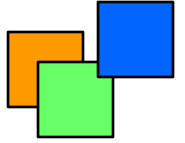




# Corso di dottorato in Tecnologie Chimiche ed Energetiche



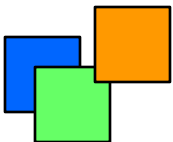
## METODI PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA DI I E II PRINCIPIO APPLICATI A SISTEMI DI GENERAZIONE DEL CALORE PER IL RISCALDAMENTO

*DOTTORANDO  
RELATORE  
CORRELATORE*

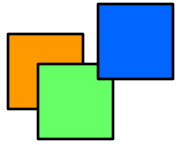
*: ing. Luca Ceccotti*

*: Prof. Ing. Onorio Saro*

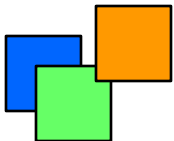
*: Dott. Ing. PhD Alessandra De Angelis*



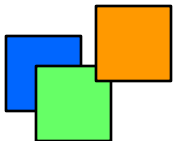
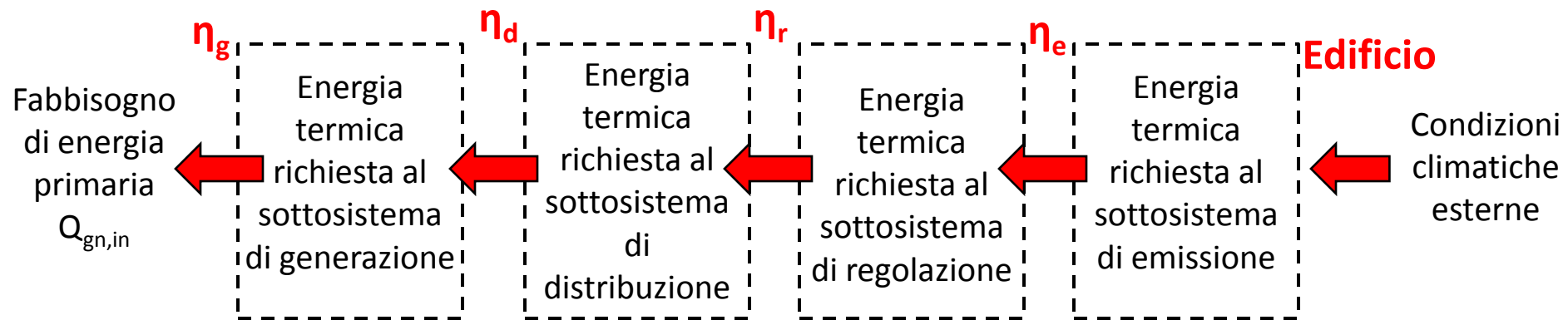
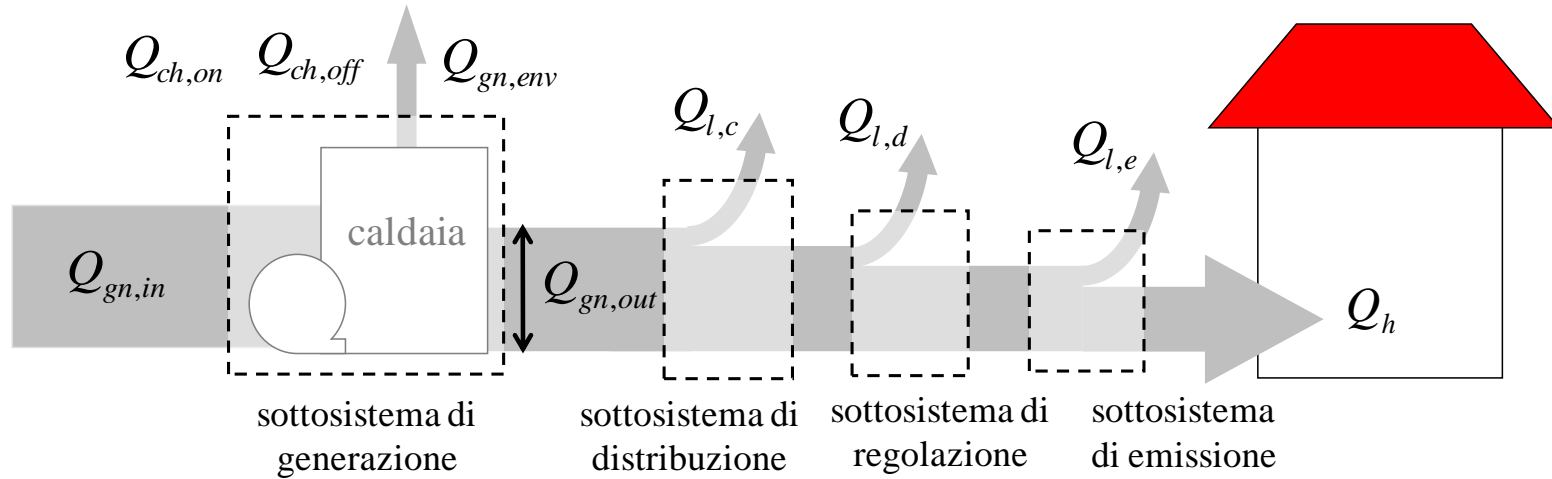
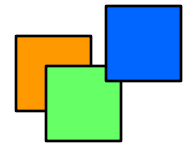
# OBIETTIVI DEL LAVORO SVOLTO



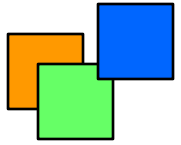
- Valutare gli effetti, sull'efficienza energetica nella produzione di energia termica, di alcune scelte impiantistiche:
  - Utilizzo di caldaie a gas a condensazione, on-off o modulanti, abbinate ad impianti a radiatori o ad irraggiamento
  - Impiego di caldaie a pezzi di legna abbinate a sistemi di accumulo termico
- Valutare, con i metodi dell'analisi exergetica, la qualità delle trasformazioni termodinamiche caratteristiche di:
  - Caldaie tradizionali
  - Caldaie a condensazione
  - Pompe di calore



# ANALISI ENERGETICA DI SISTEMI IMPIANTISTICI PER IL RISCALDAMENTO



# DETERMINAZIONE DEL FABBISOGNO DI ENERGIA TERMICA



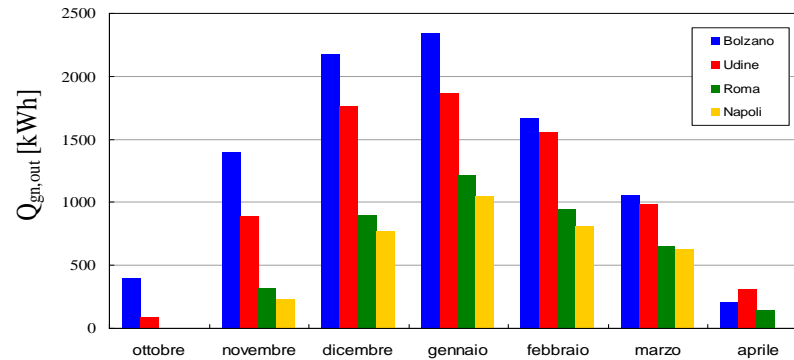
Modellazione dell'edificio + Dati climatici orari



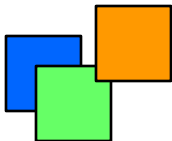
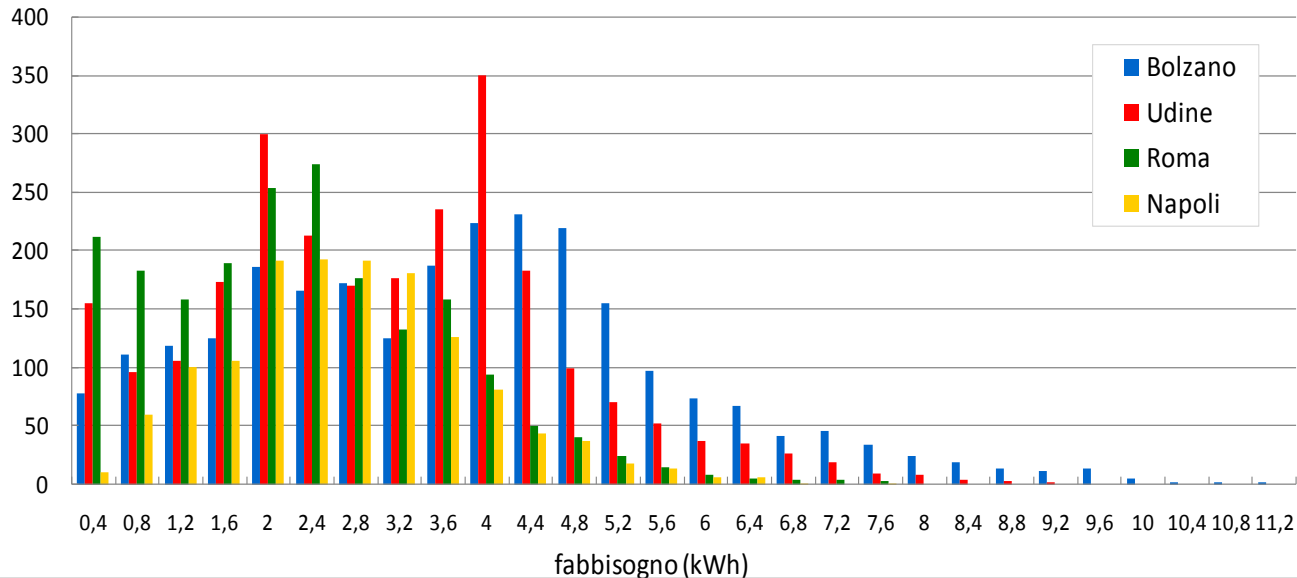
**Energy Plus**

Valori orari di energia termica  $Q_h$

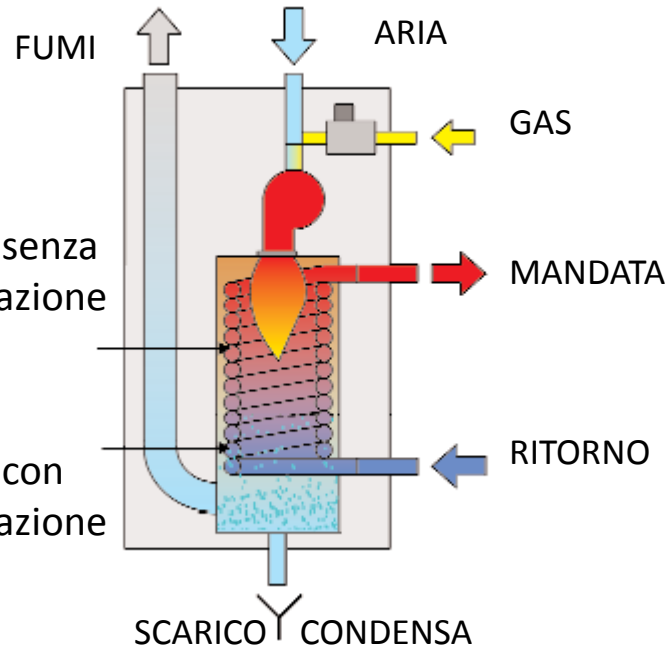
Fabbisogno energia termica mensile



numero ore



# LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

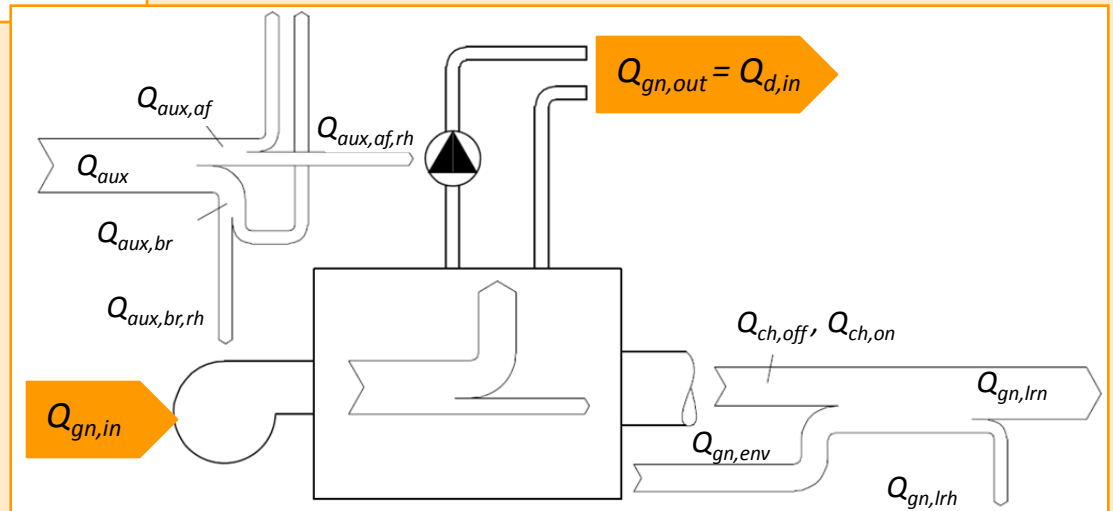


## DEFINIZIONI DI APPARECCHIO A CONDENSAZIONE

UNI EN 677:2000 "Caldaia in cui, nelle normali condizioni di funzionamento e a determinate temperature dell'acqua, il vapore acqueo contenuto nei prodotti della combustione viene parzialmente condensato, per poter utilizzare il calore latente del vapore acqueo stesso per il riscaldamento e che soddisfa i requisiti di rendimento contenuti nella norma"

## FLUSSI DI ENERGIA PER IL GENERATORE DI CALORE

Individuazione del metodo più adatto per determinare le perdite energetiche



# LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

## PERDITE ENERGETICHE: metodo di calcolo semplificato

$$\eta_{gn,Pn,cor} = \eta_{gn,Pn} + f_{cor,Pn} \cdot (\Phi_{gn,rif,Pn} - \mathcal{G}_{gn,w})$$

$$\Phi_{gn,l,Pn,cor} = \frac{(-\eta_{gn,Pn,cor})}{\eta_{gn,Pn,cor}} \cdot \Phi_{Pn}$$

A potenza nominale

$$\eta_{gn,Pint,cor} = \eta_{gn,Pint} + f_{cor,Pint} \cdot (\Phi_{gn,rif,Pint} - \mathcal{G}_{gn,w})$$

$$\Phi_{gn,l,Pint,cor} = \frac{(-\eta_{gn,Pint,cor})}{\eta_{gn,Pint,cor}} \cdot \Phi_{Pint}$$

A potenza intermedia

$$\Phi_{int} = 0,3 \cdot \Phi_{Pn}$$

$$\Phi_{gn,l,P0,cor} = \Phi_{gn,l,P0} \cdot \left( \frac{\mathcal{G}_{gn,avg} - \mathcal{G}_{a,gn}}{\mathcal{G}_{rif,avg} - \mathcal{G}_{a,rif}} \right)^{1,25}$$

