

SEZIONE 3.1

Ruolo delle fonti primarie e pianificazione del parco elettrico

Fabio Bignucolo

*Dipartimento di Ingegneria Industriale
Università di Padova*

Centro studi Levi Cases



Legame tra consumo energetico e sviluppo economico

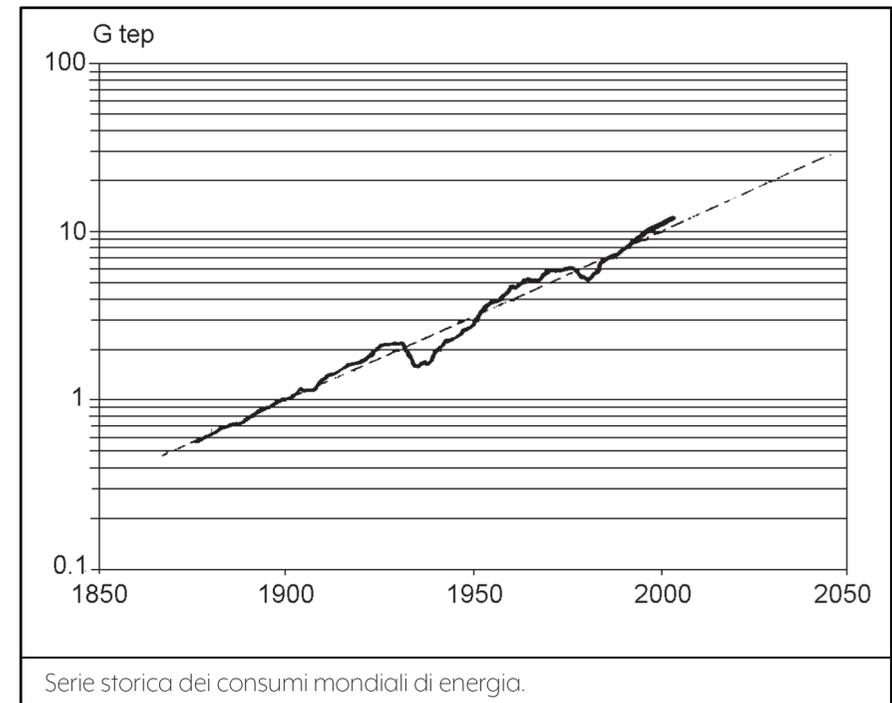
Lo sviluppo economico implica un incremento imprescindibile dei consumi?

- Storicamente sì, in quanto in passato l'uomo non ci si è posto il tema dell'esaurimento delle fonti primarie che in quel momento stava usando
- 2.000 kcal (uomo preistorico) → 230.000 kcal (cittadino US)
- Si usa il Prodotto Nazionale Lordo (PNL) come indice di sviluppo economico
- **Correlazione diretta PNL – consumo energetico**
- Come lo sviluppo di colossi economici come Cina e India impatterà sul consumo complessivo di risorse disponibili?
- Quale l'influenza della crescente pressione demografica?

Consumo pro-capite

N. di persone

Consumo energetico complessivo



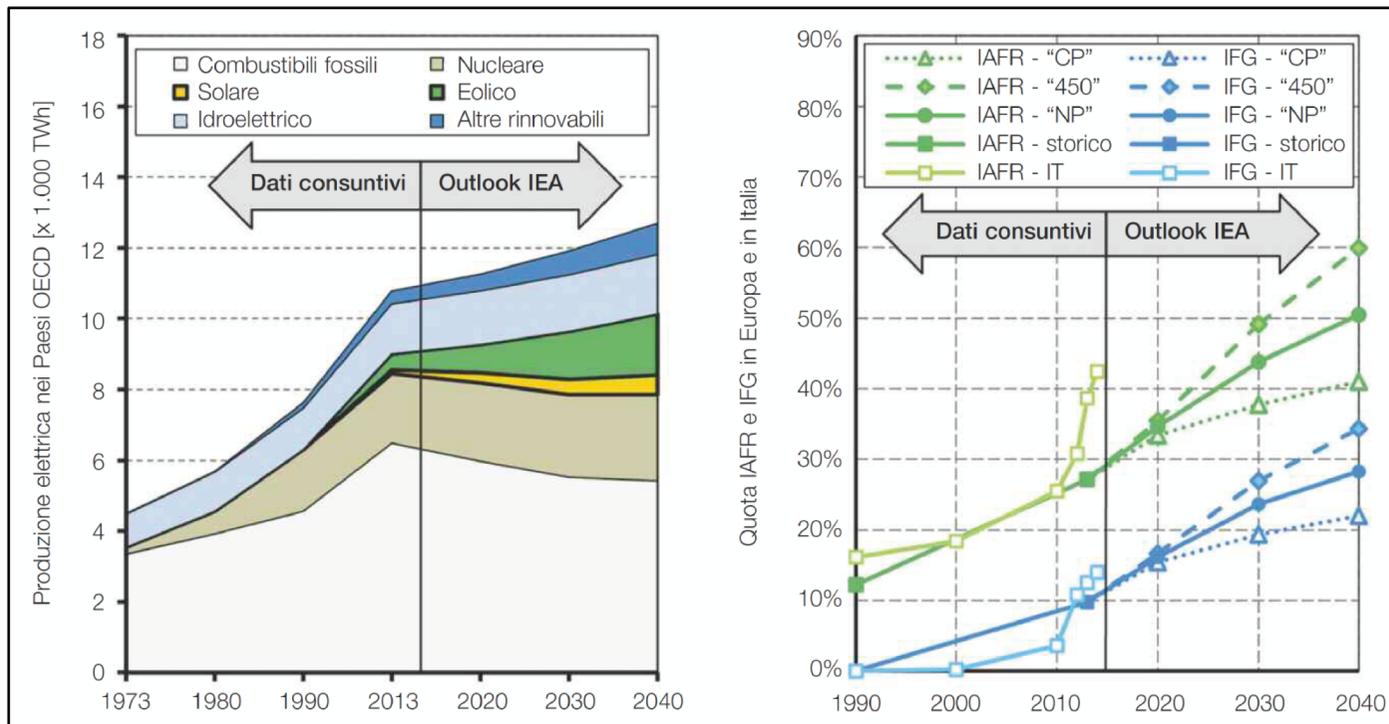
Legame tra consumo energetico e sviluppo economico

Questo trend è destinato a mutare o no?

- Dipende dalle **politiche globali e locali** intraprese dai vari stati
- Maggiore sensibilità alle conseguenze ambientali
- Spesso la politica si confronta anche sugli aspetti ambientali
 - **Sviluppo industriale o rispetto dell'ambiente?** Si tratta di un «o» secco, oppure i due concetti possono convivere entro alcune regole?
- Nei **paesi industrializzati** recentemente si è osservato una riduzione della dipendenza tra PNL e consumi energetici
 - Attenzione alle tematiche ambientali → Efficienza energetica
 - Conversione delle attività produttive (Industria pesante → Industria elevato contenuto tecnologico)
 - Attività manifatturiera → Settore terziario/servizi
- E nei **paesi in via di sviluppo?**
 - Ripercorreranno il percorso seguito dai paesi ora industrializzati?
 - Come gestiranno la crescente pressione demografica?

Legame tra consumo energetico e sviluppo economico

Il consumo energetico a livello mondiale è destinato a aumentare, seppur con una derivata attenuata



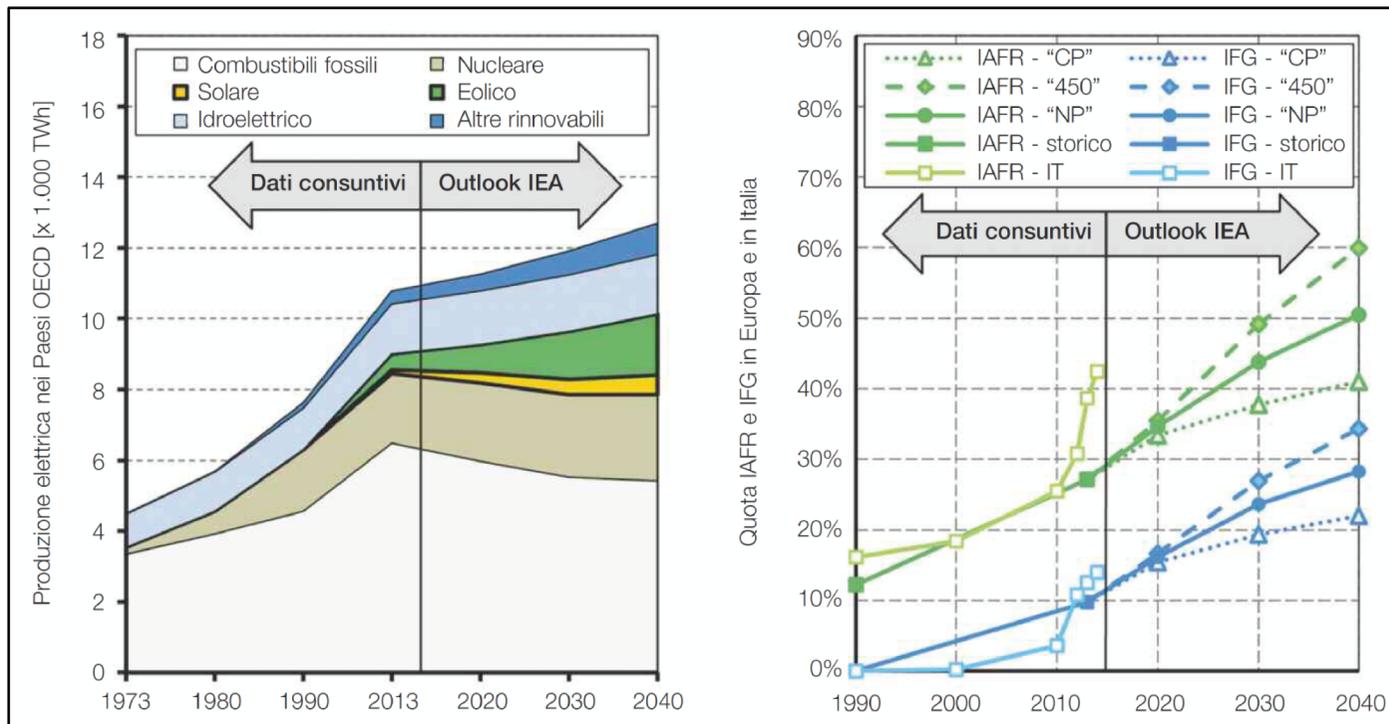
- Nel **passato**, diffusione crescente delle IAFR sostenute da significativi meccanismi di incentivazione economica
- Nel **prossimo futuro**, decrescita progressiva delle incentivazioni erogate, in linea con il calo di costi della tecnologia
- **Obiettivo**: sviluppo industriale di impianti IAFR, in grado di sostenersi economicamente senza incentivazioni specifiche (*market-parity*)

