



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

# Lezione 01 - Introduzione

**Corso di Fisica Tecnica**  
**a.a. 2019-2020**

***Prof. Gaël R. Guédon***  
Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano

Prof. Gaël Raymond Guédon

Dipartimento di Energia

Tel.: 02 2399 3828

Email: [gaelraymond.guedon@polimi.it](mailto:gaelraymond.guedon@polimi.it)

Ricevimento su appuntamento

Lucidi, dispense, informazioni sul corso, esercitazioni, ecc. sono disponibili sul sito BeeP del corso

<https://beep.metid.polimi.it/>

## **Termodinamica**

Principi di conservazione

Sistemi termodinamici chiusi e aperti

Trasformazioni elementari

Macchine termodinamiche

Cicli termodinamici

## **Trasmissione del calore**

Conduzione in regime stazionario

Convezione forzata e naturale

Scambiatori di calore

Irraggiamento

## Dispense

### ➤ Termodinamica

*Libro G. Dassù e F. Inzoli «Lezioni di Fisica Tecnica: Termodinamica»*

### ➤ Trasmissione del calore

*Libro G. Dassù e F. Inzoli «Lezioni di Fisica Tecnica: Trasmissione del calore»*

## Libro di testo (facoltativo)

- Yunus A. Cengel, J. M. Cimbala, R. H. Turner, a cura di L. Molinari, L. P. M. Colombo, A. Angelorri, *Elementi di fisica tecnica. Termodinamica applicata, meccanica dei fluidi, trasmissione del calore*, Editore: McGraw Hill, 2017

## Eserciziario (facoltativo)

- E. Colombo e F. Inzoli «Termodinamica e trasmissione del calore»

## Obiettivi della lezione

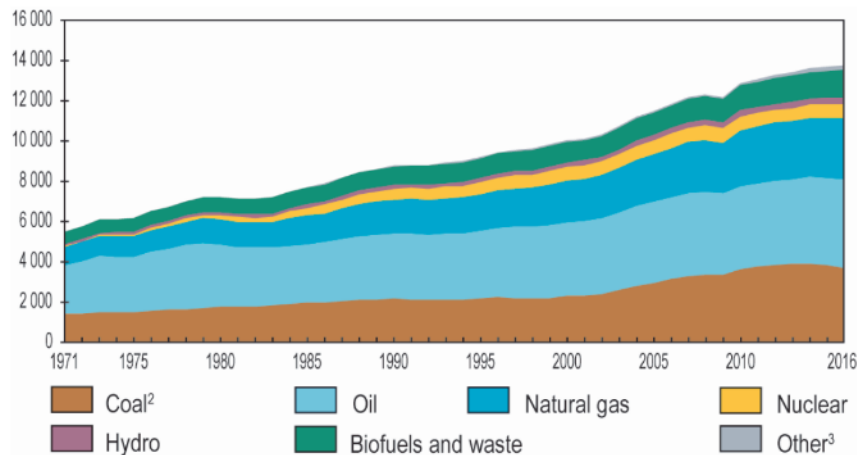
- Introdurre il tema dell'**energia**
- Definire un **sistema termodinamico**
- Definire uno **stato di equilibrio**
- Definire le **variabili** o **funzioni di stato**
- Introdurre i vari modelli di **equazioni di stato**



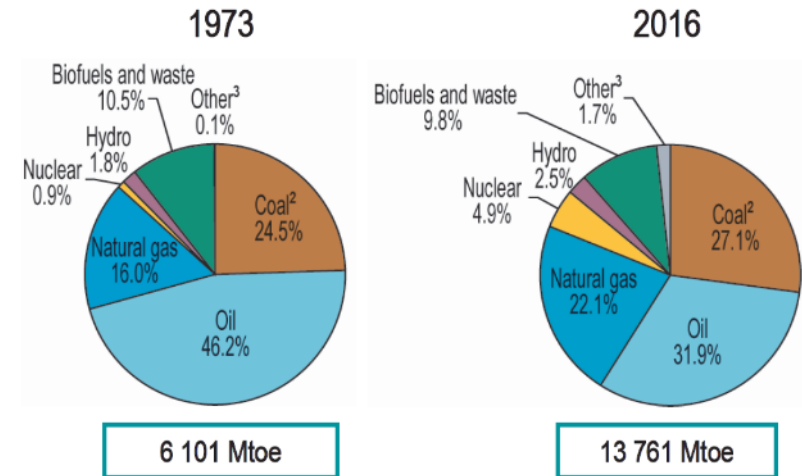
## Fonti di energia

### World total primary energy supply (TPES) by fuel

World<sup>1</sup> TPES from 1971 to 2016 by fuel (Mtoe)



1973 and 2016 fuel shares of TPES



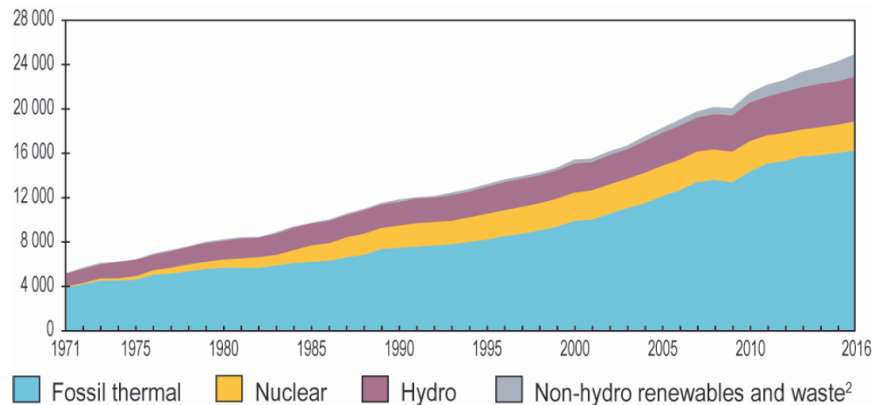
1. World includes international aviation and international marine bunkers.
2. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.
3. Includes geothermal, solar, wind, tide/wave/ocean, heat and other.

