

# Le pompe di calore: interazione pompa-edificio

**G.L. Morini**

*Laboratorio di Termotecnica  
Dipartimento di Ingegneria Energetica, Nucleare e del  
Controllo Ambientale  
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna*



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Dispersioni di un edificio

### Fabbisogno per riscaldamento

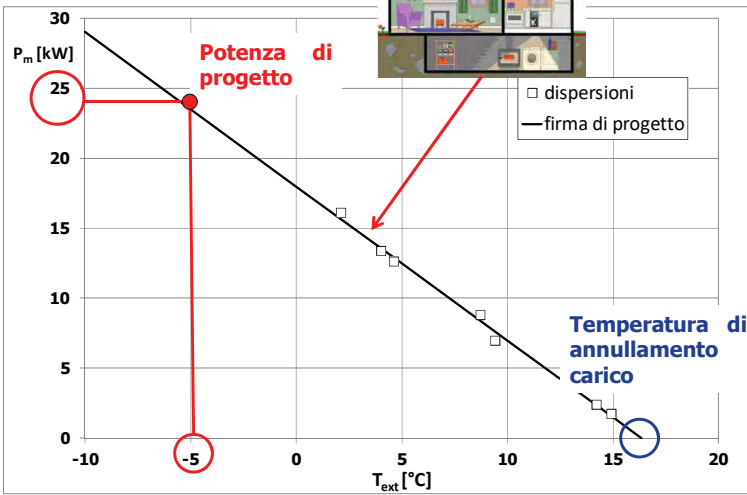
	Bologna		$P_m = \frac{Q_{g,out}}{24 \times N_{tot}}$	<b>Pm [kW]</b>
	$\theta_{ac}$ [°C]	$Q_{g,out(k)}$ [kWh]		
<b>Gen</b>	2.1	12000	$P_m = \frac{12000}{24 \times 31} = 16.1$	<b>16.1</b>
<b>Feb</b>	4.6	8500		<b>12.6</b>
<b>Mar</b>	9.4	5200		<b>7.0</b>
<b>Apr</b>	14.2	870		<b>2.4</b>
<b>Ott</b>	14.9	720		<b>1.8</b>
<b>Nov</b>	8.7	6350		<b>8.8</b>
<b>Dic</b>	4	9970		<b>13.4</b>



