

# Impianti di produzione dell'energia elettrica

Alberto Berizzi

Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano  
e-mail: [alberto.berizzi@polimi.it](mailto:alberto.berizzi@polimi.it)

# Energia e lavoro

Lavoro è l'atto di produrre un cambiamento di configurazione in un sistema.

Energia è la capacità di compiere lavoro.

L'energia totale di qualsiasi sistema materiale è una quantità che non può né essere aumentata né diminuita da qualsiasi azione tra le parti del sistema, benché possa essere trasformata in una qualsiasi delle forme di cui l'energia è suscettibile.

L'energia  $[ML^2T^{-2}]$  si misura in Joule  $J=Nm$

# Forme di energia

- Chimica
- Meccanica
  - cinetica
  - potenziale
- Elastica
- Elettrica
- Elettromagnetica  
o raggiante
- Termica
- Interna
- Nucleare
- Sonora
- Biologica

# Fonti di energia

- Primarie: il lavoro utile per l'uomo è ricavato direttamente dall'apparato concentratore di energia predisposto: energia eolica, idraulica, termica
- Secondarie: l'energia non è prodotta direttamente, bensì proviene da un apparato primario ed è stata trasformata in altra forma più atta alla sua utilizzazione e trasporto.

# Energia elettrica

- E' una fonte di tipo secondario, ricavabile da fonti primarie:
  - chimica,
  - idraulica,
  - meccanica,

sempre attraverso energia meccanica, cioè mediante alternatori, tranne nel fotovoltaico o nella pila (trascurabili)

# Unità di misura

	<b>Joule</b>	<b>kgm</b>	<b>kcal</b>	<b>kWh</b>
<b>1 Joule</b>	1	0,102	$2,389 \cdot 10^{-4}$	$2,778 \cdot 10^{-7}$
<b>1 kgm</b>	9,81	1	$2,343 \cdot 10^{-3}$	$2,724 \cdot 10^{-6}$
<b>1 kcal</b>	4186	426,7	1	$1,163 \cdot 10^{-3}$
<b>1 kWh</b>	$3,6 \cdot 10^6$	$3,671 \cdot 10^5$	860	1

1 tep =  $10^7$  kcal

1 BTU = 0,252 kcal

- Per l'energia primaria, si usa il tep: quantità di energia necessaria per ottenere, da una qualunque fonte, il calore prodotto da una tonnellata di petrolio
- L'energia idroelettrica è supervalorizzata di un coefficiente 1/0.4

# Consumo interno lordo di energia (1999)

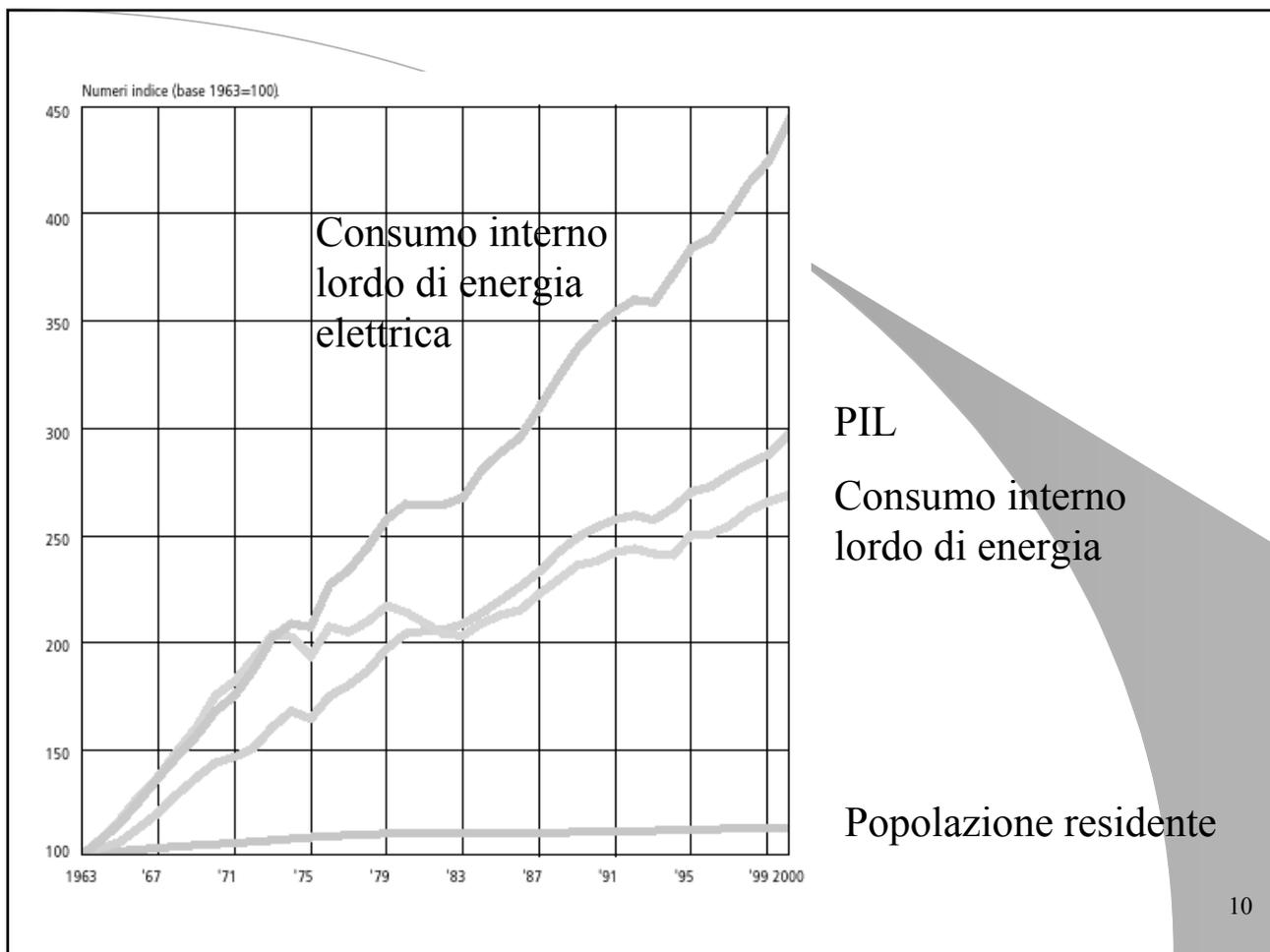
- Somma dei quantitativi di fonti primarie prodotte, di fonti primarie e secondarie importate e della variazione delle scorte di fonti primarie e secondarie presso produttori e importatori, diminuita delle fonti primarie e secondarie esportate
- 182.7 Mtep: (150 nel 1988)
  - 92.5 derivati del petrolio (90)
  - 56 gas (32)
  - 12.1 carbone (15)
  - 13 rinnovabili (10)
  - 9.2 import (3)