A carico nullo

$$\Phi_{gn,l,Px} = \frac{\Phi_{Px}}{\Phi_{Pint}} \cdot (\Phi_{gn,l,Pint,cor} - \Phi_{gn,l,P0,cor}) + \Phi_{gn,l,P0,cor}$$

$$0 \leq \Phi_{Px} < \Phi_{Pint}$$

A potenza media

$$\Phi_{gn,l,Px} = \frac{\Phi_{Px} - \Phi_{Pint}}{\Phi_{Pn} - \Phi_{Pint}} \cdot (\Phi_{gn,l,Pn,cor} - \Phi_{gn,l,Pint,cor}) + \Phi_{gn,l,Pint,cor}$$

$$\Phi_{Pint} \leq \Phi_{Px} < \Phi_{Pn}$$

$$Q_{gn,l,t} = \frac{\Phi_{gn,l,Px} \cdot t_{gn}}{1000}$$

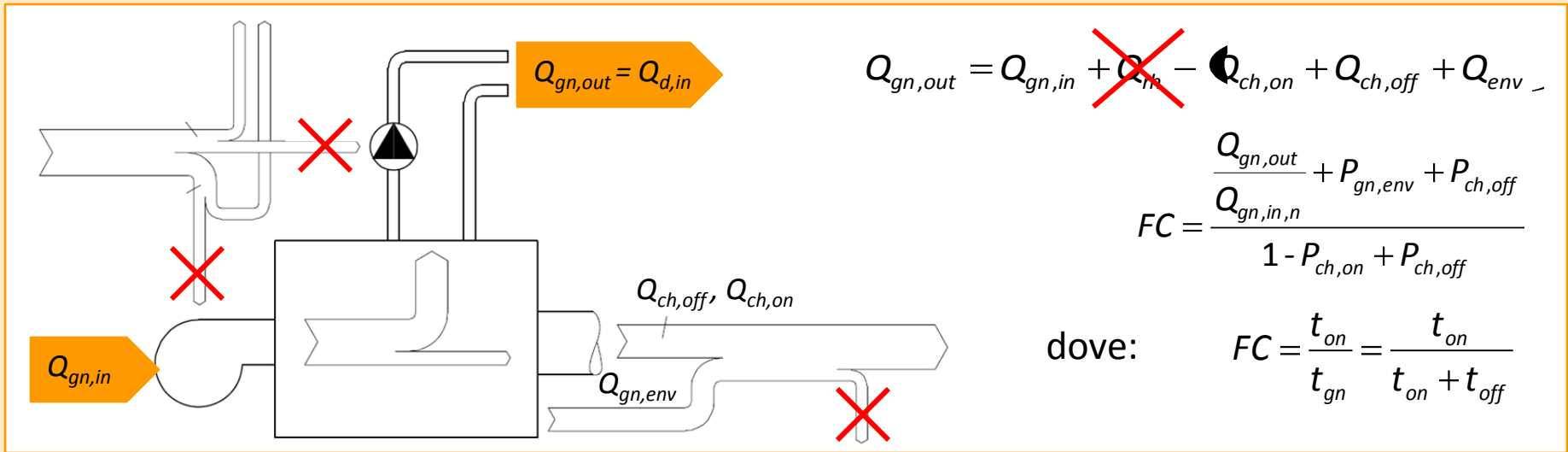
Perdite totali di energia nell'intervallo di simulazione considerato

$$Q_{gn,in} = Q_{gn,out} + Q_{l,gn} - Q_{l,gn,rh}$$

Fabbisogno di energia del generatore

# LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

## PERDITE ENERGETICHE: metodo di calcolo analitico



$$P_{ch,on} = P'_{ch,on} + \left( \frac{q_{gn,w,avg} - g_{gn,rif}}{q_{gn,w,rif} - g_{a,rif}} \right) \cdot 0,045 \cdot FC^n$$

$$P_{ch,on,avg} = P'_{ch,on,min} + \left( \frac{\Phi_{cn,avg} - \Phi_{cn,min}}{\Phi_{cn,max} - \Phi_{cn,min}} \right) \cdot (P_{ch,on} - P_{ch,on,min})$$

$$P_{ch,off} = P'_{ch,off} \cdot \left( \frac{q_{gn,w,avg} - g_{a,gn}}{q_{gn,w,rif} - g_{a,rif}} \right) \cdot FC^p$$

$FC < 1$     intermittenza alla potenza minima  
 $FC \geq 1$     continuité a potenza intermedia

$$P_{gn,env} = P'_{gn,env} \cdot k_{gn,env} \cdot \left( \frac{q_{gn,w,avg} - g_{a,gn}}{q_{gn,w,rif} - g_{a,rif}} \right) \cdot FC^m$$

$$Q_{gn,in} = \Phi_{cn,in,min} \cdot t_{gn} \cdot FC$$

$$Q_{gn,in} = \Phi_{cn,in,avg} \cdot t_{gn}$$

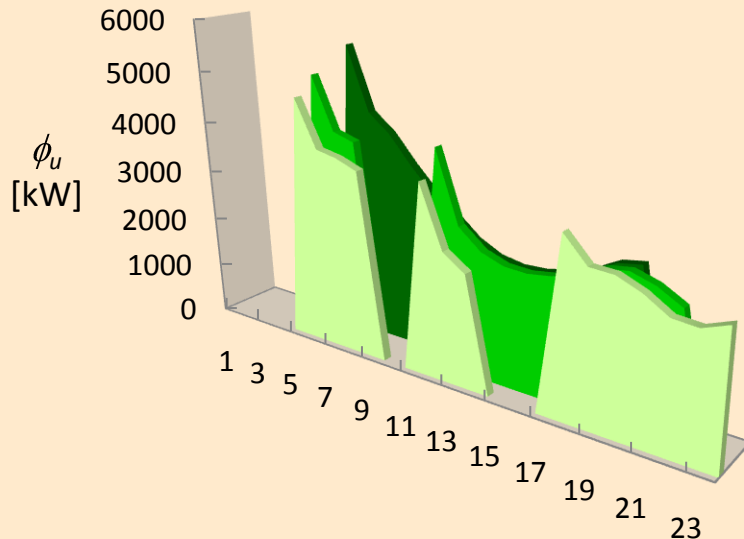
# LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

## INFLUENZA DELLA MODULAZIONE SUL FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA

Nel seguito è stato utilizzato il metodo analitico per il calcolo delle perdite di generazione

Range di modulazione: intervallo tra la potenza massima erogabile e la minima per cui è possibile la regolazione della fiamma

	UNITÀ DI MISURA	GENERATORE A	GENERATORE B	GENERATORE C	GENERATORE D
$\Phi_{cn,max}$	[W]	26700	17400	24500	33000
$\Phi_{cn,min}$	[W]	1100	2500	5000	10000
$P_{ch,on}$	[%]	2	2	2	2
$P_{gn,env}$	[%]	0,6	0,6	0,6	0,6
$P_{ch,off}$	[%]	0,1	0,1	0,1	0,1



Fabbisogno di energia termica al variare del profilo di conduzione dell'impianto per un giorno tipo (1 gennaio) a Udine

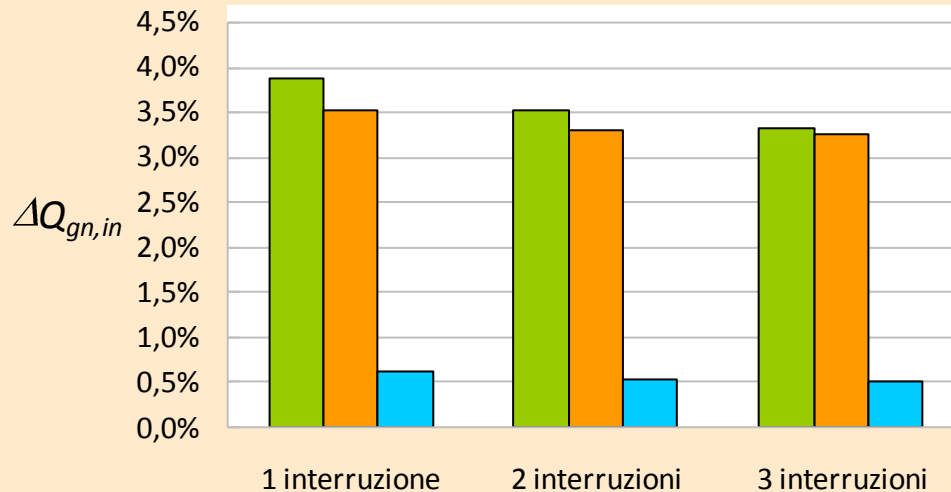
- 3 interruzioni
- 2 interruzioni
- 1 interruzione



# LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

## INFLUENZA DELLA MODULAZIONE SUL FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA

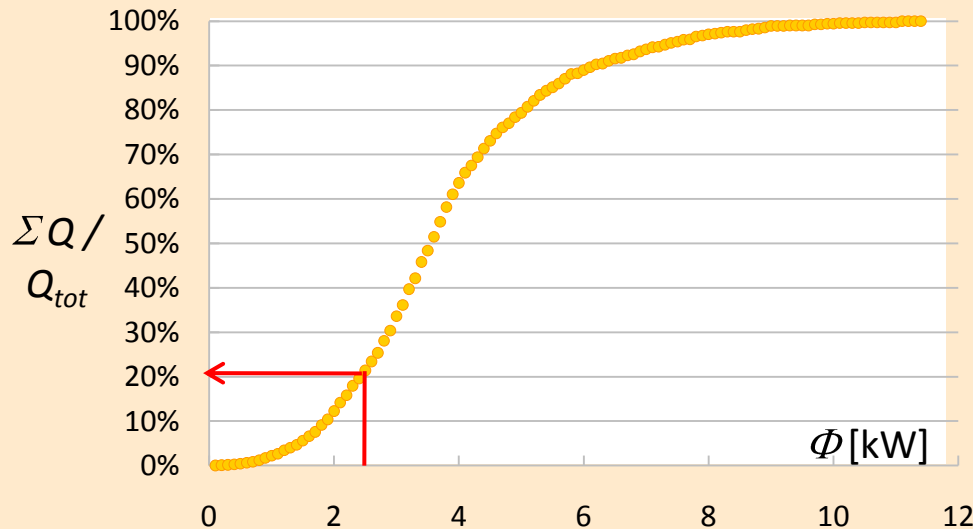
■ generatore A:  $\Phi_{min} = 1,1$  kW    ■ generatore B:  $\Phi_{min} = 2,5$  kW    ■ generatore C:  $\Phi_{min} = 5$  kW



Risparmio di combustibile utilizzando il generatore A, B o C rispetto al tipo D (non modulante)

**Numero di interruzioni** poco influente sul consumo di combustibile

**Potenza minima** molto influente sul consumo di combustibile

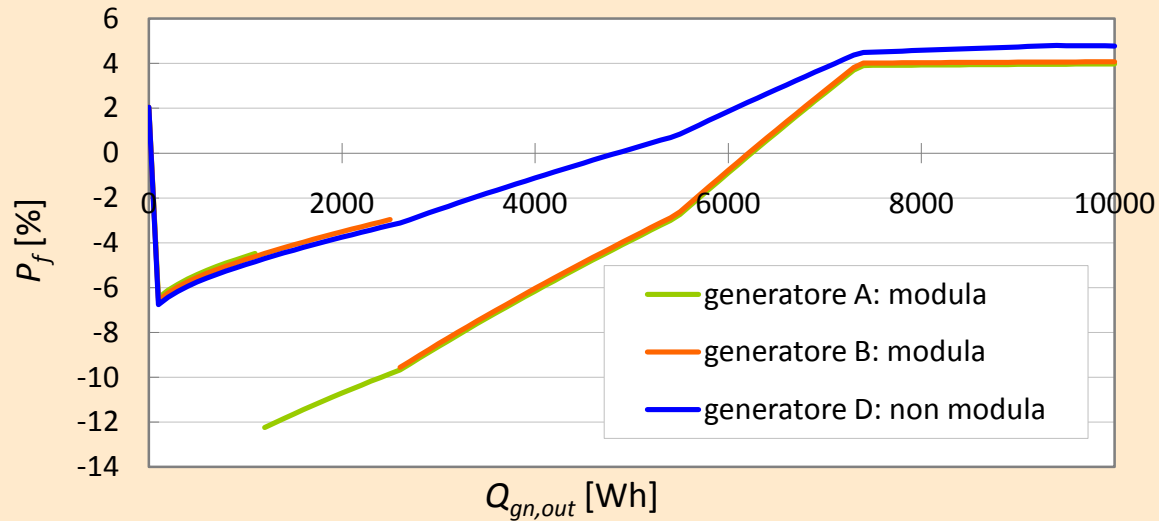


Percentuale di fabbisogno termico per ogni valore di potenza richiesta alla caldaia

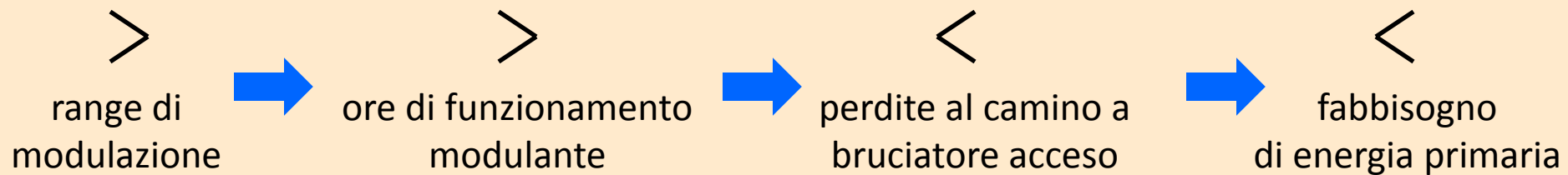
Il generatore B con potenza minima  $\Phi_{min} = 2,5$  kW fornisce all'impianto circa l'80% dell'energia termica funzionando in regime di modulazione

# LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

## INFLUENZA DELLA MODULAZIONE SULLE PERDITE ENERGETICHE DEL GENERATORE

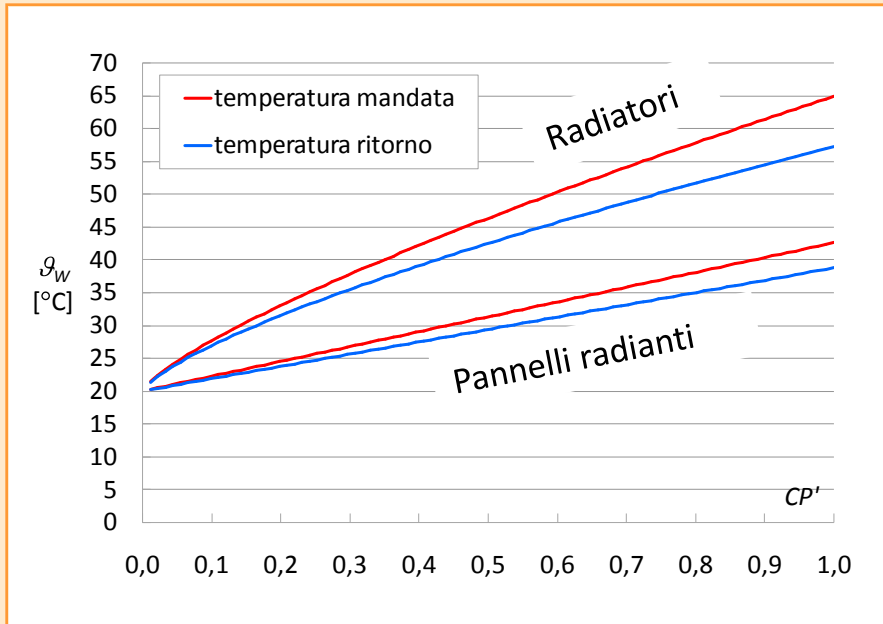


Andamento delle perdite al camino a bruciatore acceso per tre dei generatori considerati al variare del carico massimo richiesto dall'edificio



# LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

## INFLUENZA DEL TERMINALE DI EMISSIONE SUL FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA



Regolazione secondo le curve caratteristiche dei corpi scaldanti

$$g_w = f(CP')$$

$$CP' = \frac{Q_{effettiva}}{Q_{progetto}}$$

radiatori:

$$\Phi = \Phi_n \left( \frac{\Delta g}{\Delta g_n} \right)^p$$

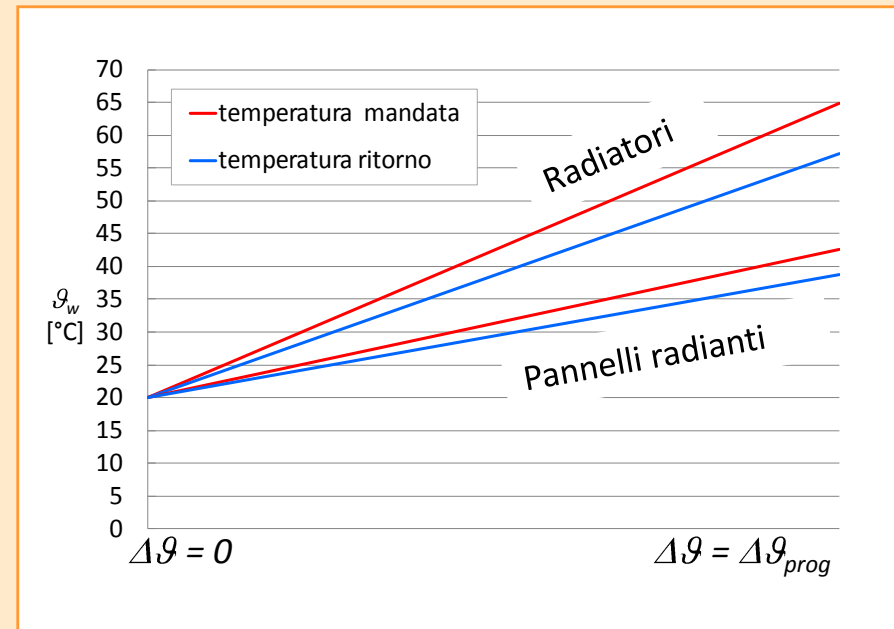
pannelli:

$$q = q_n \left( \frac{\Delta g_H}{\Delta g_{H,des}} \right)$$

Regolazione con compensazione della temperatura esterna

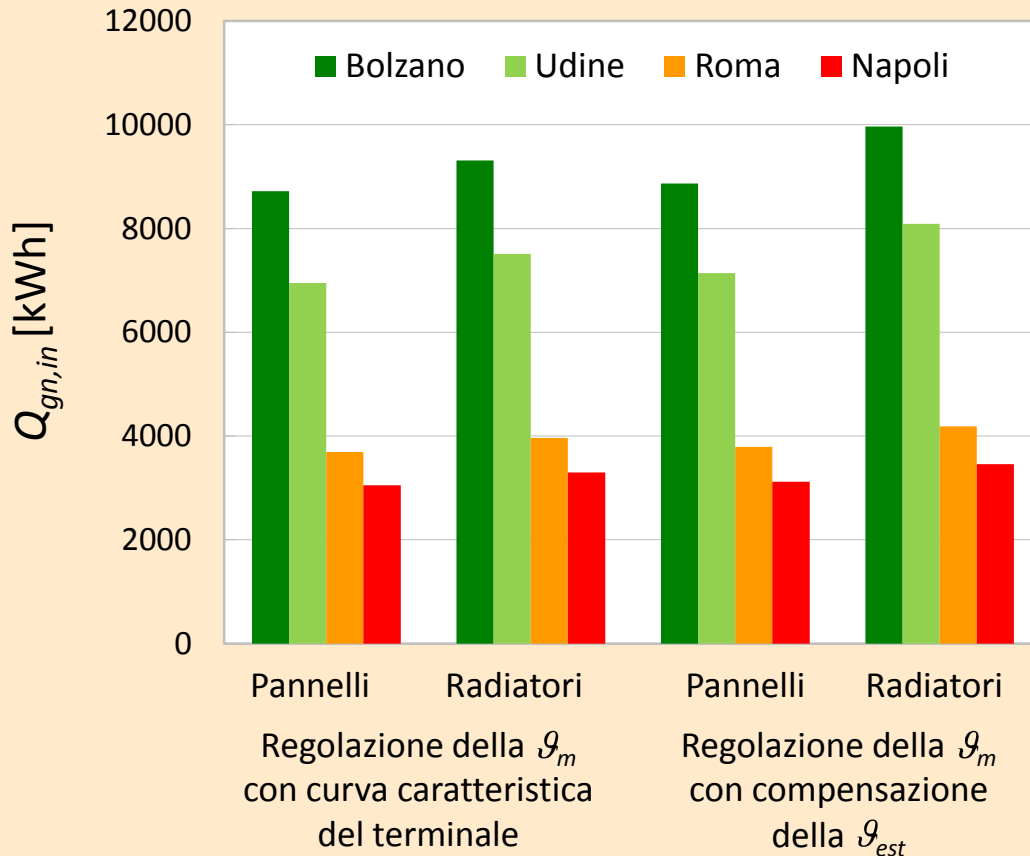
$$g_w = f(\Delta g) \quad \Delta g = g_{amb} - g_{est}$$

$$\frac{g_{est} - g_{est,min}}{g_{est,max} - g_{est,min}} = \frac{g_{w,max} - g_{w,m}}{g_{w,max} - g_{w,min}}$$



# LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

## INFLUENZA DEL TERMINALE DI EMISSIONE SUL FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA



Differenze di energia primaria mensile tra impianto a radiatori e impianto a pannelli radianti per diverse località italiane e per diversi sistemi di regolazione

regolazione con curva caratteristica del terminale



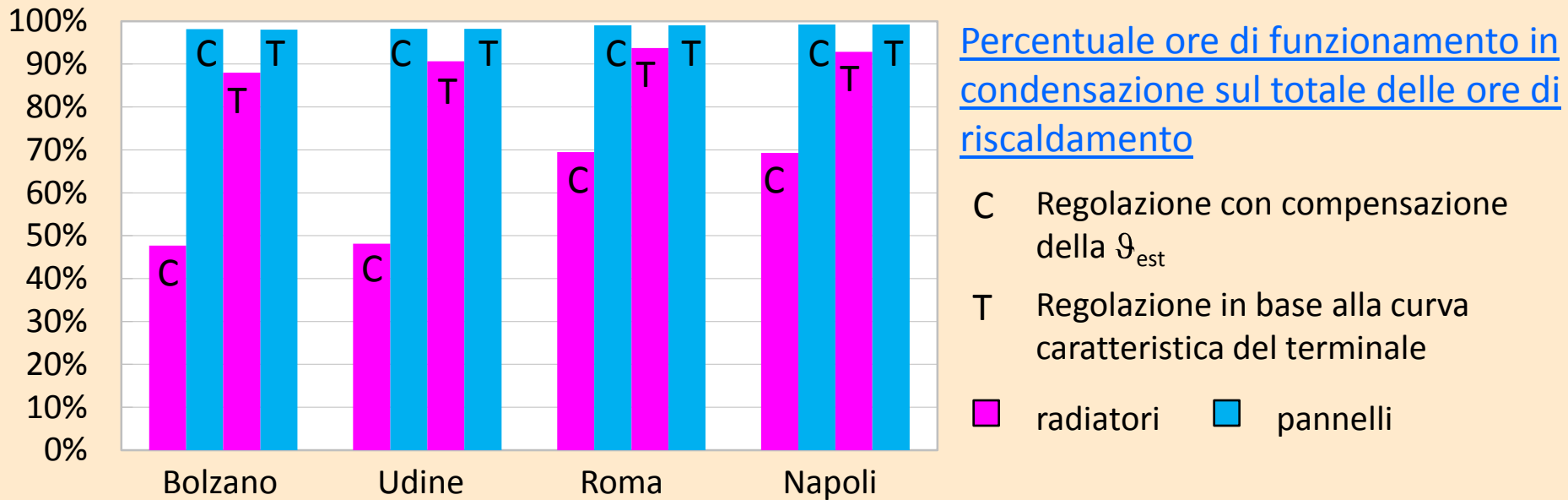
minore fabbisogno di energia

6% a favore dell'impianto a pannelli radianti

10% a favore dell'impianto a pannelli radianti

# LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

## INFLUENZA DEL TERMINALE DI EMISSIONE SUL FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA



Percentuale ore di funzionamento in condensazione sul totale delle ore di riscaldamento

C Regolazione con compensazione della  $\vartheta_{est}$

T Regolazione in base alla curva caratteristica del terminale

■ radiatori ■ pannelli

### Regolazione con compensazione della temperatura esterna

- climi più freddi: **50%** a favore dei pannelli radianti
- climi più caldi: **30%** a favore dei pannelli radianti

### Regolazione in base alla curva caratteristica del terminale

- climi più freddi: **10%** a favore dei pannelli radianti
- climi più caldi: **8%** a favore dei pannelli radianti

impianto radiante —————> funzionamento sempre in condensazione

impianto a radiatori con curva caratteristica —————> aumenta funzionamento in condensazione

# LE CALDAIE A CONDENSAZIONE

## OTTIMIZZAZIONE DEL FUNZIONAMENTO

Il sistema più efficiente è:

Caldaia a condensazione



Potenza minima del generatore tale da fornire almeno l'80% della potenza termica in modulazione



Impianto radiante

Risultati più che soddisfacenti si ottengono anche con:

Caldaia a condensazione



Potenza minima del generatore tale da fornire almeno l'80% della potenza termica in modulazione



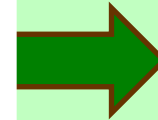
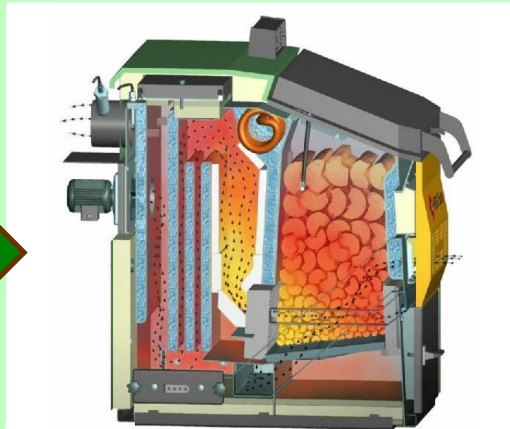
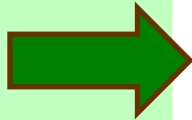
Impianto a radiatori



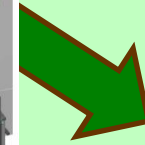
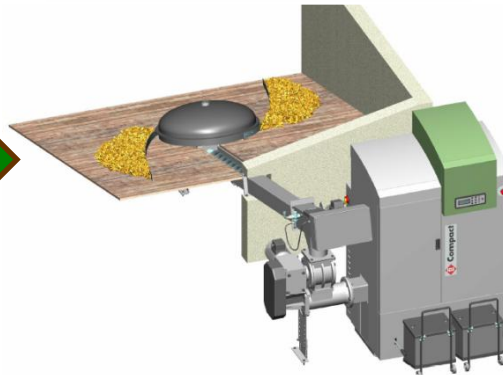
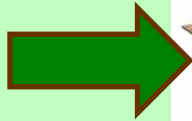
Regolazione temperatura mandata con curva caratteristica corpo scaldante

# LE CALDAIE A BIOMASSA

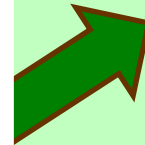
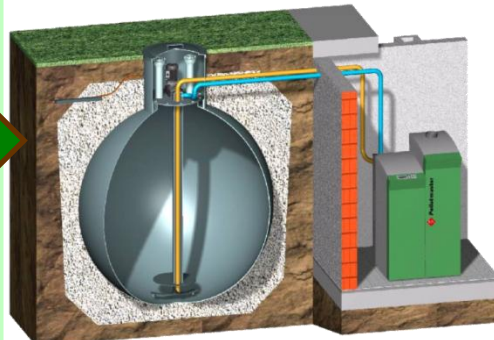
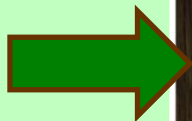
## TIPOLOGIE DI BIOMASSA FORESTALE E CORRISPONDENTI GENERATORI DI CALORE



- Caricamento manuale
- Necessità operatore
- Adatto ad abitazioni singole
- Potenza fino a 50 kW
- Combustione a fiamma inversa
- Regolazione combustione



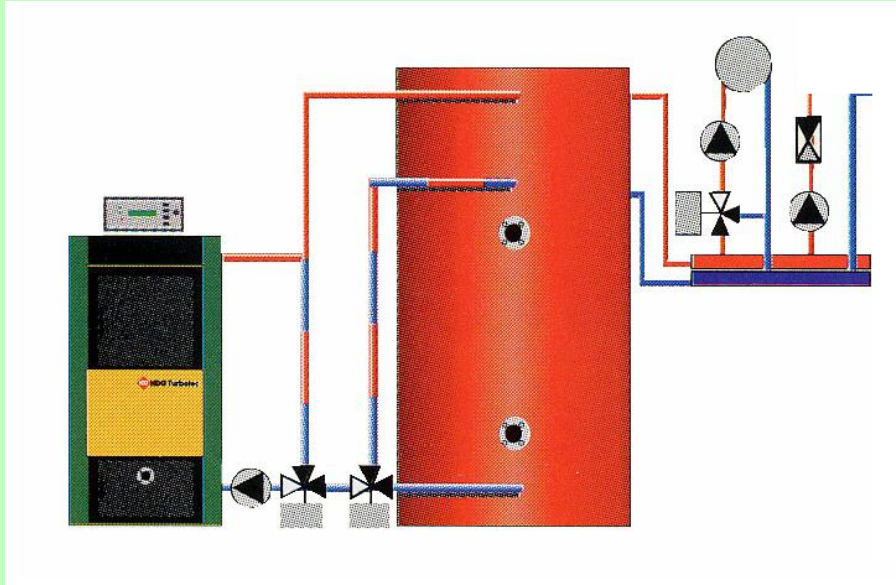
- Caricamento automatico
- Adatto ad abitazioni, condomini, teleriscaldamento
- Nessun limite di potenza
- Regolazione combustione
- Automatismi per la pulizia



- Nessun limite di potenza
- Regolazione combustione
- Automatismi per la pulizia

# LE CALDAIE A BIOMASSA

## L'ACCUMULO TERMICO ABBINATO ALLE CALDAIE A BIOMASSA A CARICAMENTO MANUALE



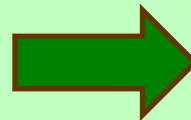
La letteratura scientifica e le istruzioni dei costruttori di caldaie a caricamento manuale prevedono l'installazione di un sistema di **accumulo inerziale**

Accumulo termico

Maggiore comodità per l'operatore?