IAFR: Impianti Alimentati a Fonte Rinnovabile (in letteratura si trovano anche altre diciture, ad esempio RESs, Renewable Energy Sources)

OECD: Organisation for Economic Co-operation and Development

Legame tra consumo energetico e sviluppo economico

Il consumo energetico a livello mondiale è destinato a aumentare, seppur con una derivata attenuata



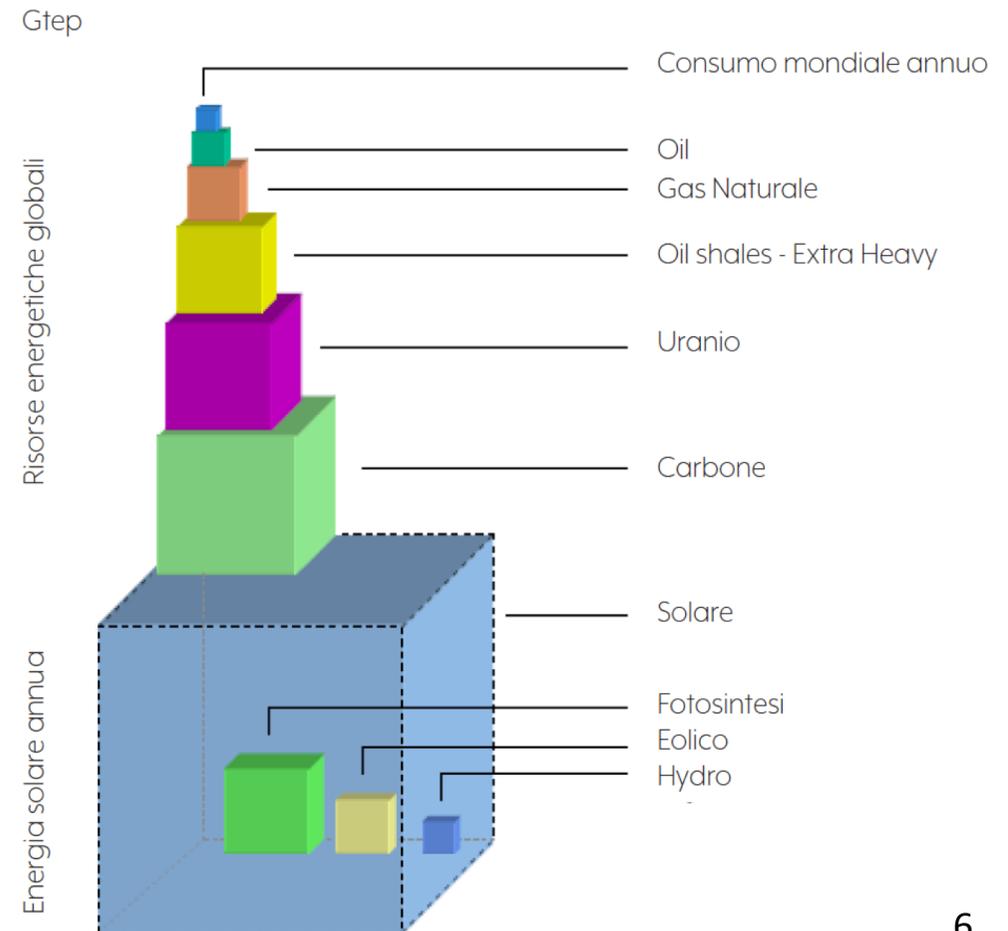
- La diffusione di IAFR nel settore elettrico introduce nuove sfide:
 - **Dimensione degli impianti e diverso impatto ambientale**, rispetto agli impianti fossili
 - Larga diffusione di sistemi statici o comunque interconnessi tramite inverter (**IFG**)
 - **Riduzione dell'inerzia della rete** (richiesta inerzia virtuale/sintetica)

IFG: Inertia-Free Generators. Fanno parte di questa categoria gli impianti fotovoltaici, gli impianti eolici e tutti i sistemi interconnessi alla rete tramite inverter, se non controllati per fornire un contributo inerziale intenzionale (inerzia virtuale o sintetica)

Fonti energetiche e disponibilità

Il problema della disponibilità delle fonti primarie è concreto?

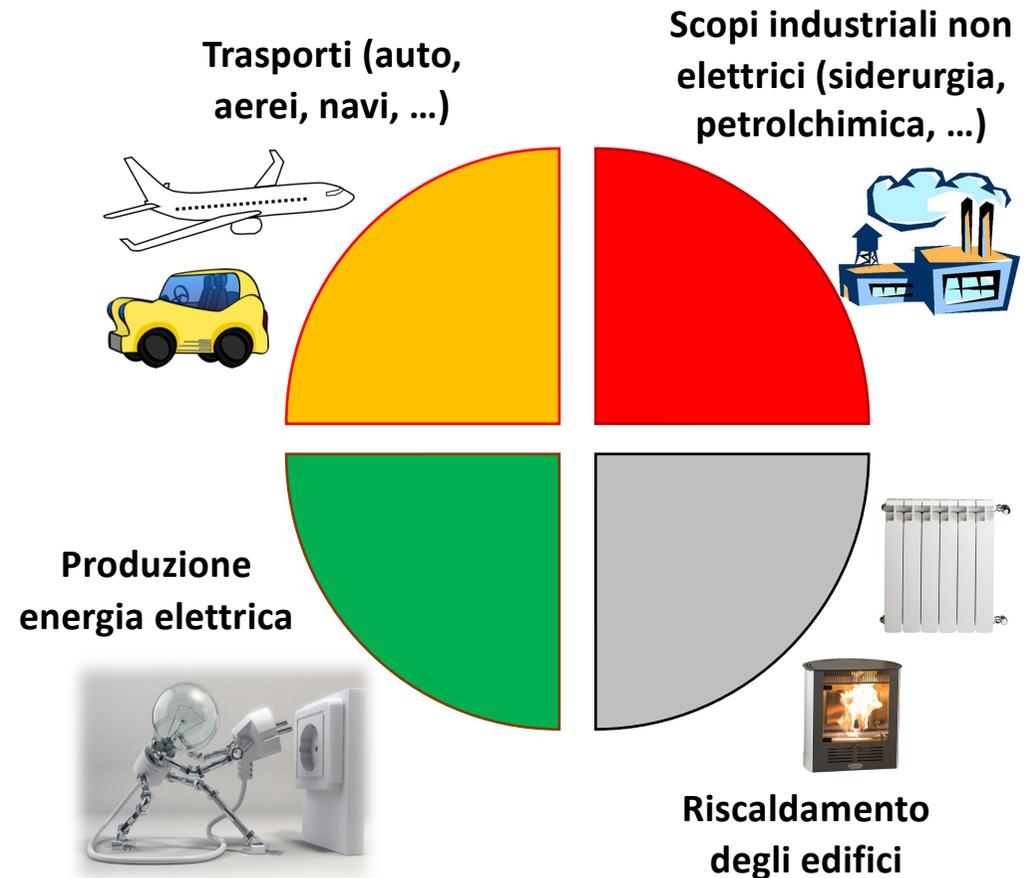
- Alcune fonti primarie sono destinate ad esaurirsi nel tempo → **Fonti non rinnovabili** (tempi di ricostituzione talmente lunghi da renderle in pratica delle entità finite)
- Progressivamente, lo sfruttamento delle fonti non rinnovabili (**fossili**) imporrà un aumento dei loro costi di approvvigionamento (limitazione dell'offerta, difficoltà di estrazione, ecc.)
- Le **fonti rinnovabili**:
 - Sono ampiamente disponibili
 - Hanno un trend decrescente di costo di conversione in energia finale (energia termica, energia elettrica, ecc.)
 - **Ruolo integrativo** → **Ruolo alternativo** rispetto agli impianti tradizionali (in relazione alla disponibilità della fonte primaria)
- **Come integrare le fonti rinnovabili nel panorama energetico mondiale?** → Analisi dei consumi energetici



Struttura dei consumi energetici

Ripartizione dei consumi finali di energia

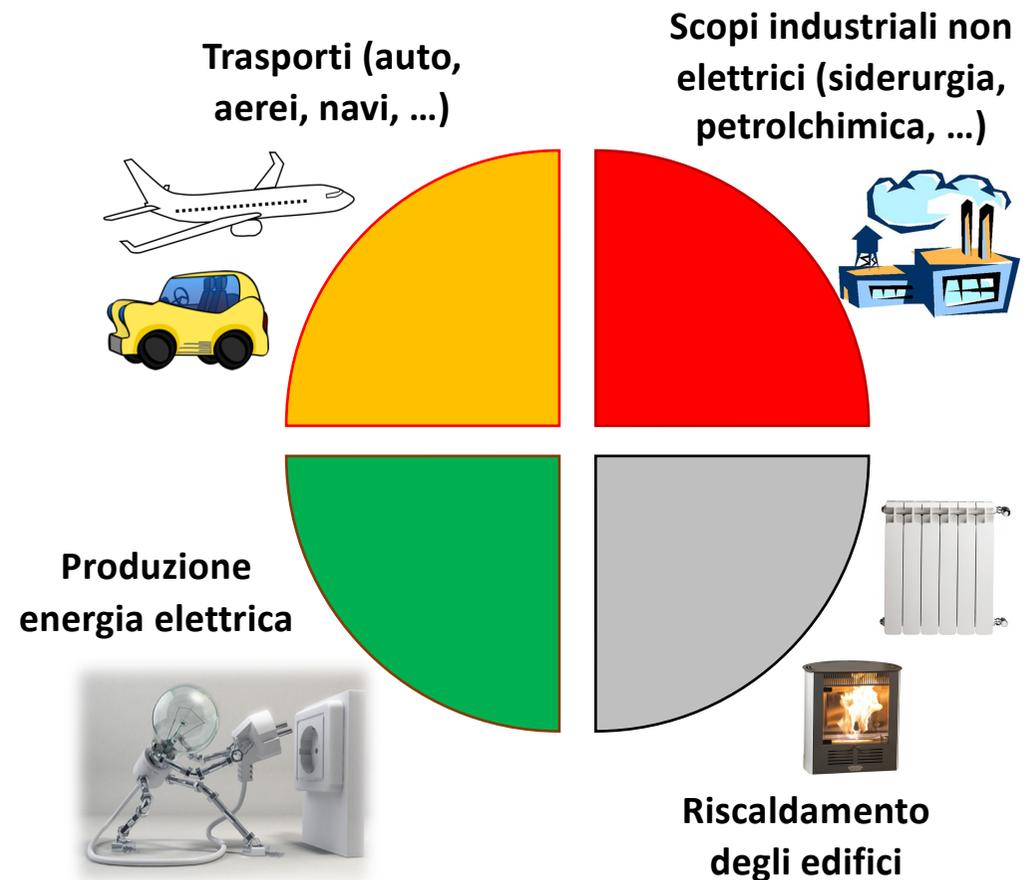
- Ripartizione mondiale bilanciate in 4 macro-settori energetici
- Variazioni anche significative possono manifestarsi a livello continentale/nazionale/locale in funzione di molti aspetti:
 - Condizioni climatiche
 - Disponibilità locale e costo delle materie prime
 - Strategie ambientali
 - Scelte politico-strategiche su
 - Ripartizione attività produttive interne
 - Approvvigionamenti energetici



Struttura dei consumi energetici

Ripartizione dei consumi finali di energia

- Lo sviluppo dei vari settori, e quindi dei vari vettori energetici, ha portato allo sviluppo di infrastrutture estese e complesse (rete elettrica, metanodotti, distribuzione petrolifera, ecc.)
 - Tempi di realizzazione delle infrastrutture (10s anni)
- Diversa utilizzazione energetica → **Tempi di conversione significativi**
 - Fattibilità tecnica
 - Modifica/integrazione delle infrastrutture
 - Dinamicità al cambiamento da parte degli utilizzatori energetici («**viscosità al cambiamento** delle abitudini consolidate»)



Su quale infrastruttura agire?

