



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE





UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

**DIEF**

Dipartimento di  
Ingegneria Industriale

# Termodinamica e sostenibilità ambientale

**Progetto Galileo 2014**

**Giuseppe Grazzini**

Progetto Galileo 2014



***"I concetti fisici sono creazioni libere dell'intelletto umano e non vengono, come potrebbe credersi, determinati esclusivamente dal mondo esterno"***

A. Einstein, L. Infeld- L'evoluzione della Fisica- Boringhieri, Torino 1965.

***"Le formule delle scienze 'esatte' sono da considerare relazioni tra quantità e cioè tra nostri costrutti, non tra fantomatici 'enti' indipendenti dal nostro operare. Una qualunque grandezza fisica esiste soltanto in quanto è definita da nostre operazioni metriche; è cioè una nostra interpretazione di alcune componenti della situazione (evento) in cui siamo immersi; interpretazione, si badi bene, su cui concordano tutti gli interessati."***

D.Faggiani - Fondamenti di termodinamica tecnica - Di Stefano Editore, Genova 1981



## Come valutare la sostenibilità?

*"Lo sviluppo sostenibile è quello che soddisfa i bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri. Il concetto di sviluppo sostenibile implica dei limiti, non limiti assoluti ma imposti dal presente stato dell'organizzazione tecnologica e sociale nell'uso delle risorse ambientali e dalla capacità della biosfera di assorbire gli effetti delle attività umane"*  
*(Rapporto Brundtland 1987)*

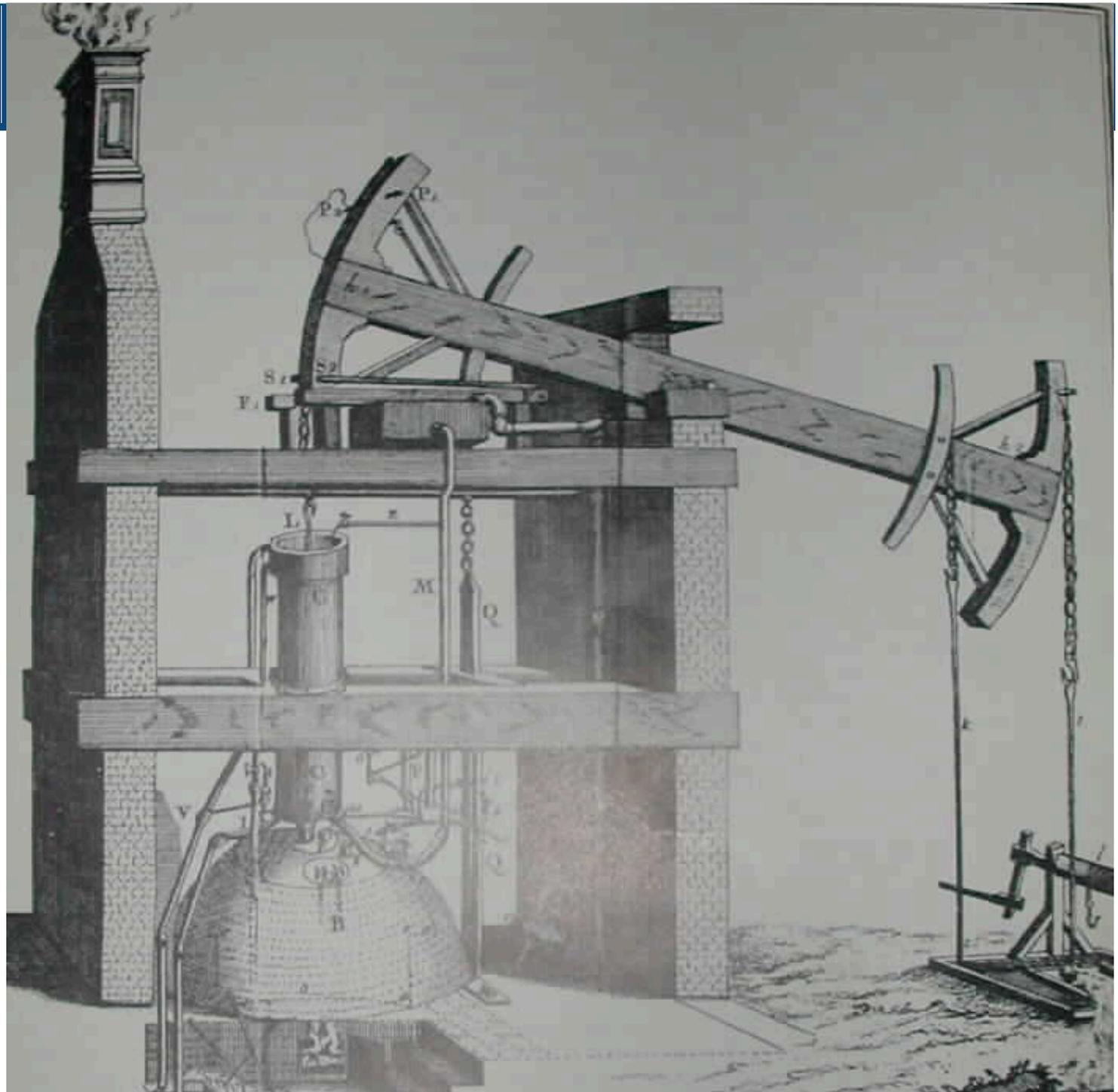
### *La definizione dell'Unione Europea e UNDP*