# Usi finali dell'energia (1999)

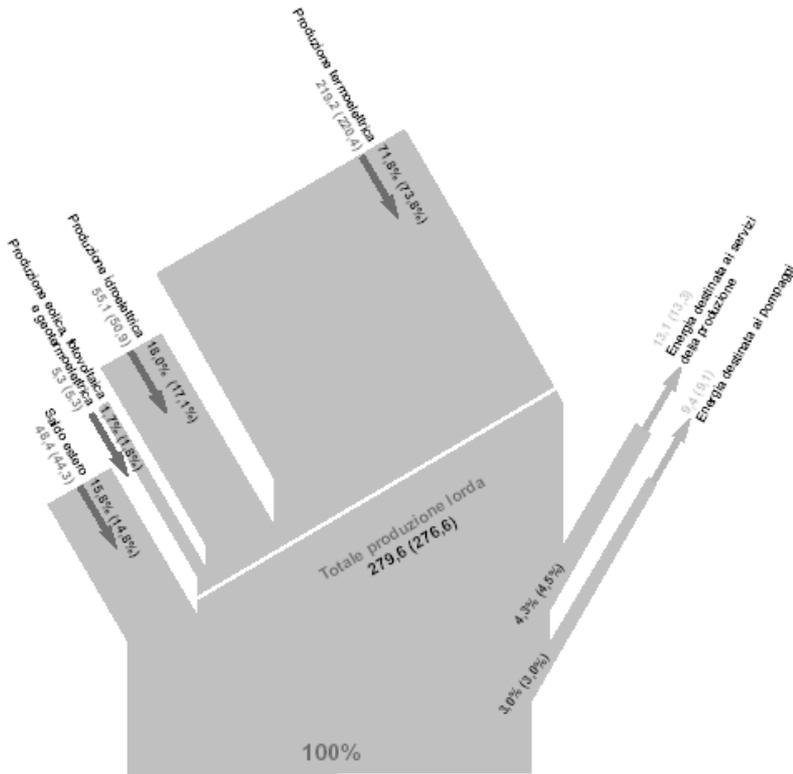
- Consumo interno lordo di energia diminuito del consumo del settore energetico; quest'ultimo include le relative variazioni delle scorte
- 166.6 Mtep:
  - Industria 55.2
  - Trasporti 42.5
  - Usi civili e agricoltura 61.1
  - Usi non energetici 7.8

# Bilancio dell'energia elettrica (1999)

● Fonti primarie:	63.3 Mtep
● Solidi	6.6
● Derivati petrolio	19.4
● Gas naturale	16.7
● Rinnovabili	11.4
● Import	9.2
● Consumi finali:	63.3 Mtep
● Industria	28.5
● Trasporti	1.8
● Usi civili e agricoltura	27.3
● Consumi centrali e perdite	5.7



# Bilancio energetico 2001 (Dati GRTN)



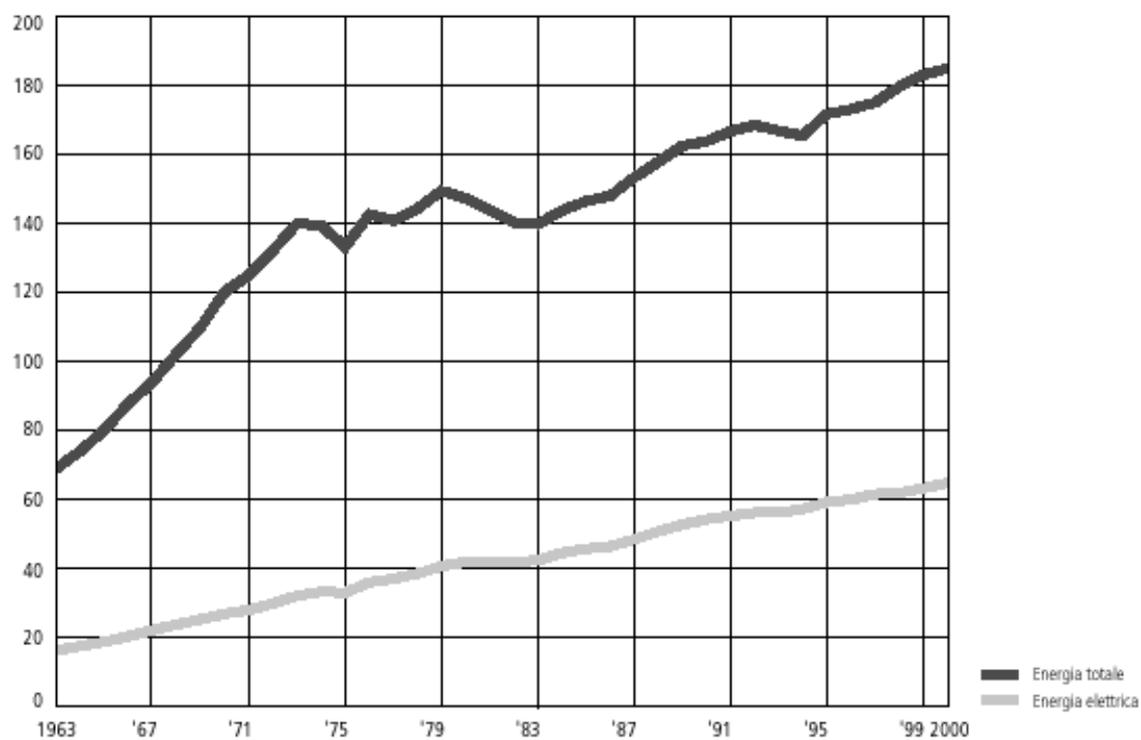
Fabbisogno (consumi + perdite) 305,4 (298,5)