Elementi di valutazione per la scelta strategica

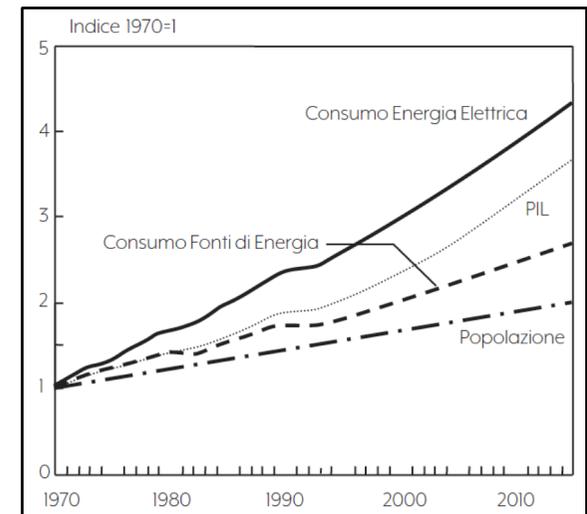
1. Flessibilità al cambiamento della infrastruttura esistente (ovvero modificabilità dal punto di vista tecnico in tempi ragionevoli)
2. Possibilità di comportare vantaggi anche in altri settori energetici

Su quale infrastruttura agire?

Elementi di valutazione per la scelta strategica

1. Flessibilità al cambiamento della infrastruttura esistente (ovvero modificabilità dal punto di vista tecnico in tempi ragionevoli)

- Il sistema elettrico è il più facilmente modificabile in termini di input energetico, in quanto è possibile lasciare inalterata (o quasi) la maggior parte della propria struttura (trasmissione, distribuzione e utilizzazione)
 - Devono essere analizzate le localizzazioni di fonti primarie e centri di consumo
 - Potenziamento delle infrastrutture di trasporto
 - Deve essere verificata la stabilità del sistema
 - Stabilità della frequenza, regolazione di tensione, aleatorietà delle fonti primarie, solidità del mercato, ecc.
- La correlazione tra sviluppo economico e consumo elettrico è più forte di quella vista in precedenza con il consumo energetico complessivo
 - Perché? **Flessibilità**, **pulizia** e **capillarità** del vettore elettrico, indispensabilità nell'uso delle moderne apparecchiature



Valori normalizzati a 1 nel 1970

Elettrificazione dei consumi finali

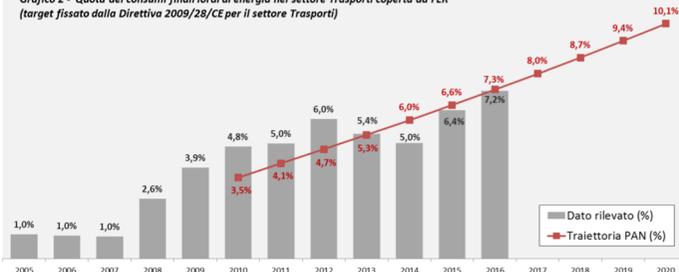
Su quale infrastruttura agire?

Elementi di valutazione per la scelta strategica

1. Flessibilità al cambiamento della infrastruttura esistente (ovvero modificabilità dal punto di vista tecnico in tempi ragionevoli)
2. Possibilità di comportare vantaggi anche in altri settori energetici

Trasporti

Grafico 2 - Quota dei consumi finali lordi di energia nel settore Trasporti coperta da FER (target fissato dalla Direttiva 2009/28/CE per il settore Trasporti)



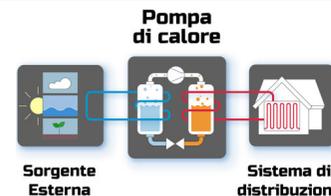
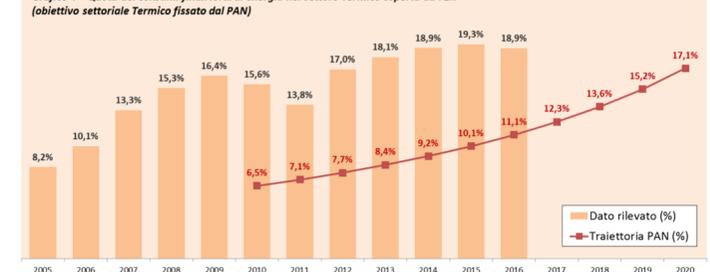
Energia elettrica

Grafico 3 - Quota dei consumi finali lordi di energia nel settore Elettrico coperta da FER (obiettivo settoriale Elettrico fissato dal PAN)



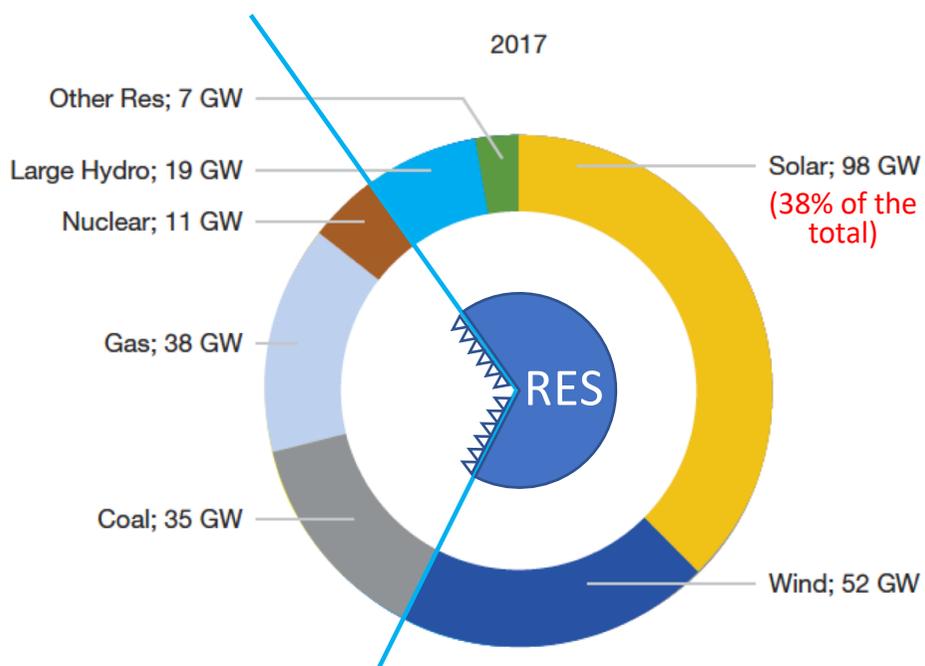
Energia termica

Grafico 4 - Quota dei consumi finali lordi di energia nel settore Termico coperta da FER (obiettivo settoriale Termico fissato dal PAN)



Su quali fonti si investe in nuovi impianti di generazione elettrica?

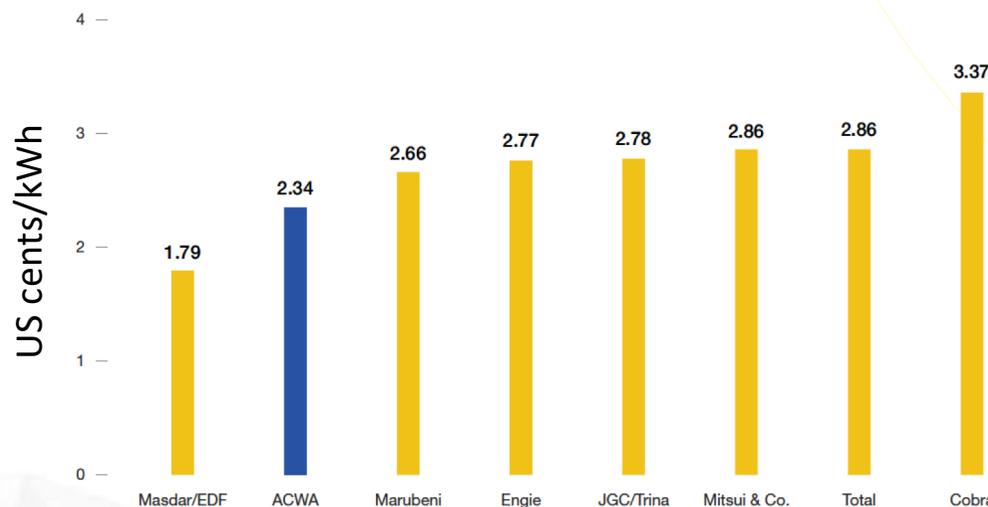
FIGURE 1 NET POWER GENERATING CAPACITY ADDED IN 2017
BY MAIN TECHNOLOGY



Source: Frankfurt School-UNEP Centre and BNEF (2018)

- **FV ha la maggiore potenza installata nel 2017 (mondo)**
- Il costo del kWh FV è ora comparabile con altre fonti in alcune località, in alcune hp