Influenza sul rendimento del sistema generatore+accumulo?

Come dimensionare l'accumulatore?



Modello del sistema mediante bilanci energetici



# LE CALDAIE A BIOMASSA

## MODELLO DI UN SISTEMA CALDAIA – ACCUMULATORE TERMICO – IMPIANTO

### Flussi energetici per la caldaia



**Bilancio:**

$$Q_{H,gen,out} = Q_{comb} + Q_{br} + Q_{pmp} - Q_{ch,on} - Q_{ch,off} - Q_{gnr,env}$$

**Perdite:**

$$\begin{cases}
 P_{ch,on} = [P'_{ch,on} + (\vartheta_{gnr,w,m} - \vartheta_{gnr,w,m,test}) \cdot f_{corr}] \cdot FC^n \\
 P_{gnr,env} = P'_{gnr,env} \cdot k_{gnr,env} \cdot \frac{(\vartheta_{gnr,w,m} - \vartheta_{i,brm})}{(\vartheta_{gnr,w,m,test} - \vartheta_{i,brm,test})} \cdot FC^m \\
 P_{ch,off} = P'_{ch,off} \cdot \frac{(\vartheta_{gnr,w,m} - \vartheta_{i,brm})}{(\vartheta_{gnr,w,m,test} - \vartheta_{i,brm,test})} \cdot FC^p
 \end{cases}
 \quad \rightarrow \quad
 FC = \frac{t_{gnr,on}}{t_{gnr,tot}}$$

**Stati di funzionamento:**

Accesa		$Q_{legna,f} = Q_{legna,i} - Q_{comb}$
Spenta		
Mantenimento braci		$Q_{legna,f} = Q_{legna,i} - Q_{ch,off} - Q_{env}$

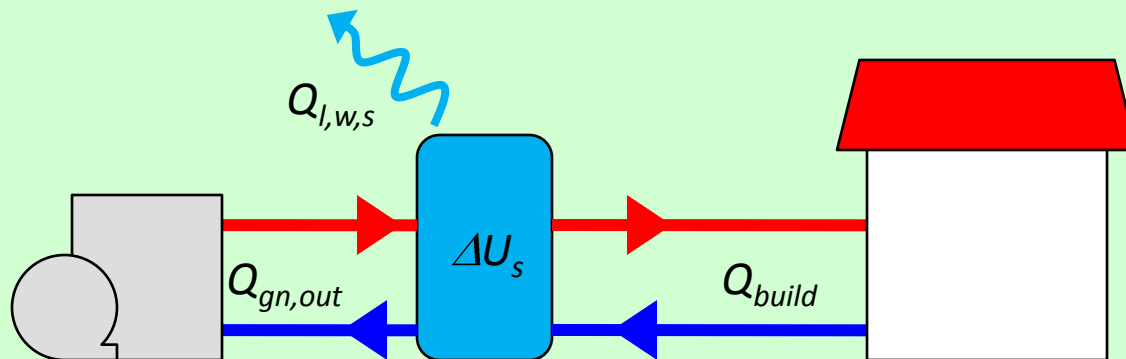
**Transitori:**

$\vartheta_{gnr,f} = \vartheta_{gnr,i} + \frac{Q_{comb} - Q_{env} - Q_{ch,on}}{C_{gnr}}$	Riscaldamento con caldaia accesa
$\vartheta_{gnr,f} = \vartheta_{gnr,i} - \frac{Q_{env}}{C_{gnr}} - \frac{Q_{ch,off}}{C_{gnr}}$	Raffreddamento con caldaia spenta o in mantenimento braci

# LE CALDAIE A BIOMASSA

## MODELLO DI UN SISTEMA CALDAIA – ACCUMULATORE TERMICO – IMPIANTO

Flussi energetici per l'accumulatore



**Bilancio:** 
$$\Delta U_s = Q_{gn,out} - Q_{l,w,s} + Q_{build}$$

**Perdite:** 
$$Q_{l,w,s} = K_s \cdot A_s \cdot (g_s - g_a) \cdot t_s$$

**Transitori:**

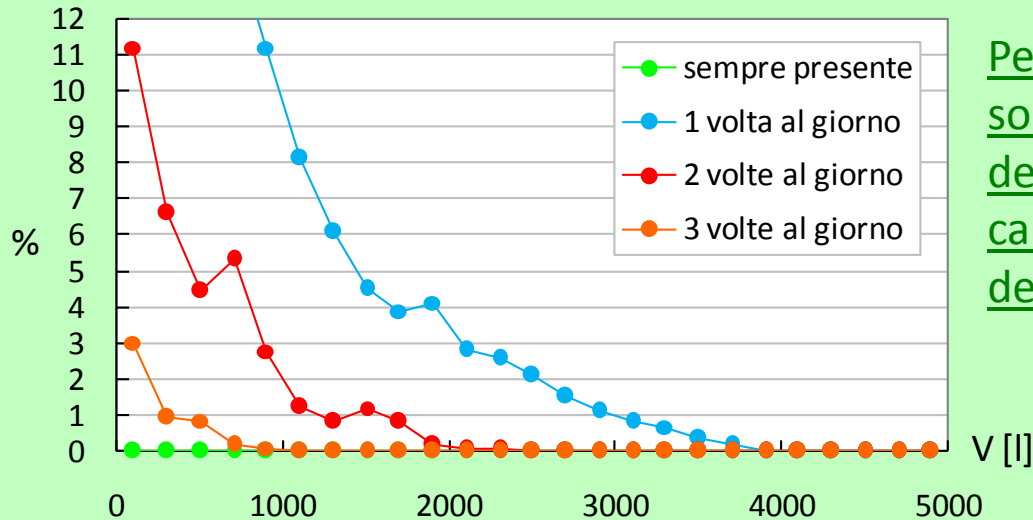
$$g_{sf} = g_{si} + \frac{Q_{gn,out}}{C} - \frac{K_s \cdot A_s}{C} \cdot (g_{si} - g_a) \cdot t_s - \frac{Q_{build}}{C} \quad \text{Riscaldamento}$$

$$g_{sf} = g_{si} - \frac{K_s \cdot A_s}{C} \cdot (g_{si} - g_a) \cdot t_s + \frac{Q_{build}}{C} \quad \text{Raffreddamento}$$

# LE CALDAIE A BIOMASSA

## L'ACCUMULATORE È NECESSARIO?

### INFLUENZA DELLA DISPONIBILITÀ DELL'OPERATORE



Percentuale di fabbisogno termico non soddisfatto in funzione del volume dell'accumulatore, con volume stiva di carica 50 litri, al variare della disponibilità dell'operatore

#### Conclusioni:

- Se l'operatore è sempre disponibile, l'accumulo non serve
- Se l'operatore non è sempre disponibile, è necessario un accumulo minimo affinché sia fornita all'edificio l'energia richiesta
- Minore è il numero di volte al giorno in cui l'operatore accetta di effettuare il carico e maggiore è la capacità minima ammissibile

**A quanto ammonta la capacità minima?**

# LE CALDAIE A BIOMASSA

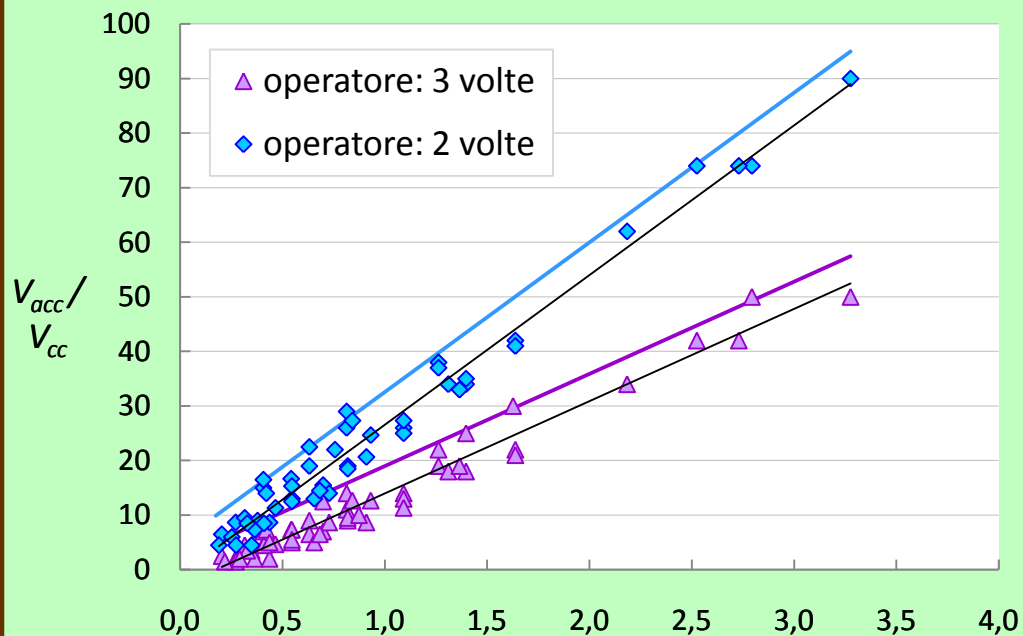
## VOLUME DI ACCUMULO MINIMO AMMISSIBILE

Campagna di simulazione di diversi edifici, variando:

- fattore di forma S/V
- trasmittanza
- potenza massima richiesta
- caratteristiche del generatore

A Udine:

Rette interpolanti traslate in modo che i valori rappresentino il 99% dei casi simulati



$$V_{acc} = c_1 \cdot \frac{P_{max} \cdot V_{cc}}{Q_{cc}} + c_2 \cdot V_{cc}$$

$\frac{P_{max} \cdot h}{Q_{cc}}$

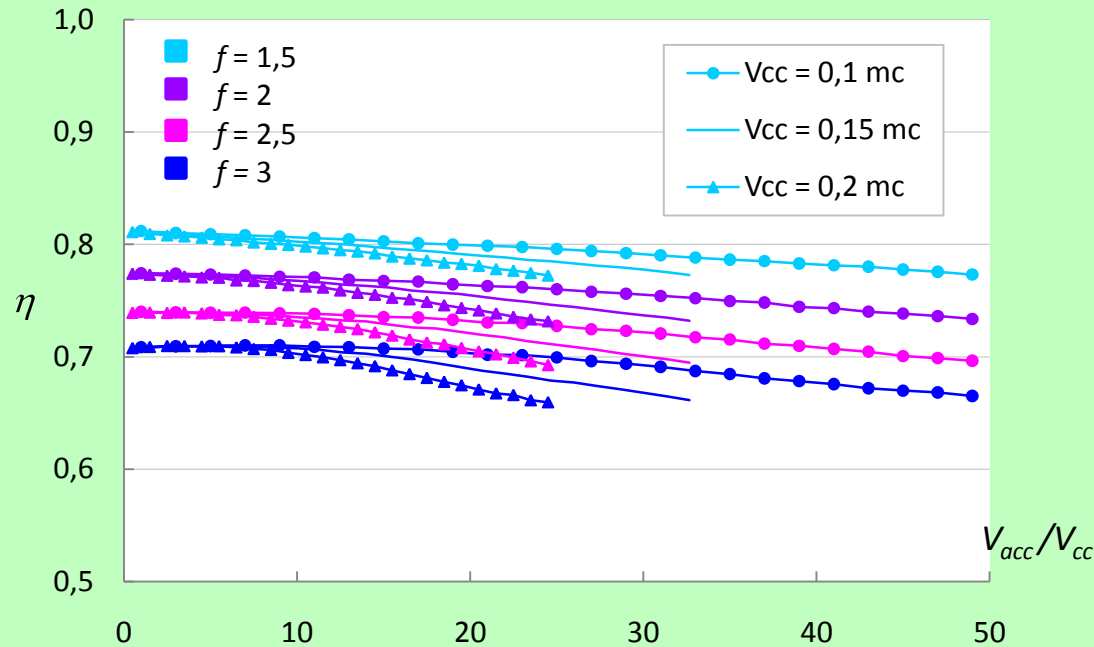
operatore	Nord		Centro	
	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	c <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>
2 volte/giorno	385	5	258	0
3 volte/giorno	237	2	128	1

# LE CALDAIE A BIOMASSA

## VOLUME DI ACCUMULO OTTIMALE

Influenza del volume di accumulo e del sovradimensionamento sul rendimento

Ad esempio, a Udine:



volume di accumulo



sovradimensionamento

Il rendimento del sistema diminuisce

E' possibile trovare il volume ottimo a partire dalle caratteristiche di generatore ed impianto

# LE CALDAIE A BIOMASSA

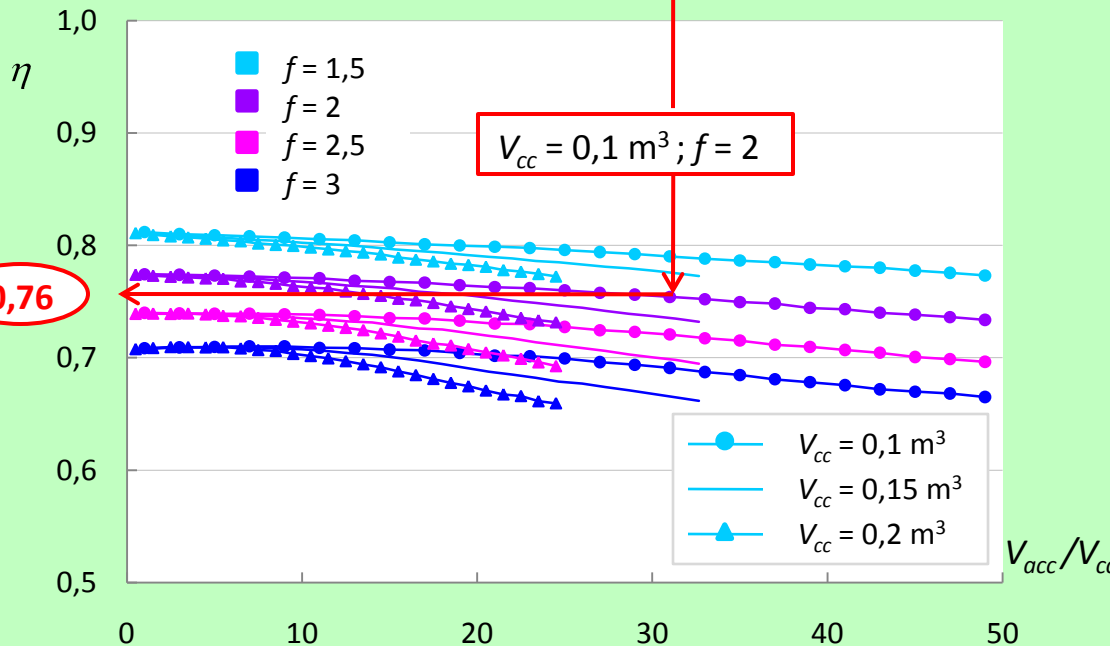
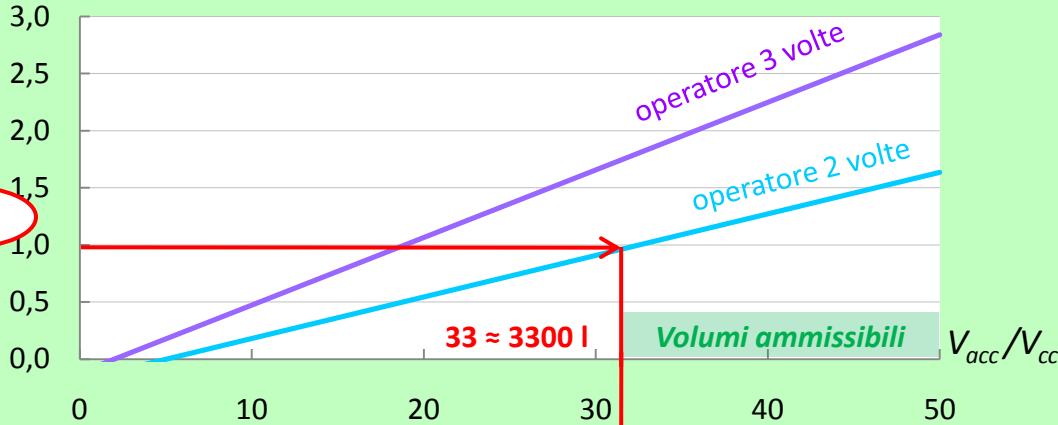
## VOLUME DI ACCUMULO OTTIMALE

