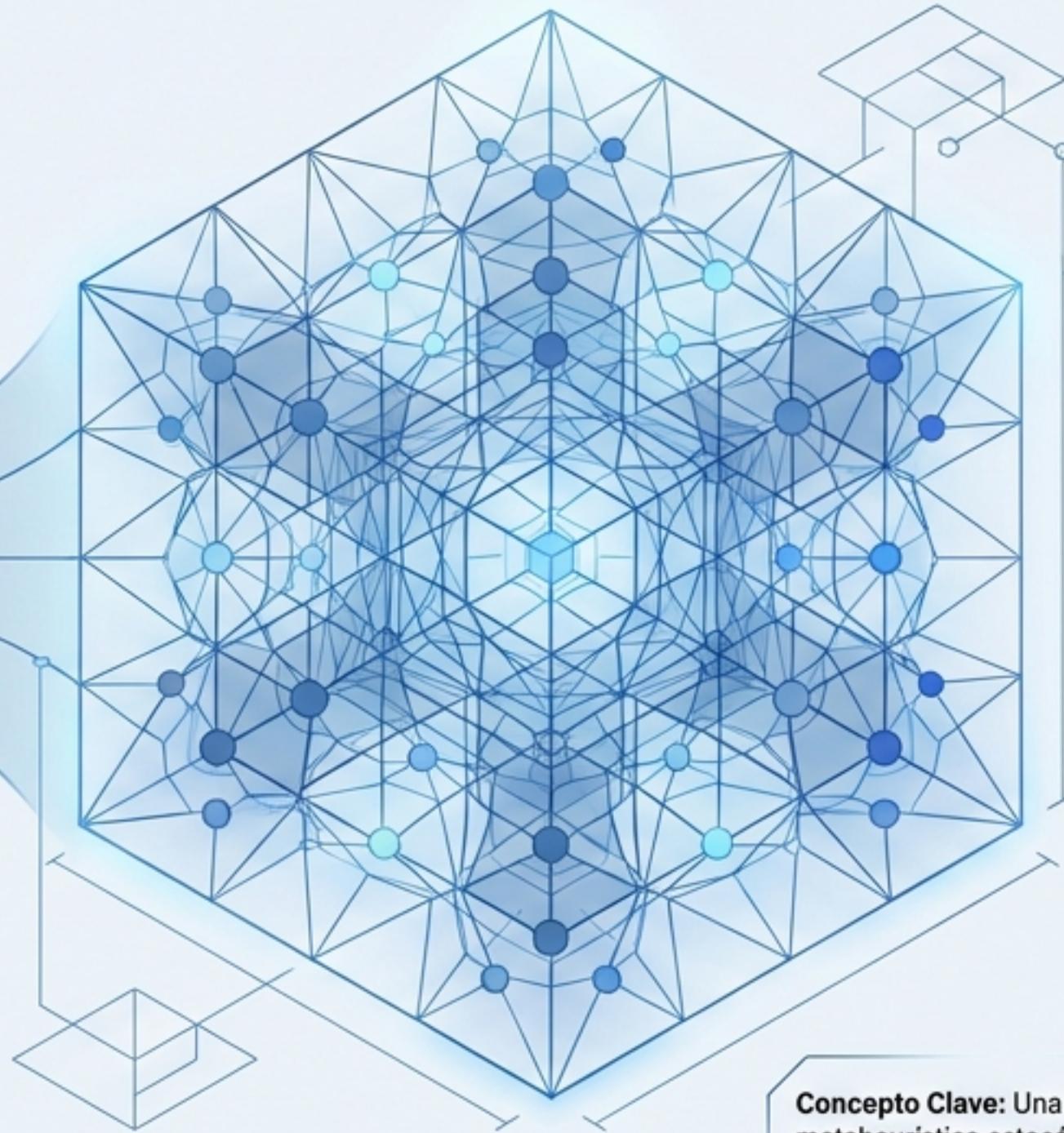


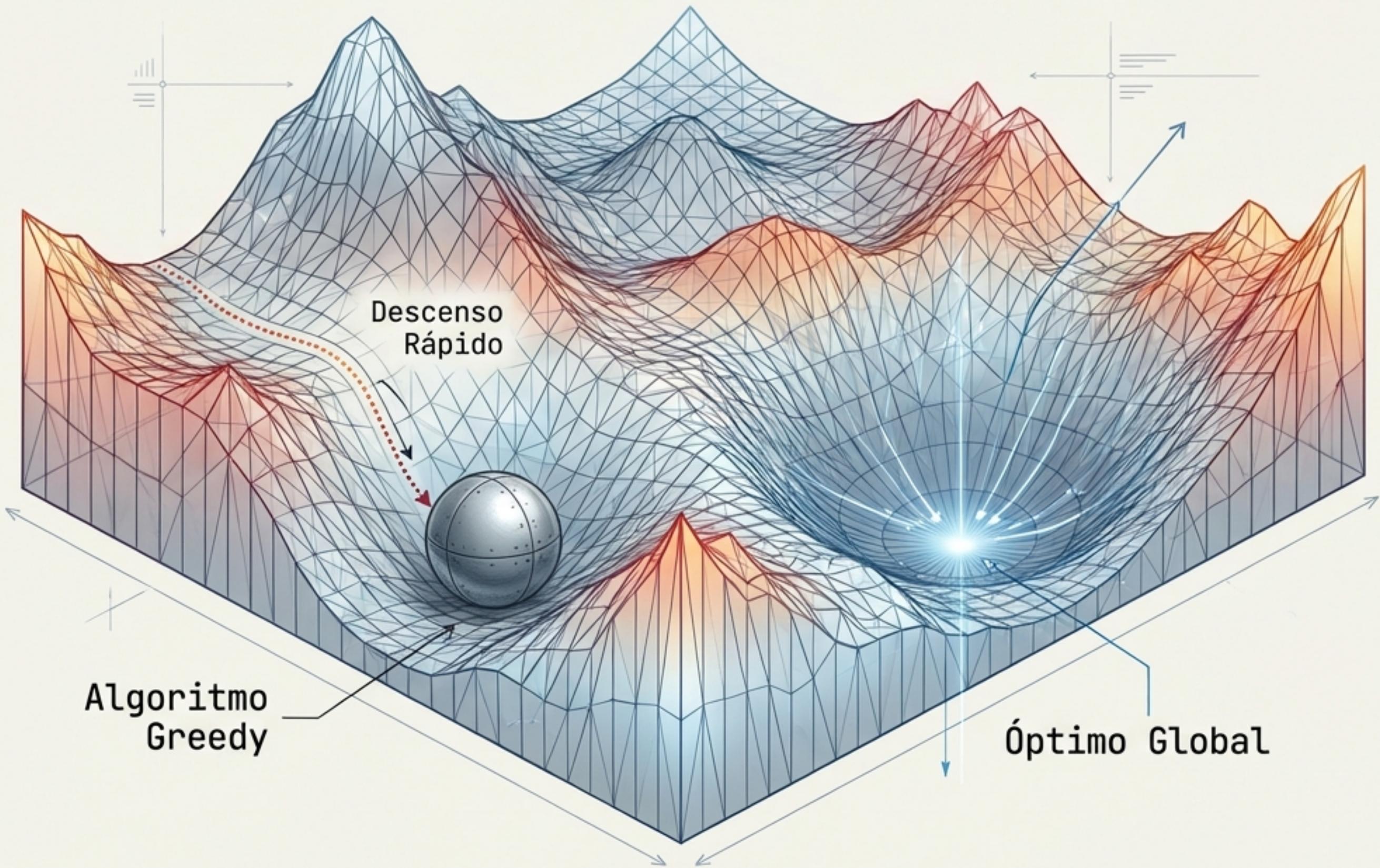
# Optimización Heurística mediante Recocido Simulado

Del caos térmico a la solución matemática óptima.