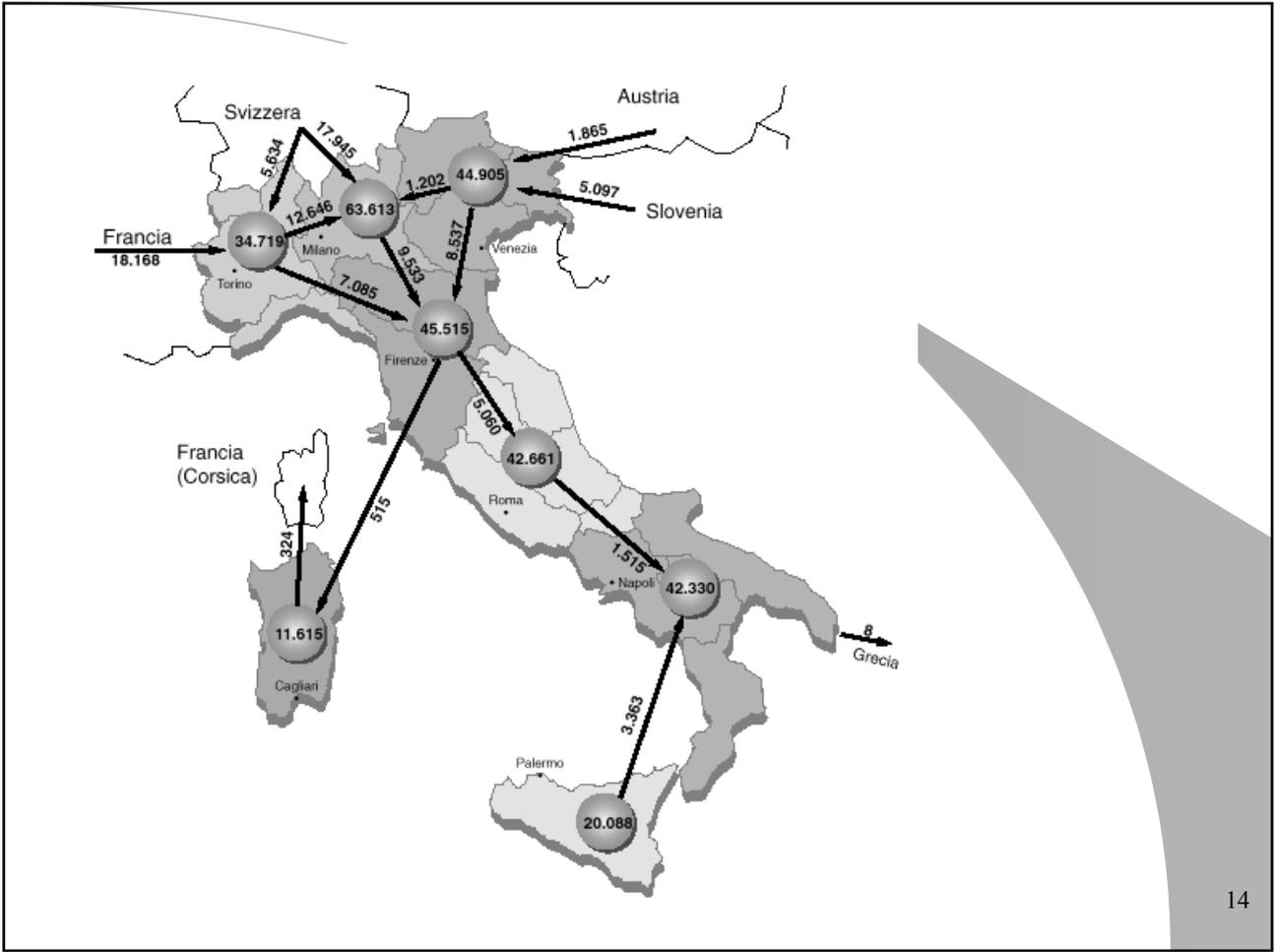
Variazione 2001/2000  
+2,3 %

# Bilancio dell'energia elettrica [GWh]

	1999	2000	2000/1999
<b>Produzione lorda</b>	<b>265.656,7</b>	<b>276.629,1</b>	<b>4,1%</b>
- idrica	51.777,3	50.899,6	-1,7%
- termica	209.067,8	220.454,9	5,4%
- geotermica	4.402,7	4.705,2	6,9%
- eolica	402,6	563,1	39,7%
- fotovoltaica	6,3	6,3	0,0%
<b>Consumi dei servizi ausiliari</b>	<b>12.920,0</b>	<b>13.336,4</b>	<b>3,2%</b>
<b>Produzione netta</b>	<b>252.736,7</b>	<b>263.292,7</b>	<b>4,2%</b>
- idrica	51.153,7	50.229,2	-1,8%
- termica	197.047,8	208.079,3	5,6%
- geotermica	4.127,5	4.415,5	7,0%
- eolica	401,5	562,5	39,6%
- fotovoltaica	6,2	6,2	0,0%
<b>Destinata ai pompaggi</b>	<b>-8.903,0</b>	<b>-9.129,5</b>	<b>2,5%</b>
<b>Produzione destinata al consumo</b>	<b>243.833,7</b>	<b>254.163,3</b>	<b>4,2%</b>
<b>Ricevuta da fornitori esteri</b>	<b>42.538,0</b>	<b>44.831,0</b>	<b>5,4%</b>
<b>Ceduta a clienti esteri</b>	<b>-528,0</b>	<b>-484,0</b>	<b>-8,3%</b>
<b>RICHIESTA</b>	<b>285.843,7</b>	<b>298.510,3</b>	<b>4,4%</b>
<b>Perdite di rete</b>	<b>18.559,5</b>	<b>19.190,7</b>	<b>3,4%</b>
in percentuale della richiesta	6,5%	6,4%	
<b>CONSUMI</b>	<b>267.284,2</b>	<b>279.319,6</b>	<b>4,5%</b>
<b>Agricoltura</b>	<b>4.682,2</b>	<b>4.906,6</b>	<b>4,8%</b>
<b>Industria</b>	<b>139.698,1</b>	<b>148.192,4</b>	<b>6,1%</b>
- di base	68.114,3	72.663,1	6,7%
- non di base	59.462,8	62.532,0	5,2%
<b>Terziario</b>	<b>62.187,0</b>	<b>65.108,8</b>	<b>4,7%</b>
<b>Usi domestici</b>	<b>60.716,9</b>	<b>61.111,7</b>	<b>0,7%</b>

## Richiesta di energia elettrica [Mtep]

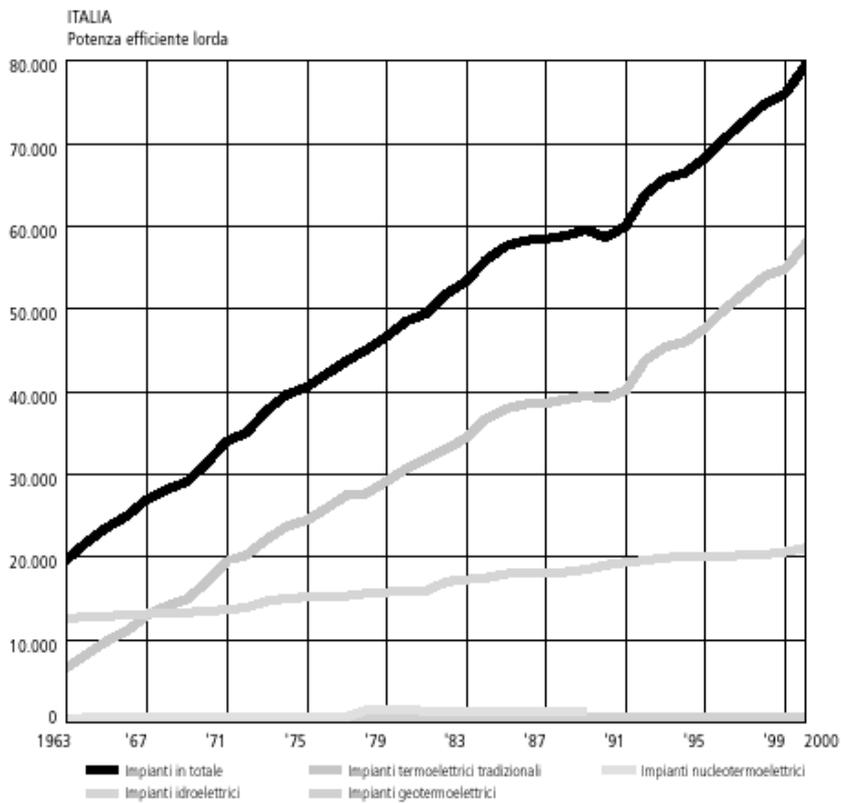




## Tipologie di impianto di generazione

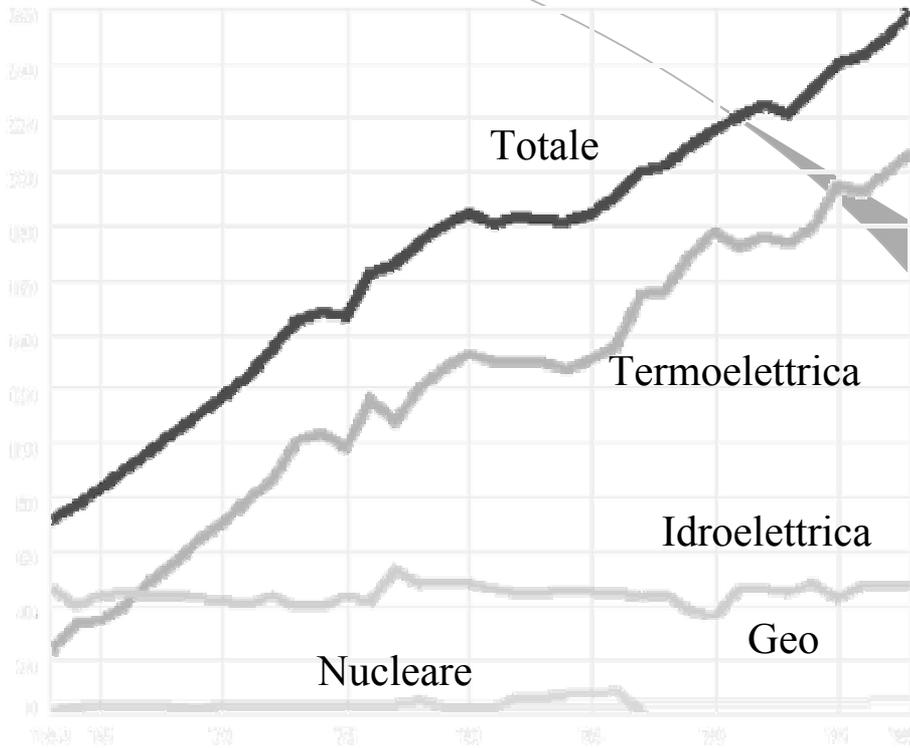
- Idroelettrici: sfruttano l'energia potenziale dell'acqua accumulata in bacini
- Termoelettrici: motori termici oppure impianti basati sulla produzione di vapore
- Fonti rinnovabili: idroelettrico, solare, biomasse, eolico, celle a combustibile, geotermoelettrici, ecc.