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

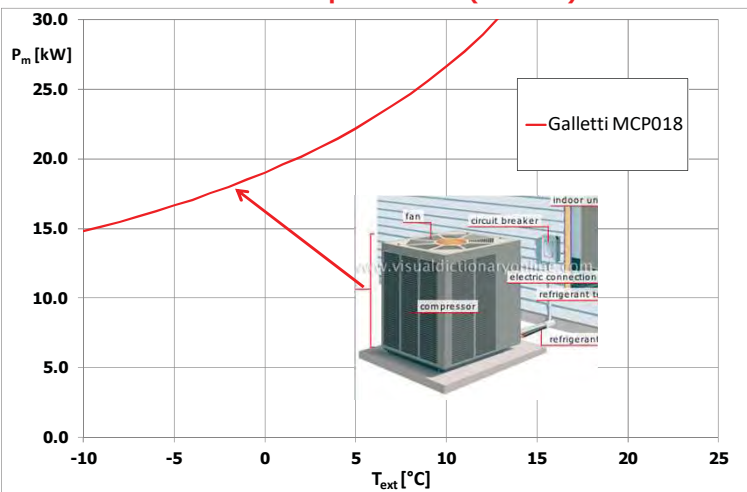
## Dispersioni di un edificio

### Determinazione della Firma



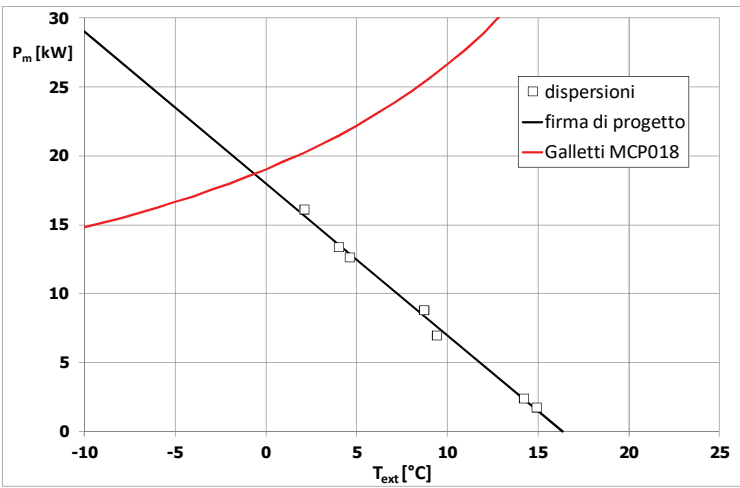
## Curva di potenza PdC

### Costruzione curva di potenza PdC (MCP018)



## Curva di potenza PdC

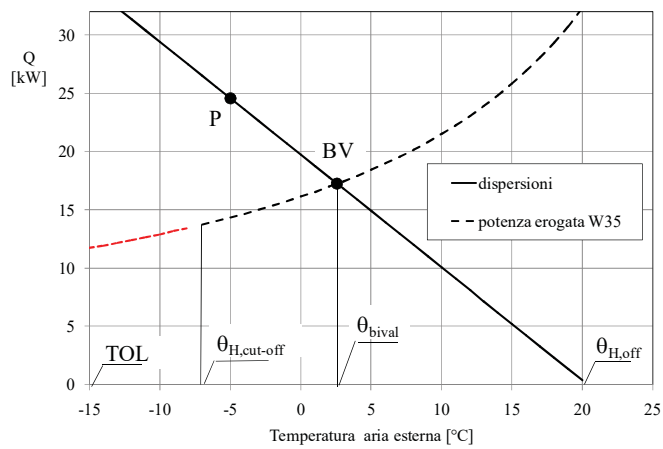
Sovrapposizione curve



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

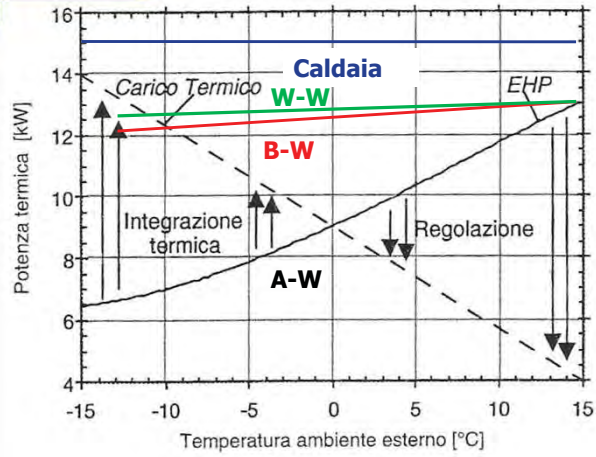
## PdC: Balance Point

Nomenclatura della UNI TS 11300-4



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## PdC: Balance Point

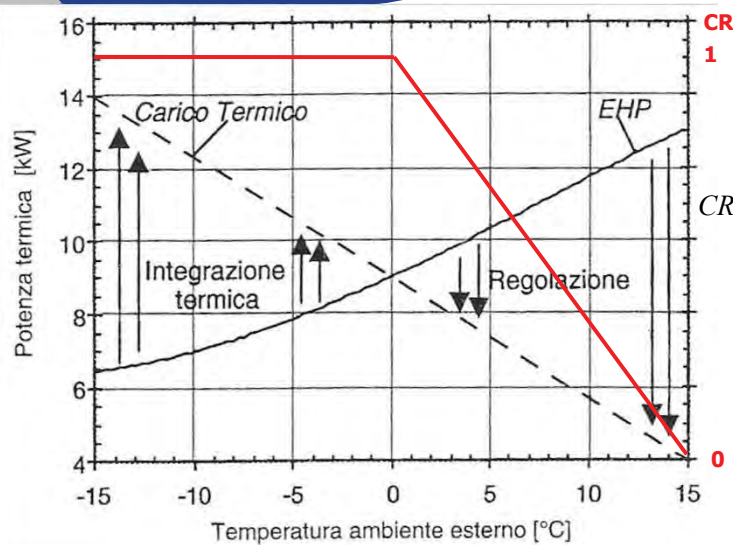


**Balance Point in funzione del tipo di pompa**



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Balance Point e fattore di carico: On-off