*"Si definisce Sviluppo Sostenibile uno sviluppo contemporaneamente capace di assicurare il miglioramento della qualità della vita, mantenendo nei limiti naturali la capacità di carico degli ecosistemi che ci sostengono."*



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

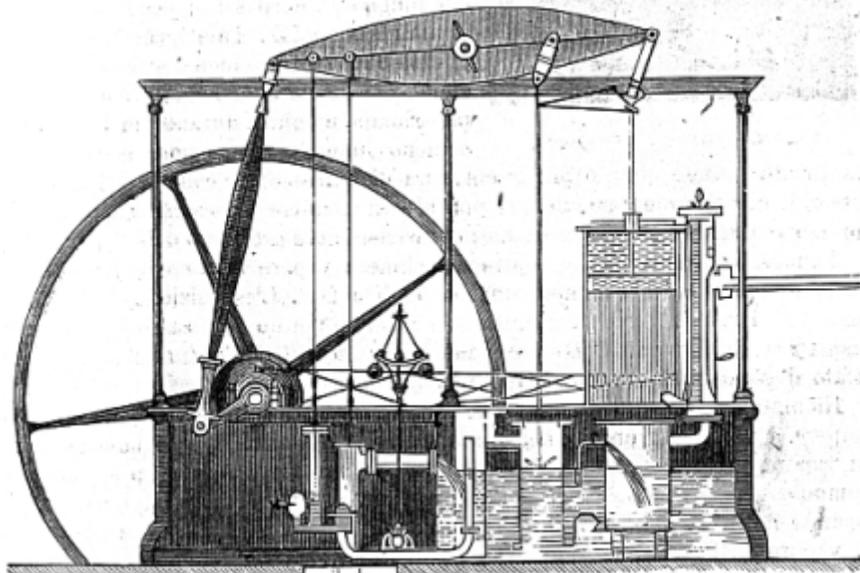
LA  
MACCHINA  
A VAPORE  
DI  
NEWCOMEN  
1712





Per i templi bastava la **STATICA**

Per i cannoni divengono necessarie  
la **DINAMICA** e la **CINEMATICA**



Per la macchina a vapore serviva la  
**TERMODINAMICA**



## Nicolas Léonard Sadi Carnot

All'età di 16 anni, entrò nella École Polytechnique, Dopo la laurea, divenne ufficiale del genio militare dell'esercito francese conseguendo il grado di capitano, prima di dedicarsi ai suoi studi dopo il 1819, prima part-time e poi a tempo pieno dal 1828.

1824 [Réflexions sur la puissance motrice du feu](#) Libro con cui ha fondato la termodinamica enunciando il II Principio

Parigi, 1/6/1796 – Parigi, 24/8/1832  
per epidemia di colera

## Leggi fondamentali

**I° principio** della Termodinamica afferma la conservazione dell'Energia *Lavoro = Calore*

nega perpetuum mobile I<sup>a</sup> specie

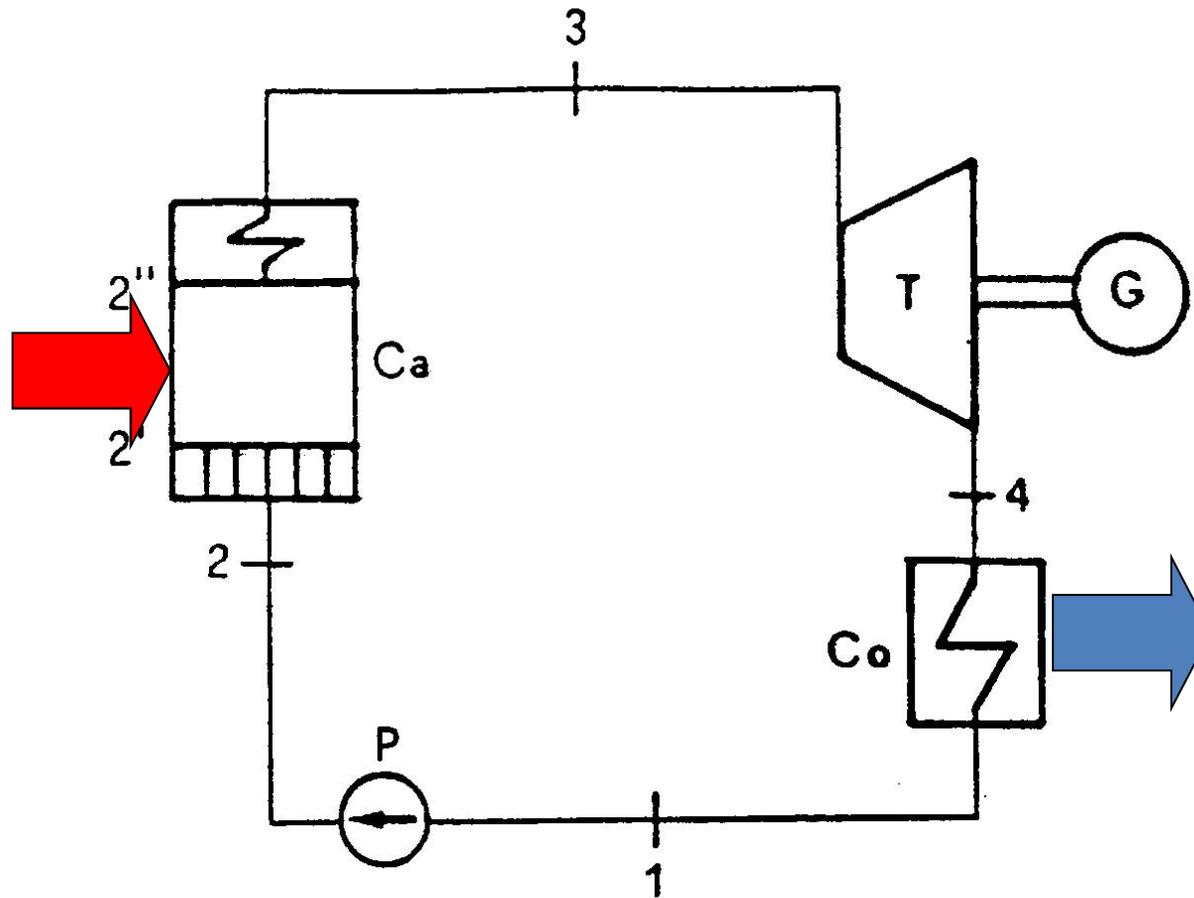
**II° principio** nega la trasformazione completa di calore in lavoro *Lavoro* → *Calore* quindi