IEA Key world energy statistics, 2018



## Trasformazioni

World electricity generation<sup>1</sup> from 1971 to 2016 by fuel (TWh)

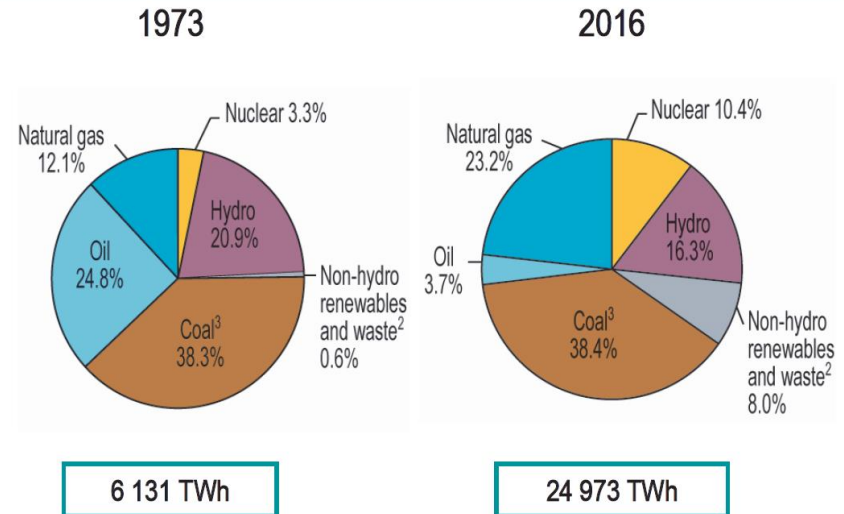


1. Excludes electricity generation from pumped storage.

2. Includes geothermal, solar, wind, tide/wave/ocean, biofuels, waste, heat and other.

3. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.

1973 and 2016 source shares of electricity generation<sup>1</sup>



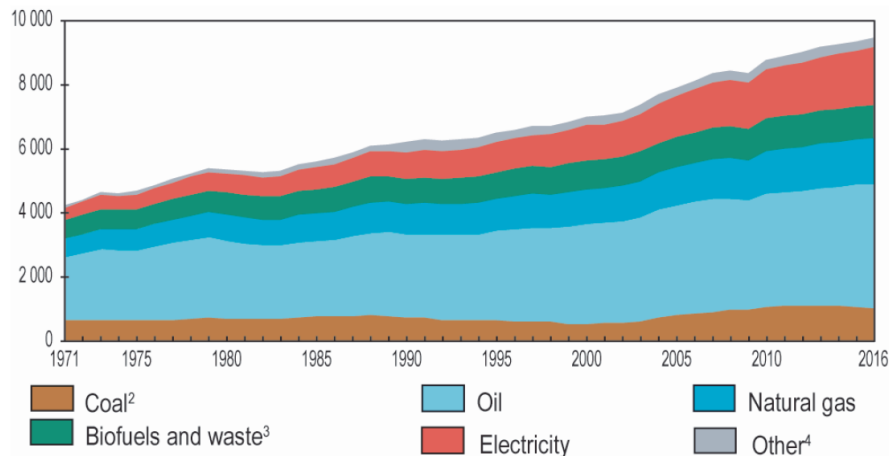
IEA Key world energy statistics, 2018



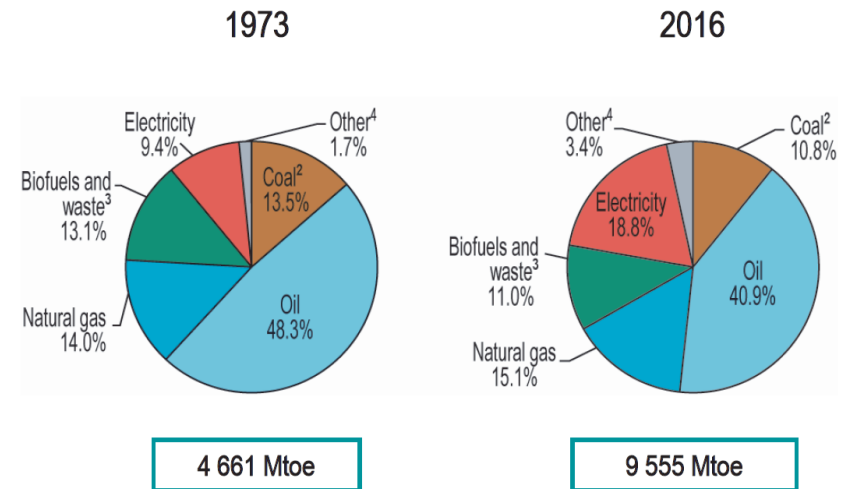
## Consumi

### World total final consumption (TFC) by fuel

World<sup>1</sup> TFC from 1971 to 2016 by fuel (Mtoe)



1973 and 2016 fuel shares of TFC



1. World includes international aviation and international marine bunkers.

2. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.

3. Data for biofuels and waste final consumption have been estimated for a number of countries.

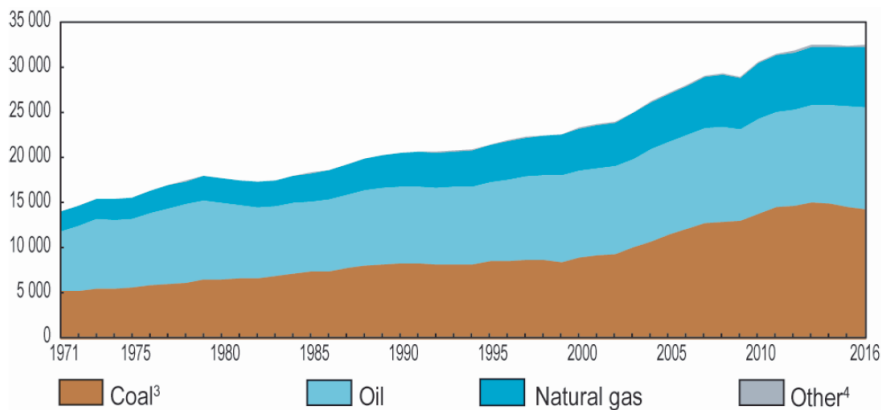
4. Includes heat, solar thermal and geothermal.