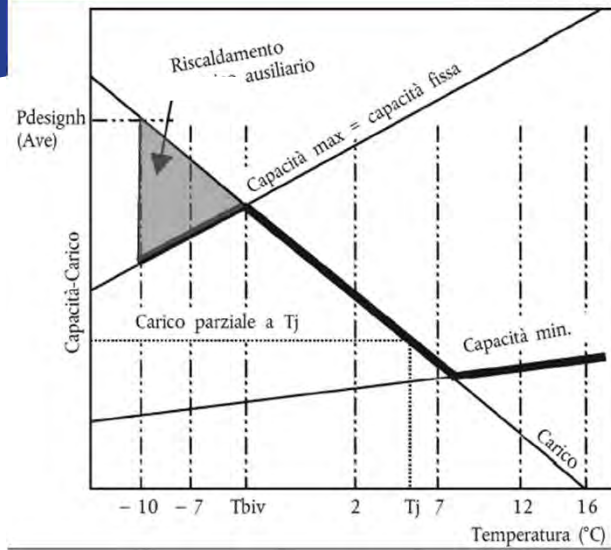


$$CR = \frac{Q}{Q_{\max}} \cong \frac{\tau_{ON}}{\tau_{tot}}$$



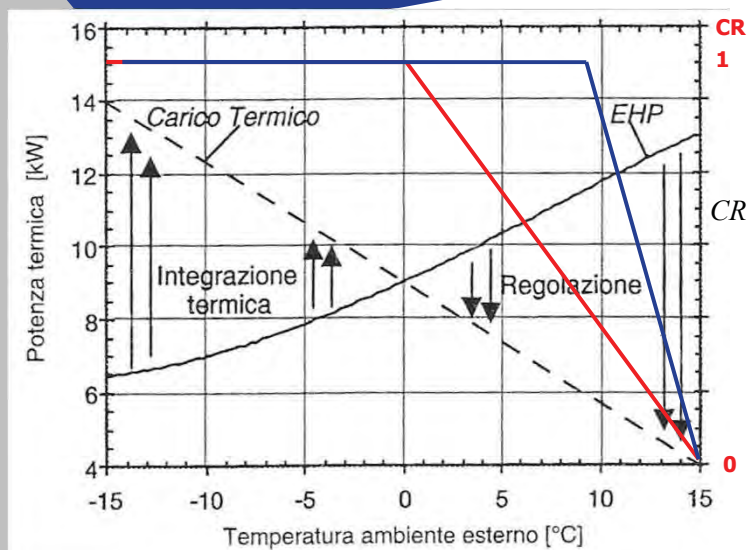
DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## PdC A-W multicompressore o con inverter



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## EHP multicompressore o con inverter



$$CR = \frac{Q}{Q_{max}} \cong \frac{\tau_{ON}}{\tau_{tot}}$$



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Prestazioni a carico parziale

### Fattore di carico (CR) e

$$CR = \frac{Q_{CR}}{Q} \Big|_{\theta_c, \theta_f}$$

### fattore di correzione (Fc)

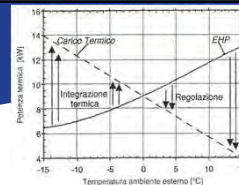
$$F_C = \frac{COP_{CR}}{COP} \Big|_{\theta_c, \theta_f} \quad o \quad F_C = \frac{COP_{t,CR}}{COP_t} \Big|_{\theta_{gen}, \theta_c, \theta_f} \quad F_C = \frac{GUE_{CR}}{GUE} \Big|_{\theta_{gen}, \theta_c, \theta_f}$$

Le EHP con inverter hanno un COP che viene influenzato di meno dalla variazione del carico.



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Pompe di Calore ad Aria



### Sbrinamento dell'evaporatore

Sotto i 6°C, è inevitabile la formazione di brina sugli evaporatori delle pompe A – W o A – A.

Il controllo dello sbrinamento può essere attuato in vari modi:

- **Controllo a tempo:** viene stabilito un programma di arresti prestabilito.
- **Controllo della temperatura:** viene comandato quando la temperatura del fluido refrigerante si abbassa al di sotto di un preimpostato valore.
- **Controllo della pressione dell'aria:** viene comandato quando la differenza di pressione a monte e a valle della batteria aumenta oltre un certo valore.

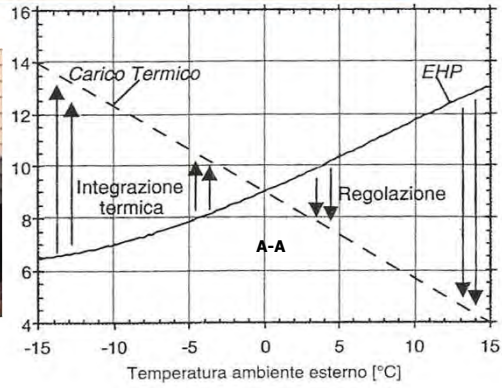
Lo sbrinamento può essere attuato in vari modi:

- **Arresto compressore:** in questo modo la temperatura del fluido refrigerante nei tubi dell'evaporatore aumenta e, lasciando in funzione il ventilatore, la brina si scioglie.
- **Acqua spruzzata:** viene spruzzata periodicamente sopra la batteria acqua di rete.
- **Inversione del ciclo:** viene invertito il ciclo, che diventa " frigorifero ": la presenza di un volano termico permette di non risentire delle oscillazioni di temperatura nel caso delle pompe ad acqua (lato impianto).
- **Resistenze elettriche:** sono inserite nel circuito dell'aria dell'evaporatore.