# Potenza efficiente lorda [MW]



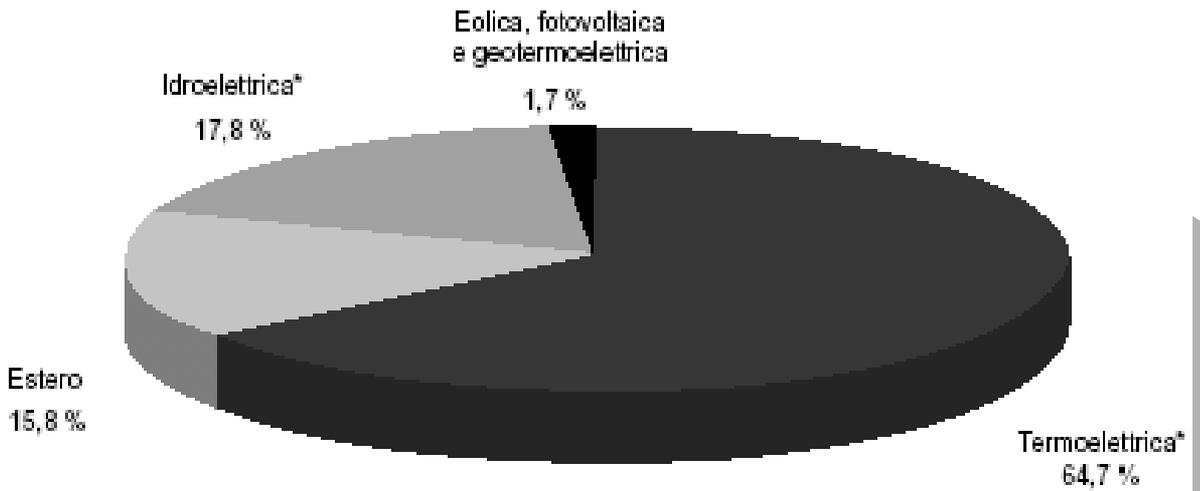
# Caratteristiche dell'energia elettrica

[TWh]



Produzione  
lorda di  
energia  
elettrica

# Produzione di energia (2001)



## *Caratteristiche dell'energia elettrica*

# Contemporaneità di utilizzo

- L'energia elettrica deve essere utilizzata nel momento in cui è prodotta
- Piccoli squilibri sono ammessi solo per pochi istanti

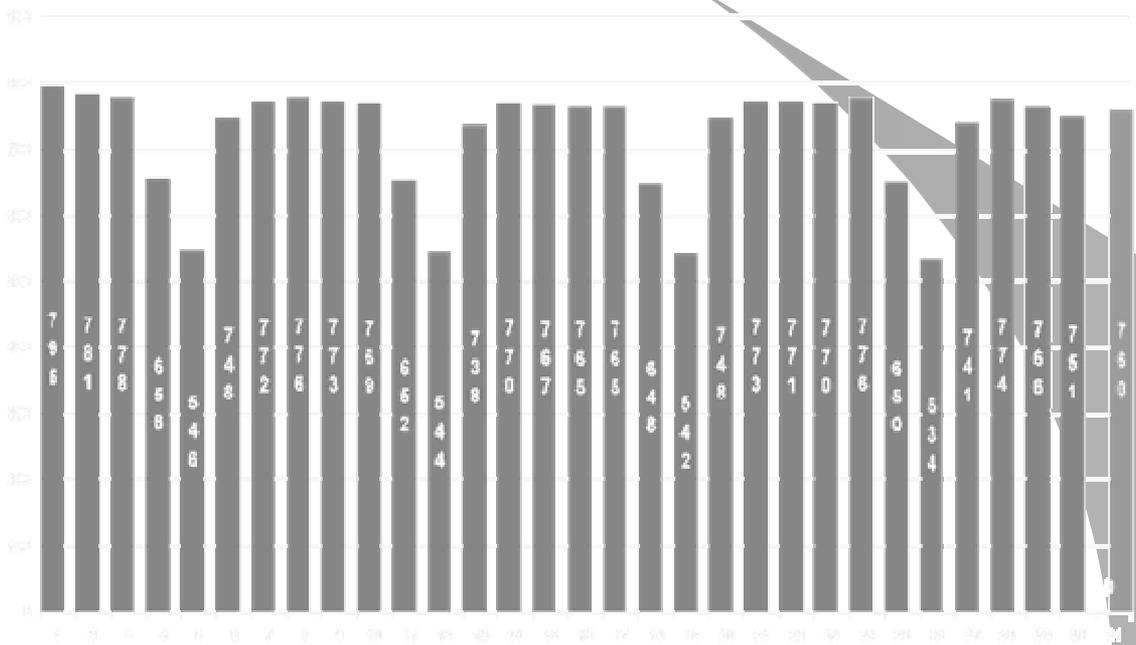


Variazione dell'energia cinetica delle masse e  
perciò della frequenza di rete (50 Hz)

# Caratteristiche dell'energia elettrica

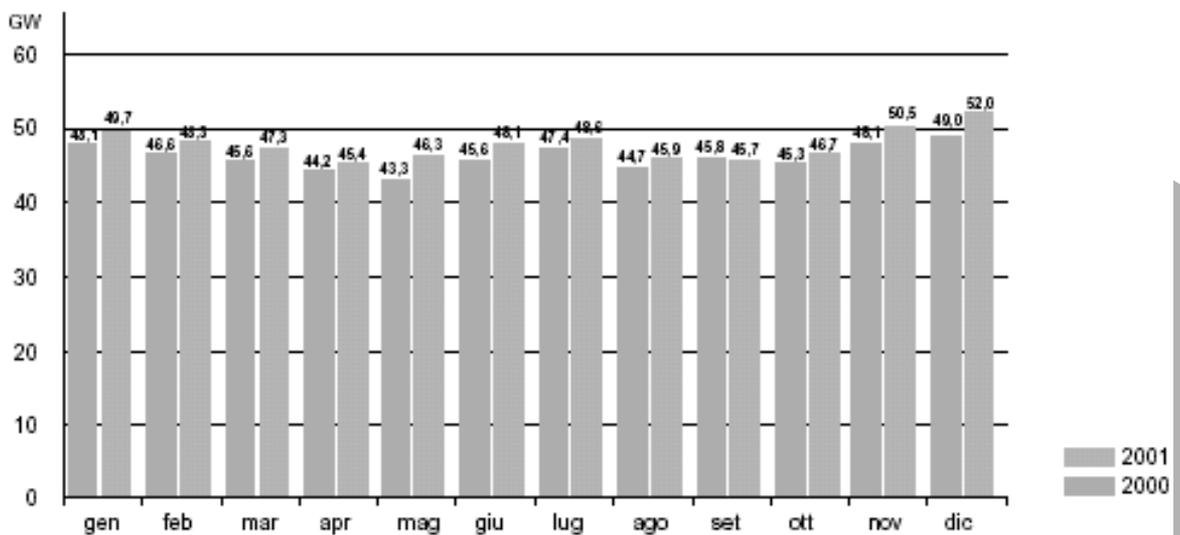
## Richiesta giornaliera (Marzo 2000)