**Concepto Clave:** Una técnica metaheurística estocástica para espacios de búsqueda complejos.

# La Trampa de los Mínimos Locales



**El Problema:** En espacios de búsqueda grandes y complejos (problemas NP-hard), los algoritmos exactos son computacionalmente prohibitivos.

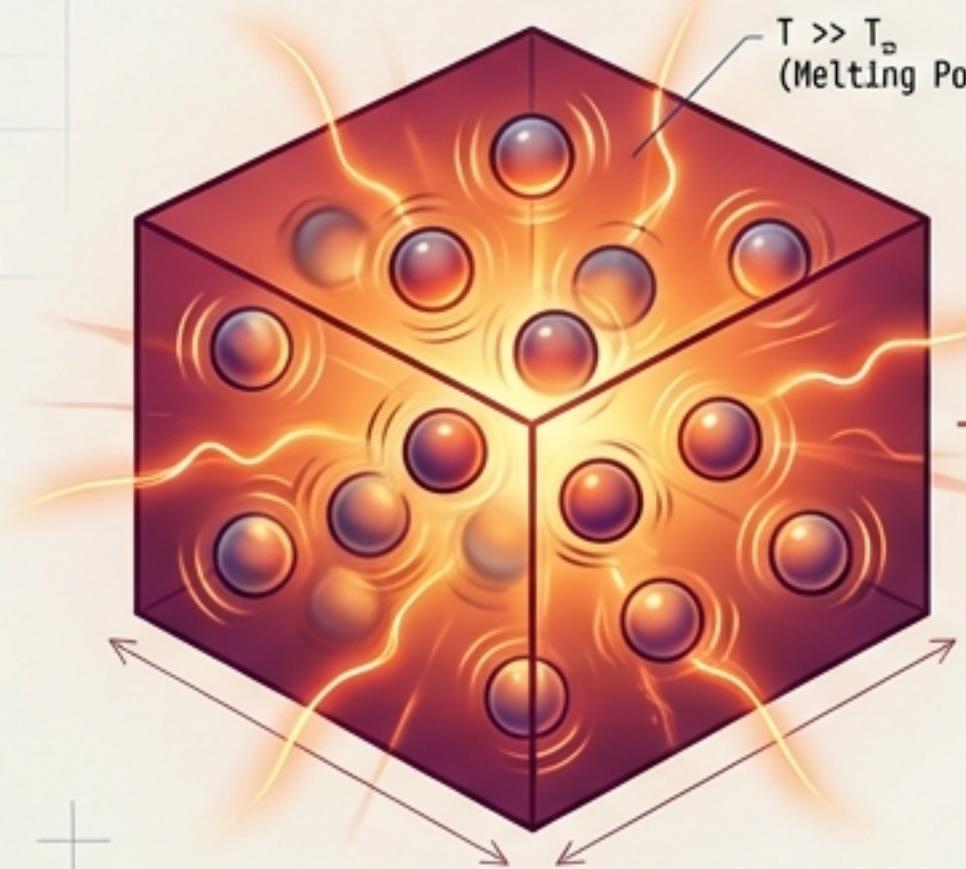
**El Fallo ‘Codicioso’:** Los métodos tradicionales buscan mejorar inmediatamente. Al descender demasiado rápido, quedan atrapados en un ‘mínimo local’, perdiendo de vista el óptimo global.