IEA Key world energy statistics, 2018

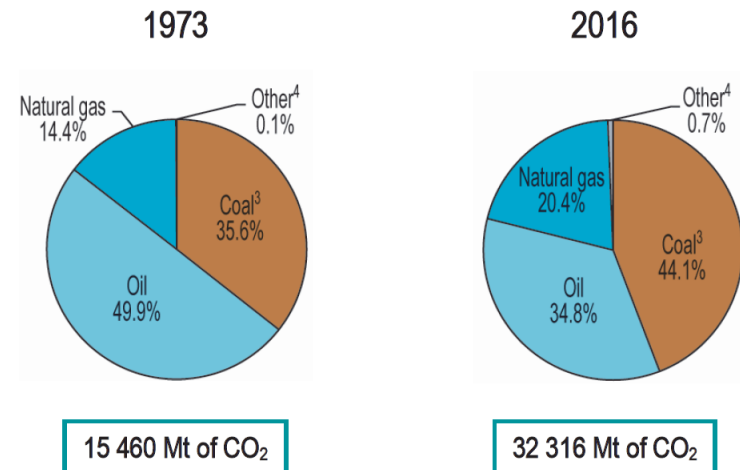
## Emissioni

### CO<sub>2</sub> emissions by fuel

World<sup>1</sup> CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion<sup>2</sup> from 1971 to 2016  
by fuel (Mt of CO<sub>2</sub>)



1973 and 2016 fuel shares of CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion<sup>2</sup>



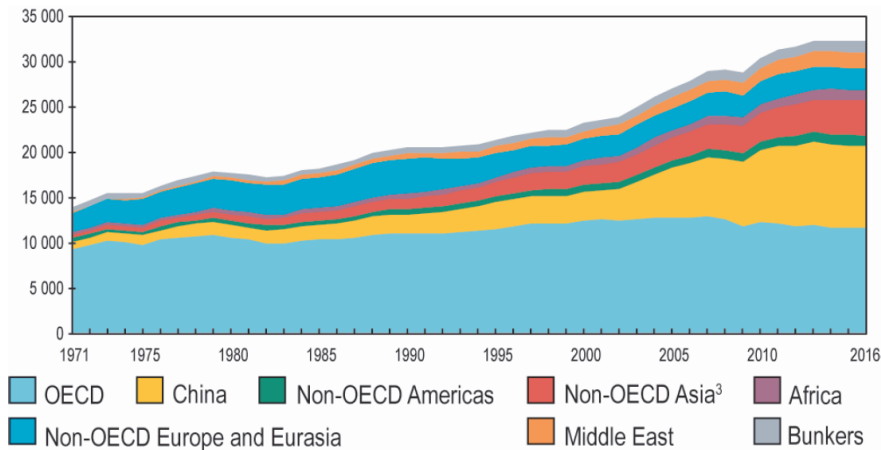
1. World includes international aviation and international marine bunkers.
2. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion are based on the IEA Energy Balances and on the 2006 IPCC Guidelines, and exclude emissions from non-energy.
3. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.
4. Includes industrial waste and non-renewable municipal waste.

IEA Key world energy statistics, 2018

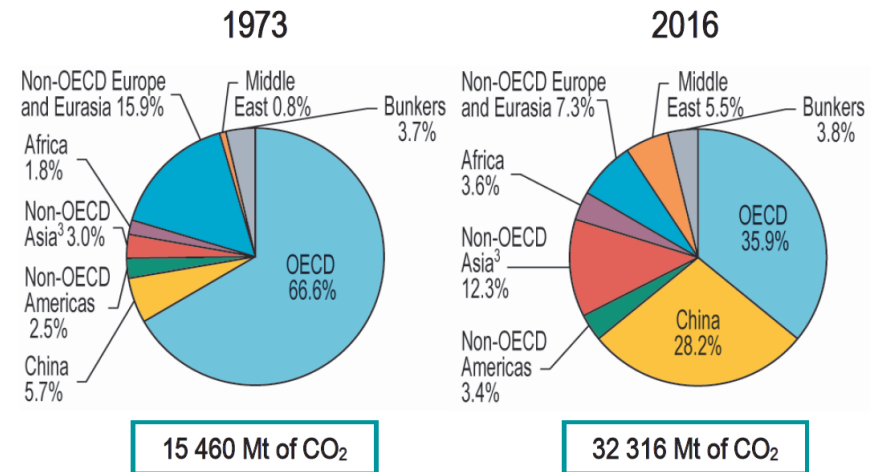
## Emissioni

### CO<sub>2</sub> emissions by region

World<sup>1</sup> CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion<sup>2</sup> from 1971 to 2016  
by region (Mt of CO<sub>2</sub>)



1973 and 2016 regional shares of CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion<sup>2</sup>



1. World includes international aviation and marine bunkers, which are shown together as Bunkers.

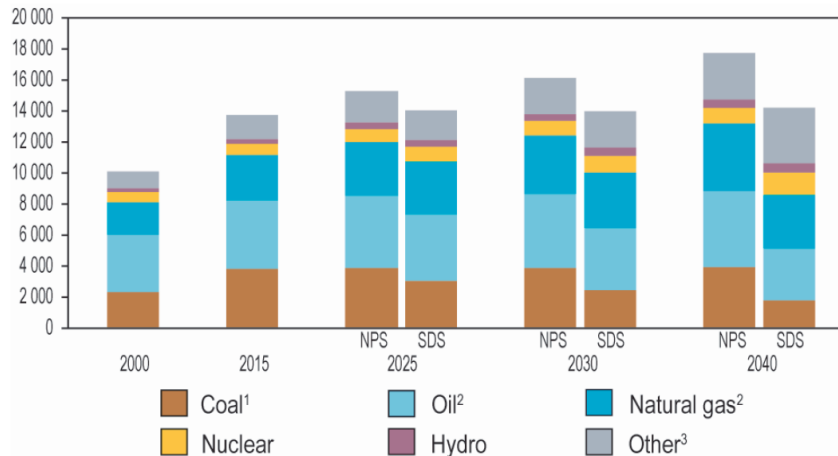
2. CO<sub>2</sub> emissions from fuel combustion are based on the IEA Energy Balances and on the 2006 IPCC Guidelines, and exclude emissions from non-energy.