[GWh]

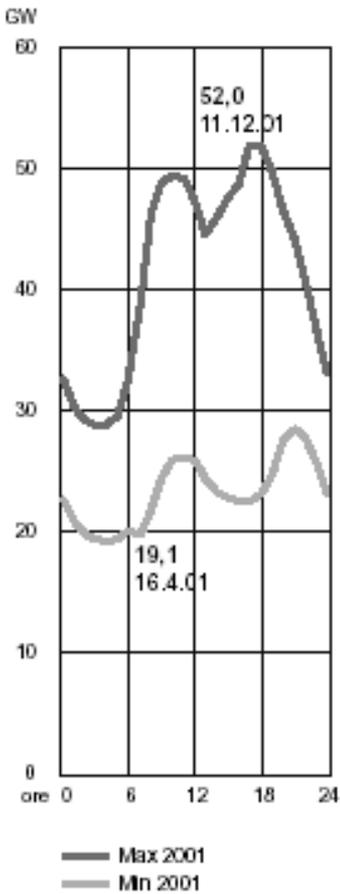


# Fabbisogno massimo mensile

Fabbisogno massimo mensile

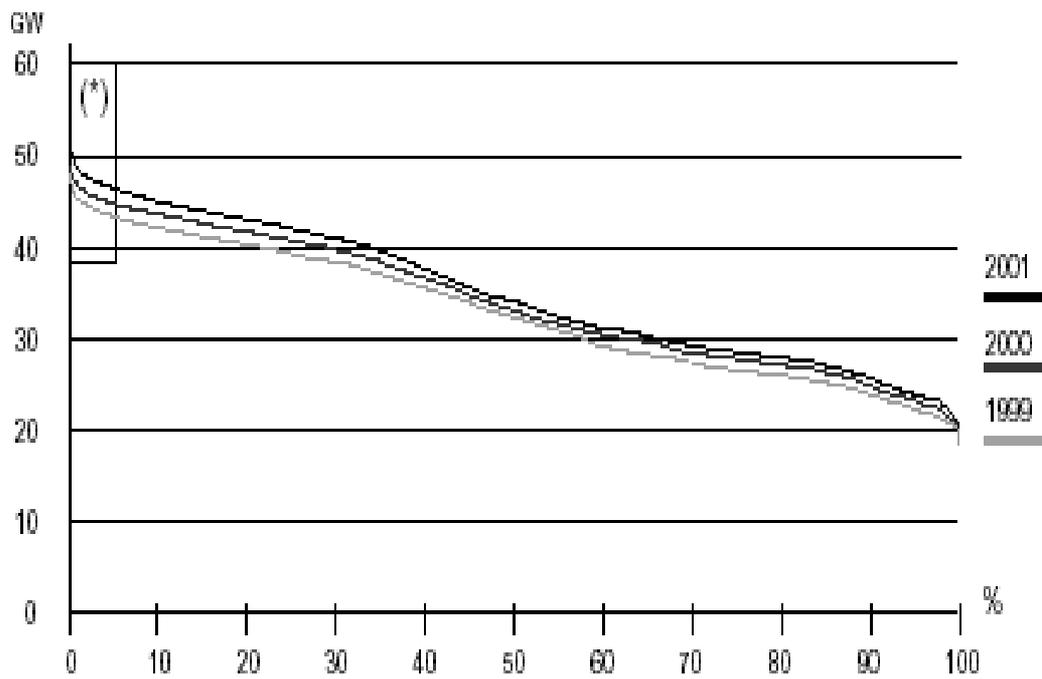


# Diagramma di carico 2001



	MAX		MIN	
	GW	data - ora	GW	data - ora
<b>POTENZA</b>				
Termica erogata lorda	37,6	19 dicembre ore 19	14,9	16 aprile ore 04
Idroelettrica erogata lorda	14,4	30 luglio ore 11	1,2	10 dicembre ore 03
Fabbisogno	52,0	11 dicembre ore 17	19,1	16 aprile ore 04
<b>ENERGIA</b>				
	GWh	data	GWh	data
Termica prodotta lorda	822,0	19 dicembre	375,1	16 aprile
Idroelettrica prodotta lorda	233,5	31 maggio	48,4	16 dicembre
Fabbisogno	1.000,7	12 dicembre	552,2	12 agosto

# Curva di durata dei carichi (2001)



# Parametri importanti

- Fattore di contemporaneità per un complesso di carichi:  $f_c = P_M / \sum P_{Mi}$
- Rapporto tra la potenza massima richiesta e la potenza minima richiesta
  - nell'arco dell'anno (2.7 nel 2001)
  - nell'arco di una giornata
- Numero di ore di utilizzazione della potenza massima: è il numero di ore di funzionamento di una macchina di potenza  $P_M$  (picco di carico) a  $P$  costante per produrre/assorbire l'energia  $E$  corrispondente al diagramma di carico:

$$H = E / P_M \longrightarrow 5860 \text{ ore circa (2001)}$$

# Grandezze di un impianto di produzione

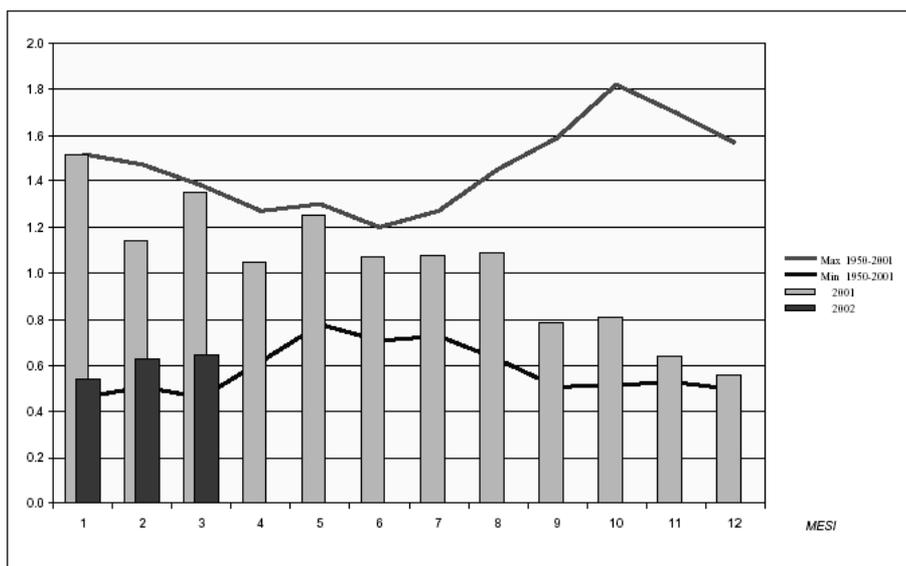
- Potenza nominale: somma delle potenze nominali delle macchine dello stesso tipo presenti in centrale [kW o kVA]
- Massima potenza (lorda o netta) efficiente: massima potenza producibile ( $t > 15$  ore) con tutte le parti in perfetta efficienza (massimo salto, portata-idroelettriche; condizioni ideali-termoelettriche)
- Fattore di utilizzazione  $f_u$  della  $P_M$ : rapporto tra l'energia prodotta e l'energia che avrebbe potuto produrre alla  $P_M$
- Durata di utilizzazione della  $P_M$  in un intervallo di T ore:  $f_u T$
- Potenza disponibile: massima potenza producibile nelle condizioni in cui si trova, indipendentemente dalle condizioni della rete, che si suppone possa accettarla tutta
- Potenza indisponibile: potenza efficiente-potenza disponibile