**La Necesidad:** Un mecanismo que permita aceptar temporalmente peores soluciones para escapar de estas trampas.

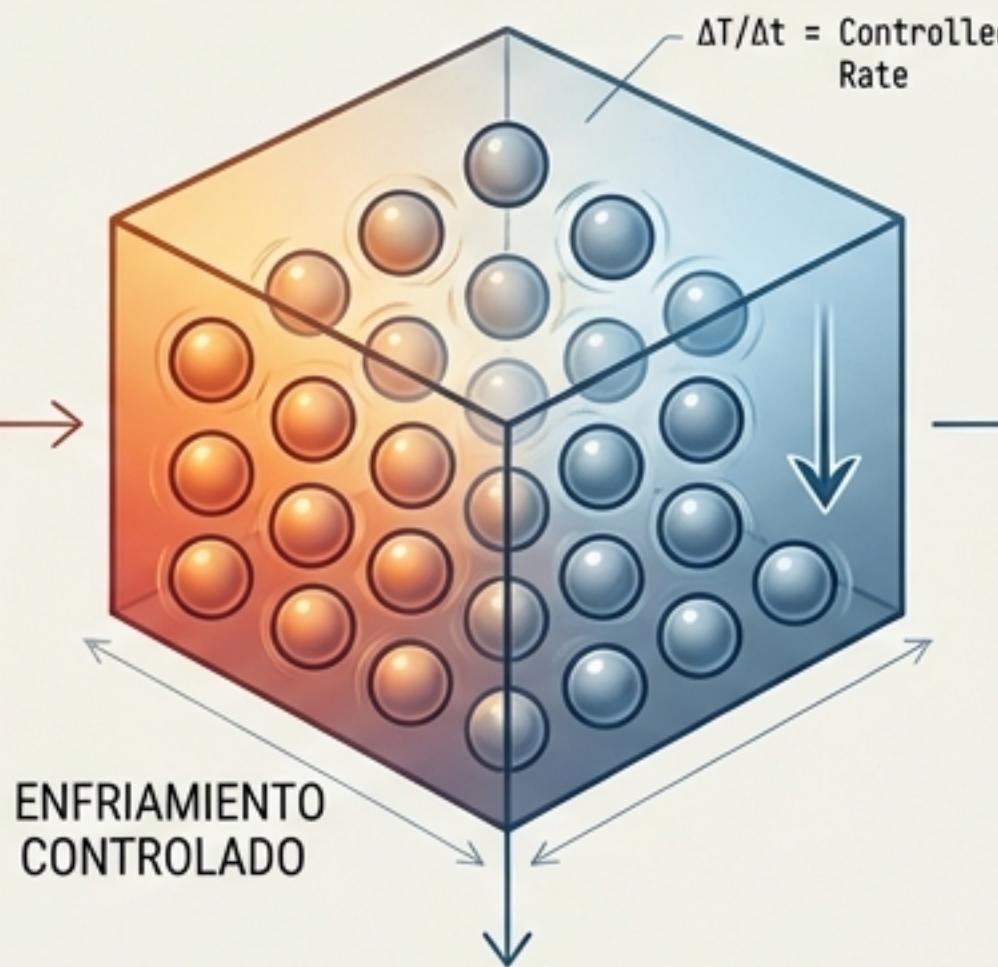
# La Inspiración Metalúrgica



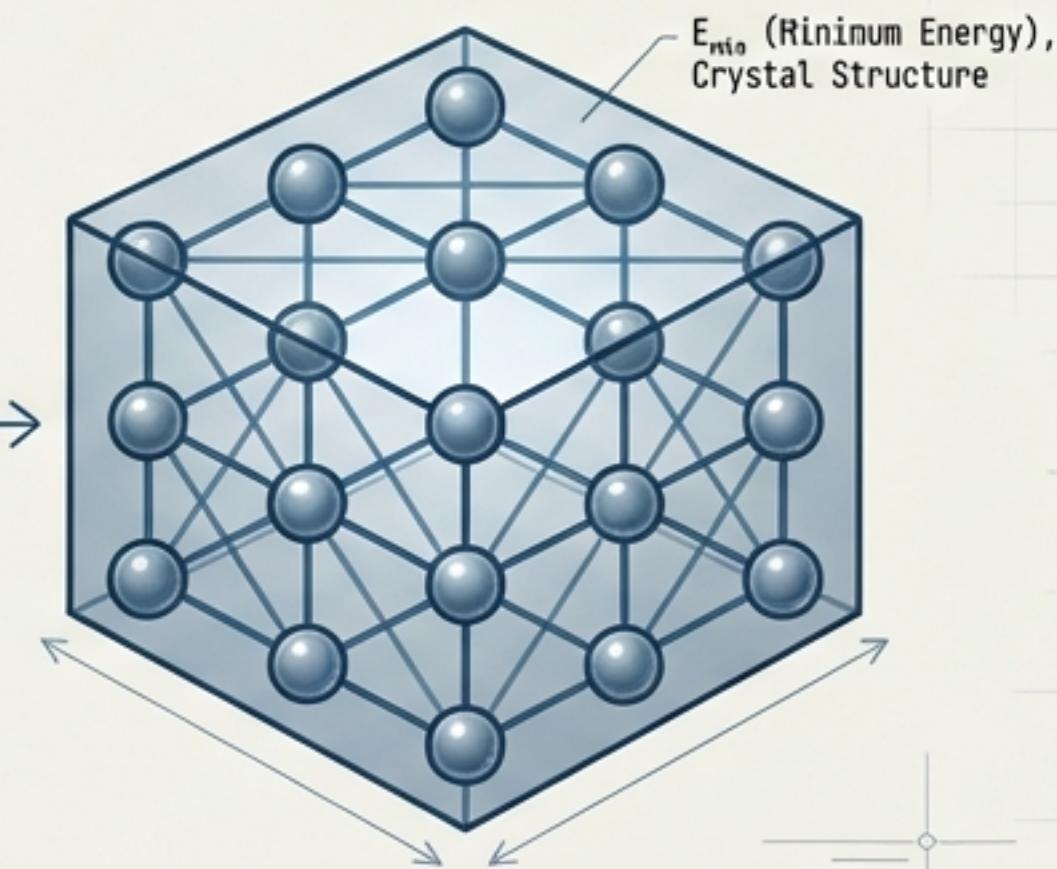
## Alta Temperatura (Caos)



## Enfriamiento Controlado



## Estado Sólido (Cristalización)



**Recocido Físico:** Los metalúrgicos calientan un material para liberar sus átomos (alta energía) y luego lo enfrian a una velocidad controlada.

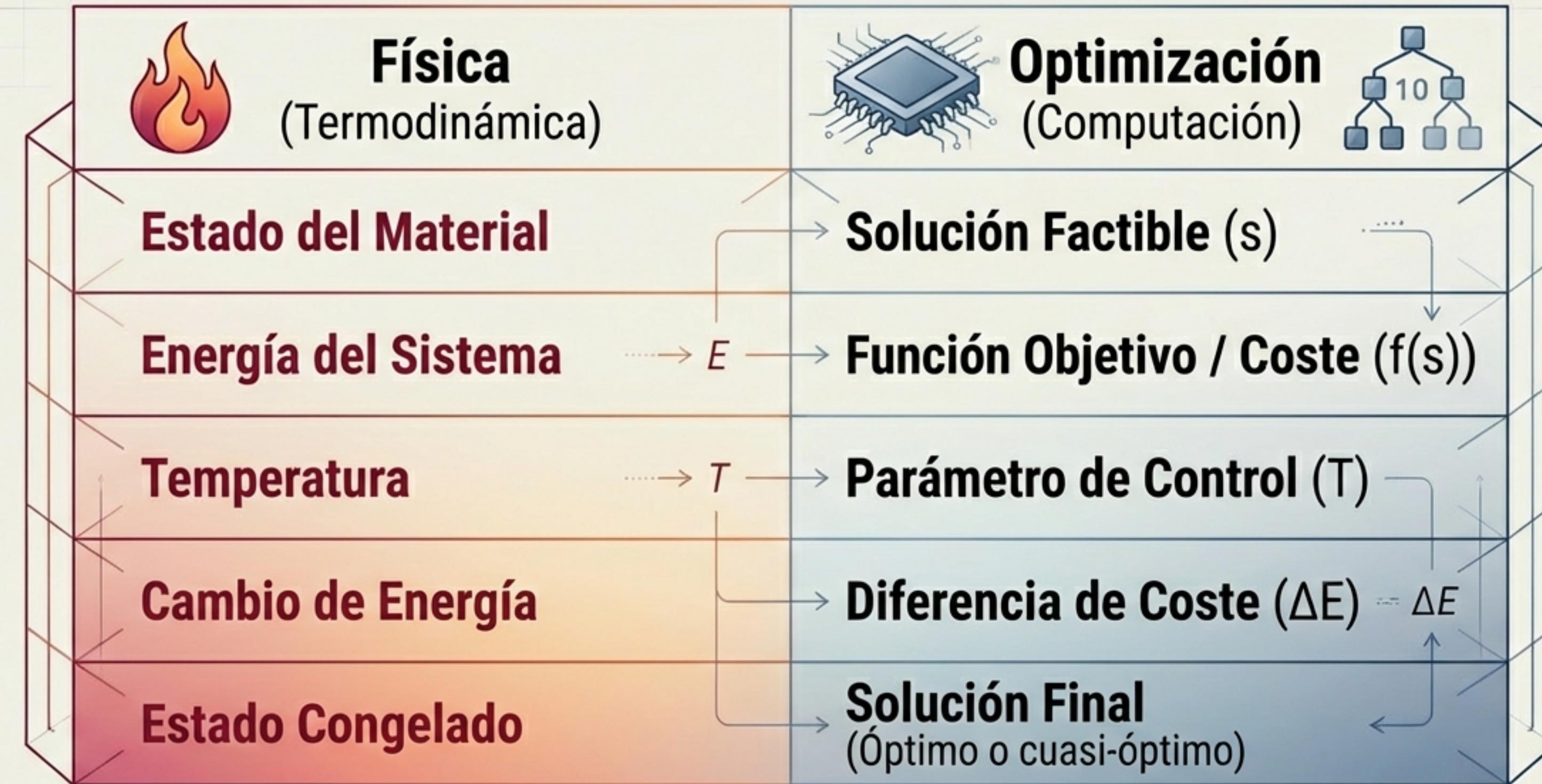


**La Analogía:** Si el enfriamiento es demasiado rápido (quenching), el material se vuelve quebradizo e imperfecto.



**El Objetivo:** Si es lento y controlado, los defectos se corrigen, alcanzando una configuración cristalina estable de mínima energía.