3. Non-OECD Asia excludes China.

IEA Key world energy statistics, 2018

## Previsioni per il 2040

TPES outlook by fuel and scenario to 2040 (Mtoe)

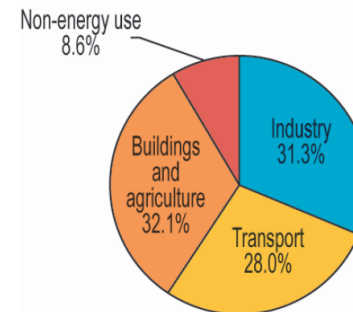


**NPS: New Policies Scenario**  
Incorporates existing energy policies as well as an assessment of the results likely to stem from the implementation of announced policy intentions.

**SDS: Sustainable Development Scenario<sup>4</sup>**  
Outlines an integrated approach to achieving internationally agreed objectives on climate change, air quality and universal access to modern energy.

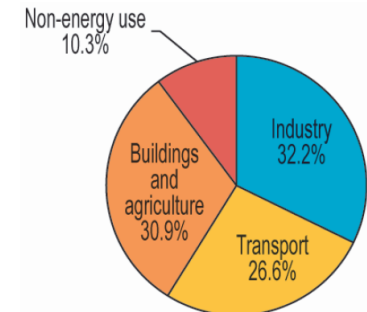
Total final consumption by sector and scenario in 2040

### New Policies Scenario



12 461 Mtoe

### Sustainable Development Scenario



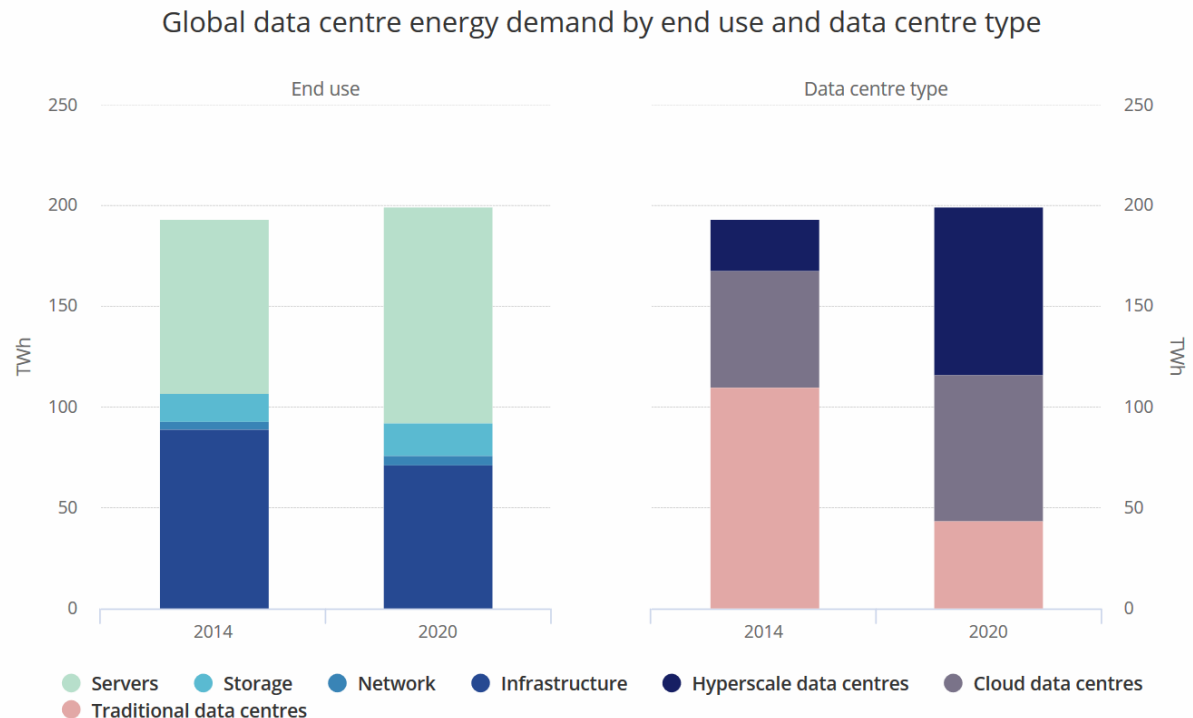
10 174 Mtoe

1. In these graphs, peat and oil shale are aggregated with coal.
  2. Includes international aviation and international marine bunkers.
  3. Includes biofuels and waste, geothermal, solar, wind, tide, etc.
  4. For more information: <http://www.iea.org/weo/weomodel/sds/>.
- Source: IEA, World Energy Outlook 2017.