## Impianti idroelettrici

- Ad acqua fluente (potenza *as available*); H=5000-6000 ore
- A bacino (regolazione giornaliera e settimanale); H=4000-5000 ore
- A serbatoio (regolazione stagionale e pluriennale): H=3500-4000
- Di pompaggio

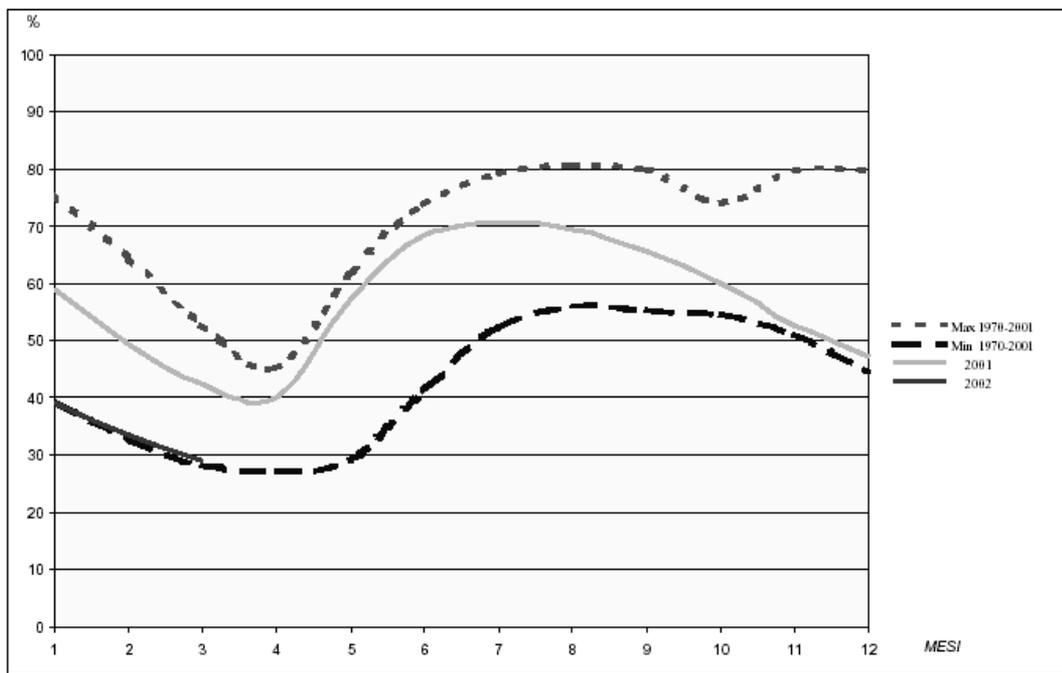
# Producibilità idroelettrica (Marzo 2001)

Indici mensili di producibilità idroelettrica. Confronto 2002-2001 e valori storici



# Invasi e bacini (2001)

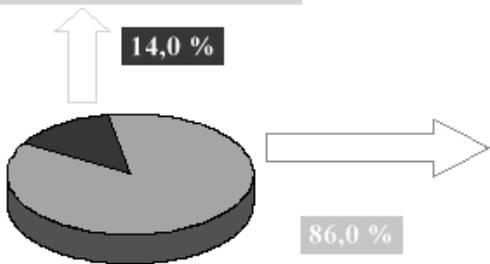
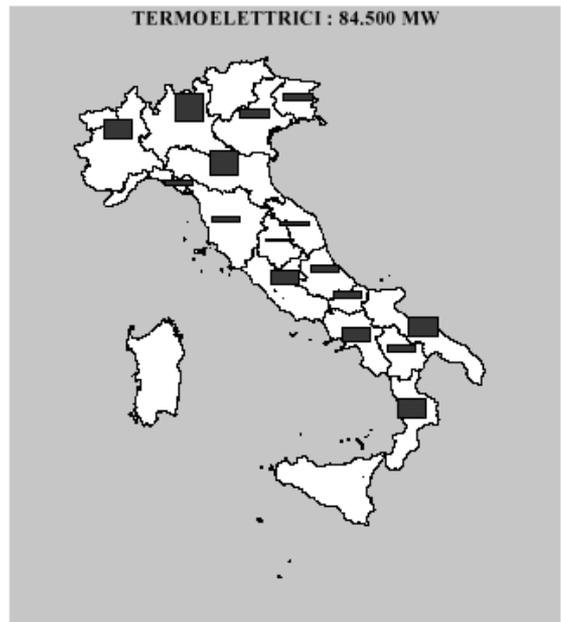
Coefficienti d'invaso dei serbatoi stagionali. Confronto 2002-2001 e valori storici



# Impianti termoelettrici

- Termonucleari (elevati costi d'impianto e bassi costi di esercizio)
- Termoelettrici tradizionali: a carbone (H=5500-6000 ore), a nafta (H=7000 ore) con bassi rendimenti
- Turbogas (una volta di punta H=1000 ore, ora anche di base)
- Cicli combinati, con rendimenti fino al 60%
- Problemi:
  - esaurimento scorte naturali
  - stabilità politica dei paesi fornitori
  - variabilità dei prezzi delle fonti primarie
  - impatto ambientale e inquinamento

# Richieste di connessione di nuovi impianti (al 31/10/2001)



**TOTALE : 98.200 MW**

# Costo dell'energia

- Dipende da:
  - produzione
  - trasporto
  - distribuzione
- E' funzione del tipo di fonte primaria
- Per quanto riguarda la produzione, comprende:
  - capitale (diminuisce all'aumentare dei kWh prodotti)
  - combustibile (proporzionale ai kWh prodotti)
  - funzionamento (diminuisce all'aumentare dei kWh prodotti)

# Valore

- Quanto sono disposto a pagare per un prodotto, nelle condizioni stabilite
- Il valore del bene è quindi superiore al costo di produzione:
  - quando il bene è necessario al cliente
  - durante squilibri o interruzioni
  - in funzione qualità dell'alimentazione richiesta

# Valutazione degli investimenti

- Bisogna valutare:
  - quanto produrre
  - dove produrre
  - dov'è il mercato (a chi e a quanto posso vendere il prodotto)
  - come posso fornirla al consumatore (vettoriamento)
  - capitale necessario e tempi di rientro (o VAN)
  - norme particolari (CIP6, CV, ecc.)