# Traduciendo la Física a las Matemáticas



Basado en el algoritmo de Metropolis (1953) y desarrollado para optimización por Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi (1983) y Černý (1985).



# El Criterio de Metropolis: Aceptando lo 'Peor'

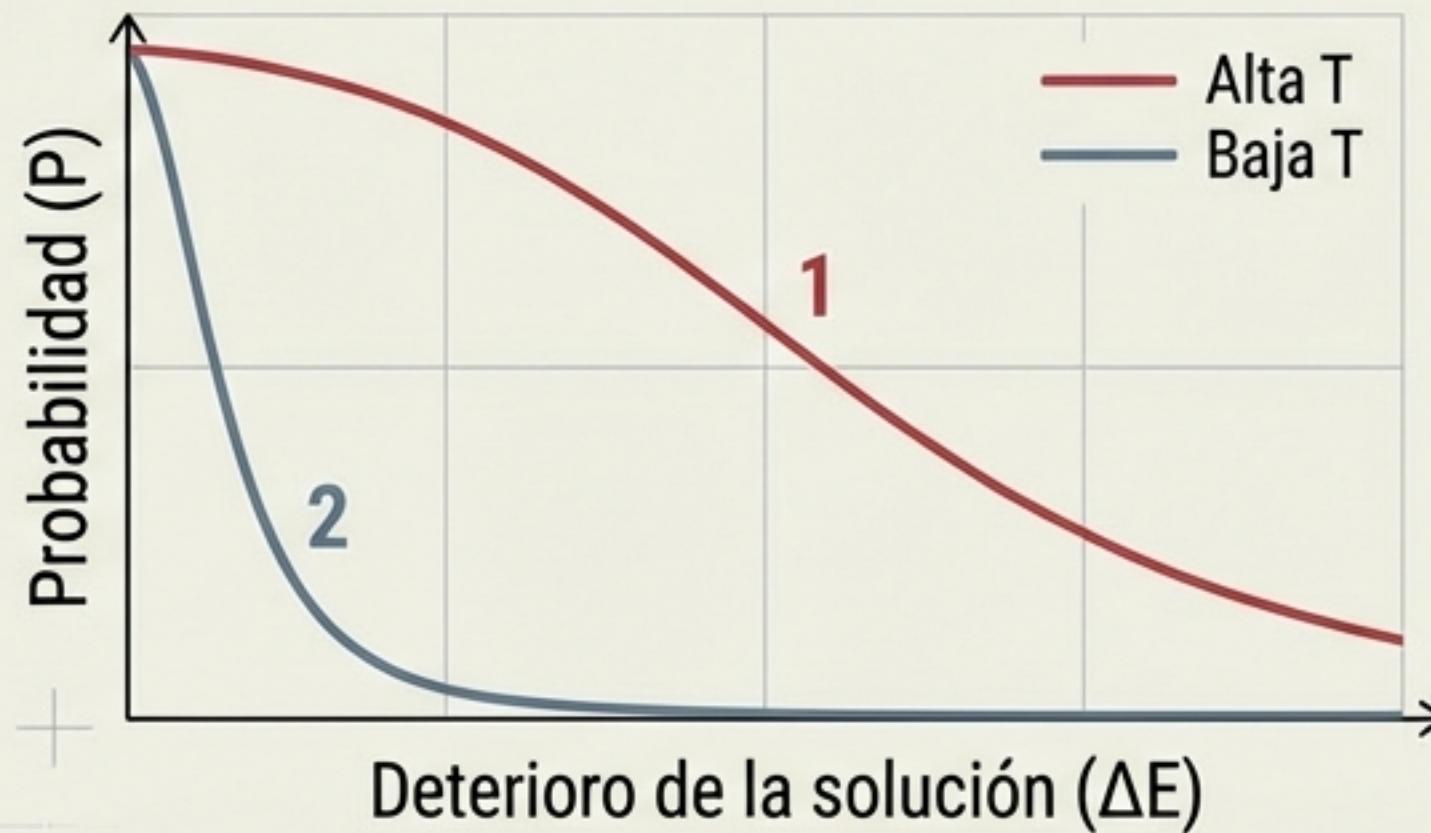


$$P = e^{(-\Delta E / T)}$$

Temperatura (Control de Probabilidad)

Magnitud del empeoramiento

## Probabilidad de Aceptación



**La Regla de Oro:** Si una nueva solución es mejor ( $\Delta E \leq 0$ ), se acepta incondicionalmente.



**La Excepción Estocástica:** Si la nueva solución es peor, todavía puede ser aceptada basada en una probabilidad que depende de la Temperatura (T).