IEA Key world energy statistics, 2018

## Impatto energetico delle tecnologie ICT

- 194 TWh elettrici nel 2014
- circa 1% del consumo globale di energia elettrica
- crescita del carico di lavoro stimata al 300%
- consumi contrastati dal miglioramento dell'efficienza dei sistemi



*IEA's latest analysis on data centres and networks*

## Esempi di **macchine termodinamiche** dedicate alla **produzione di energia elettrica**



300 MWe a 1 GWe





## Esempi di **macchine termodinamiche** dedicate alla **produzione di energia elettrica**



750 kWe



11 MWe



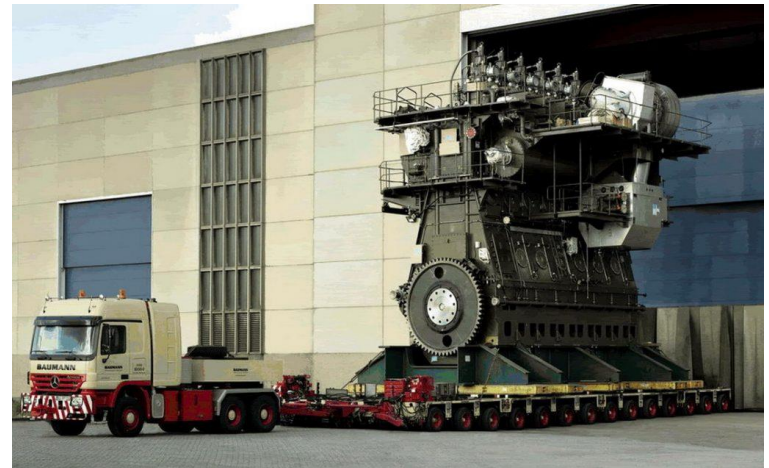
22,5 GWe



## Esempi di macchine termodinamiche per il trasporto



300 kW



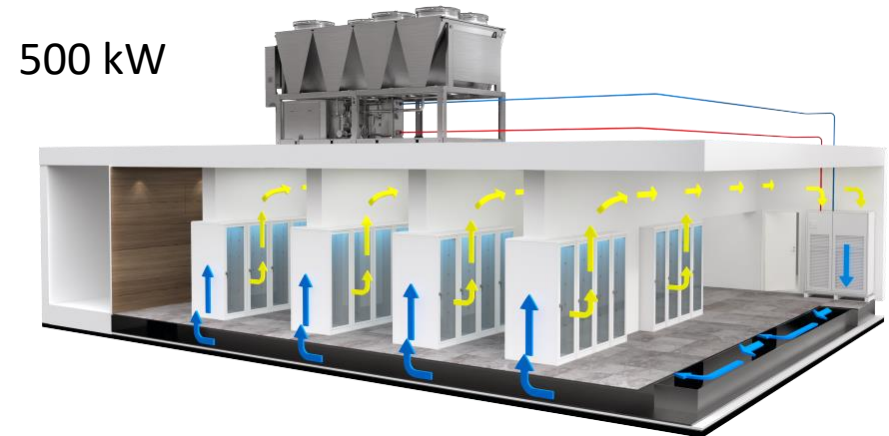
80 MW

65 MW (spinta massima)

## Esempi di **macchine termodinamiche** per usi **industriali**

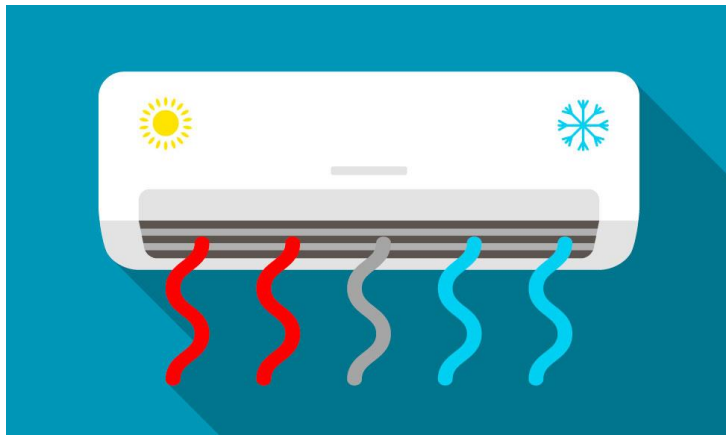


50 kW



200 kW

## Esempi di **macchine termodinamiche** per usi **domestici**



1500 W



200 W

## Il sistema termodinamico

«Porzione di spazio limitata da un **contorno**»

*Il contorno è costituito da una superficie reale o immaginaria, rigida o deformabile.*

«**Mondo esterno o ambiente**»

*Tutto ciò che è esterno al sistema termodinamico. Quando il mondo esterno è di massa infinita, esso è chiamato ambiente.*

«**Serbatoio, sorgente o pozzo**»

*Ambiente che interagisce con il sistema termodinamico.*

## **Il sistema composto**

«Insieme dei sistemi e sottosistemi a massa finita e/o infinita»

## **Sistemi mono e pluricomponenti**

«Stati di aggregazione»

## Il sistema semplice

- chimicamente e fisicamente omogeneo ed isotropo
- non soggetto a campi gravitazionali, elettrici o magnetici
- chimicamente inerte
- esente da effetti di superficie per via delle grandi dimensioni

**Lo stato di equilibrio** è il particolare stato cui perviene spontaneamente il sistema isolato

- **Riproducibile e descrivibile** da poche proprietà del sistema stesso
- Il sistema all'equilibrio è compiutamente descritto attraverso un numero ristretto di **variabili termodinamiche** (anche dette grandezze o proprietà di stato, variabili o funzioni di stato, parametro termodinamico)



## Grandezze intensive ed estensive

- **Grandezza intensiva:** valore **non dipende** dall'estensione del sistema (per esempio temperature, pressione, densità)
- **Grandezza estensiva:** valore **dipende** dall'estensione del sistema (per esempio massa, volume)

Massa: 200 g
Volume: 2 L
Temperatura: 10 °C
Pressione: 1 bar

dividendo il  
sistema in 2



Massa: 100 g	Massa: 100 g
Volume: 1 L	Volume: 1 L
Temperatura: 10 °C	Temperatura: 10 °C
Pressione: 1 bar	Pressione: 1 bar