## Costo degli impianti idroelettrici

- Elevati costi fissi e costi di “combustibile” nulli
- Disponibilità variabile con l’idraulicità e talora in funzione degli impianti a monte
- Disponibilità costanti nel giorno e variabili su base stagionale
- Possibilità di trasferire energia dal giorno alla notte o dalla stagione di morbida a quella di magra mediante accumulo

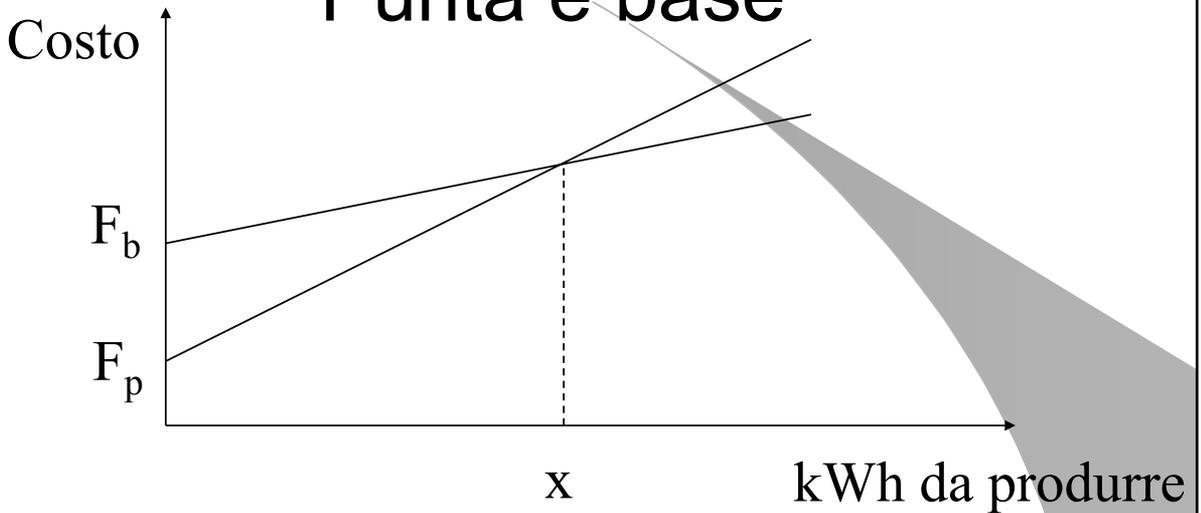
# Costo degli impianti termoelettrici

- “Bassi” costi di impianto, elevati costi di combustibile
  - scelta del combustibile come mix tra rendimento, costo della fonte primaria, vincoli ambientali e variabilità dei prezzi
- Possono coprire sempre il diagramma di carico
- Il costo del kWh aumenta rapidamente al diminuire del numero di ore di utilizzazione
- Turbogas: bassi costi di impianto, bassi rendimenti, elevato costo del combustibile

# Costi di esercizio

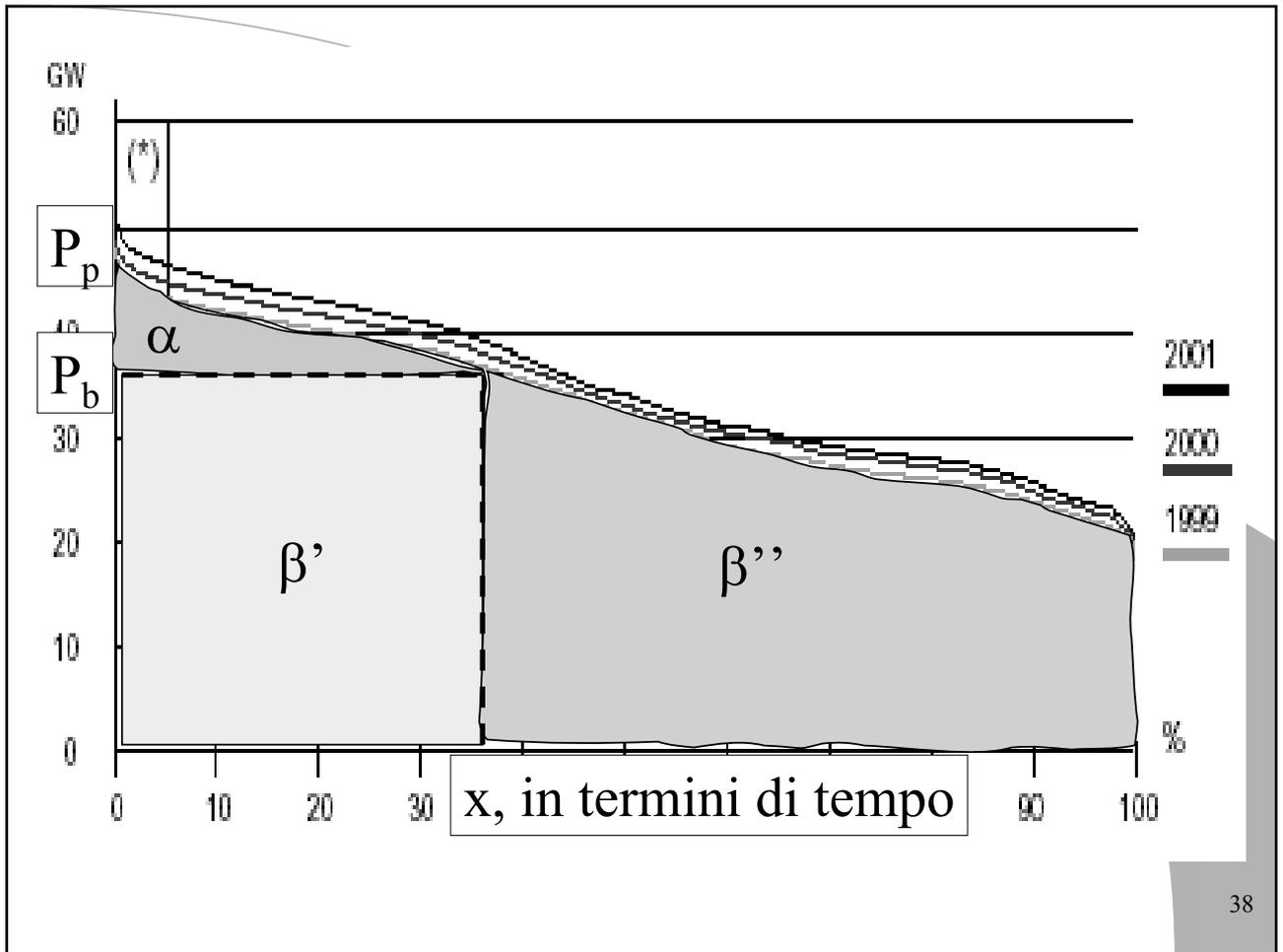
- Personale: per la manutenzione, gestione, emissioni
- Manutenzione: controlli, riparazioni, sostituzioni
- Tasse
- Convenzioni e concessioni

## Punta e base



$$F_p + C_p x = F_b + C_b x \implies F_b = F_p + x(C_p - C_b)$$

$$x = (F_p - F_b) / (C_b - C_p)$$



# Costo di produzione

$$\begin{aligned}
 C_{\text{tot}} &= F_p P_p + C_p \alpha + F_b P_b + C_b (\beta' + \beta'') = \\
 &= F_p P_p + C_p \alpha + [F_p + x(C_p - C_b)] P_b + C_b (\beta' + \beta'') = \\
 &= F_p (P_p + P_b) + C_p (\alpha + x P_b) + C_b (\beta' + \beta'' - x P_b) =
 \end{aligned}$$

$\beta'$  (graficamente)

$$= \underbrace{F_p (P_p + P_b)}_{\text{Dipende dalla}} + \underbrace{(C_p (\alpha + \beta'))}_{\text{Dipende dalla}} + \underbrace{C_b \beta''}_{\text{Costo della energia}}$$

Dipende dalla  
totale potenza  
installata, al  
costo  $F_p$

Dipende dalla  
totale energia  
nelle ore di  
punta

Costo della energia  
di base

# Tipologie dell'energia elettrica

- Base continua (feriale): per P sotto il minimo festivo (feriale); per 8760 ore/anno, 60% dell'energia totale
- Di modulazione a continuità diurna: corrispondente alla parte di carico compresa tra la minima feriale e il minimo meridiano; 4500 ore/anno, 38% dell'energia
- Di modulazione spinta: compresa nella residua parte sovrastante del diagramma; 1000 ore/anno, 12% dell'energia