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Comportamento dinamico delle EHP



Durante la vita operativa della EHP la pompa lavora in regime non stazionario:

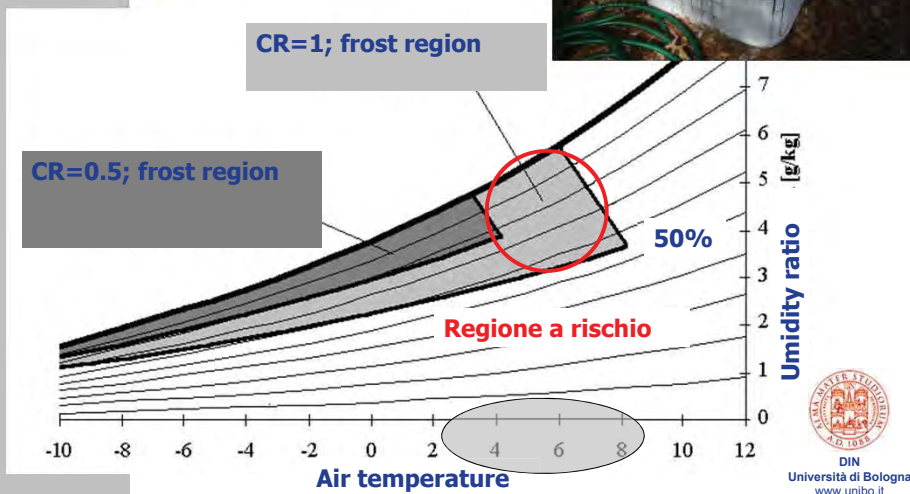
- quando  $T_{ext} > T_{balance\ point}$
- (per EHP ad aria) quando la batteria esterna è soggetta al brinamento (EHP in arresto e/o inversione ciclo)

$$COP = \alpha(CF) \frac{T_H}{T_H - T_L}$$



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

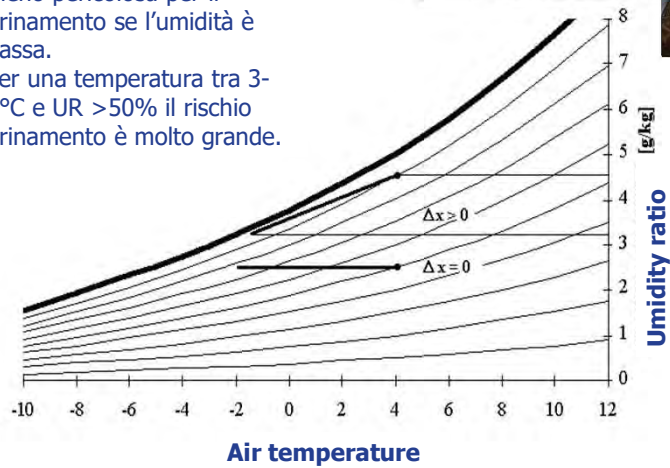
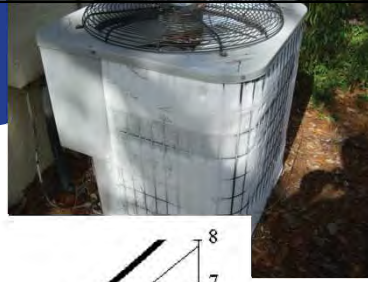
## HP defrosting



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## HP defrosting

- Una temperatura bassa dell'aria esterna è ( $< -3^{\circ}\text{C}$ ) meno pericolosa per il brinamento se l'umidità è bassa.
- Per una temperatura tra  $3-6^{\circ}\text{C}$  e UR  $> 50\%$  il rischio brinamento è molto grande.



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Simulazione numerica

### Condizioni climatiche

Table 1. Weather data of the selected sites.

Town	$z_{0.5}$ (h)	RH (%)
Bologna	1516	67-90
Bolzano	935	54-74
Milan	1697	78-90
Turin	1605	54-86
Venice	1310	69-83
Verona	1453	63-86
Florence	996	72-88
Rome	448	67-82
Bari	406	67-78
Naples	161	65-68

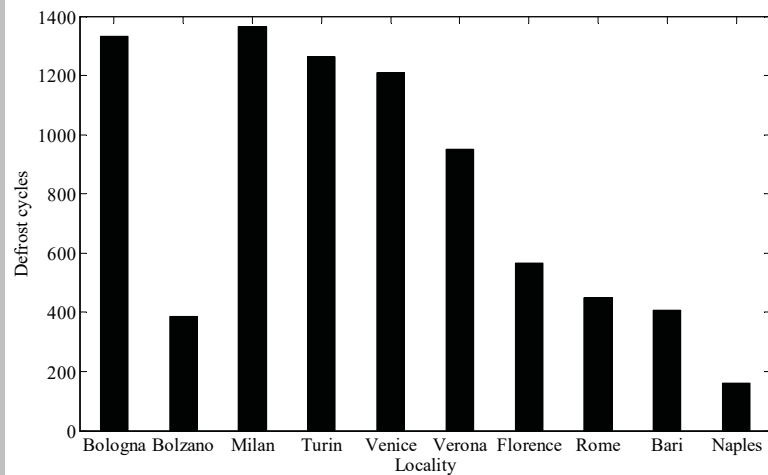


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it



## Simulazione numerica

### Numero di cicli di defrost per anno (CASE 0)



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Modalità di funzionamento degli impianti a PdC di tipo EHP