**Alta Temperatura:** Se aceptan casi todos los movimientos (Exploración pura).

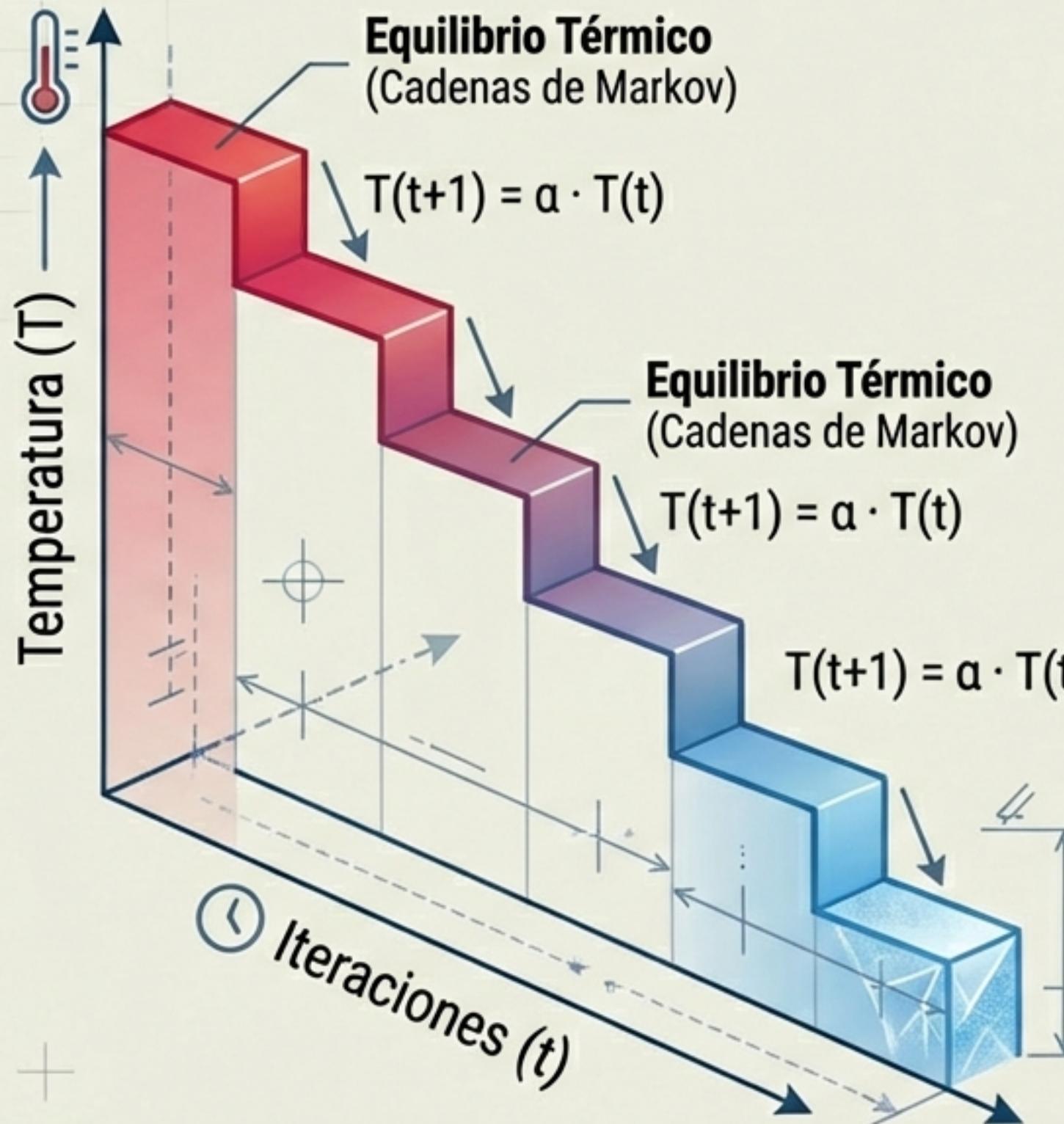


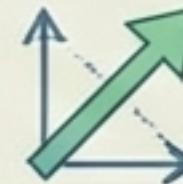
**Baja Temperatura:** El sistema se vuelve selectivo y rechaza movimientos que empeoran el coste (Explotación).

# El Ciclo de Vida del Algoritmo



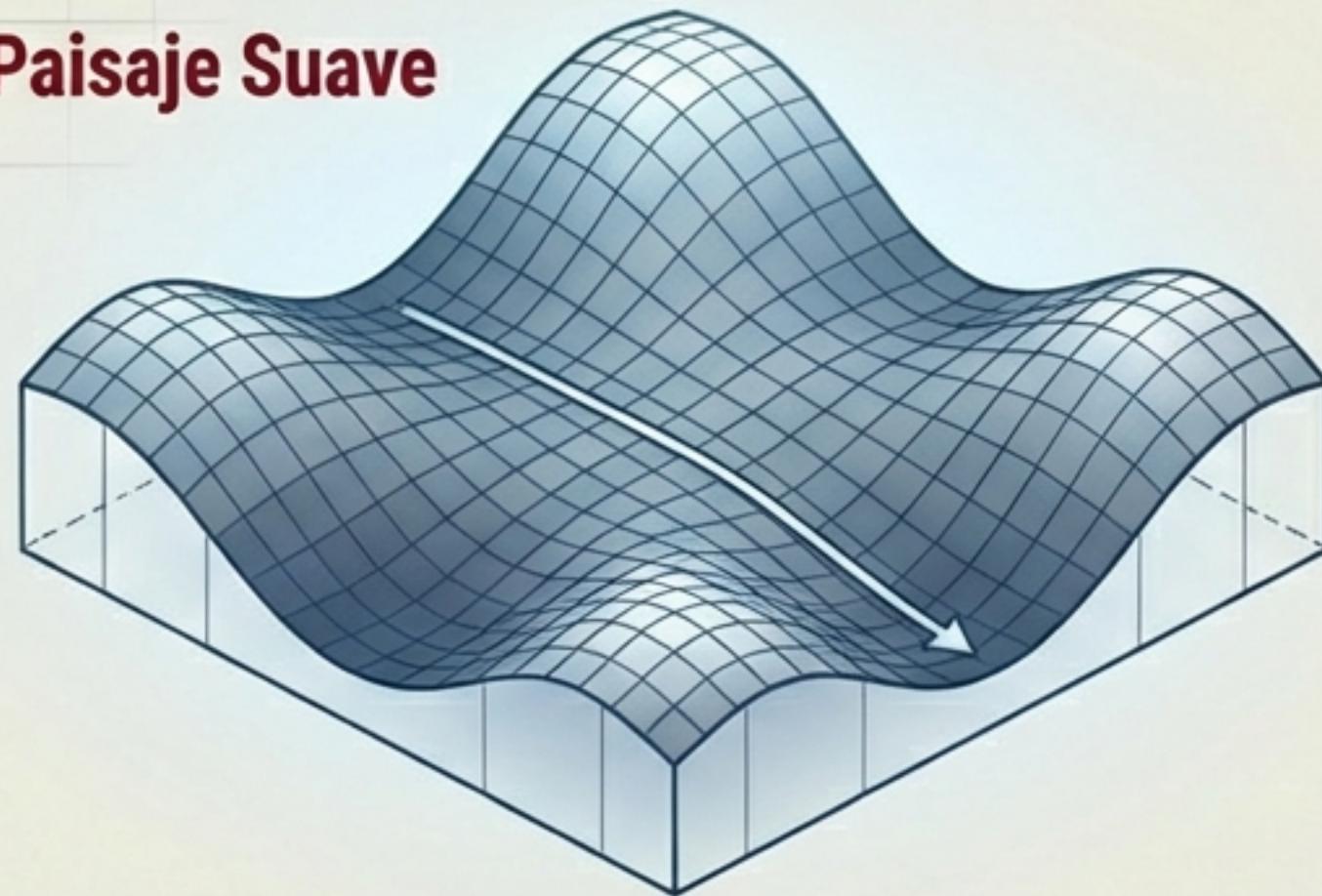
# El Arte del Enfriamiento (Cooling Schedule)



- **Esquema Geométrico:** La temperatura desciende gradualmente:  
$$T(t+1) = \alpha \cdot T(t)$$
(donde  $\alpha$  suele ser  $0.8 - 0.99$ ).
- **Temperatura Inicial ( $T_0$ ):** Ajuste crítico. Según el método de Medina (2001), se busca una  $T_0$  que permita una tasa de aceptación de soluciones peores entre el 20% y el 40%.
- **Riesgo:** Un enfriamiento muy rápido atrapa al sistema en estados metaestables (mínimos locales).

# Topología y Restricciones

Paisaje Suave



Paisaje Rugoso



## La Importancia del Paisaje:

Según Černý (1985), las topologías suaves facilitan la convergencia, mientras que los paisajes rugosos presentan mayores desafíos.

El uso adecuado de penalizaciones puede “suavizar” la topología, haciendo que las barreras de energía sean más fáciles de superar.