Esempio di un edificio a Udine:

### DATI DI INPUT:

Dispersioni termiche: 15 kW  
Accensione giornaliera: 14 h  
Volume stiva di carica: 0,1 m<sup>3</sup>  
Potenza nominale caldaia: 30 kW  
Operatore: 2 volte/giorno

$P_{max} * h / Q_{cc}$



$$\frac{P_{max} * h}{Q_{cc}} = \frac{15 \cdot 14}{0,1 \cdot 750 \cdot 0,7 \cdot 3,8} = 1,05$$

$$f = \frac{P_{nom}}{P_{max}} = \frac{30}{15} = 2$$

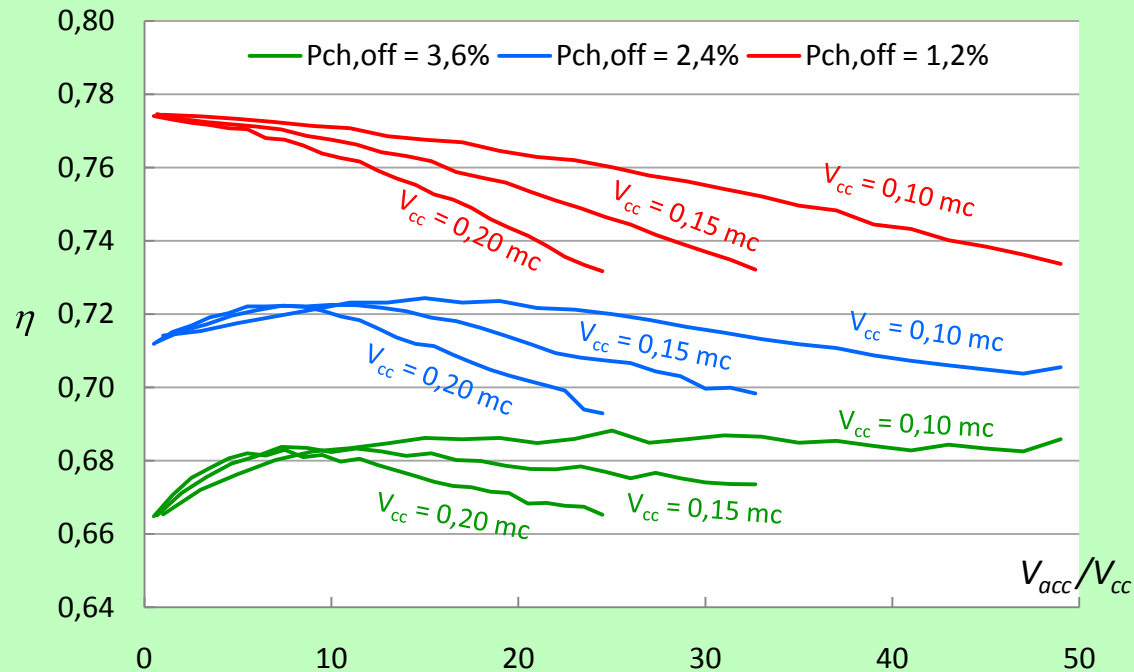
### Conclusioni:

Il volume minimo ammissibile corrisponde al volume ottimo dell'accumulatore

# LE CALDAIE A BIOMASSA

## ALTRI PARAMETRI CHE INFLUENZANO IL RENDIMENTO

Perdite energetiche a bruciatore spento:

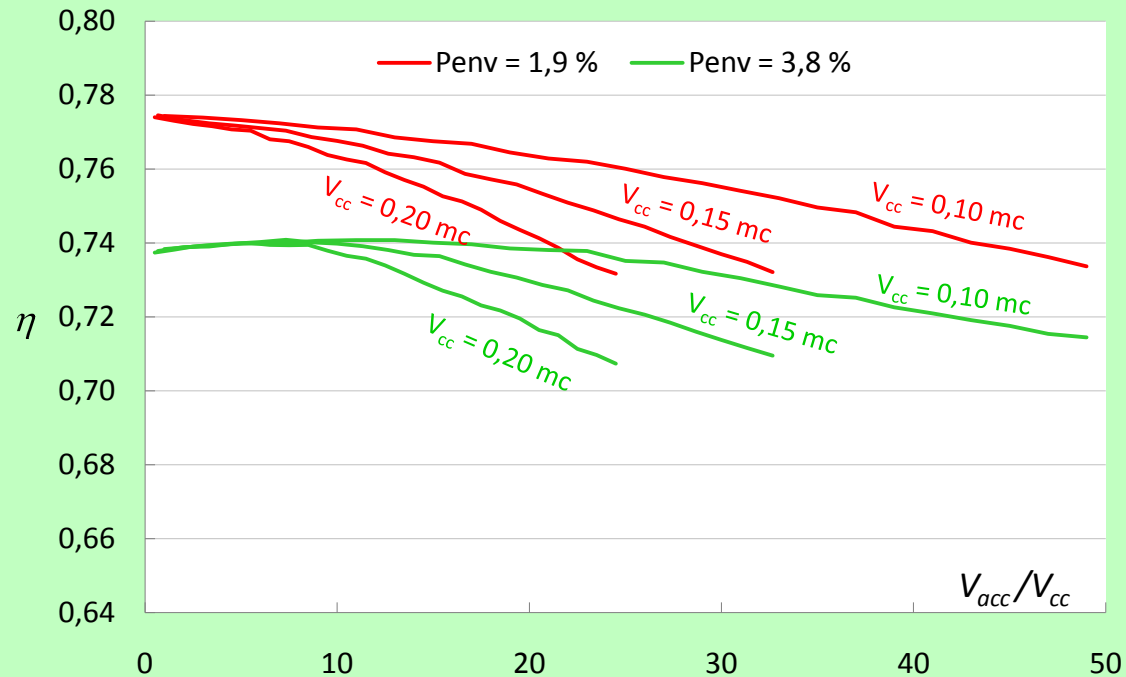


- Il valore di  $P_{ch,off}$  incide in modo importante sul rendimento
- Per valori elevati di  $P_{ch,off}$  può esserci un valore di capacità ottimale dell'accumulo superiore alla minima ammissibile
- Difficilmente il miglioramento di rendimento giustifica un volume di accumulo maggiore rispetto al minimo ammissibile, anche nel caso b)

# LE CALDAIE A BIOMASSA

## ALTRI PARAMETRI CHE INFLUENZANO IL RENDIMENTO

Perdite energetiche al mantello:



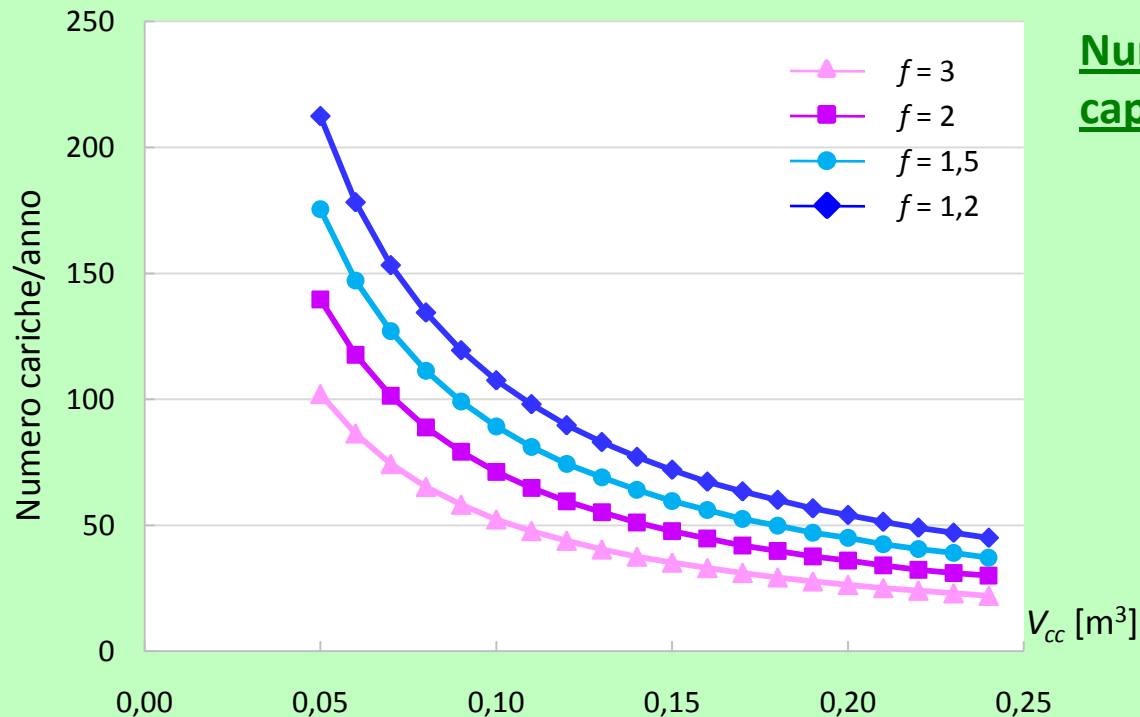
- L'incidenza di  $P_{env}$  sul rendimento è meno marcata rispetto a  $P_{ch,off}$
- Anche in questo caso, per valori elevati di  $P_{env}$  può esserci un valore di capacità ottimale dell'accumulo superiore alla minima ammissibile
- Difficilmente il miglioramento di rendimento giustifica un volume di accumulo maggiore rispetto al minimo ammissibile, anche nel caso b)



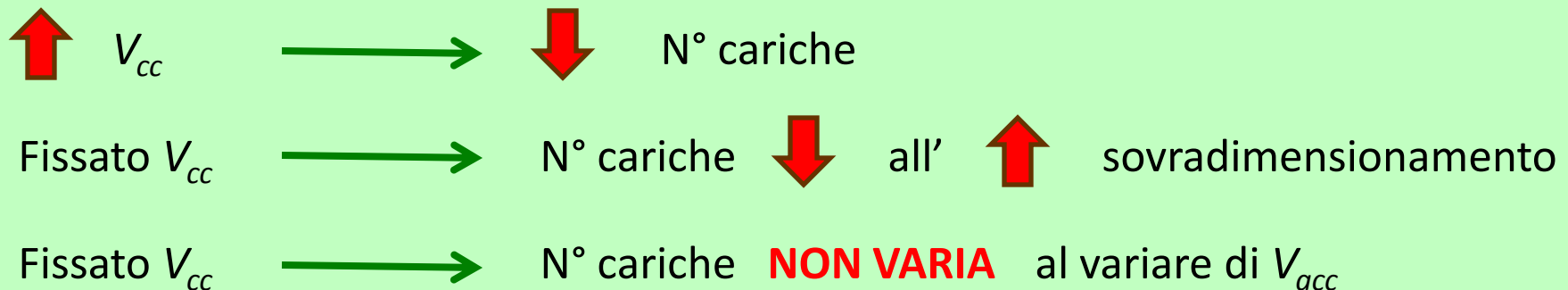
# LE CALDAIE A BIOMASSA

## PARAMETRI CHE INFLUENZANO LA COMODITÀ DI UTILIZZO DEL GENERATORE

Volume della camera di carica della legna in caldaia:



Numero di cariche al variare della capacità della camera di carica  $V_{cc}$



# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## I GENERATORI ANALIZZATI

1. CALDAIA TRADIZIONALE: generatore a combustione alimentato a gas metano con regolazione on-off
2. CALDAIA A CONDENSAZIONE: generatore a combustione alimentato a gas metano con regolazione modulante e sfruttamento del calore latente dei fumi
3. POMPA DI CALORE: generatore del tipo aria-acqua ad azionamento elettrico con regolazione multistadio

### CONDIZIONI CLIMATICHE

	Temperatura esterna di progetto [°C]	Temperatura esterna massima [°C]	Temperatura esterna minima [°C]
BOLZANO	-15	25,4	-11,6
UDINE	-5	24,4	-6,4
ROMA	0	22,5	-4
PALERMO	5	30	5,9