*Lavoro = Calore assorbito ( $t_1$ ) - Calore ceduto ( $t_2$ )*

con  $t_1 > t_2$

Si può anche enunciare dicendo che il calore passa spontaneamente solo da un corpo più caldo ad uno più freddo

nega perpetuum mobile II<sup>a</sup> specie



Si fornisce calore  $Q_1$  alla caldaia a  $T_1$  e si cede calore  $Q_2$  a  $T_2$  al condensatore producendo il lavoro

$L$

Schema elementare di un impianto termico motore a turbina a vapore.  $P$ : pompa;  $Ca$ : caldaia;  $T$ : turbina;  $G$ : generatore elettrico;  $Co$ : condensatore.

Poiché usando il primo principio per una macchina ciclica possiamo scrivere  $L=Q_1-Q_2$ , allora l'efficienza si può scrivere:

$$\varepsilon = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Per una macchina reversibile si può dimostrare che esso è il massimo possibile

$$\varepsilon_R = 1 - \frac{Q_R}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Dove T è la temperatura assoluta definita dal S.I. ed espressa in K. Maggiore è la temperatura  $T_1$  e quindi la differenza tra le temperature, più si ottiene lavoro, cioè aumenta la “qualità” di Q.

Per una trasformazione REVERSIBILE avremo quindi:

$$\frac{Q_R}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1} \quad \text{IRREVERSIBILE} \Rightarrow \frac{Q_2}{T_2} > \frac{Q_1}{T_1} \Rightarrow \frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1} + \sigma$$

dove  $\sigma$  rappresenta la traccia termodinamica sull'ambiente

*Poiché per le macchine cicliche lo stato termodinamico finale=iniziale, solo l'ambiente registra l'irreversibilità.*

$$dS = \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{\text{reversibile}} \quad dS > \left( \frac{\delta Q}{T} \right)_{IR} \Rightarrow dS = \frac{\delta Q}{T} + dS_I$$



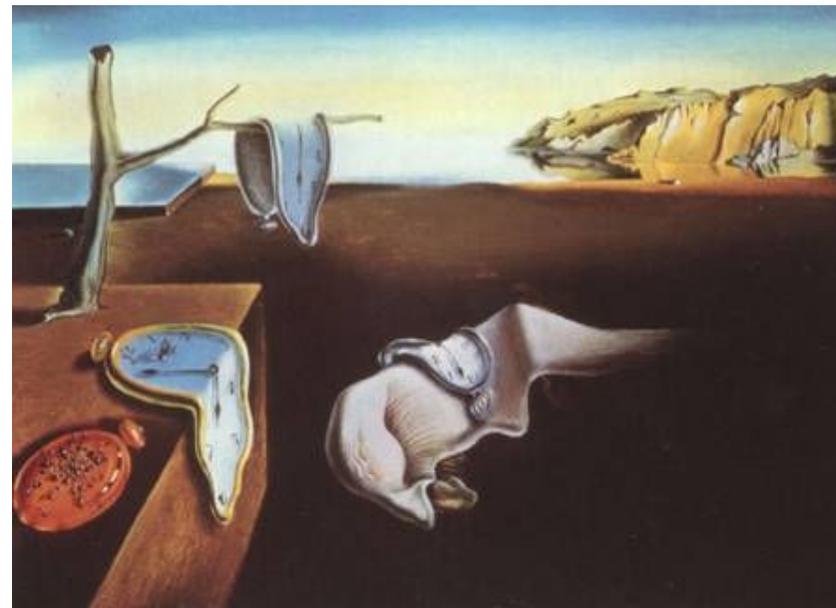
## Irreversibilità

Non si torna indietro

Il “tempo” ha un verso definito

Va sempre verso entropia crescente

Insieme alla teoria della relatività ristretta, la Termodinamica contribuisce a rompere l'idea del tempo assoluto secondo Newton





Il concetto di entropia e la sua variazione nei processi irreversibili è alla base della moderna termodinamica e della fisica statistica.