## Manejo de Restricciones

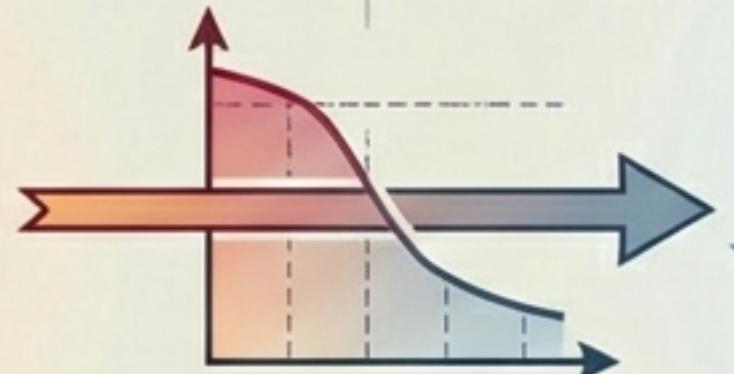
- **Opción A:** Restringir la búsqueda solo a regiones factibles.
- **Opción B:** Permitir soluciones no factibles aplicando funciones de penalización en el coste.



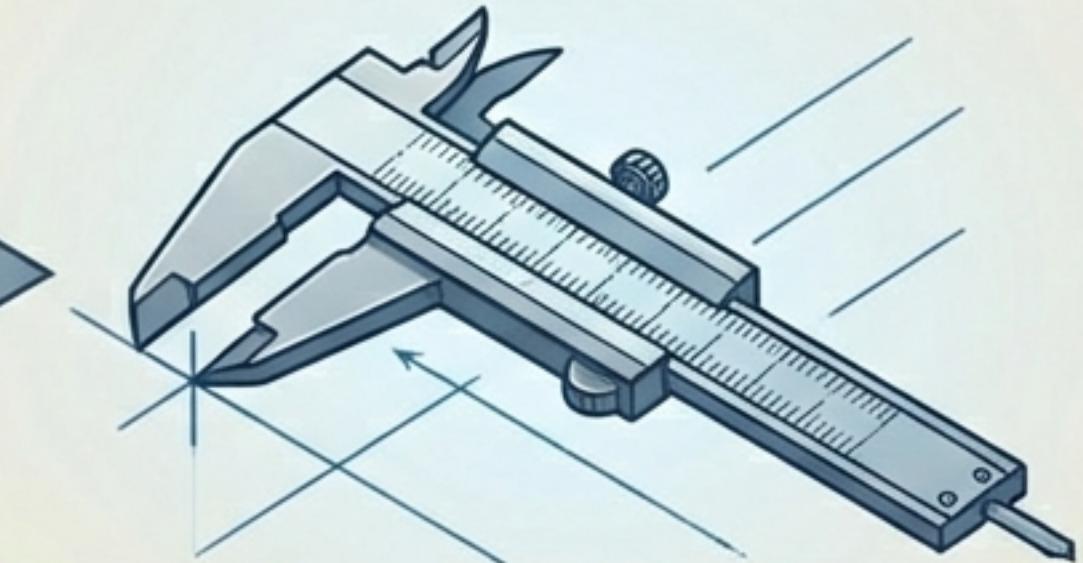
# Variantes: Aceptación por Umbrales

Threshold Accepting (Dueck & Scheuer, 1990)