Bilanci orari dei flussi di exergia in regime stazionario

# ANALISI DI II PRINCIPIO

## BILANCIO EXERGETICO

EXERGIA = ENERGIA UTILIZZABILE

$$ex_Q = Q \cdot \left( 1 - \frac{T_a}{T} \right)$$

Exergia da calore

$$ex^W = L$$

Exergia da lavoro

$$e = \left( h - h_a \right) - T_a \left( s - s_a \right)$$

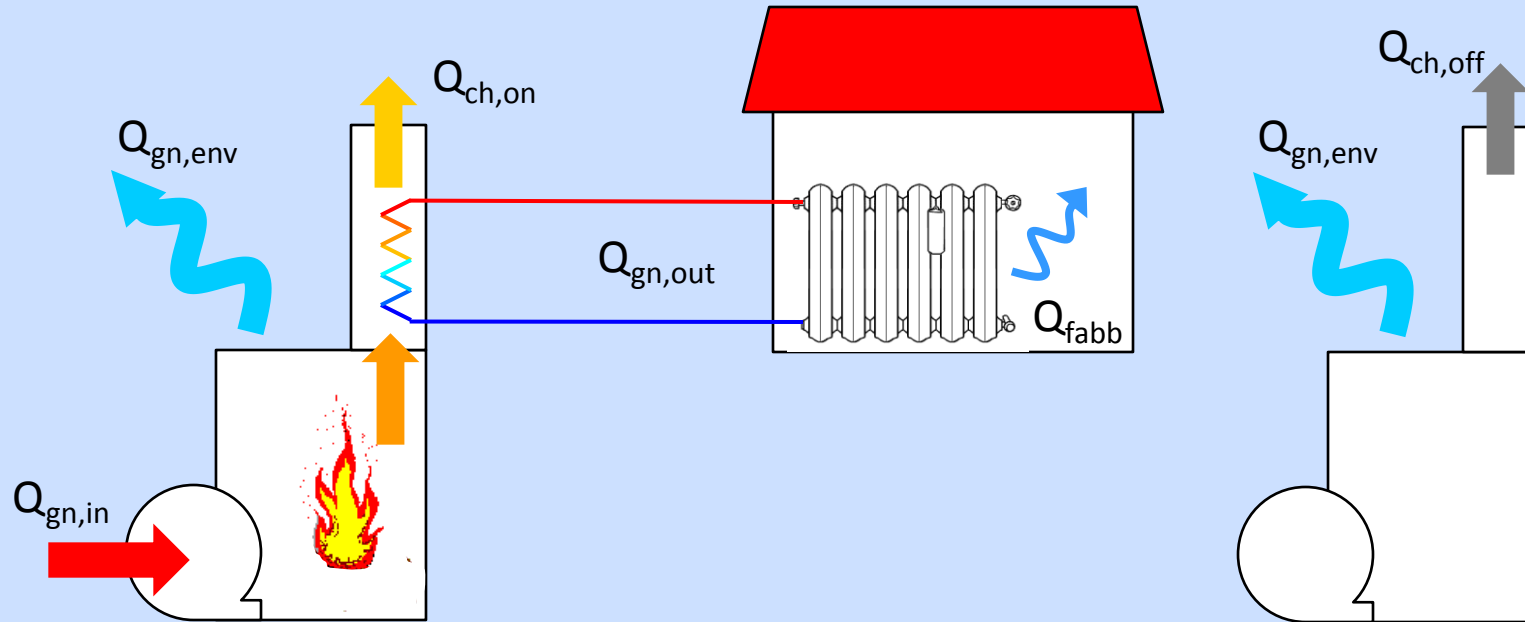
Exergia di un fluido

Bilancio di II principio per un sistema aperto

$$-Ex^W = \sum_J Ex_J^Q + \sum_J \left( \dot{n}_{in} \cdot ex_{in} \right) - \sum_J \left( \dot{n}_{out} \cdot ex_{out} \right) - Ex_{dis}$$

# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## GENERATORI A COMBUSTIONE – ANALISI ENERGETICA



$$Q_{ch,on} = \frac{P_{ch,on}}{100} \cdot \phi_{cn} \cdot t_{on}$$

$$Q_{ch,off} = \frac{P_{ch,off}}{100} \cdot \phi_{ref} \cdot t_{off}$$

$$Q_{gn,env} = \frac{P_{gn,env}}{100} \cdot \phi_{ref} \cdot (t_{on} + t_{off})$$

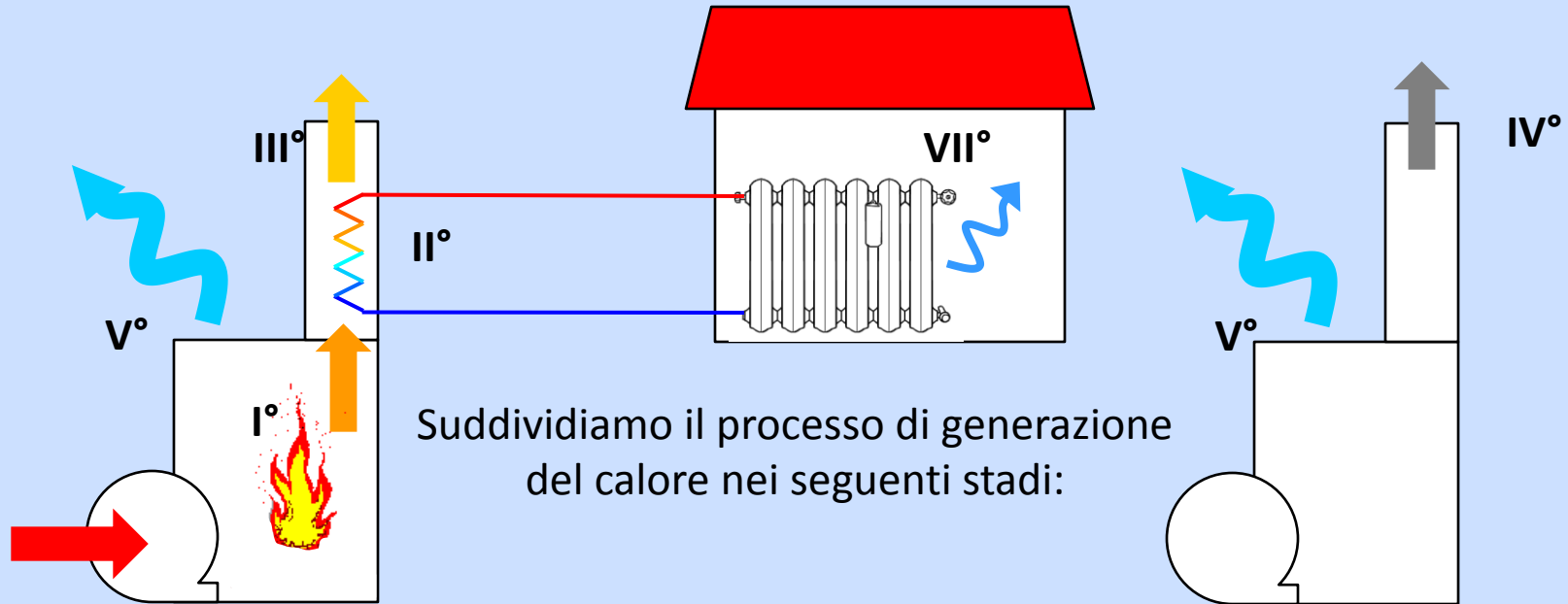
$$Q_{gn,in} = Q_{gn,out} + Q_{l,gn}$$

$$Q_{gn,l} = Q_{ch,on} + Q_{ch,off} + Q_{gn,env}$$

$$\eta = 1 - \frac{Q_{gn,l}}{Q_{gn,in}}$$

# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## GENERATORI A COMBUSTIONE – ANALISI EXERGETICA



### I STADIO:

$$Ex_{dis} = Ex_c - Ex_{f,ad}$$

### II STADIO:

$$Ex_{dis} = Ex_{f,ad} - Ex_f - Ex_w$$

### III STADIO:

$$Ex_{dis} = Ex_{ch,on}$$

### IV STADIO:

$$Ex_{dis} = Ex_{ch,off}$$

### V STADIO:

$$Ex_{dis} = Ex_{gn,env}$$

### VI STADIO:

$$Ex_{dis} = Ex_d - Ex_{d,lrh}$$

### VII STADIO:

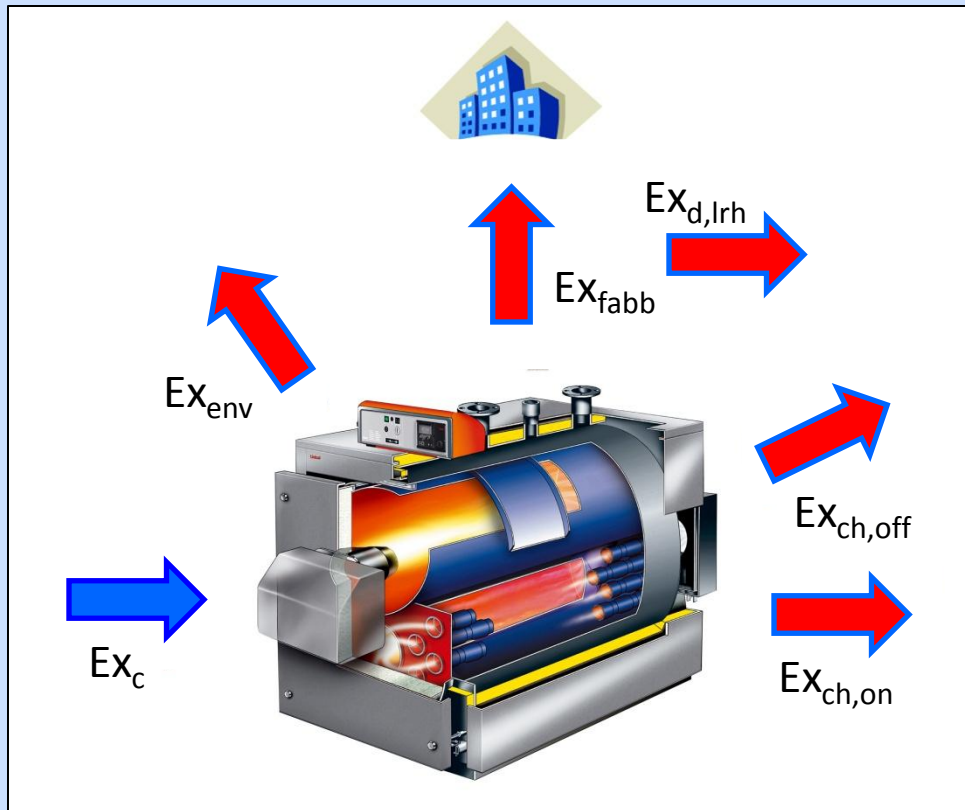
$$Ex_{dis} = Ex_w - Ex_{d,lrh} - Ex_{fabb}$$

# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## GENERATORI A COMBUSTIONE – ANALISI EXERGETICA

$$Ex_{dis} = Ex_{dis,I} + Ex_{dis,II} + Ex_{dis,III} + Ex_{dis,IV} + Ex_{dis,V} + Ex_{dis,VI} + Ex_{dis,VII}$$

$$Ex_{dis} = (m_c \cdot ex_c) + Q_{fabb} \cdot \theta_{fabb} + Q_{d,lrh} \cdot \theta_{d,lrh} - Q_{env} \cdot \theta_{env} - (m_{ch,on} \cdot ex_{ch,on}) - (m_{ch,off} \cdot ex_{ch,off})$$



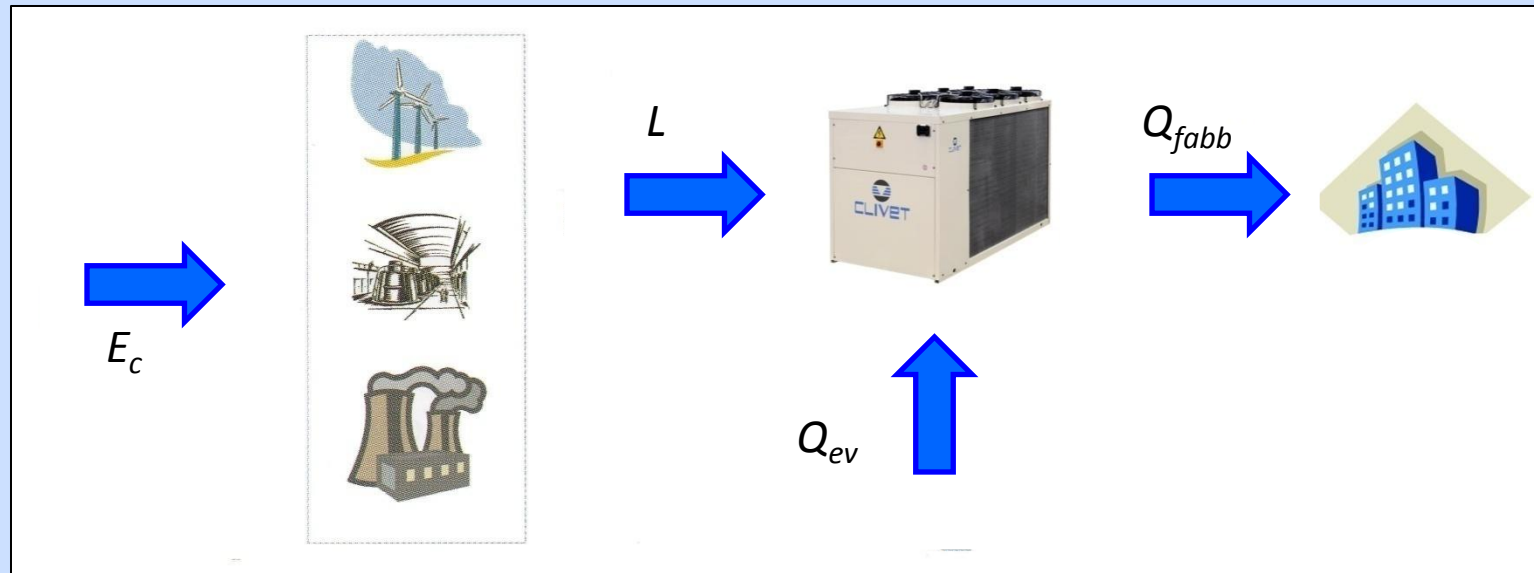
dove:

$\theta$  = fattore di Carnot

$$\theta_x = \left( 1 - \frac{T_a}{T_x} \right)$$

# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## POMPA DI CALORE



$$E_c = \frac{L}{\eta_{sel}}$$

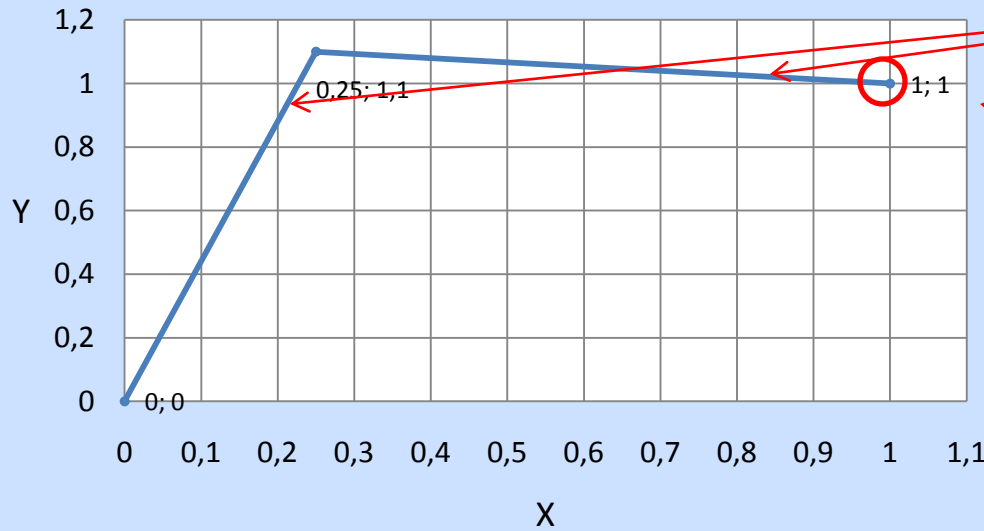
$$L + Q_{ev} = Q_{fabb} + Q_d + Q_{em}$$