### Riscaldamento

L'uso impiantistico delle pompe di calore si può differenziare considerando 3 distinte modalità di funzionamento degli impianti:

**1) Funzionamento Monovalente** o "a generatore termico unico" (mono-mode use)

**2) Funzionamento Bivalente "Monoenergetico"** o a "fonte primaria unica" (Mono-energetic use)

**3) Funzionamento Bivalente** o "a fonte primaria multipla" (Dual-mode operation)

2a 3a) **bivalente-parallelo**

2b 3b) **bivalente-alternativo**



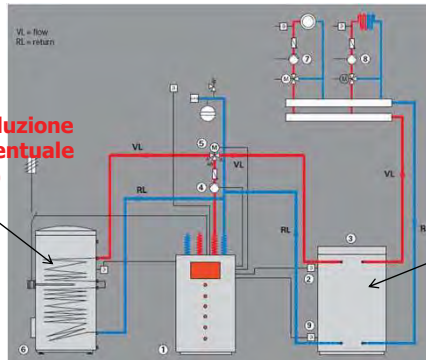
DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento Monovalente

Nel caso di modo di funzionamento monovalente **l'impianto a PdC deve coprire l'intero fabbisogno di calore dell'edificio** (riscaldamento+ACS) come unico generatore di calore.

Tipiche applicazioni in cui si può ricorrere a tale modo di funzionamento sono il riscaldamento di ville singole o singoli appartamenti.

Accumulo per produzione ACS (con eventuale integrazione solare)



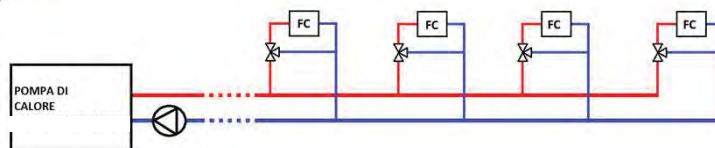
Accumulo per controllare le oscillazioni di temperatura di ritorno:  
 $V[l] = (6-15) \times Q[kW]$   
Es:  $V = 15 \times 10 = 150 [l]$

6-15 litri/kW



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Circuiti idraulici sistemi monovalenti

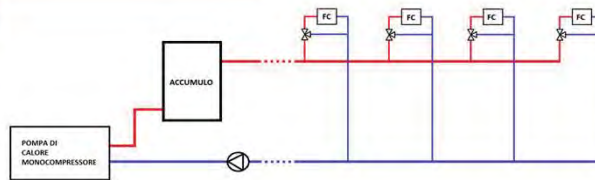


PdC+fan coil senza accumulo

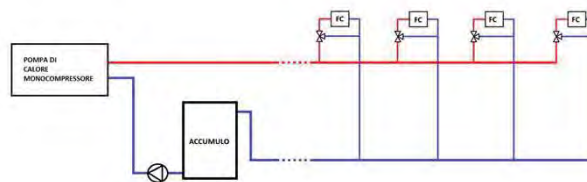


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Circuiti idraulici sistemi monovalenti



**Accumulo in mandata**

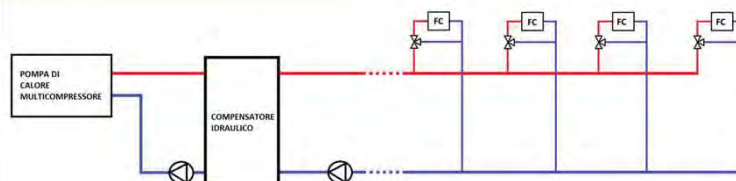


**Accumulo sul ritorno**

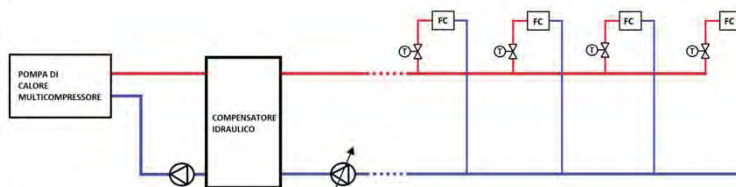


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Circuiti idraulici sistemi monovalenti