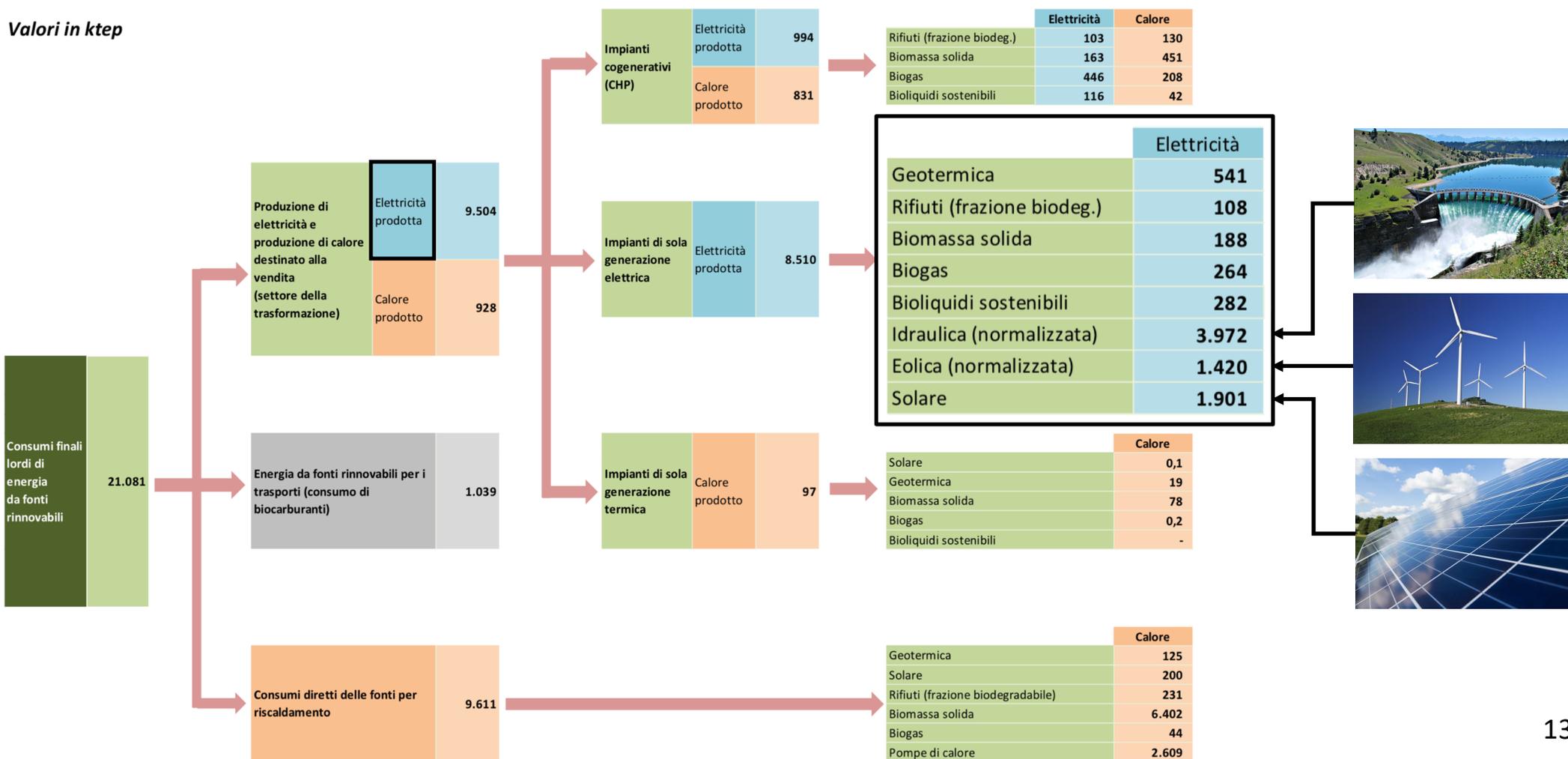
FIGURE 3 TOP 8 TECHNICAL BIDS FOR 300 MW SAKAKA PV PROJECT IN SAUDI ARABIA



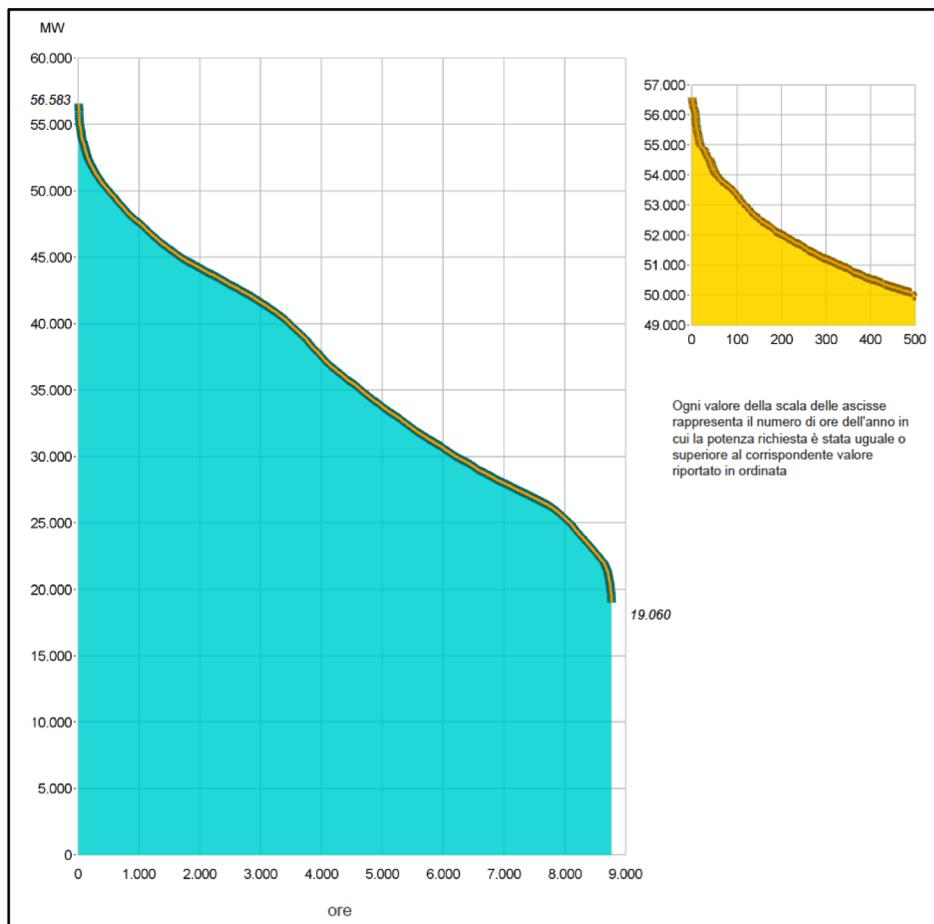
(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

Sfruttamento delle rinnovabili – IT 2016

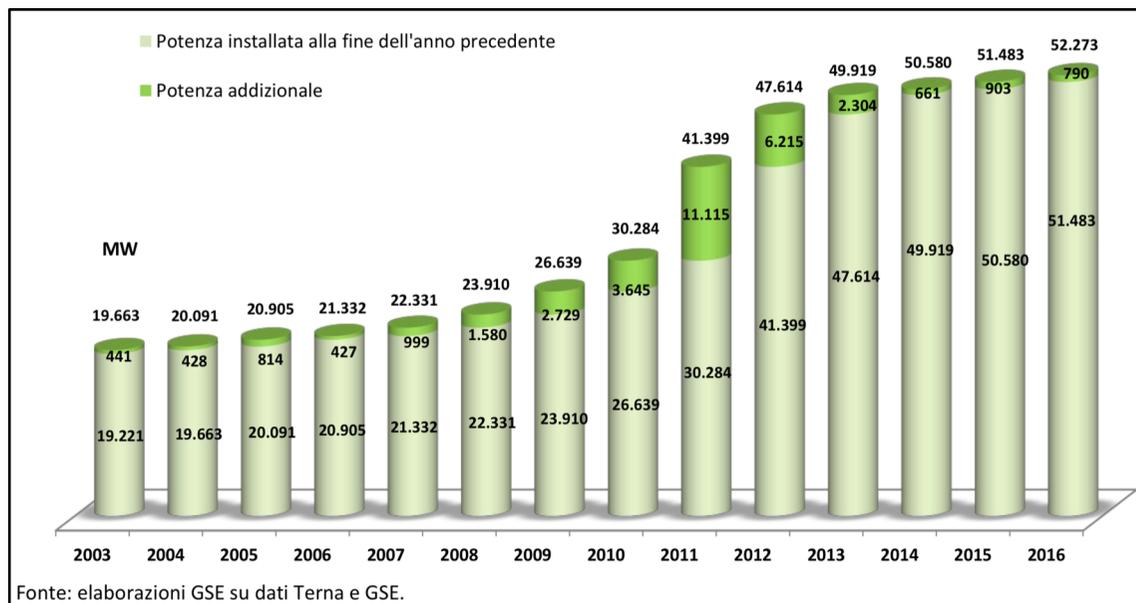
Valori in ktep



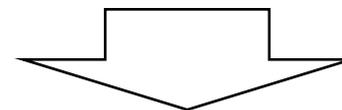
Sfruttamento delle rinnovabili – IT 2016



Curva di durata della potenza oraria richiesta sulla rete italiana nel 2017



Evoluzione della potenza installata degli impianti a fonti rinnovabili



Soggette alla **disponibilità della fonte primaria**, che è necessario caratterizzare con molta cura