Clausius nel 1854–1862 introdusse il concetto e lo battezzò mentre la scuola di Termodinamica irreversibile di Bruxell fornì le basi a Prigogine per enunciare il MinEP nel 1947.

Inoltre è stato introdotto il MaxEP utilizzato da molti studiosi nel XX° secolo in Termodinamica e nella Fisica.

Con MaxEP un sistema in condizioni di non-equilibrio evolve seguendo percorsi termodinamici che rendono massima la variazione di entropia per definite condizioni al contorno.

Il II Principio della Termodinamica afferma che in un qualsiasi processo adiabatico l'entropia dello stato finale è eguale o maggiore di quella nello stato iniziale, cioè l'entropia cresce a causa delle irreversibilità.

Dal punto di vista statistico l'entropia non solo cresce, ma raggiunge il valore massimo. Quindi il MaxEP può essere visto come la generalizzazione della formulazione di Clausius.

Il lavoro è anche quello che si ottiene dalla caduta per una altezza  $h=(z_2-z_1)$  di un peso  $P$  a sua volta esprimibile, in base alla seconda legge della dinamica, come prodotto della massa per l'accelerazione di gravità  $g$ :

$$L = P \cdot h = m \cdot g \cdot (z_2 - z_1)$$

Lavoro quindi associato al potenziale gravitazionale.

Per una macchina ciclica reversibile abbiamo:

$$L_R = \varepsilon_R \cdot Q_1 = Q_1 \cdot \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = T_2 \cdot \left( \frac{Q_1}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} \right)$$

Considerando la definizione di entropia ed il fatto che essa gode della proprietà additiva, quindi si può scrivere una entropia specifica, si ha:

$$L_R = T_2 \cdot \left( \frac{Q_1}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} \right) = T_2 \cdot (S_{12} - S_{11}) = m \cdot T_2 \cdot (s_{12} - s_{11})$$

**QUINDI L'ENTROPIA PUO' ESSERE  
INTERPRETATA COME IL POTENZIALE CHE  
FORNISCE LAVORO USANDO CALORE IN  
UNA MACCHINA TERMICA**

Per una macchina **irreversibile** vale sempre il I° principio e quindi:

$$L = Q_1 - Q_2 = T_2 \cdot \left( \frac{Q_1}{T_2} - \frac{Q_2}{T_2} \right) \quad \text{ma ricordando che:}$$

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1} + \sigma = \frac{Q_1}{T_1} + S_{irr} \quad \text{Allora:}$$

$$L = T_2 \cdot \left( \frac{Q_1}{T_2} - \frac{Q_2}{T_2} \right) = T_2 \cdot \left( \frac{Q_1}{T_2} - \frac{Q_1}{T_1} - \sigma \right) = T_2 \cdot (S_{12} - S_{11} - S_{irr})$$

**QUINDI LE IRREVERSIBILITA' FANNO PERDERE LAVORO  
DISPONIBILE**



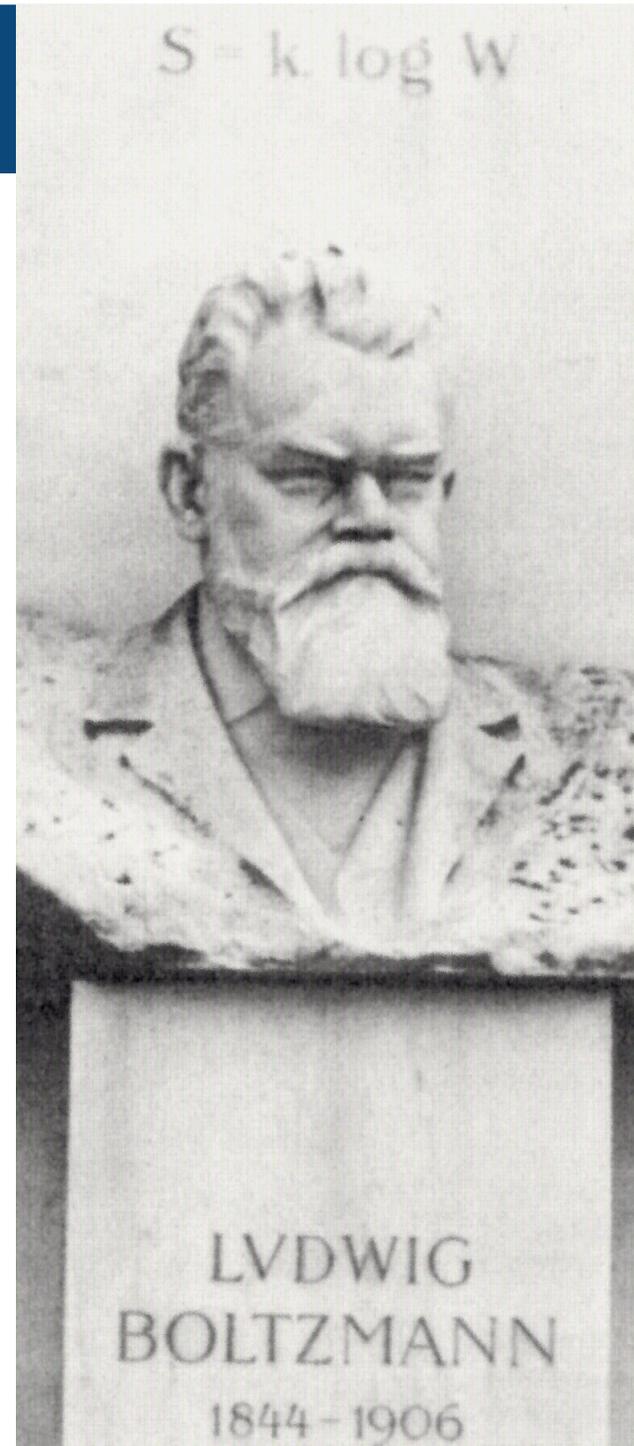
La **sorgente di "risorse"** a cui attingiamo è essenzialmente il **sole** che manda energia caratterizzata da bassa entropia, cui si aggiungono tutte le riserve di materiali concentrati. *La vita utilizza queste risorse per svilupparsi, producendo rifiuti che hanno un livello maggiore di entropia.* Questi ultimi possono essere risorse per altre forme di vita, ma la catena si arresta ad un certo punto perché la differenza tra i vari livelli diviene troppo piccola e quindi la vita produce sempre rifiuto, cioè aumento di entropia sulla terra, compensato fino ad oggi dall'energia che arriva dal sole. In generale si può dire che le perdite ci sono sempre e che tutte le perdite tendono ad annullare quelle differenze che ci permettono di sfruttare le varie forme di energia e, più in generale, ci permettono di distinguere e riconoscere. *Di qui il legame con la teoria dell'informazione, che richiede il riconoscimento dei segnali.* In modo più filosofico, potremmo dire che **l'entropia ci porta ad apprezzare il valore della differenza.**