## Simulated Annealing



## Threshold Accepting

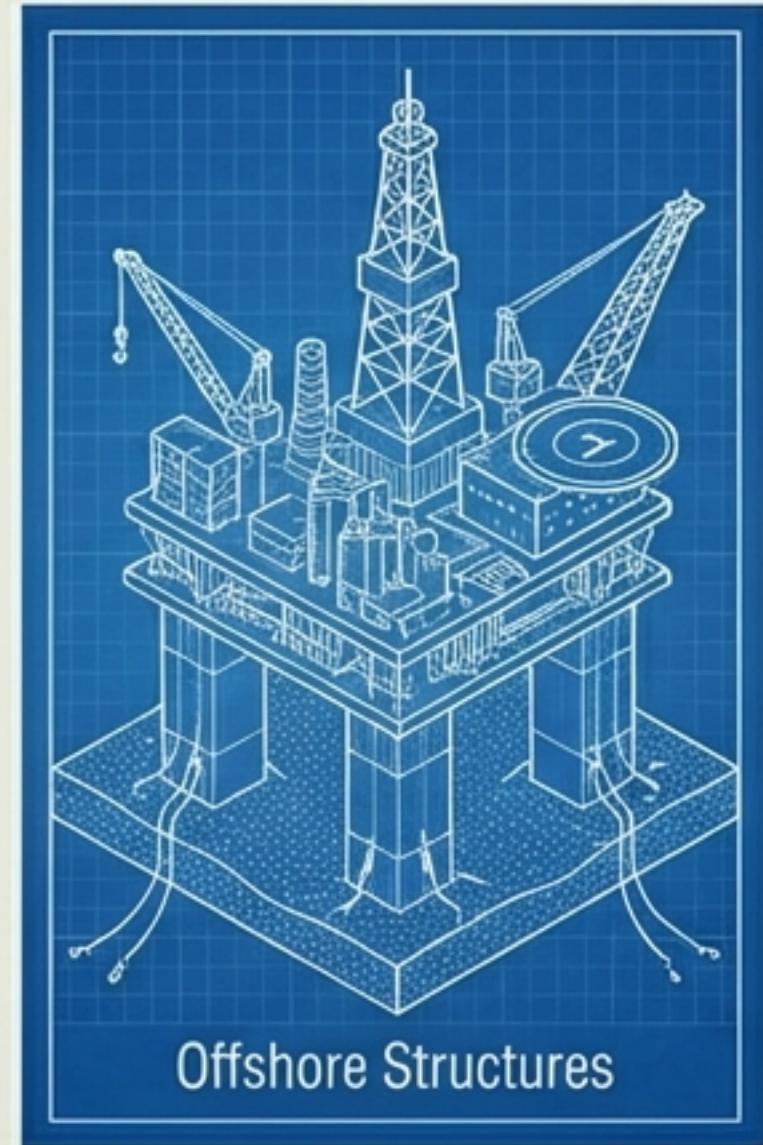
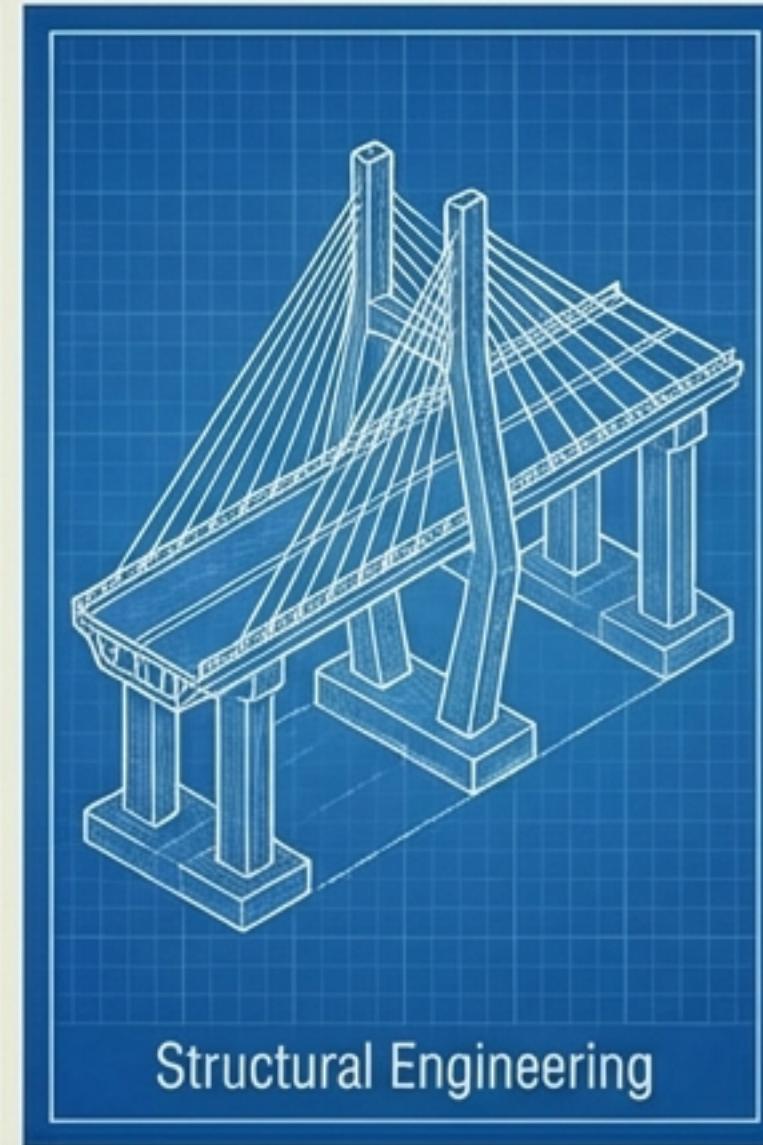
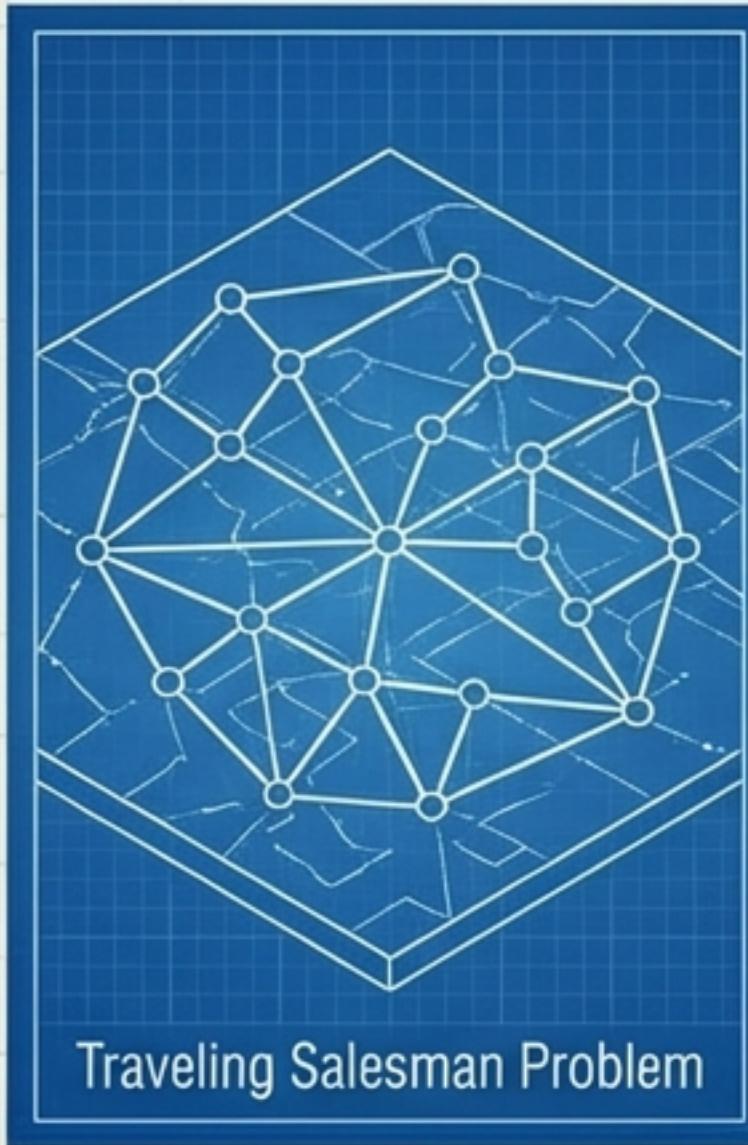


## Regla Estocástica (Boltzmann)

## Regla Determinista

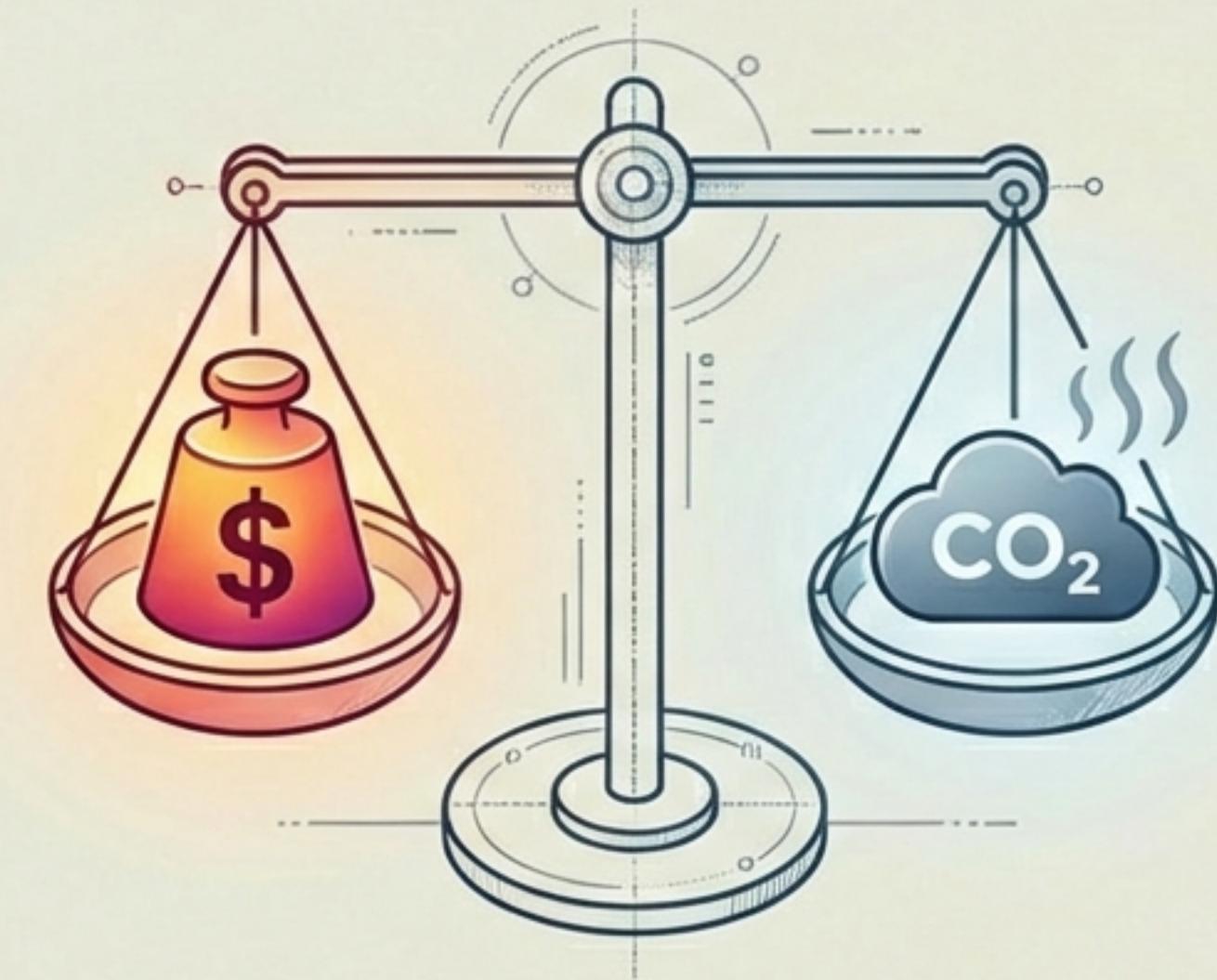
- **El Cambio:** Sustituye la regla probabilística de Boltzmann por una regla determinista.
- **Mecánica:** Acepta una solución peor solo si la degradación no supera un umbral predefinido. Este umbral disminuye con el tiempo.
- **Rendimiento:** Estudios empíricos demuestran que puede superar al SA clásico en problemas de programación (scheduling) y asignación de recursos.