Generazione e consumo di energia elettrica – IT 2016

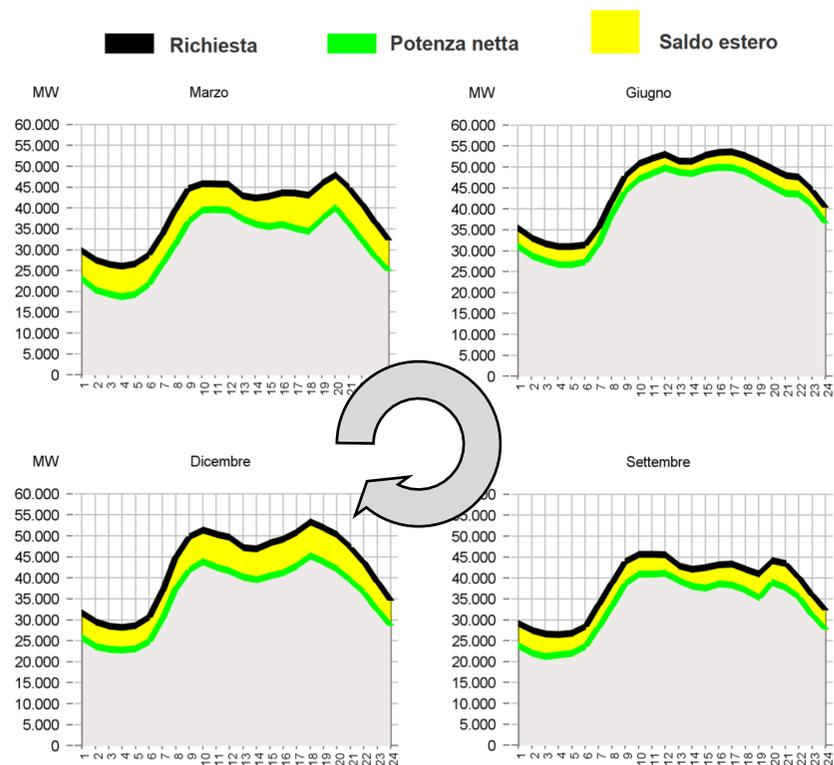
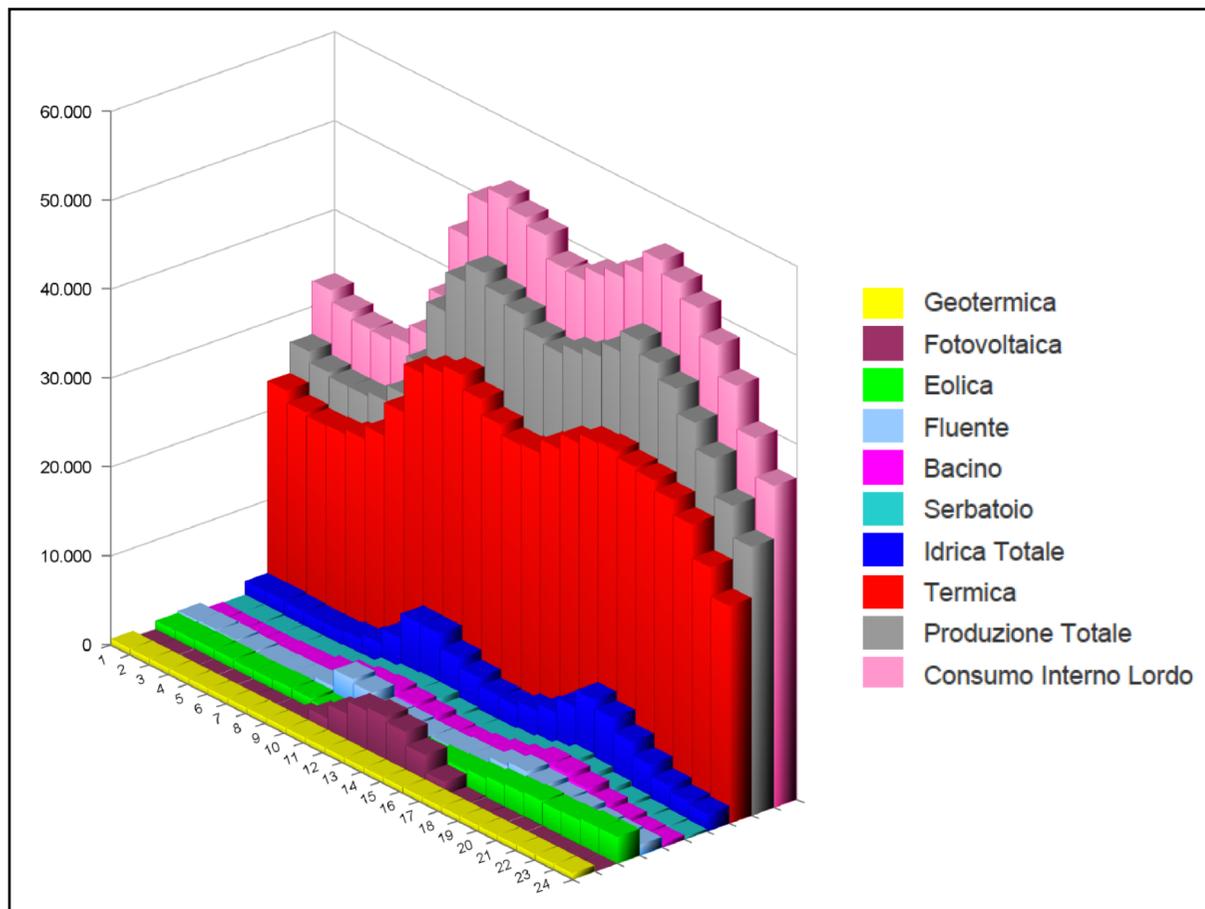
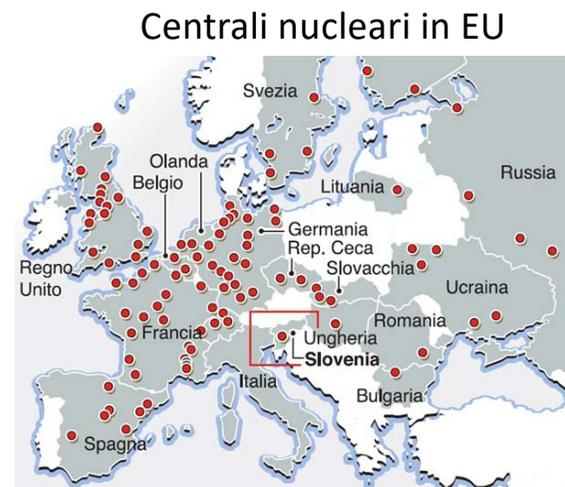
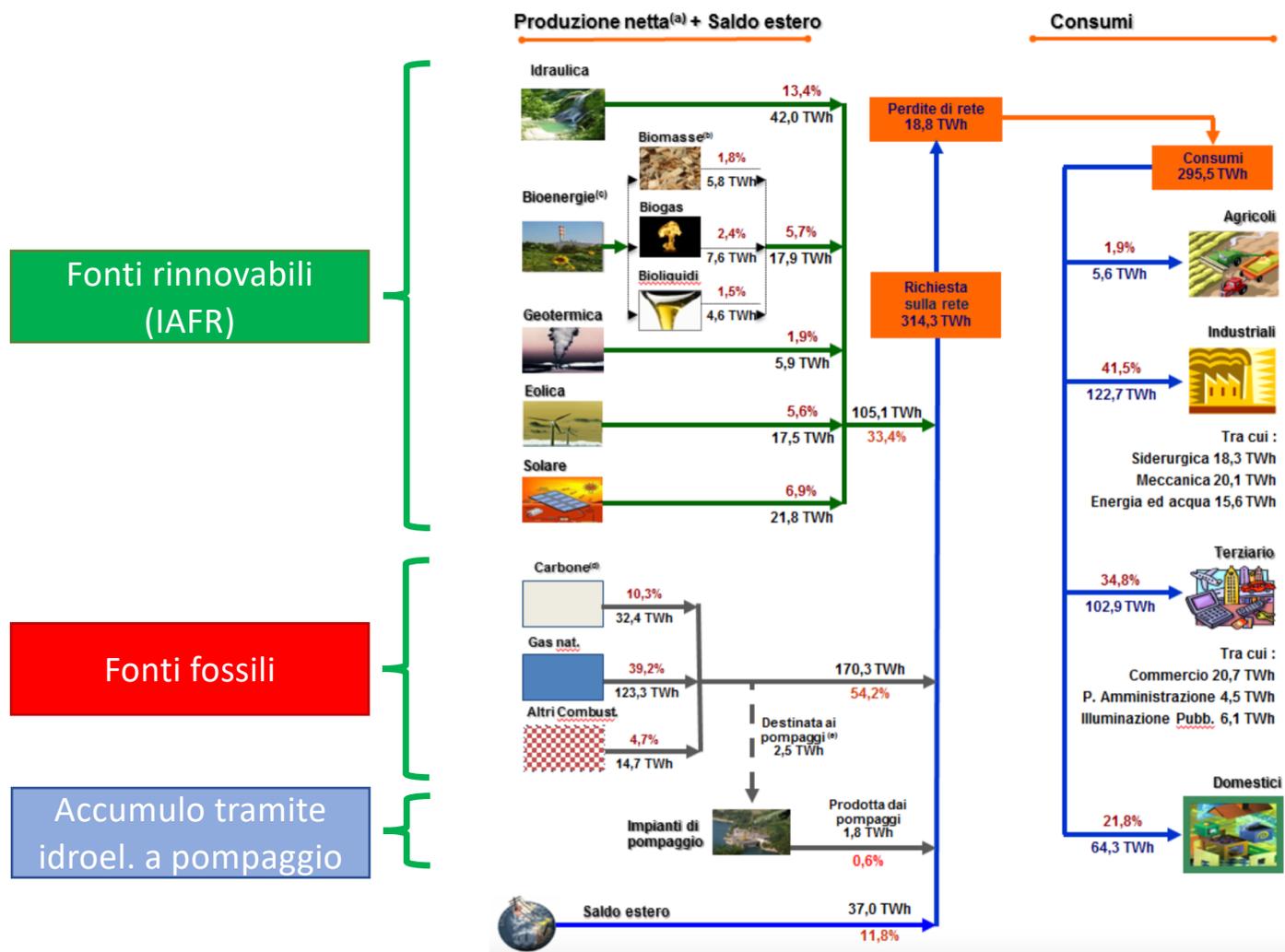


Diagramma giornaliero della potenza oraria richiesta sulla rete italiana nel 3° mercoledì di alcuni mesi del 2017



Potenza oraria relativa al consumo interno lordo di energia elettrica in Italia nel 3° mercoledì del mese di dicembre 2017 (in [MW]) 15

Generazione e consumo di energia elettrica – IT 2016



Bilancio elettrico nazionale nel 2016

Pianificazione e gestione

Lungo termine (pluriennale)

**Pianificazione della
produzione elettrica**

**Ottimizzazione del
parco di generazione**

Breve termine (giorni)

**Gestione economica
del parco di
generazione elettrica**

Sceita del piano di **ubicazione** e della **taglia** degli impianti di caratteristiche convenienti per la produzione, trasmissione e distribuzione di energia elettrica

- Previsione del carico
- Previsione dei picchi di potenza
- Struttura ottimale di un parco di produzione elettrica
- Integrazione di IAFR e stoccaggi

**Conformazione
del parco di
generazione e
vincoli di rete**

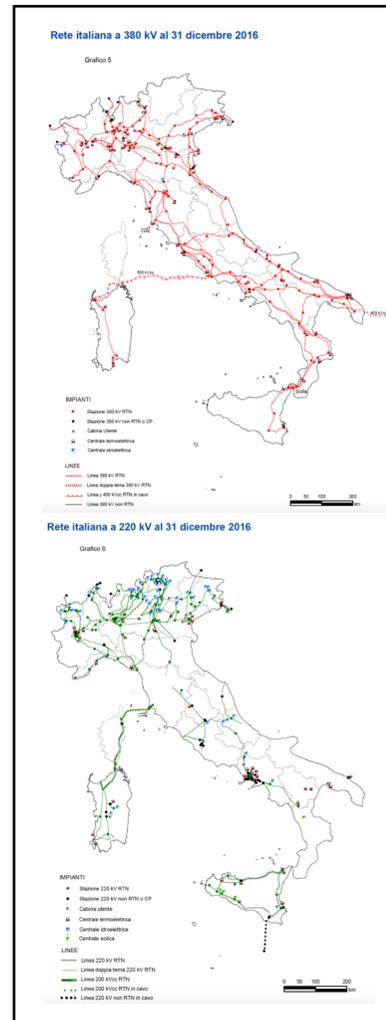
Garantire il soddisfacimento del carico nel modo **meno oneroso possibile**, note le caratteristiche del parco di generazione disponibile ed i vincoli di rete:

- Gestione centralizzata (monopolistica)
- Gestione di mercato

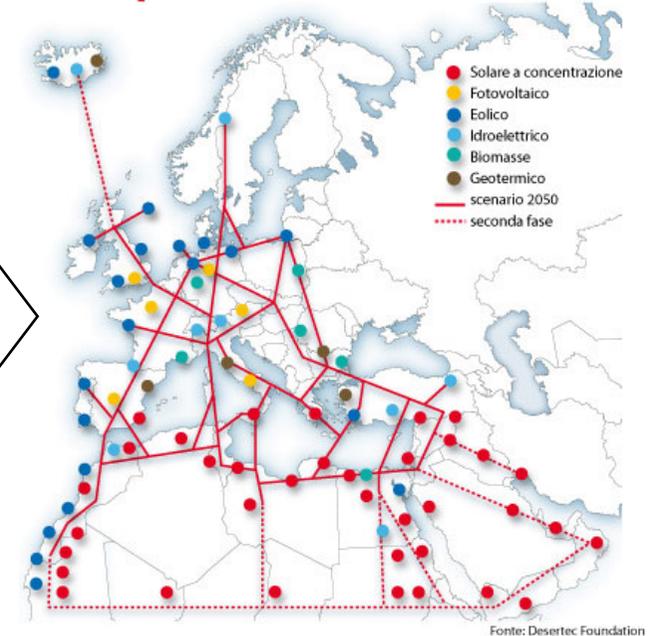
Pianificazione a lungo termine

Aspetti tecnici ed economici coinvolti

- Parco di produzione:
 - Fonti energetiche disponibili (in luoghi e tempi diversi)
 - Caratteristiche tecniche e di costo degli impianti di generazione realizzabili
- Struttura del sistema elettrico (rete elettrica)
 - Caratteristiche del sistema di produzione e locazione degli impianti
 - Localizzazione dei centri di consumo
 - Configurazione geografica dell'area di analisi
 - Caratteristiche tecniche e di costo degli impianti stessi per la trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

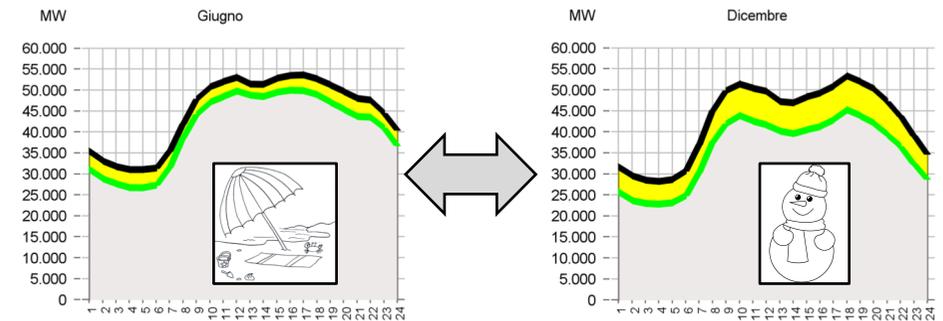


La super rete elettrica del futuro



Previsione del carico

- Conoscere il carico da servire è il primo fondamentale passo per una corretta pianificazione
 - È come cercare di caratterizzare la «clientela» in termini di quantità, qualità, preferenze, sensibilità, ecc.
- In un intervallo di tempo è necessario identificare:
 - Richiesta di energia (integrale della curva di carico)
 - Punta massima di potenza (valore massimo della curva di carico)
- **Sono parametri indipendenti?!**
 - No, esistono andamenti tipici della curva (o diagramma) di carico, con variazioni stagionali correlate ad aspetti climatici e calendariali
 - Analogamente, esistono forme tipiche delle curve di durata
- Solitamente si cerca di prevedere il consumo atteso
 - Metodi diretti (auto-proiettivi)
 - Metodi indiretti



Dati Terna (2017)

Previsione del carico – Metodi diretti (auto-proiettivi)

- In passato la stima del carico atteso era piuttosto grossolana
 - «Raddoppio del carico in 10 anni»
- Si sono sviluppati nel seguito metodi più complessi basati sui dati della serie storica pregressa
- Si definisce un **tasso relativo di crescita atteso dei consumi** a
- Fissato un intervallo di tempo di riferimento (es. anno), i consumi futuri W dopo un intervallo T saranno pari ai consumi attuali W_0 incrementati esponenzialmente di un **tasso cautelativo di incremento** i_w (maggiore di a di un opportuno margine di sicurezza)

$$\frac{dW}{W} \Big|_{dT} = a$$

$$W = W_0 (1 + i_w)^T$$

- Tale modello semplificato porterebbe ad una crescita esponenziale del consumo
 - Consumo infinito nel lungo periodo → Ipotesi irrealistica

Previsione del carico – Metodi diretti (auto-proiettivi)

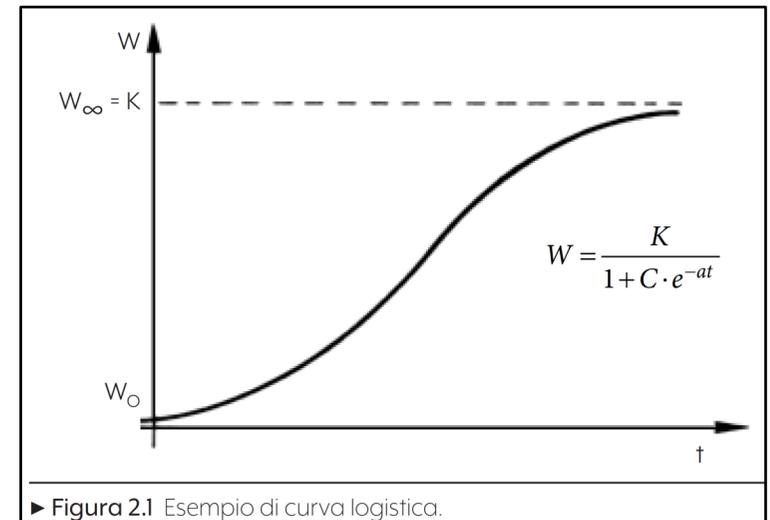
- L'analisi delle serie storiche (depurate da aspetti puntuali come conflitti bellici, ecc.) porta a ritenere più plausibile un modello con **tasso relativo di crescita dei consumi a influenzato dal livello dei consumi raggiunti W**
- Fissato $K = a/b$, si ha

$$\frac{dW}{W} = a - bW$$

$$\frac{dW}{W} + \frac{dW}{K - W} = a \cdot dt$$

- Integrando si ottiene una curva a sigmoide definita **curva logistica**:
 - All'inizio (T piccolo) si ha una crescita quasi esponenziale
 - Asintoto orizzontale ($W \rightarrow K$ per T molto grande)

$$W = \frac{K}{1 + C \cdot e^{-at}}$$



Previsione del carico – Metodi indiretti

- Nei paesi industrializzati è evidente una stretta correlazione tra consumo di energia elettrica e sviluppo dell'economia (esprimibile con indici macroeconomici, es. il Prodotto Nazionale Lordo annuo **P**)
 - Introduzione dei metodi indiretti di previsione del carico
 1. Regressione econometrica
 2. Analisi del consumo dell'utenza

Previsione del carico – Metodi indiretti

- Nei paesi industrializzati è evidente una stretta correlazione tra consumo di energia elettrica e sviluppo dell'economia (esprimibile con indici macroeconomici, es. il Prodotto Nazionale Lordo annuo **P**)
 - Introduzione dei metodi indiretti di previsione del carico
 1. **Regressione econometrica**: proiezioni basate sull'analisi delle serie storiche di **P**, dove si rileva una certa omoteticità tra **P** e **W**
 - Si introduce il **fattore di elasticità a**
 - Valori tipici di fattore di elasticità sono 1,5-1,6
 - Si ripartisce il consumo stimato tra i vari settori produttivi sulla base del relativo indice macroeconomico (**P**)

$$W = k \cdot P^a$$

$$a = \frac{\frac{dW}{W}}{\frac{dP}{P}}$$

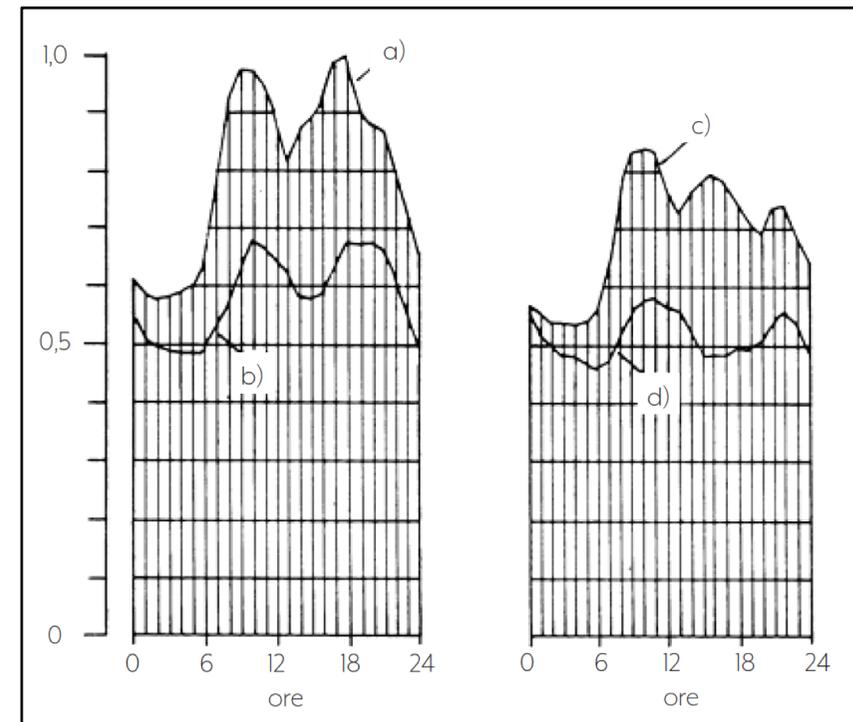
Previsione del carico – Metodi indiretti

- Nei paesi industrializzati è evidente una stretta correlazione tra consumo di energia elettrica e sviluppo dell'economia (esprimibile con indici macroeconomici, es. il Prodotto Nazionale Lordo annuo **P**)
 - Introduzione dei metodi indiretti di previsione del carico
 1. Regressione econometrica
 2. **Analisi del consumo dell'utenza**
 - Prevedere il fabbisogno di energia indagando la futura tipologia dei consumi
 - Metodo empirico della saturazione degli apparecchi utilizzatori (appliance saturation method)
 - Indagini per definire il numero di utenti in possesso di un certo tipo di apparecchiatura elettrica
 - Metodi basati sull'uso finale dell'energia (end-use energy methods)
 - Analisi dei processi attuati dagli utenti
- **Quale metodo usare?** Dipende da reperibilità dei dati, tipologia degli utenti e grado di approssimazione richiesto

Previsione del picco (massima potenza prelevata)

$$\boxed{\text{Produzione}} = \boxed{\text{Consumo}} + \underline{\text{Perdite di rete}} \pm \underline{\text{Accumulo}}$$

- Al momento non sono presenti sistemi di accumulo elettrico di taglia comparabile con il carico complessivo
- Istante per istante, **produzione = carico (+ perdite)**
 - Se a livello istantaneo il carico (+ perdite) fosse maggiore della produzione →
Rallentamento delle macchine rotanti →
Abbassamento della frequenza
- È richiesto un dimensionamento del sistema per coprire la massima potenza richiesta →
Fabbisogno di potenza alla punta
- Le maggiori variazioni si hanno su base giornaliera