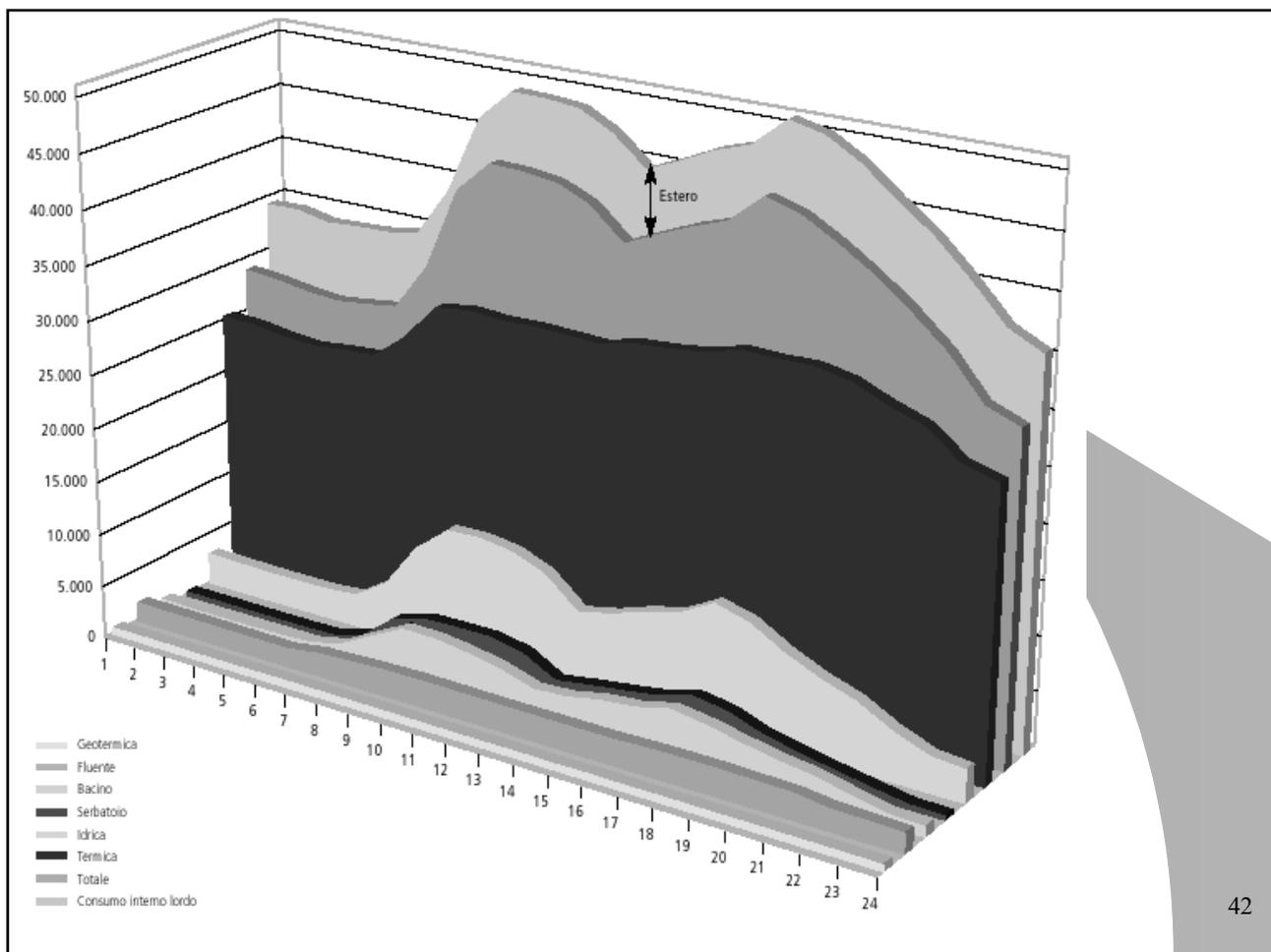
BASE

MODULATA

# Ordine di utilizzazione

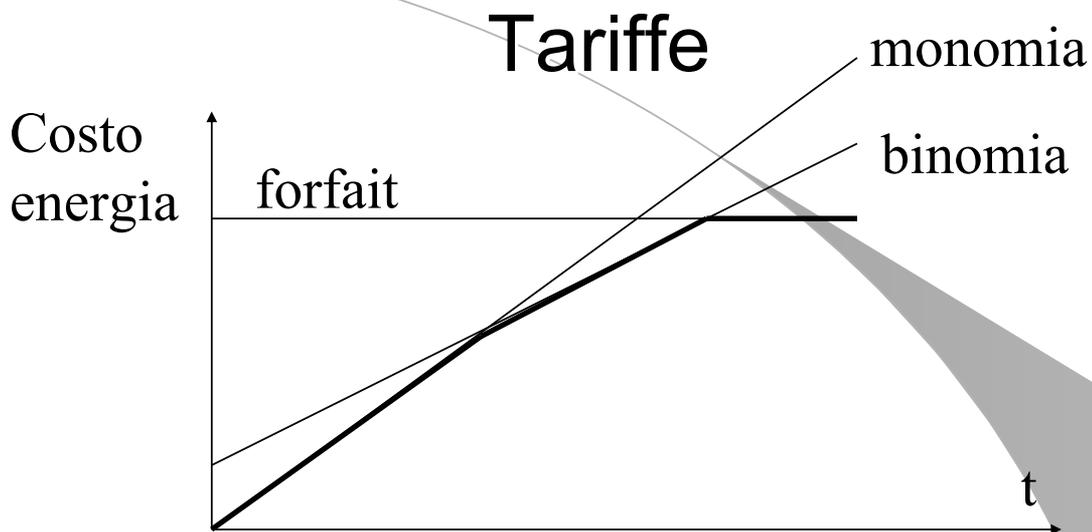
- Sulla base del costo marginale, il costo di un impianto funzionante per produrre un kWh in più
  - nullo per gli idroelettrici
  - costo del combustibile per i termoelettrici
- Idroelettrici a acqua fluente
- Geotermoelettrici
- Nucleotermoelettrici (costi unitari elevati e marginali bassi)
- Termoelettrici (combustibile e rendimento)
- Idroelettrici di regolazione a serbatoio e/o bacino
- Pompaggio

Unit commitment e dispacciamento



# Riserve

- Riserva fredda: gruppi disponibili ma non in parallelo
- Riserva calda o rotante: margini di potenza dei gruppi in servizio



Forfait: costo fisso dell'energia (illuminazione)

Monomia: costo fisso del kWh

Binomia: costo della potenza impegnata+costo per il kWh consumato

# Connessione alla rete regole tecniche

Il GRTN ha definito :

- le caratteristiche della rete di trasmissione nei punti di interconnessione (responsabilità del GRTN):
  - i valori ammissibili per le tensioni,
  - le frequenze,
  - gli indici della qualità del servizio

# Regole tecniche

- le direttive per gli impianti direttamente collegati alla rete nazionale (obblighi per i produttori):
  - schemi di connessione, protezioni e coordinamento con la rete,
  - regolazioni di tensione e frequenza nonché servizi ausiliari di rete,
  - forma d'onda della tensione generata,
  - produzione di potenza reattiva,
  - campo di variazione della frequenza e della tensione entro cui l'impianto deve rimanere connesso.