# Aplicaciones en Ingeniería y Mundo Real



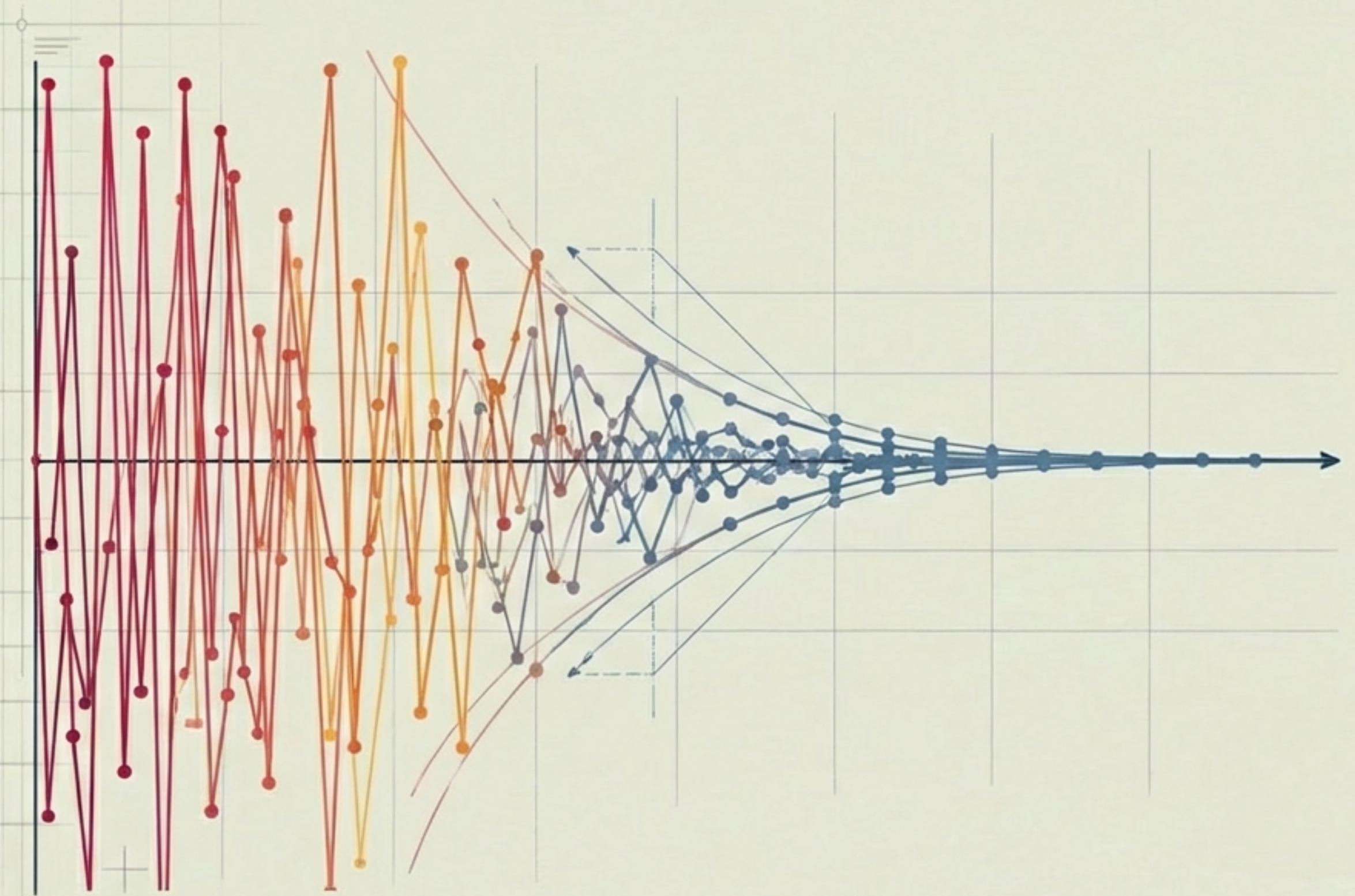
- **Rutas y Logística:** Resolución del Problema del Viajante de Comercio (TSP) y variantes con tiempo.
- **Ingeniería Estructural:** Diseño de puentes de hormigón pretensado (Martí et al., 2013) y optimización de muros de contención (Yepes et al., 2008).
- **Imagen y Química:** Segmentación de imágenes y cristalografía macromolecular.
- **Diseño Offshore:** Estructuras en condiciones de incertidumbre (Toğan, 2012).

# Sostenibilidad y Optimización Multiobjetivo



- **Más allá del Dinero:** El SA es ideal para gestionar el ‘trade-off’ entre objetivos conflictivos.
- **Caso de Estudio:** Diseño de columnas de hormigón armado (Medeiros y Kripka, 2014; Santoro y Kripka, 2020).
- **Resultado:** El algoritmo encuentra el equilibrio óptimo entre minimizar los costes de construcción y reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, algo difícil de lograr con métodos deterministas.

# Conclusión: Robustez ante la Complejidad



- **Garantía Práctica:** Aunque no garantiza matemáticamente el óptimo global en tiempo finito, produce consistentemente soluciones de alta calidad (cuasi-óptimas) donde otros fallan.
- **Versatilidad:** Robusto frente a la solución inicial y adaptable a dominios combinatorios y continuos.
- **Resumen:** Una herramienta esencial para problemas NP-hard, equilibrando la exploración audaz con la explotación precisa.