**Primario-secondario con compensatore idraulico**



**Primario-secondario con secondario a portata variabile**



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento Monovalente

### Accumulo inerziale

- 1) Serbatoio in serie sul ritorno dell'acqua** (all'ingresso della PdC)  
Si limitano le oscillazioni di temperatura dell'acqua di ritorno e dunque il numero di avviamenti/ora del compressore. L'assenza di un serbatoio sulla mandata della pompa espone i terminali a variazioni a gradini della T di mandata.
- 2) Serbatoio in serie sulla mandata dell'acqua** (all'uscita della PdC)  
Si riducono le pendolazioni di temperatura verso i terminali di impianto. La portata all'impianto e quella che attraversa la macchina è la stessa. Possono esserci problemi nel caso in cui i terminali montino valvole a 2 vie (squilibri di portata tra impianto e PdC)
- 3) Serbatoio in parallelo** (disaccoppiamento idraulico tra PdC e impianto)  
In questo caso la portata all'impianto e quella alla pompa possono essere diverse



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento Monovalente

### Accumulo inerziale

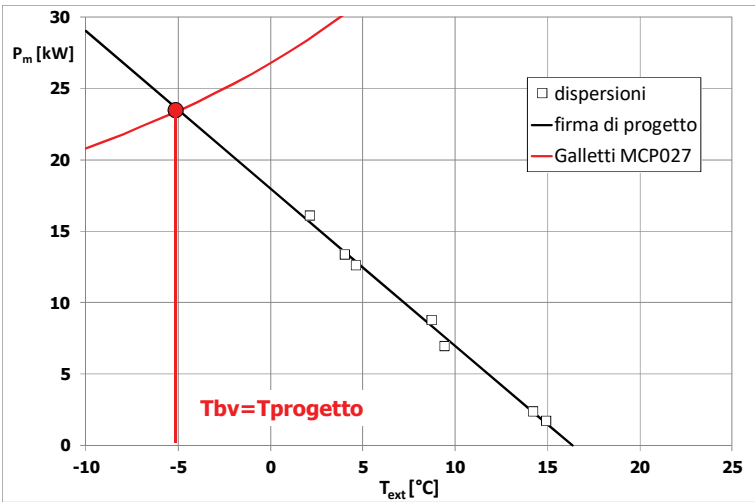
**La presenza di un serbatoio di accumulo all'uscita della PdC permette:**

- 1) Riduzione delle pendolazioni** di temperatura verso i terminali di impianto. I terminali a bassa inerzia sono sensibili a scatti a gradini della temperatura di mandata
- 2) Mantenimento della temperatura di mandata** ai terminali in caso di interruzione della fase di riscaldamento/raffrescamento per la **priorità assegnata all'ACS**
- 3) Riduzione della variazione della temperatura di mandata** ai terminali (in modalità riscaldamento) durante i cicli di **sbrinamento**



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Dimensionamento impianto Monovalente

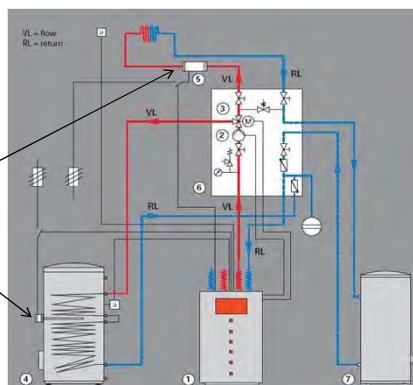


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento bivalente: Mono-energetico

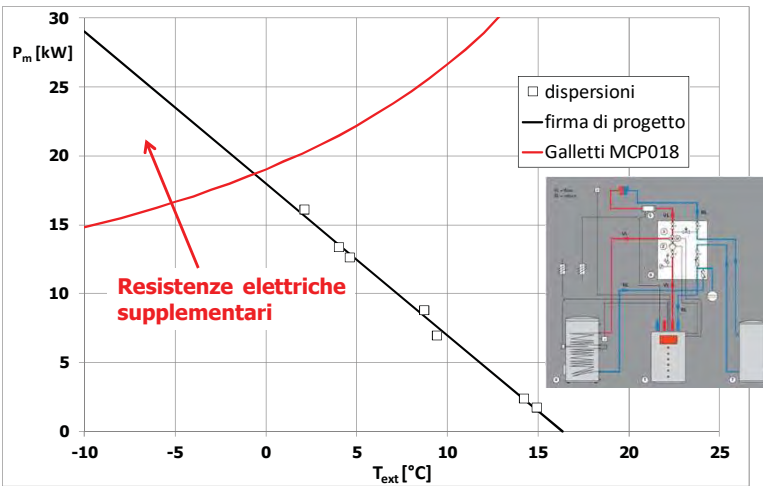
Nel caso di modo di funzionamento mono-energetico l'impianto a PdC viene integrato durante il programma di riscaldamento mediante un sistema di resistenze elettriche.