L'entropia ha ovviamente vari livelli di lettura, anche a livello microscopico.

Partendo dalla teoria cinetica dei gas e considerato l'alto numero delle molecole presenti in un volume anche piccolo di gas (Numero di Avogadro= $6 \cdot 10^{23}$  in volume molare=22.69 l) Boltzmann ricavò una espressione dell'entropia in funzione della probabilità di trovare un certo stato del gas.

Tale espressione permette di giustificare anche a livello microscopico l'irreversibilità dei processi basandosi su criteri statistici.





Le relazioni viste fanno riferimento ad una macchina ciclica, che impiega un **tempo definito** per tornare alle condizioni iniziali.

Quindi tutti i termini sono interpretabili come potenze scambiate.

A parità di potenza termica fornita il lavoro ottenibile da una macchina ideale per un tempo definito è maggiore di quello ottenibile da una macchina reale.

Viceversa per fornire lo stesso lavoro una macchina reale richiede più tempo.



Nella Termodinamica classica sembra che il tempo sia assente, tuttavia si parla sempre di **Calore** e **Lavoro scambiati** oppure di **Funzioni di Stato** che **cambiano**  
Nella Termodinamica irreversibile il **tempo** viene esplicitamente considerato e viene introdotta la **velocità di cambiamento**.

Nel 1922 **Lotka** propose la **massima potenza** come condizione per lo sviluppo della **vita** partendo dal principio di Ostwald della "massima variazione in un tempo definito" e **Schrodinger**, nel 1943, propose l'**entropia** come parametro di analisi della **vita**.