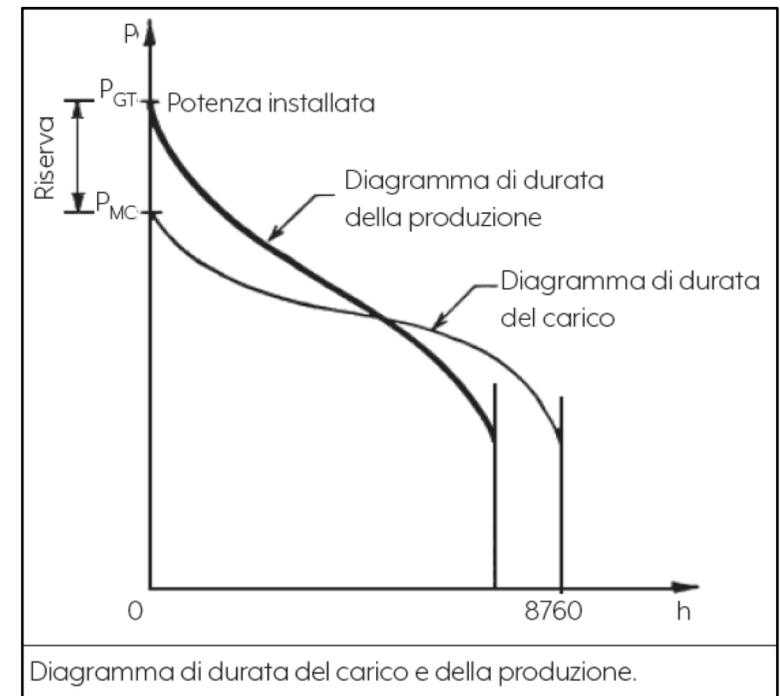
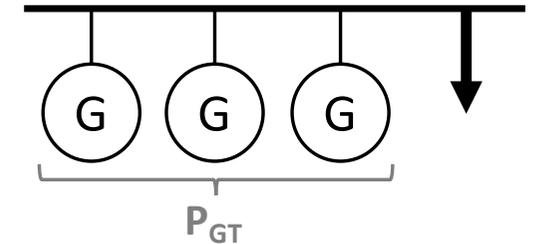


Struttura ottimale di un parco di produzione elettrica

- La **composizione del sistema di produzione** dipende da
 - Costo d'investimento dei diversi tipi di impianto realizzabili
 - Costo di gestione/funzionamento degli impianti
 - Costo del combustibile (negli impianti a fonti fossili)
 - Costo per acquisizione diritti necessari all'esercizio dell'impianto (es. diritto di superficie sulla area su cui ricade l'installazione)
 - Costo per il trattamento dei fumi (impianti a combustione)
 - Costi di manutenzione ordinaria e straordinaria
 - Costi di gestione, assicurazione, ecc.
 - Vincoli di funzionamento degli impianti
 - Vincoli imposti dallo sfruttamento della fonte primaria (es. rilascio minimo vitale per impianti idroelettrici)
 - Vincoli imposti dall'andamento del carico

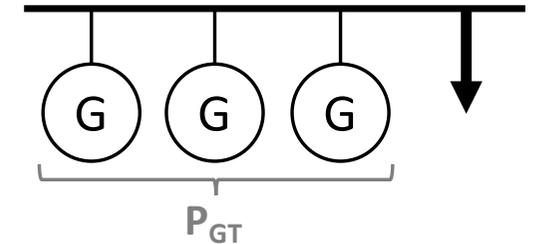
Struttura ottimale di un parco di produzione elettrica

- Ipotesi di studio:
 - Tutti gruppi termoelettrici (in prima analisi)
 - Tutti i gruppi connessi alla stessa sbarra (vincoli di rete non presenti)
- **STEP 1:** determinazione della potenza installata P_{GT}
 - Si costruisce il diagramma di durata della produzione ordinando le unità generatrici per valori decrescenti delle rispettive durate di utilizzazione
 - Si fa in modo che l'area sottesa da tale diagramma eguagli l'area delimitata dal diagramma di durata del carico
 - Si definisce la **potenza installata** P_{GT}



Struttura ottimale di un parco di produzione elettrica

- Ipotesi di studio:
 - Tutti gruppi termoelettrici (in prima analisi)
 - Tutti i gruppi connessi alla stessa sbarra (vincoli di rete non presenti)
- **STEP 2:** determinazione della **funzioni di costo** F_i
 - Tali funzioni di costo sono composte da almeno 2 termini:
 - **K**: costo fisso annuo specifico (ripartizione del costo di installazione – ammortamento dell'impianto)
 - **c**: costo specifico (unitario) medio dell'energia prodotta nell'anno. Per gli impianti a fonte fossile, **c** è principalmente composto dal costo del combustibile
 - Determinazione delle **funzioni di costo per unità di potenza installata** f_i (**h** è la durata di utilizzazione delle centrali)
 - È ragionevole assumere che se una centrale ha costo di installazione elevato ($K \uparrow$), allora abbia costo specifico basso ($c \downarrow$)
$$c_1 < c_2 < c_3 \text{ se } K_1 > K_2 > K_3$$



$$F = KP + cW$$

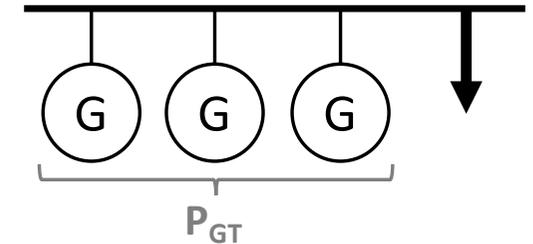
$$f_1 = K_1 + c_1h$$

$$f_2 = K_2 + c_2h$$

$$f_3 = K_3 + c_3h$$

Struttura ottimale di un parco di produzione elettrica

- Ipotesi di studio:
 - Tutti gruppi termoelettrici (in prima analisi)
 - Tutti i gruppi connessi alla stessa sbarra (vincoli di rete non presenti)



- STEP 3:** costruzione della **funzione di costo complessiva** in funzione delle potenze delle varie tipologie (P_1 , P_2 e P_3 nell'esempio)

$$F(P_1, P_2, P_3) = \left[K_1 P_1 + c_1 \int_0^{P_1} h(P) \cdot dP \right] + \left[K_2 P_2 + c_2 \int_{P_1}^{P_1+P_2} h(P) \cdot dP \right] + \left[K_3 P_3 + c_3 \int_{P_1+P_2}^{P_1+P_2+P_3} h(P) \cdot dP \right]$$

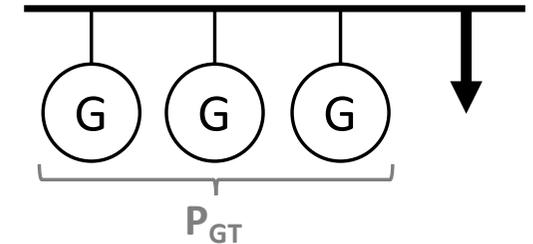
- Devono essere tenuti in considerazione due tipi di **vincolo**:
 - Consistenza del parco di generazione

$$P_1 + P_2 + P_3 = P_{GT}$$

- Potenze nominali non negative: $P_1 \geq 0$; $P_2 \geq 0$; $P_3 \geq 0$

Struttura ottimale di un parco di produzione elettrica

- Ipotesi di studio:
 - Tutti gruppi termoelettrici (in prima analisi)
 - Tutti i gruppi connessi alla stessa sbarra (vincoli di rete non presenti)



MINIMIZZAZIONE DELLE FUNZIONE DI COSTO COMPLESSIVA

- Metodo dei moltiplicatori di Lagrange applicato alla funzione $L = F(P_1, P_2, P_3) + \lambda(P_{GT} - P_1 - P_2 - P_3)$
- I valori ottimi di P_1 P_2 P_3 e la variabile ausiliaria (moltiplicatore) devono soddisfare il sistema a 4 equazioni in 4 incognite

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial P_1} = \frac{\partial F}{\partial P_1} - \lambda = K_1 + c_1 \cdot h(P_1) - c_2 \cdot h(P_1) + c_2 \cdot h(P_1 + P_2) - c_3 \cdot h(P_1 + P_2) + c_3 \cdot h(P_1 + P_2 + P_3) - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial P_2} = \frac{\partial F}{\partial P_2} - \lambda = K_2 + c_2 \cdot h(P_1 + P_2) - c_3 \cdot h(P_1 + P_2) + c_3 \cdot h(P_1 + P_2 + P_3) - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial P_3} = \frac{\partial F}{\partial P_3} - \lambda = K_3 + c_3 \cdot h(P_1 + P_2 + P_3) - \lambda = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \lambda} = P_{GT} - P_1 - P_2 - P_3 = 0 \end{array} \right.$$

Struttura ottimale di un parco di produzione elettrica

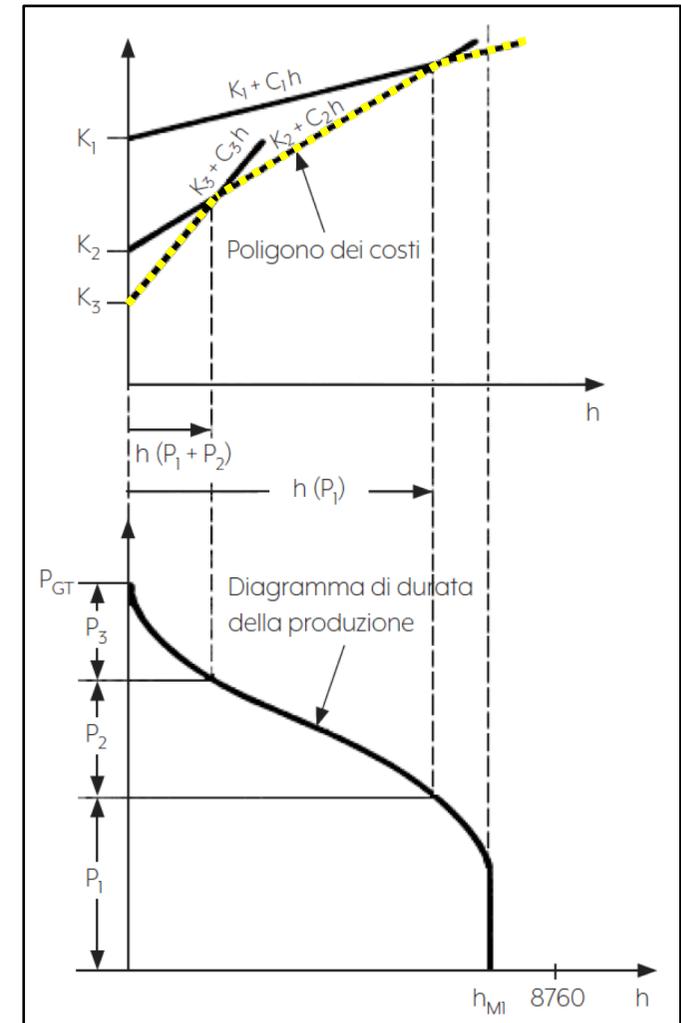
- Ipotesi di studio:
 - Tutti gruppi termoelettrici (in prima analisi)
 - Tutti i gruppi connessi alla stessa sbarra (vincoli di rete non presenti)