**Resistenze elettriche supplementari**



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento Mono-energetico

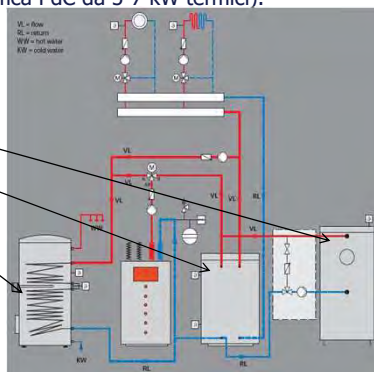


## Funzionamento Bivalente: A fonte multipla (sistemi ibridi)

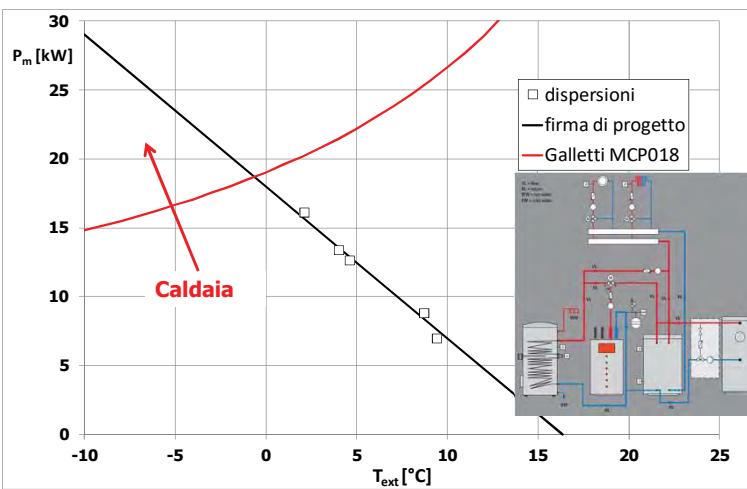
### Bivalente-parallelo

L'impianto a PdC viene integrato durante il programma di riscaldamento mediante un generatore di calore supplementare (es: caldaia). L'inserimento della caldaia viene comandato dalla temperatura esterna (ad es.  $T_{ext} < 0^\circ\text{C}$ ) o dal carico termico. Tipicamente, **la PdC viene dimensionata sul 50-70% del carico termico massimo dell'edificio**. (Es: 10 kW di carico termico massimo significa PdC da 5-7 kW termici).

Accumuli e caldaia supplementare



## Funzionamento Bivalente: A fonte multipla (sistemi ibridi)



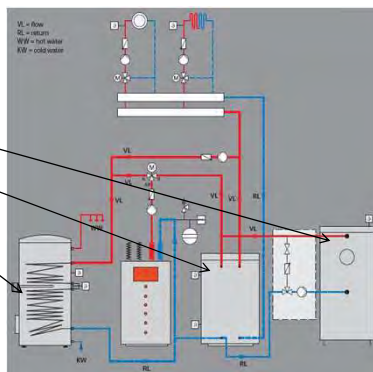
DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento Bivalente

### Bivalente-alternativo

**Fino a una determinata temperatura esterna** (es: 0°C) che corrisponde ad una temperatura di mandata del riscaldamento (es: 50°C) **l'impianto a PdC copre l'intero riscaldamento**. Oltre, la PdC è disinserita e solo il generatore alternativo alimenta l'impianto. Modo particolarmente adatto a edifici esistenti con impianti a radiatori ad alta temperatura.

Accumuli e caldaia  
supplementare



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## COP medio effettivo: SCOP

### COP medio effettivo >< COP nominale

Le prestazioni delle pompe di calore (specialmente quelle ad Aria) sono fortemente influenzate dal valore di temperatura dell'aria esterna.

• Occorre determinare il valore "medio stagionale" del COP per effettuare le valutazioni energetiche.

• Il valore del COP cambia quando la PdC lavora ai "carichi parziali"



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## COP medio effettivo: SCOP

### COP medio effettivo (SCOP) >< COP nominale

Metodi di calcolo consigliati UNI 11300-4

Sorgente fredda	Sorgente calda		
	Aria	Acqua a t costante	Acqua a t variabile
Aria esterna	Bin	Bin	Bin
Aria di recupero (t indipendente dal clima)	Mensile	Mensile	Mensile
Aria di recupero (t dipendente dal clima)	Bin	Bin	Bin
Terreno (sonda orizzontale)	Mensile	Mensile	Mensile
Terreno (sonda verticale)	Mensile	Mensile	Mensile
Acqua di pozzo/falda	Mensile	Mensile	Mensile
Acqua di fiume	Mensile	Mensile	Mensile



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it



## COP medio effettivo: SCOP

### COP medio effettivo >< COP nominale

Il calcolo su base **mensile** delle prestazioni energetiche di una PdC è possibile andando ad utilizzare la **temperatura esterna media mensile** solo se:

- 1) La temperatura della sorgente fredda è stabile (ad es. terreno o corso d'acqua)
- 2) La temperatura di mandata dell'impianto si mantiene stabile durante l'intero anno (ad es. impianti a pannelli o ventilconvettori)