$\eta_{sel}$  = rendimento del sistema elettrico nazionale

# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## POMPA DI CALORE – ANALISI ENERGETICA

PARAMETRO COP

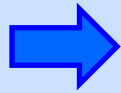


Macchina a due stadi

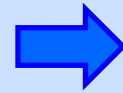
Condizioni nominali

- X** : parametro della potenza termica
- Y** : parametro del coeff. di prestazione
- P<sub>HR</sub>** : potenza termica ridotta
- P<sub>HA</sub>** : potenza termica a piena potenza
- P<sub>EA</sub>** : potenza assorbita a piena potenza
- P<sub>A,i</sub>** : potenza assorbita in condizioni reali
- Q<sub>ce,in</sub>** : fabbisogno di energia primaria

$$X = \frac{P_{HR}}{P_{HA}}$$



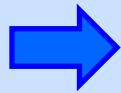
$$COP_A = \frac{P_{HA}}{P_{EA}}$$



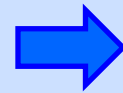
$$Y = \frac{COP_R}{COP_A}$$

Dalle condizioni di prova

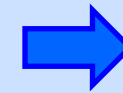
$$X = \frac{Q_{gn,out}}{P_H}$$



$$COP_i = COP \cdot Y$$



$$P_{A,i} = \frac{Q_{gn,out}}{COP_i}$$

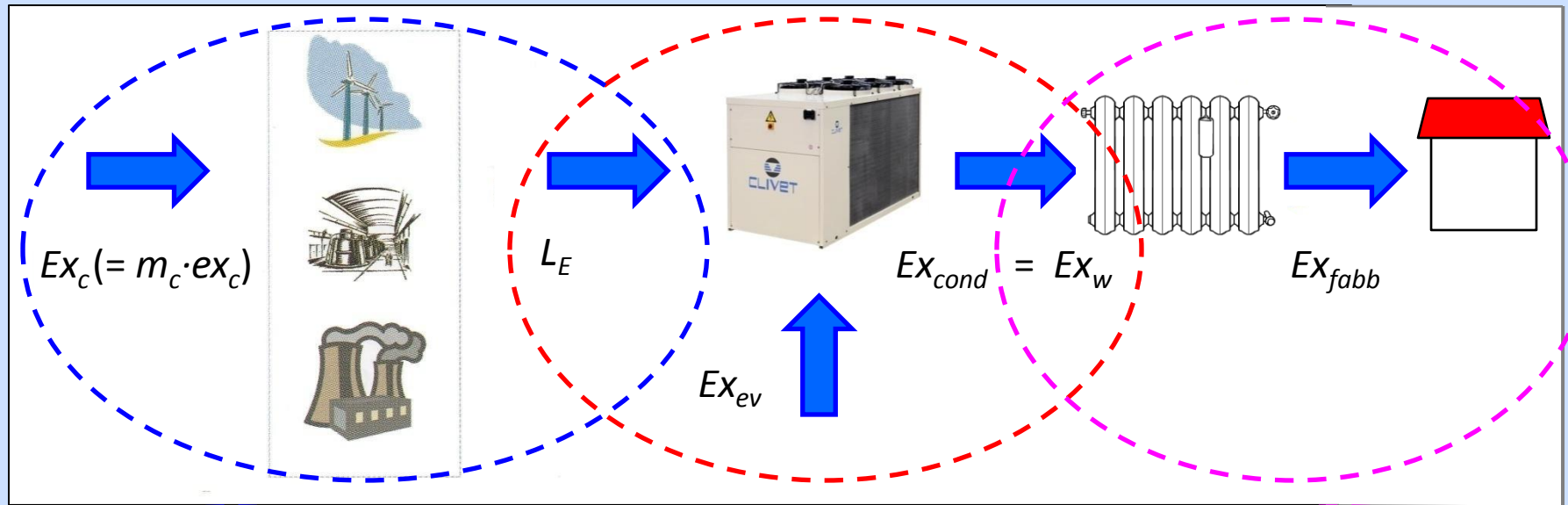


$$Q_{ce,in} = \frac{P_{a,i}}{\eta_{el}}$$



# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## POMPA DI CALORE



$$Ex_{dis,cent} = Ex_c - L_E$$

$$Ex_{dis,em} = Ex_w - Ex_{fabb}$$

$$Ex_{dis,pdc} = L_E + Q_{ev} \theta_{ev} - Q_{cond} \theta_{cond}$$

$Ex_c$ : exergia del combustibile

$L_E$ : lavoro assorbito dai compressore

$Ex_{ev}$ : exergia scambiata all'evaporatore

$Ex_{cond}$ : exergia scambiata all'evaporatore

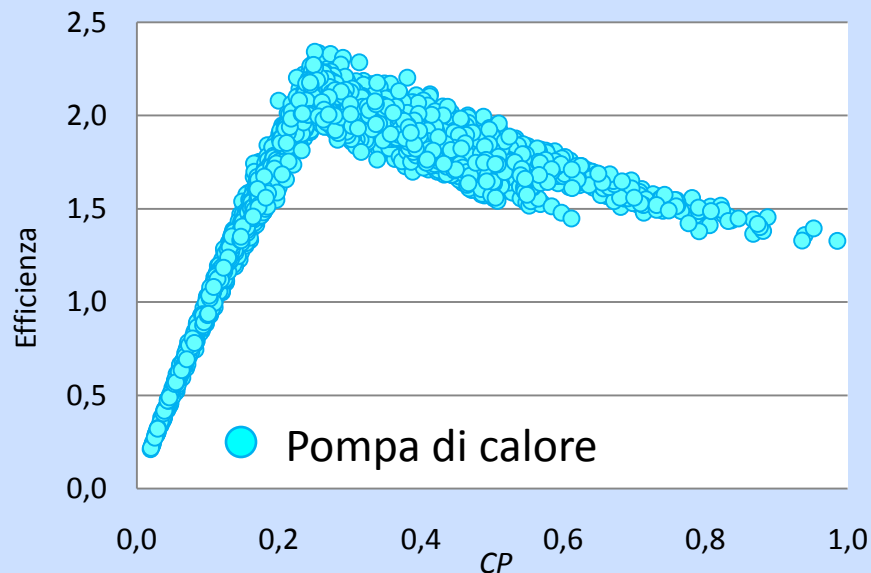
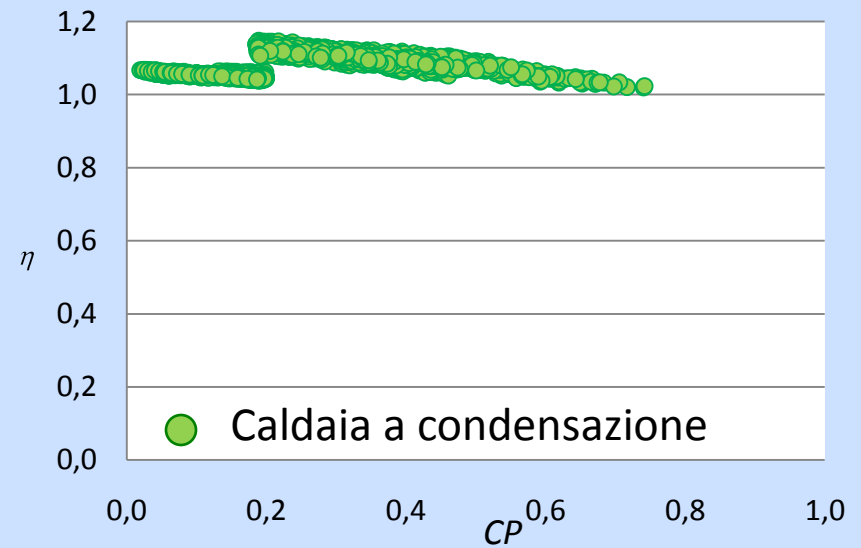
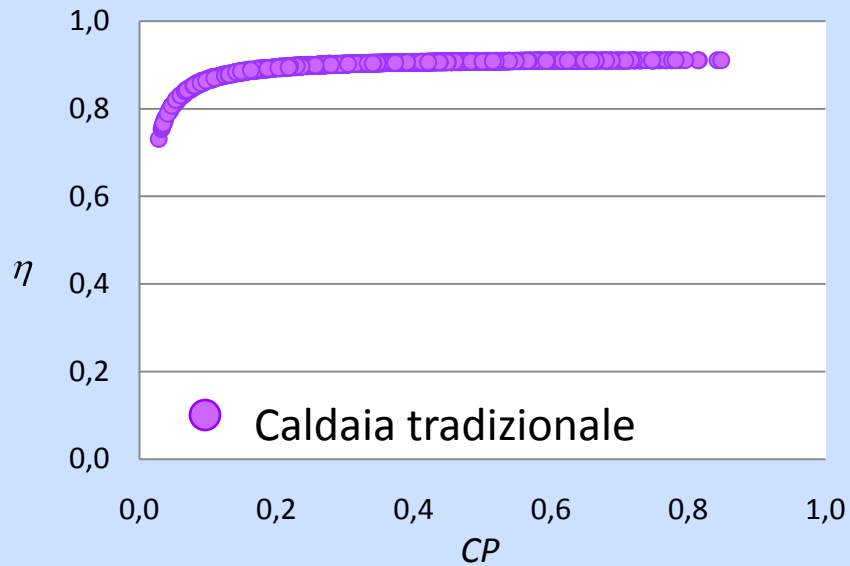
$Ex_{fabb}$ : exergia fornita all'ambiente

$$Ex_{dis,tot} = Ex_{dis,pdc} + Ex_{dis,cent} + Ex_{dis,em}$$

NOTE:  $\theta_{ev} = 0$

# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## RENDIMENTO ENERGETICO



$$CP = \frac{Q_{gn,out}}{Q_{gn,out,n}}$$

VALORI MEDI STAGIONALI:

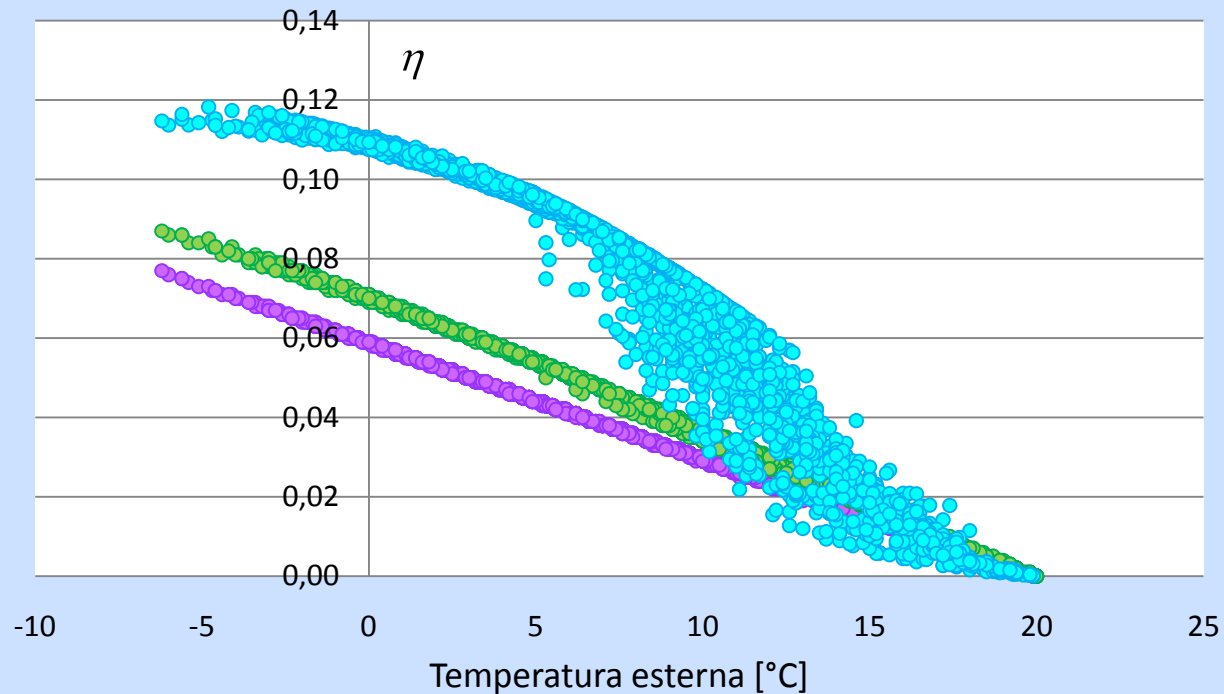
Caldaia Trad. = 89,3 %;

Caldaia Cond. = 108,5 %;

Pdc = 1,731

# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## RENDIMENTO EXERGETICO



Rendimento exergetico in funzione della temperatura esterna

- Caldaia tradizionale
- Caldaia a condensazione
- Pompa di calore

$$\eta = \frac{\text{Exergia ottenuta}}{\text{Exergia fornita}}$$

VALORI MEDI STAGIONALI:

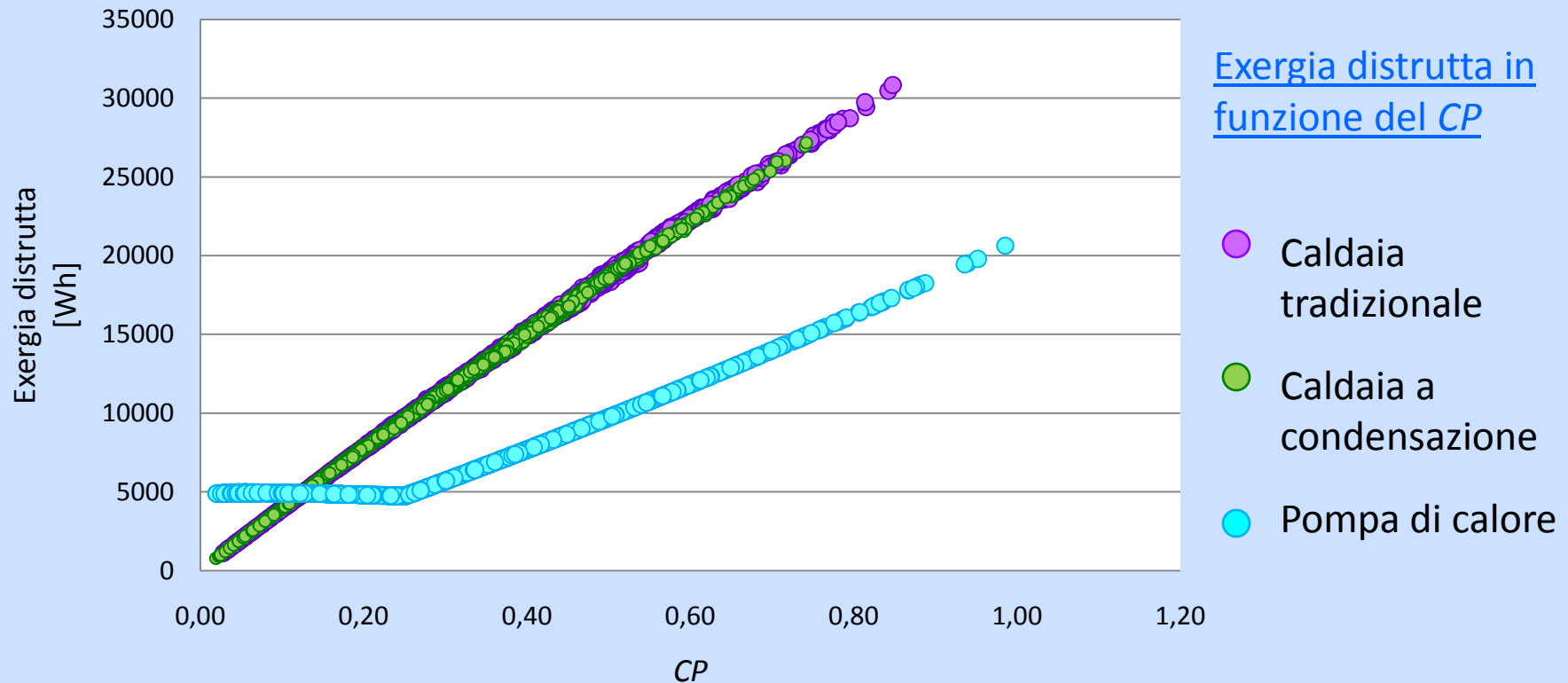
Caldaia Trad. = 4,3 %;