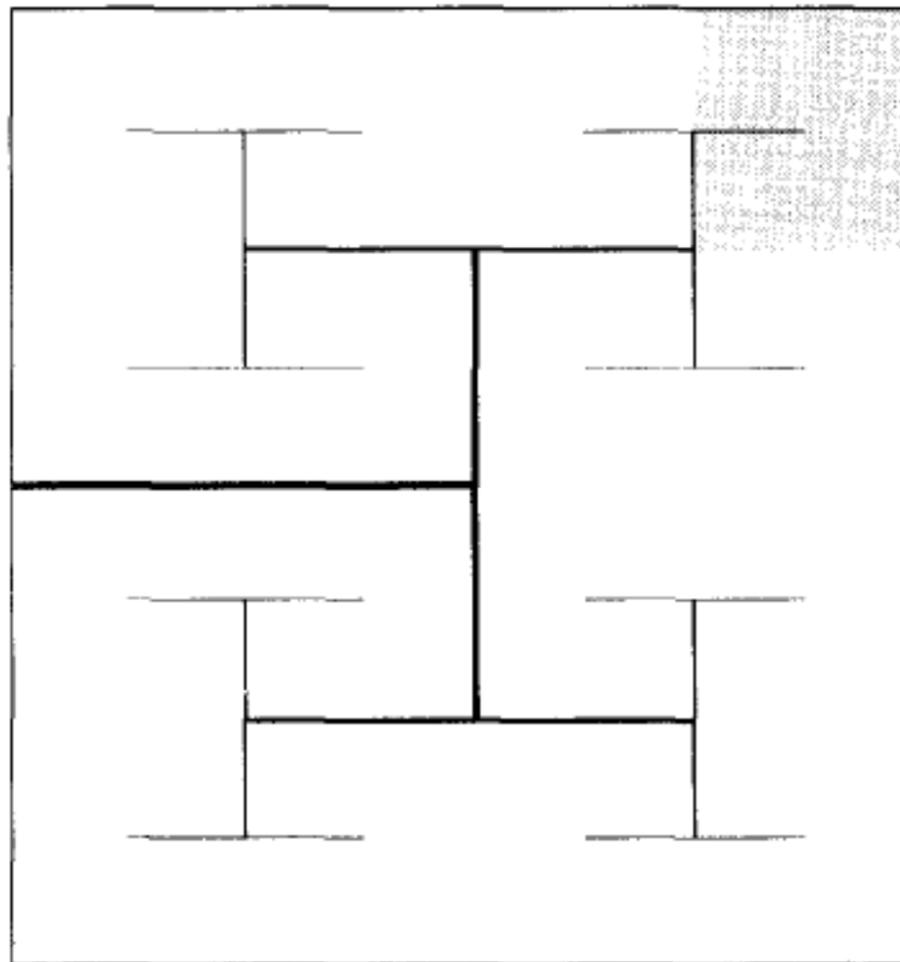
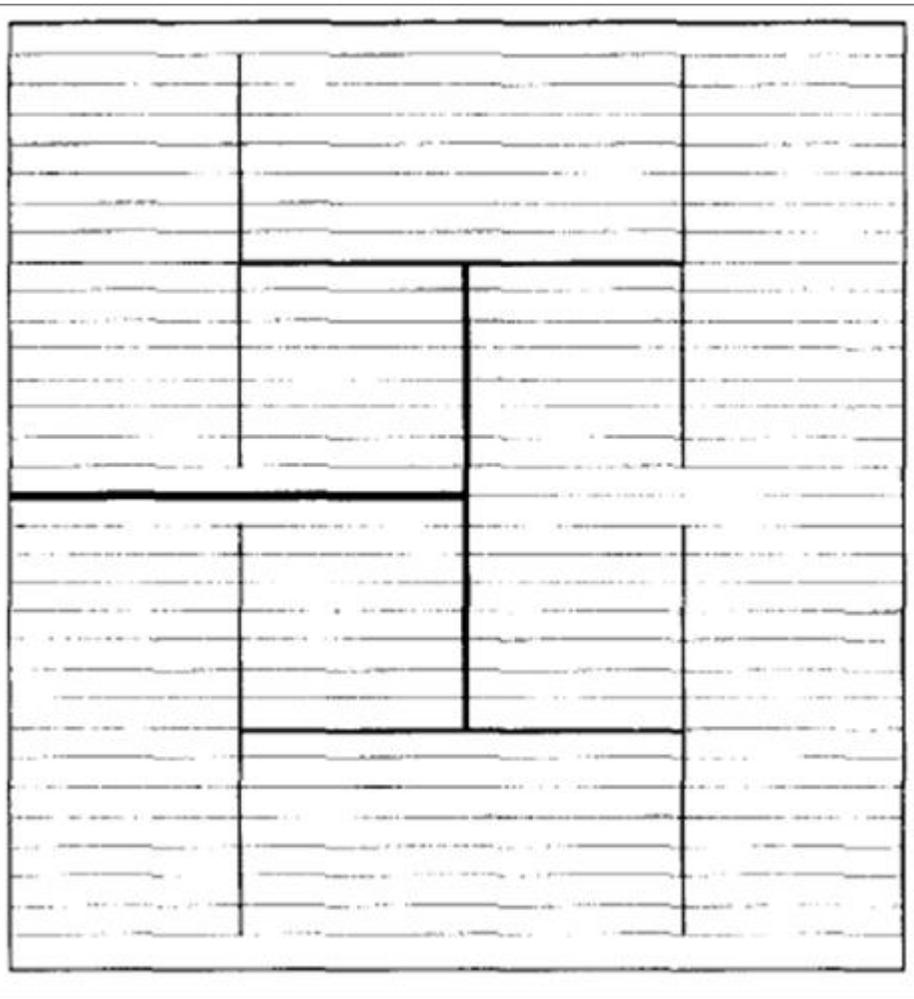
Nel 1996 **Bejan** formulò la "constructal law" introducendo più **esplicitamente il tempo**

# Raffreddamento dell'elettronica

La ricerca del massimo per la velocità di flusso di calore  $q$  porta all'identificazione di una configurazione geometrica interna.

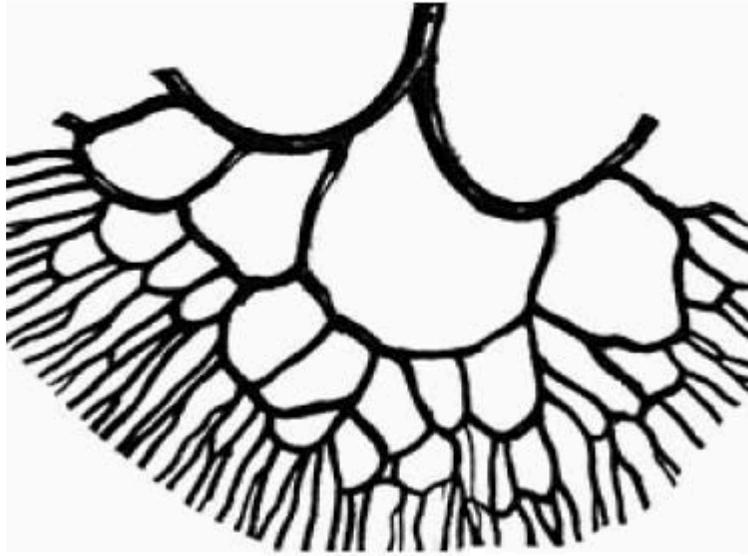
Questo rappresenta il concetto centrale della constructal theory (Bejan 1996):

la massimizzazione dei flussi, soggetti a vincoli, rappresenta un principio di evoluzione del sistema attraverso la generazione di configurazioni geometriche specifiche.