## Grandezze intensive ed estensive

- **Grandezza intensiva:** valore **non dipende** dall'estensione del sistema (per esempio temperature, pressione, densità)
- **Grandezza estensiva:** valore **dipende** dall'estensione del sistema (per esempio massa, volume)
- **Grandezza estensiva specifica:** grandezza estensiva divisa per un'altra grandezza estensiva (tipicamente massa o numero di moli)

$$v = \frac{V}{M}$$

## Grandezze intensive ed estensive

Le grandezze estensive specifiche ed intensive vengono normalmente usate per descrivere lo stato di equilibrio di un sistema termodinamico

### ➤ Legge di Duhem

*«Nel caso di sistema monocomponente, il numero di parametri termodinamici intensivi o estensivi specifici indipendenti atti a descrivere compiutamente lo stato interno di equilibrio è due.»*

## Grandezze intensive ed estensive

### ➤ Regola di Gibbs

$$V = C + 2 - F$$

$C$ : numero di componenti

$F$ : numero di fasi

$V$ : numero di **variabili intensive indipendenti** utilizzabili

## Grandezze intensive ed estensive

- Una **diretta conseguenza** della legge di Duhem è l'esistenza della cosiddetta **equazione di stato**

$$f(P, v, T) = 0$$

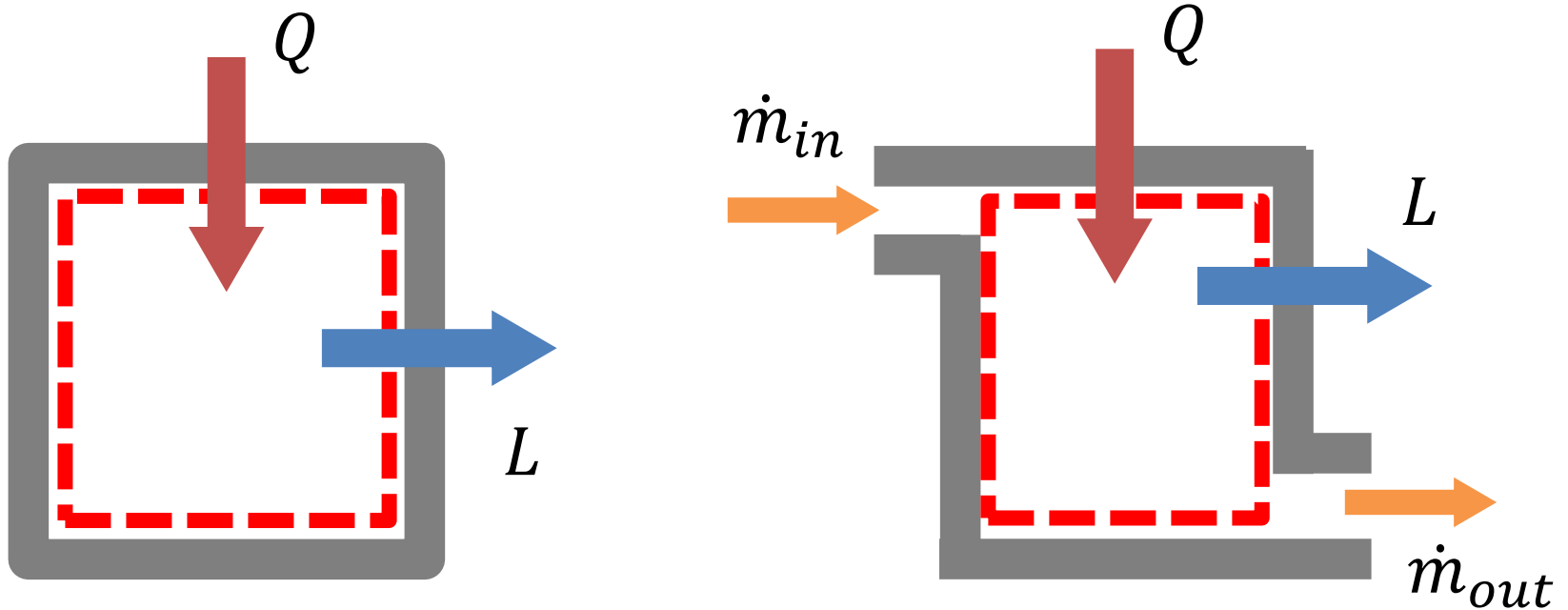
*In molti casi, l'equazione di stato è ignota*

## Il contorno del sistema

- Attraverso il contorno, il sistema può **scambiare massa e/o energia** con un altro sistema

CONTORNO	CALORE	LAVORO	MASSA
Adiabatico	NO		
Diatermano	SI		
Rigido		NO	
Deformabile		SI	
Impermeabile (chiuso)			NO
Permeabile (aperto)			SI
Sistema isolato	NO	NO	NO

