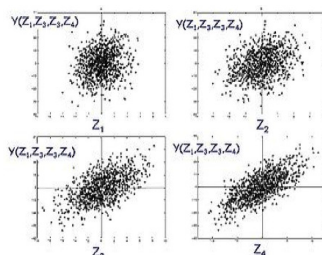


- Análisis de sensibilidades = Calcular cuánto afecta a CDF(RF) la incertidumbre en NF, CF.
- Análisis de incertidumbres = Calcular CDF(RF) conocido CDF(NF), CDF(CF).

Análisis de sensibilidades (SA) e incertidumbre (UA)

Algoritmos:

- Locales: calcular $\frac{\partial RF}{\partial NF, CF}$, analíticamente o por diferencias finitas $\frac{\partial RF}{\partial XF_i} \approx \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{RF(XF_i + \varepsilon) - RF(XF_i)}{\varepsilon}$
- Global: analíticamente o por Montecarlo (1: generar conjunto muestras $XF_i \sim CDF(XF)$; 2: calcular conjunto $RF_i = RF(XF_i)$; 3: aproximar $CDF(RF_i)$ mediante histograma o momentos).



Emisión acústica inalámbrica

(loading...)

Teoría de decisiones bayesiana

Probabilidad = grado de certidumbre. Riesgo \equiv incertidumbre.

Principios:

- 1 Coherencia. Ejemplo: no sería coherente que $P(\text{colapsa})=0.5$ y $P(\text{no colapsa})=0.6$.
- 2 Completo. Asignamos probabilidades a todas las proposiciones.
- 3 La información adicional se incorpora mediante probabilidad condicional $P(A|B)$. Ejemplo: $A=\text{colapsa}$; $B=\text{detecto daño}$.

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

- 4 Objetivo: elegir la opción de máxima esperanza de utilidad.

Algoritmo numérico habitual: Metrópolis-Hastings.

Teoría de decisiones bayesiana - Ejemplo

Pregunta: ¿estudio o no estudio para el examen?

Utilidad asignada: aprobar=10, estudiar=-5. Matriz de decisiones (Pugh):

	Aprueba	Suspende
Estudia	$10-5=5$	-5
No estudia	10	0

Paradoja: siempre será más útil no estudiar ($10 > 5$; $0 > -5$).

Solución bayesiana: falta incorporar la información de que estudiar E aumenta la probabilidad de aprobar $P(A|E)$ (Maximización de la utilidad esperada condicionada, MCEU).

$$\text{Utilidad} = \begin{cases} 5P(A|E) - 5P(\bar{A}|E) & \text{Estudia} \\ 10P(A|\bar{E}) & \text{No estudia} \end{cases}$$

$$P(\bar{A}|E) = 1 - P(A|E), U(E) > U(\bar{E}) \Leftrightarrow P(A|E) - P(A|\bar{E}) > 0.5.$$

Teoría de decisiones bayesiana - Ejemplo

Pregunta: ¿intervenir (reforzar) o no intervenir?

Utilidad asignada: no resiste=-10, intervenir=-1.

	Resiste	No resiste
Intervenir	-1	-10-1=-11
No intervenir	0	-10

Paradoja: siempre será más útil no intervenir ($0 > -1$; $-10 > -11$).

Solución bayesiana: falta incorporar la información de que intervenir I aumenta la probabilidad de resistir $P(R|I)$ (Maximización de la utilidad esperada condicionada, MCEU).

$$\text{Utilidad} = \begin{cases} -1P(R|I) - 11P(\bar{R}|I) & \text{Intervenir} \\ -10P(\bar{R}|\bar{I}) & \text{No intervenir} \end{cases}$$

$$U(I) > U(\bar{I}) \Leftrightarrow P(R|I) - P(R|\bar{I}) > 0.1.$$