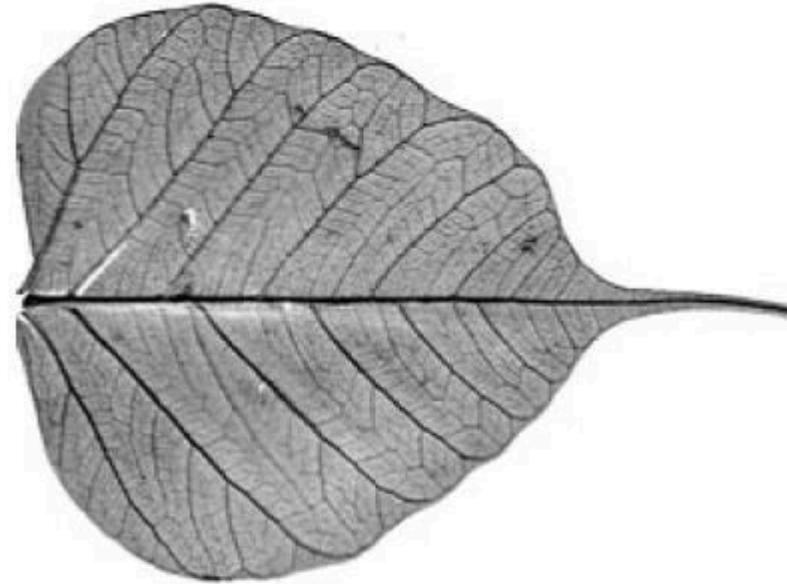




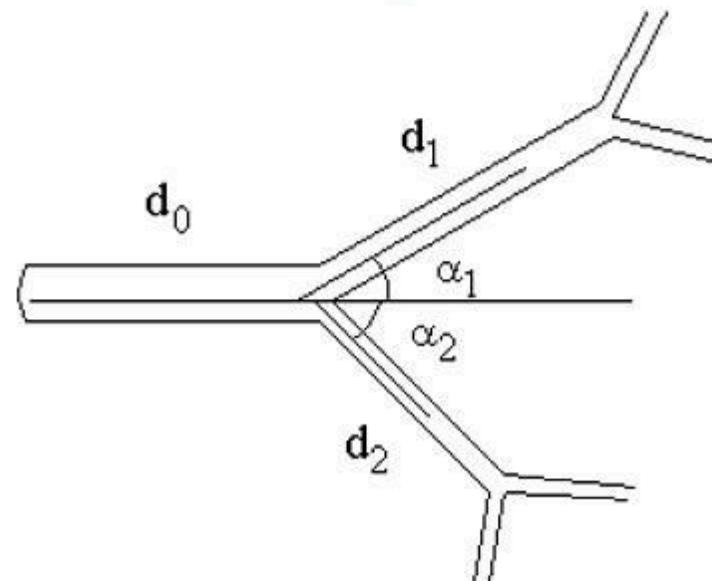
Osservazioni simili possono farsi per i bacini fluviali. Le dimensioni globali del bacino sono date e il flusso totale è determinato dalle piogge. Sul terreno l'acqua ha l'opzione di scorrere come un film o filtrare in superficie nel suolo umido verso i punti più bassi del bacino. Invece il bacino tende a sviluppare una sua rete di “percorsi ad alta conducibilità” (fiumi, affluenti, ruscelli e rivoletti), lasciando la filtrazione solo alla scala più piccola (elementare). Il problema opposto determina la forma del delta fluviale.