• MINIMIZZAZIONE DELLE FUNZIONE DI COSTO COMPLESSIVA

- Si determina le durate di funzionamento $h(P_1)$ e $h(P_2)$

$$h(P_1) = \frac{K_1 - K_2}{c_2 - c_1} \quad h(P_1 + P_2) = \frac{K_2 - K_3}{c_3 - c_2}$$

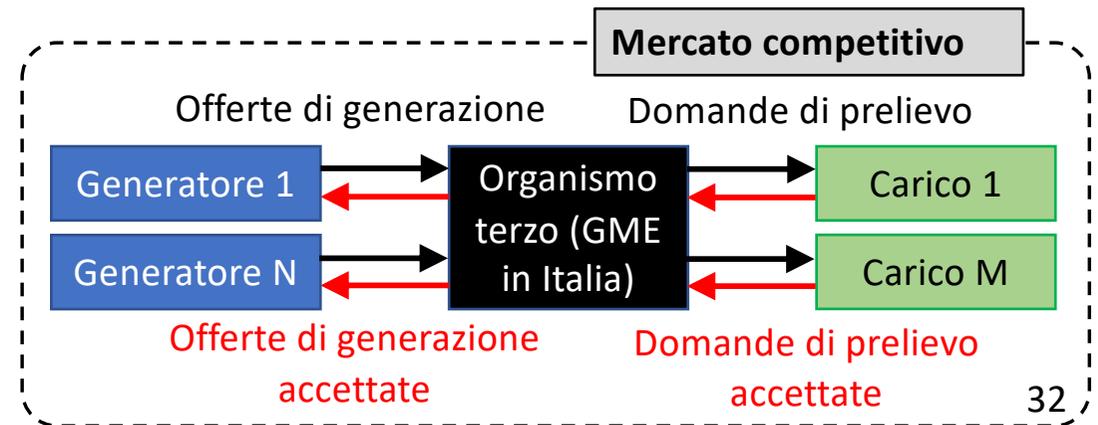
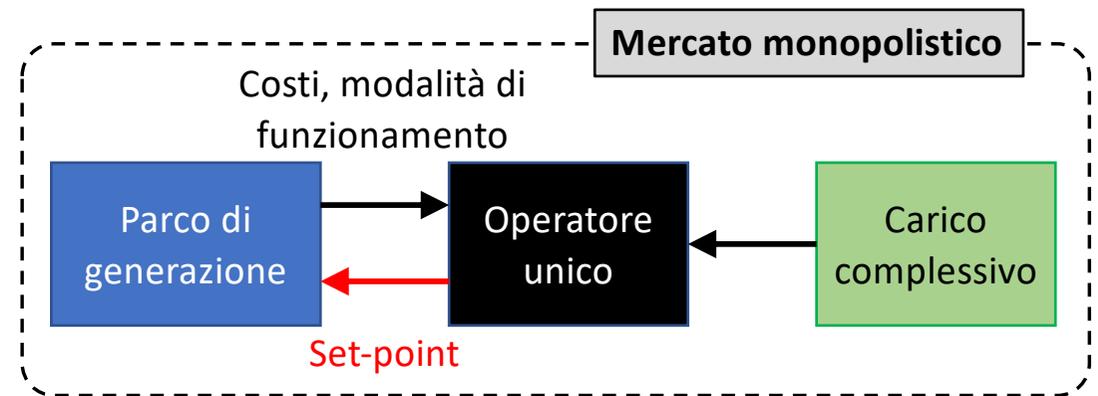
- Dal diagramma di durata della produzione si ricavano quindi P_1 e P_2
- Allo stesso risultato si giunge anche con una procedura grafica che compara tra loro le funzioni di costo per unità di potenza installata $f_i \rightarrow$ I valori $h(P_1)$ e $h(P_2)$ si determinano in corrispondenza dei vertici del poligono dei costi (in giallo tratteggiato nella figura in alto)



Gestione economica a breve termine

Gestione economica = Programmazione a breve termine

- **Mercato monopolistico** (gestione centralizzata)
 - Struttura verticalmente integrata → Un unico operatore conosce le funzioni di costo di ogni centrale, le caratteristiche del carico e la presenza di eventuali vincoli di trasporto (congestioni di rete)
 - Gestione al minimo costo
- **Mercato competitivo**
 - Libero accesso alla rete da parte di produttori (offerta) e consumatori (domanda)
 - Mercato gestito da un organismo terzo → Equilibrio domanda/offerta



Gestione economica a breve termine – Gestione centralizzata

Programmazione a breve termine in un mercato monopolistico

- **Dispacciamento**: ripartizione del carico totale di una rete tra i vari generatori in servizio in un determinato arco di tempo (es. 1 ora)
- **Scopo del dispacciamento**: alimentare il carico complessivo al minimo costo di produzione, con alcuni **vincoli**:
 - Rispetto dei vincoli di rete
 - Mantenimento dei margini di sicurezza
 - Qualità del servizio alle utenze
- Alcuni aspetti da considerare in relazione alla **disponibilità delle centrali**:
 - Piani di manutenzione
 - Modalità di utilizzo dei serbatoi delle centrali idroelettriche nell'arco di un anno
 - Rampe di accensione e spegnimento dei gruppi

Gestione economica a breve termine – Gestione centralizzata

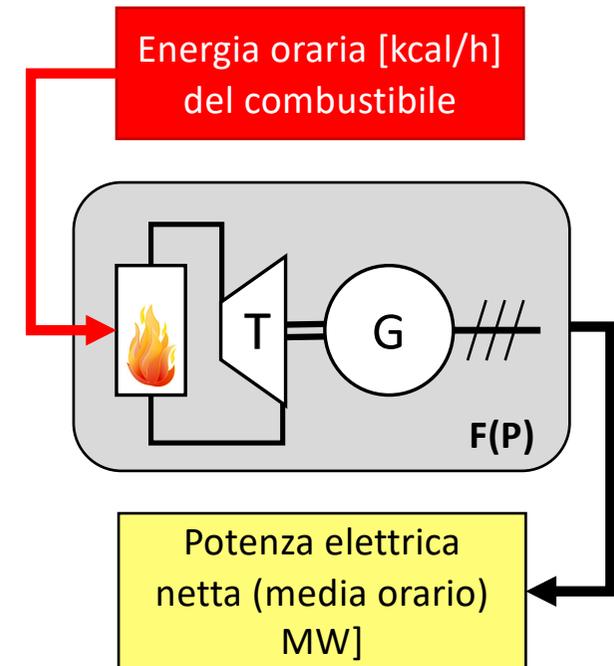
Caratterizzazione delle unità termoelettriche

- Per l'*i*-esima centrale, si può esprimere la funzione ingresso/uscita $F_i(P_i)$ in forma polinomiale e in [kcal/h]

$$F_i(P_i) = a + bP_i + cP_i^2 + dP_i^3 \quad [\text{kcal/h}]$$

- Il costo del combustibile c_i è espresso in [€/kcal]
- Il **costo orario di produzione** della *i*-esima centrale è C_i [€/h], espresso in funzione della potenza netta prodotta P_i in [MW]

$$C_i(P_i) = c_i \cdot F_i(P_i) = \alpha + \beta P_i + \gamma P_i^2 + \delta P_i^3 \quad [€/h]$$



Gestione economica a breve termine – Gestione centralizzata

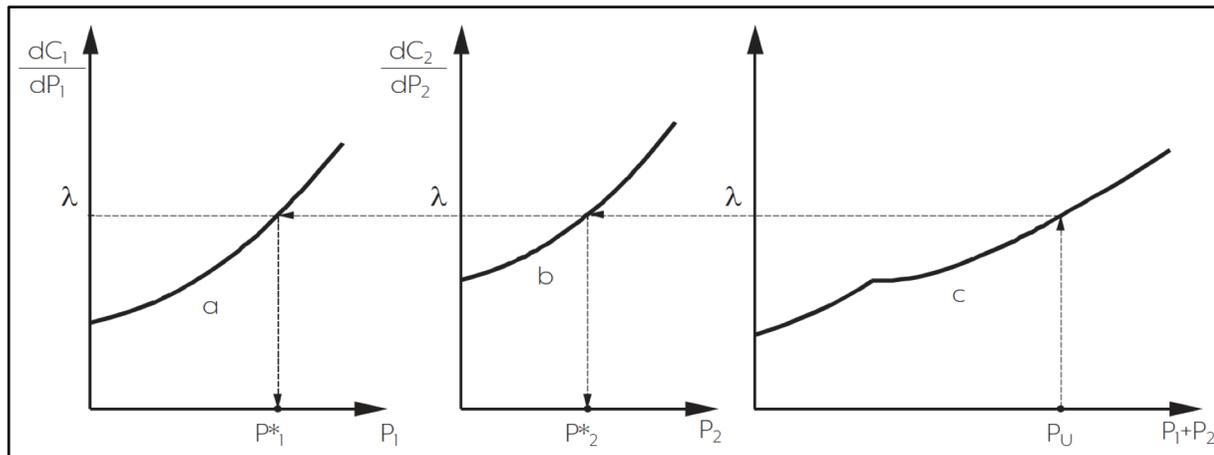
Dispacciamento economico

- Metodo dei moltiplicatori di Lagrange → Si risolve il problema duale della minimizzazione della funzione Lagrangiana (funzione obiettivo)
 - Si costruisce il sistema di n+1 equazioni per determinare le n+1 incognite (P_i, λ)
 - Azzeramento delle derivate parziali rispetto alle incognite
 - λ è il punto comune di lavoro delle varie unità (**metodo degli uguali costi incrementali**) perché la soluzione del sistema risulta

$$L = C_T + \lambda \cdot \Phi$$

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{dC_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0 & i = 1, 2, \dots, n \\ \Phi = 0 \end{cases}$$

$$\frac{dC_i}{dP_i} = I_i = \lambda$$



Procedura grafica per la risoluzione del problema di minimizzazione col metodo degli uguali costi incrementali

Gestione economica a breve termine – Mercato competitivo

- Il principio seguito nella struttura verticalmente integrata può essere sostanzialmente mantenuto se le **funzioni di costo** → **funzioni di prezzo**
 - Offerte di acquisto da parte dei consumatori
 - Offerte di vendita da parte dei produttori
 - Chiusura del mercato sul **punto di equilibrio tra domanda e offerta**
- Gli impianti produttori sono tra loro in concorrenza
 - Le procedure di selezione degli impianti chiamati a produrre devono avvenire con criteri di massima **trasparenza** e verificabili in ogni momento, senza creare condizioni di favore per alcuni rispetto ad altri