## Sistema chiuso e sistema aperto





## La trasformazione termodinamica

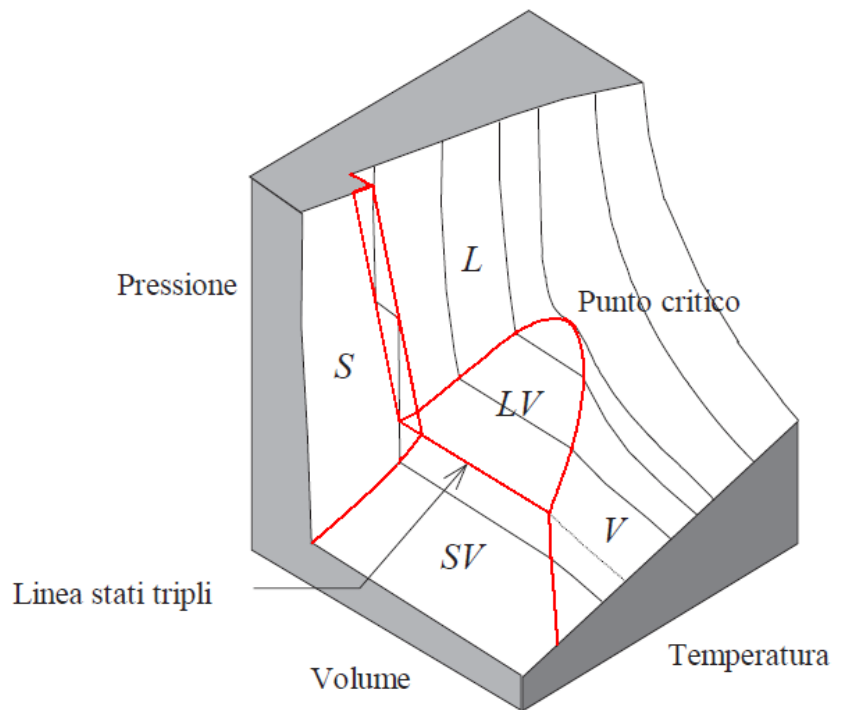
Dopo la rimozione dei vincoli di un sistema chiuso in equilibrio, il sistema scambia con l'ambiente calore e/o lavoro fino al raggiungimento di un nuovo stato di equilibrio.

**L'insieme degli stati intermedi** successivi, tra lo stato iniziale e finale, definisce la **trasformazione termodinamica**.

TRASFORMAZIONE	CARATTERISTICHE
Quasi-statica o internamente reversibile	Costituita da una successione di stati di equilibrio; può non essere reversibile
Reversibile	Se percorsa in senso inverso, riporta sistema e ambiente nello stato iniziale
Irreversibile	Trasformazione in parte o per intero non reversibile. Non è rappresentabile su un diagramma di stato.
Chiusa o ciclica	Gli estremi della trasformazione coincidono
Elementare	Se una delle grandezze di stato si mantiene costante durante la trasformazione

«L'**equazione di stato** di un **sistema semplice** è rappresentata in uno spazio cartesiano tridimensionale da una superficie detta «**superficie di stato**», luogo dei punti rappresentativi di **tutti i possibili stati** termodinamici di equilibrio»

$$f(P, v, T) = 0$$



## Gas ideali

$$PV = NRT$$

$P$ : pressione [Pa]

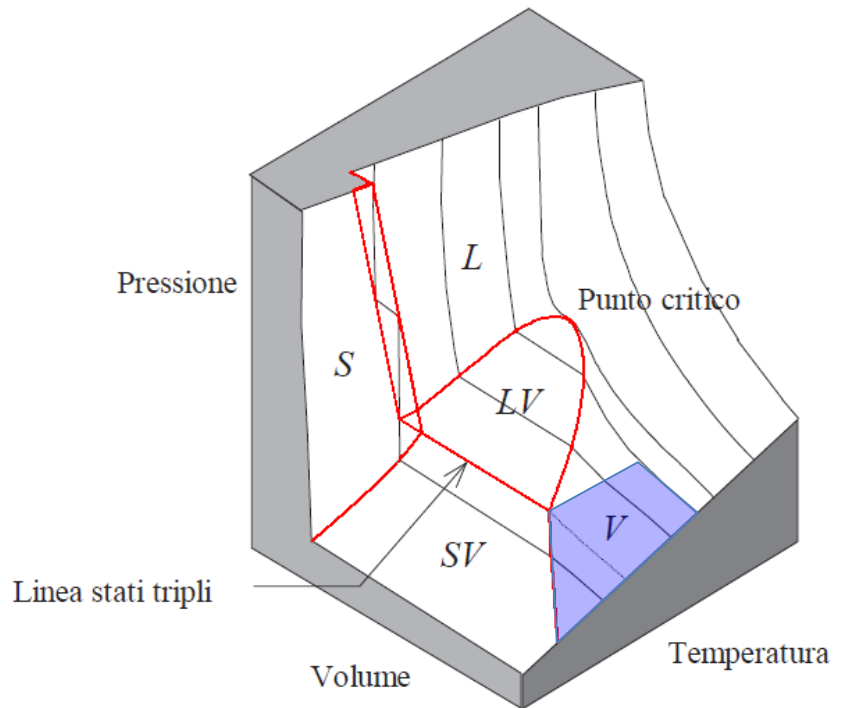
$V$ : volume [m<sup>3</sup>]

$N$ : moli [kmole]

$T$ : temperatura [K]

$R$ : costante universale dei gas ideali

$$R = 8314 \text{ [J/(kmole K)]}$$



## Gas ideali

$$PV = \frac{M}{M_m} RT$$

$$PV = MR^*T$$

$P$ : pressione [Pa]

$V$ : volume [ $\text{m}^3$ ]

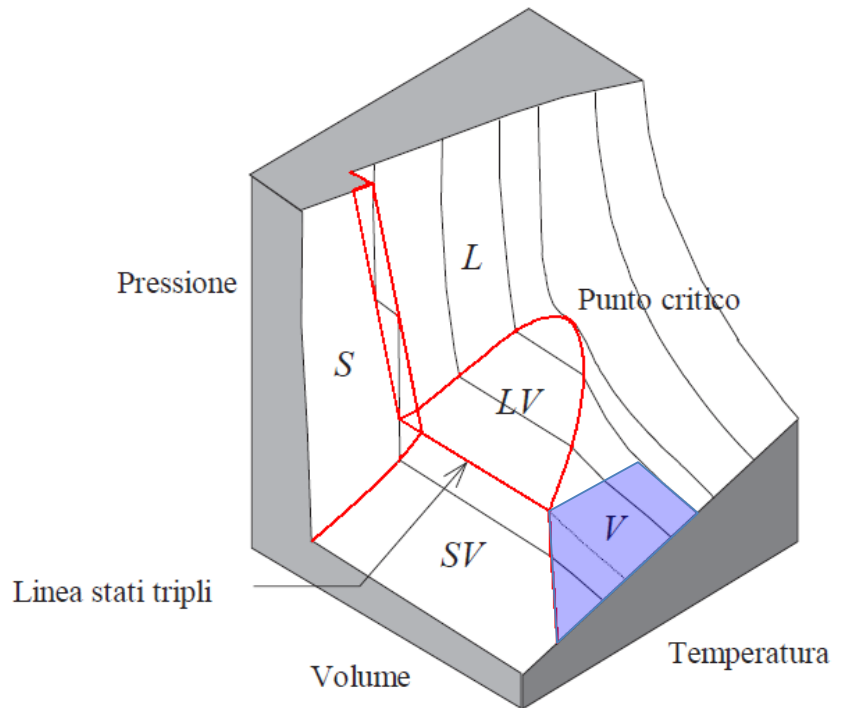
$M$ : massa [kg]