a



b



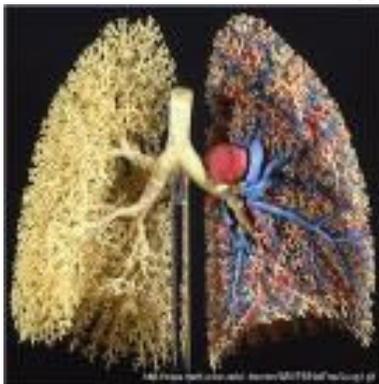
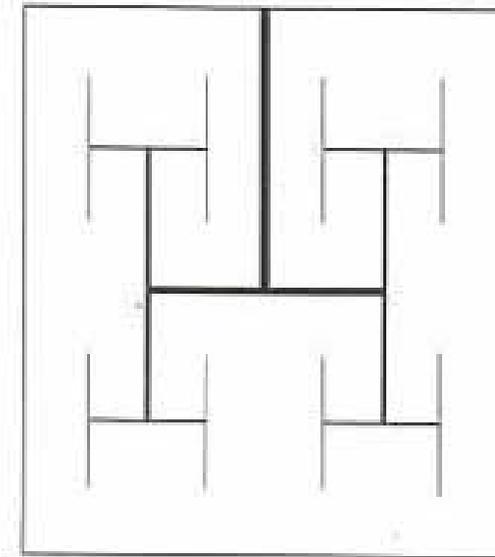
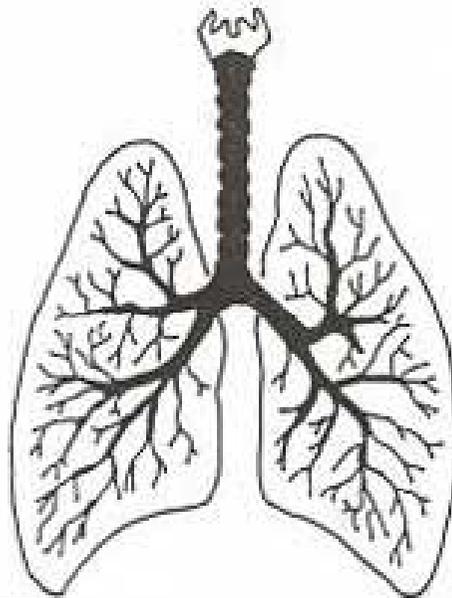
## Constructal theory

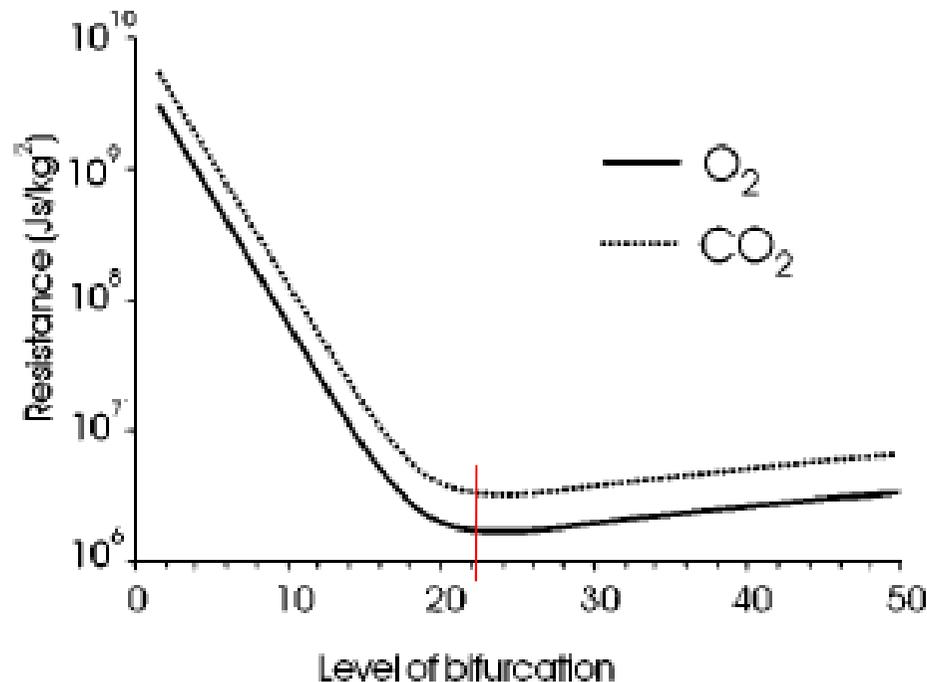
Nature



Time

Principle





## Constructural idea:

The fluid tree should promote the easiest access to the external air

Reis, A. H., Miguel, A. F. and Aydin, M. (2004) A constructal view of flow architecture of the lungs. *Medical Physics* 31, 1135-1140

**-23 levels of bifurcation** (*channelling*) that ends with alveolar sacs (*diffusion*)

- length defined by the **ratio of the square of the first airway diameter to its length** is constant for all individuals of the same species



Possiamo **concludere** dicendo che, poiché i processi evolvono in modo da dare la massima variazione di entropia nel minimo tempo, **i sistemi da noi costruiti devono cercare di rendere minima questa variazione di entropia dovuta alle irreversibilità**, dato che essa rappresenta quello che chiamiamo inquinamento dell'ambiente.

Sostenibile sarà quindi il sistema che si inserisce nel flusso energetico naturale minimizzando la variazione di entropia dell'ambiente.

*Grazie dell'attenzione*



## Bibliografia indicativa

- A. Bejan, S. Lorente, *Design with Constructal Theory*, Wiley, 2008  
[www.constructal.org](http://www.constructal.org)
- C. Cercignani, *Boltzmann. Un genio nell'Austria felix*, I grandi della scienza, Le Scienze, 2003
- M. Cini, *Un paradiso perduto*, Feltrinelli, 1994.
- T.K.Derry, T.I.Williams, *Storia della tecnologia*, Boringhieri 1977.
- E. Schrodinger, *What is life?*, Edizione Italiana, Sansoni, Firenze, 1947.
- AA.VV., *The Project Physics Course, Unità 1-3*, Zanichelli 1977.
- I. Asimov, *Le parole della scienza*, Oscar Mondadori, 1976.