Caldaia Cond. = 5,2 %;

Pdc = 8,4 %

# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## EXERGIA DISTRUTTA



$$Ex_{distrutta} = Ex_{fornita} - Ex_{ottenuta}$$

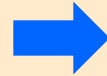
VALORI TOTALI STAGIONALI:

Caldaia Trad. = 35313 kWh;    Caldaia Cond. = 28796 kWh;    Pdc = 17407 kWh

# CONCLUSIONI

## OTTIMIZZAZIONE DI IMPIANTI CON CALDAIA A CONDENSAZIONE:

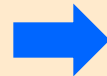
Scelta del metodo più adatto per il calcolo dell'efficienza



METODO ANALITICO DI CALCOLO DELLE PERDITE DI GENERAZIONE



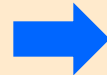
Risparmio di energia primaria con la caldaia a condensazione rispetto ad una tradizionale



RISPARMIO DI ENERGIA PRIMARIA  $\approx 10\%$  RISPETTO AD UNA CALDAIA TRADIZIONALE



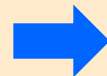
Risparmio di energia primaria con la caldaia modulante rispetto ad una on-off



RISPARMIO DI ENERGIA PRIMARIA  $\approx 4\%$



Miglior sistema di regolazione della temperatura di mandata



TEMPERATURA DI MANDATA VALUTATA CON CURVA DEL CORPO SCALDANTE MIGLIORA L'EFFICIENZA ANCHE CON IMPIANTO A RADIATORI

# CONCLUSIONI

## OTTIMIZZAZIONE DI IMPIANTI CON CALDAIA A PEZZI DI LEGNA:

Il sistema di caricamento manuale richiede la presenza di un operatore



SE L'OPERATORE NON È DISPONIBILE 24h/24 È NECESSARIO UN ACCUMULO



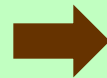
L'accumulo introduce delle perdite energetiche nel sistema. Problema del dimensionamento accumulo



RELAZIONI PER IL CALCOLO DELLA CAPACITÀ MINIMA DELL'ACCUMULO MEDIANTE BILANCI ENERGETICI



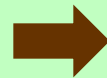
Influenza dell'accumulo sul rendimento del sistema



LA CAPACITÀ MINIMA CORRISPONDE A QUELLA OTTIMALE



Altri parametri influenti sull'efficienza del sistema e sulla comodità di utilizzo dell'impianto

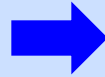


- RENDIMENTO CALA AUMENTANDO IL SOVRADIMENSIONAMENTO
- MAGGIORE CAPACITÀ DELLA STIVA DI CARICA COMPORTA MINOR NUMERO DI CARICHE ANNUE

# CONCLUSIONI

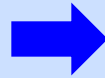
## CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA:

Elevata efficienza energetica



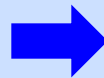
PERDITE ENERGETICHE MINIME E  
BASSO FABBISOGNO DI ENERGIA PRIMARIA

Elevata efficienza exergetica



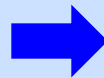
MINIMA EXERGIA DISTRUTTA E  
ELEVATO SFRUTTAMENTO DEL LAVORO  
POTENZIALE CONTENUTO NELL'ENERGIA  
PRIMARIA

A livello di singolo utente



MAGGIORE IMPORTANZA VIENE DATA AGLI  
ASPETTI DI RISPARMIO ENERGETICO

A livello di progettazione e di  
politica energetica



IMPORTANZA DOVREBBE ESSERE DATA AGLI  
ASPETTI DI QUALITÀ NELLO SFRUTTAMENTO  
DELL'ENERGIA PRIMARIA



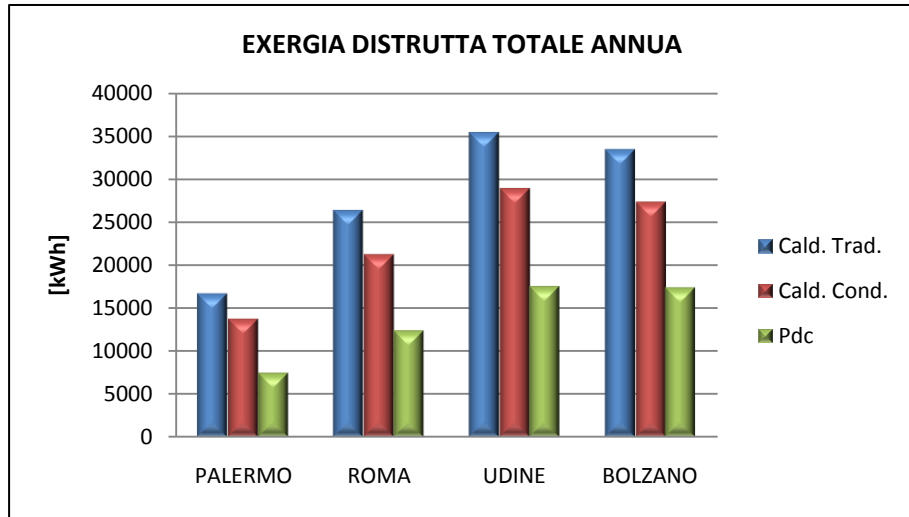
*GRAZIE  
PER  
L'ATTENZIONE*



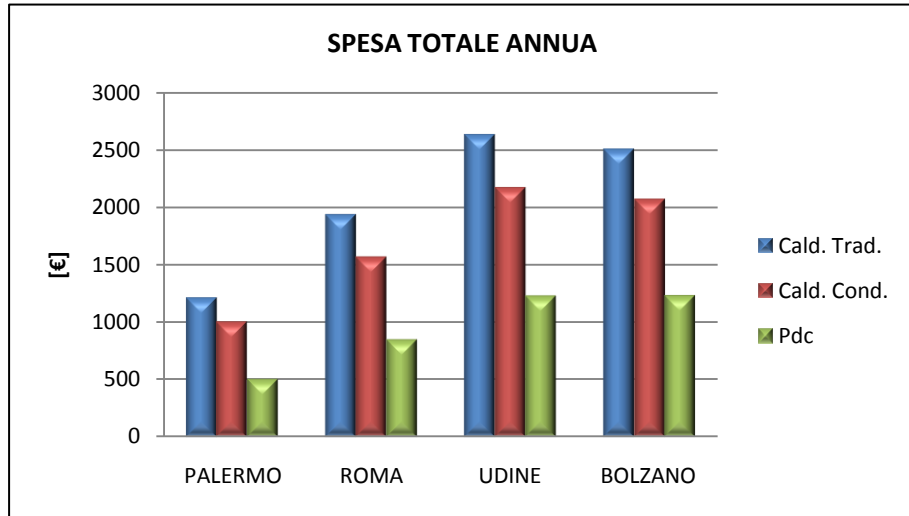


# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## VALUTAZIONI COMPARATIVE

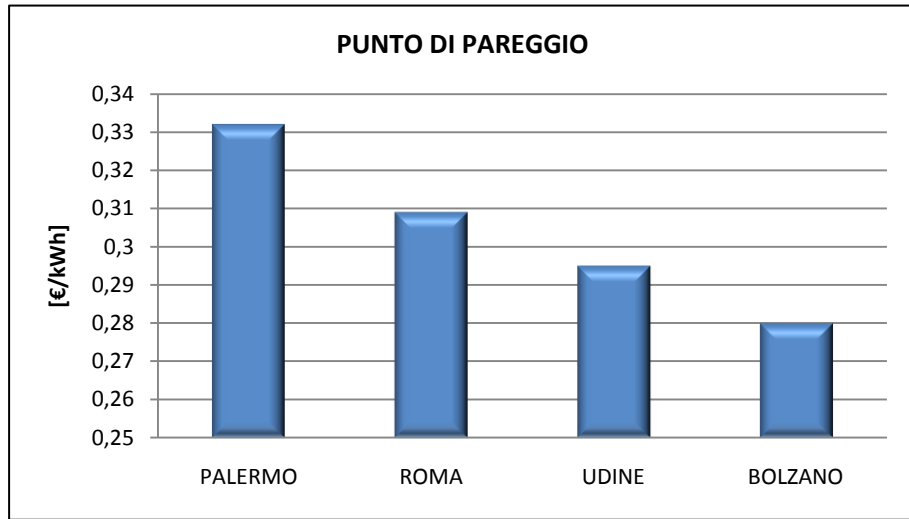
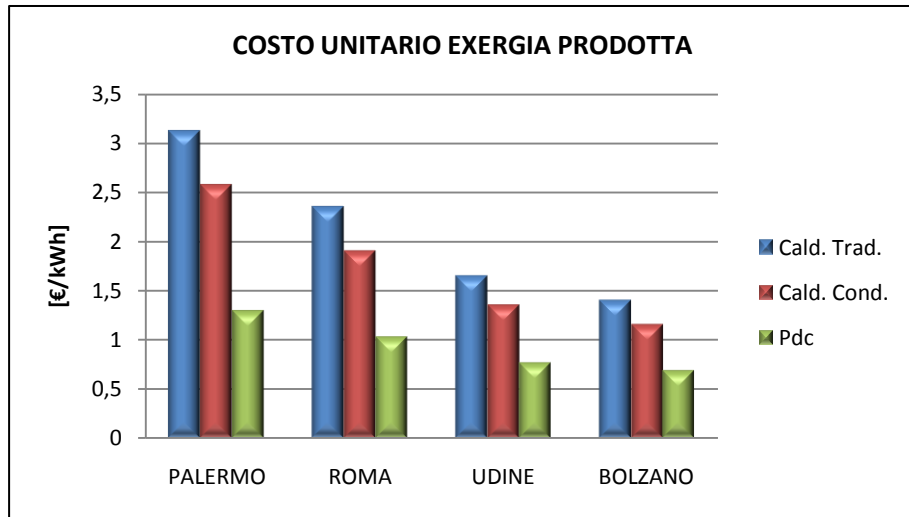


- **EXERGIA DISTRUTTA:**  
✓ Variabile con il clima
- **SPESA TOTALE ANNUA:**  
✓ Variabile con il clima



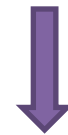
# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## VALUTAZIONI COMPARATIVE



- **COSTO EXERGIA:**  
✓ Variabile con il clima
- **PUNTO DI PAREGGIO:**  
✓ Variabile con il clima

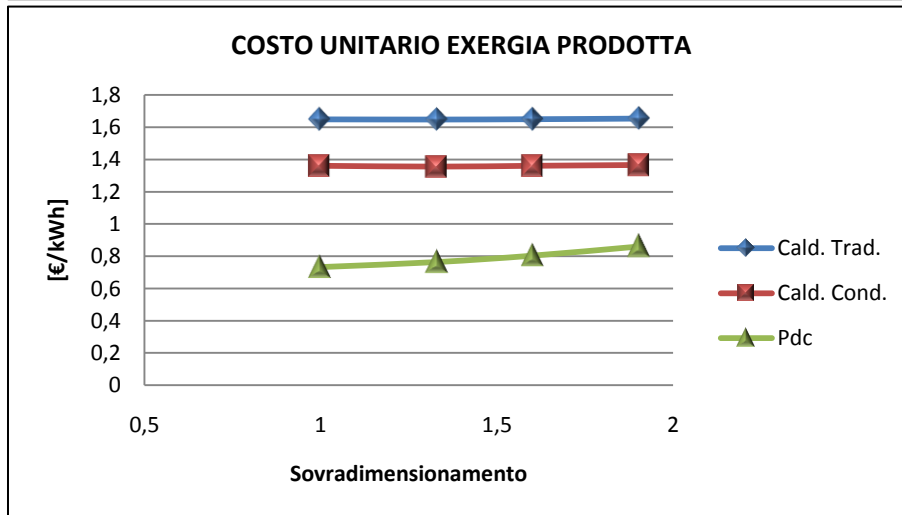
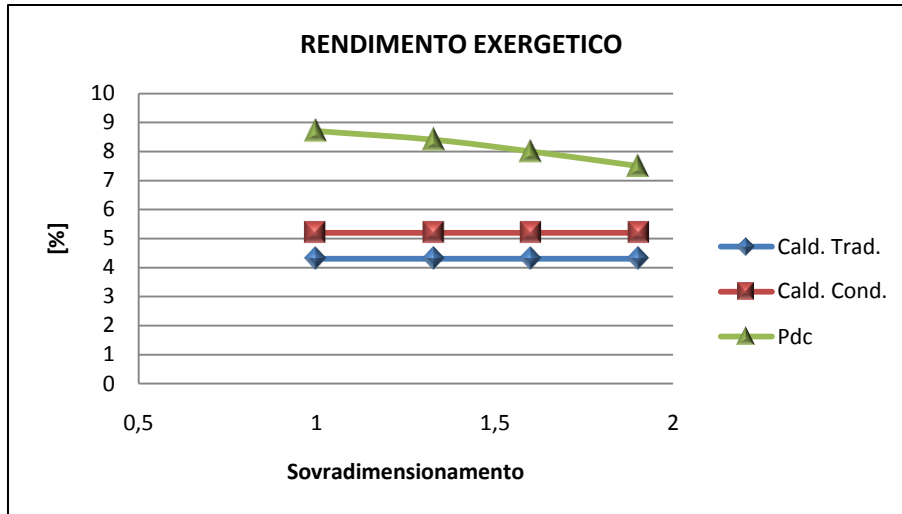
**PUNTO DI PAREGGIO**  
Spesa pdc = Spesa cald. cond.



$C_{el}$

# CONFRONTO TRA ANALISI ENERGETICA ED EXERGETICA

## VALUTAZIONI COMPARATIVE



- **CALDAIE:**
  - ✓ **Rendimento exergetico costante**
  - ✓ **Costo exergia costante**
- **POMPE DI CALORE:**
  - ✓ **Rendimento exergetico variabile**
  - ✓ **Costo exergia costante**