$M_m$ : massa molare [kg/kmole]

$T$ : temperatura [K]

$R^*$ : costante caratteristica del gas considerato

$$R^* = \frac{R}{M_m}$$



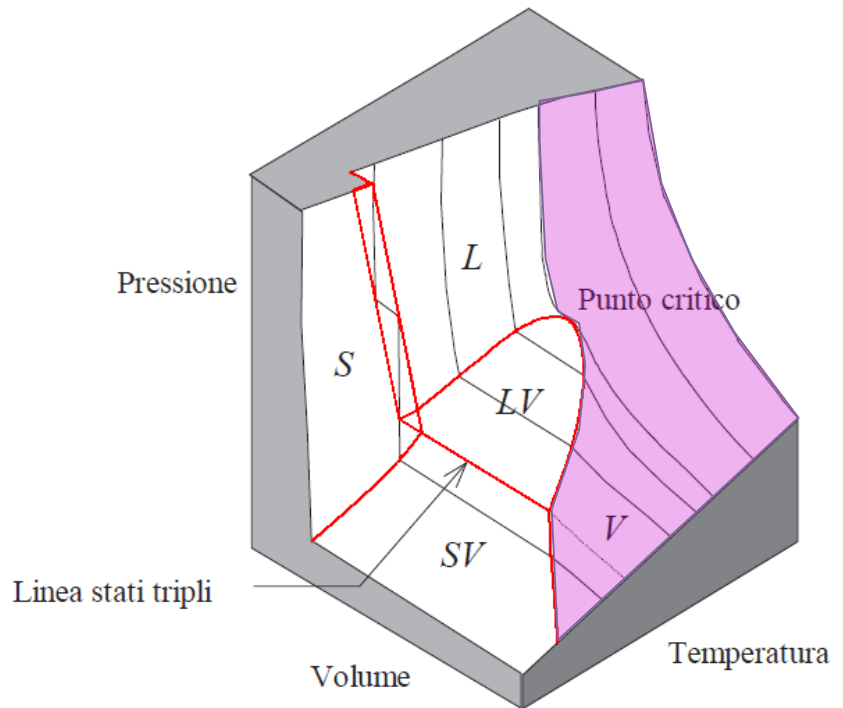
## Gas reali

Modelli di equazione di stato più complessi per descrivere il comportamento dei gas in condizioni di temperatura e **pressioni elevate**

### Esempio

Equazione di van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{v_m^2}\right)(v_m - b) = RT$$



## Liquidi e solidi

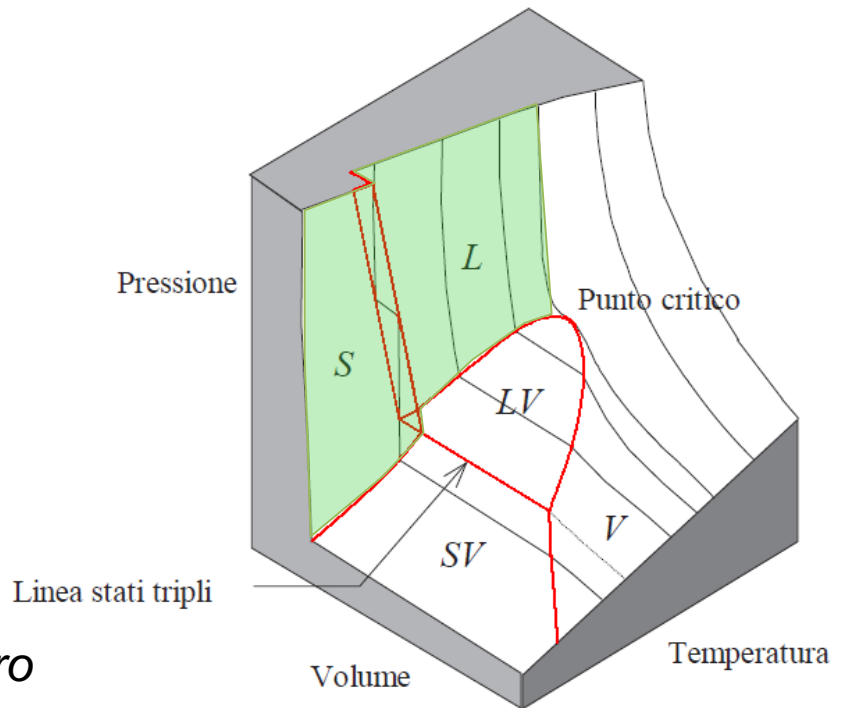
$$f(P, v, T) = 0 \quad \rightarrow \quad v = v(P, T)$$

$$dv = \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P dT + \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T dP$$

$$dv = \beta v dT - K_T v dP$$

$$\beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \quad \text{coefficiente di dilatazione termica isobaro}$$

$$K_T = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial P} \right)_T \quad \text{coefficiente di comprimibilità isoterma}$$





## Liquidi e solidi

$\beta$  e  $K_T$  possono essere considerati costanti per ampi intervalli di temperatura e di pressione.  
La precedente relazione differenziale è quindi integrabile e lo stato calcolabile.

## Modello semplificato

Liquido incompressibile

Solido incompressibile

$v = \text{costante}$