Quando la temperatura della sorgente fredda varia molto durante il periodo di riscaldamento (su base giornaliera ed oraria) come nel caso dell'aria esterna oppure quando la temperatura di mandata dell'impianto viene variata durante la stagione di riscaldamento per adeguarla al clima esterno (impianti a radiatori ad alta temperatura) **NON SI PUO' UTILIZZARE IL CALCOLO MENSILE.**

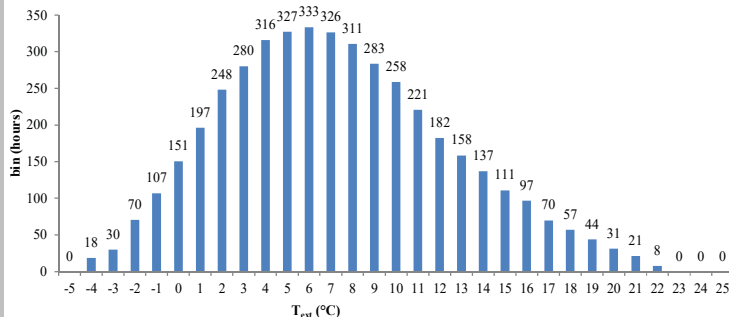


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## COP medio effettivo: SCOP

### COP medio stagionale >< COP nominale

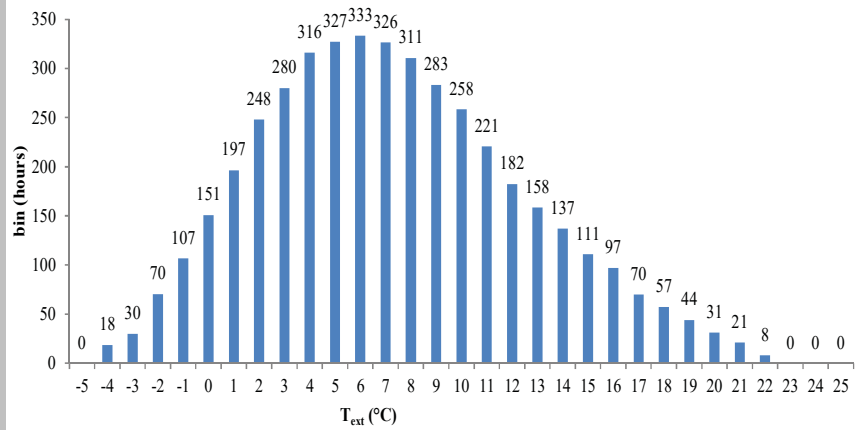
Quando la temperatura della sorgente fredda e/o la temperatura di mandata variano durante il periodo di riscaldamento il calcolo deve essere condotto per "**intervallo di temperatura esterna**" (**BIN**) anzichè per "**intervallo temporale**" (**calcolo mensile**)



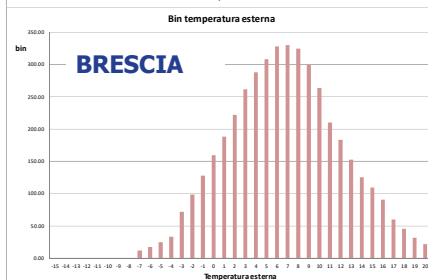
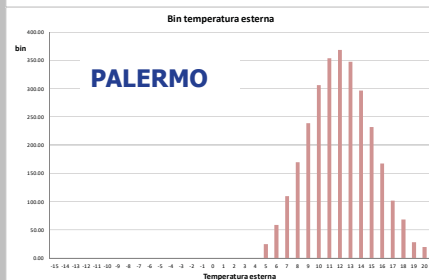
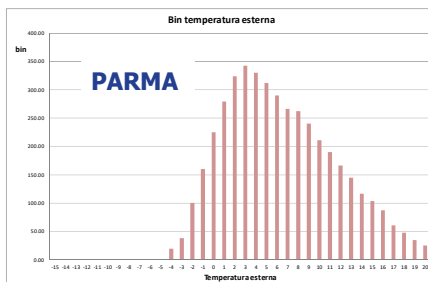
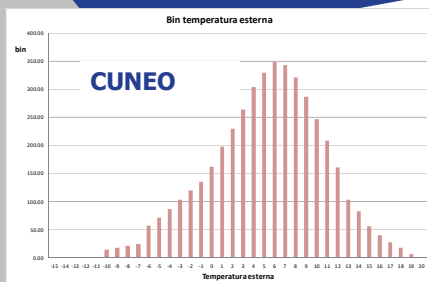
DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## COP medio effettivo: SCOP

**BOLOGNA**  
(dati UNI 10349)



## COP medio effettivo: SCOP



## Regole di dimensionamento: sistemi bivalenti

### Fabbisogno per riscaldamento

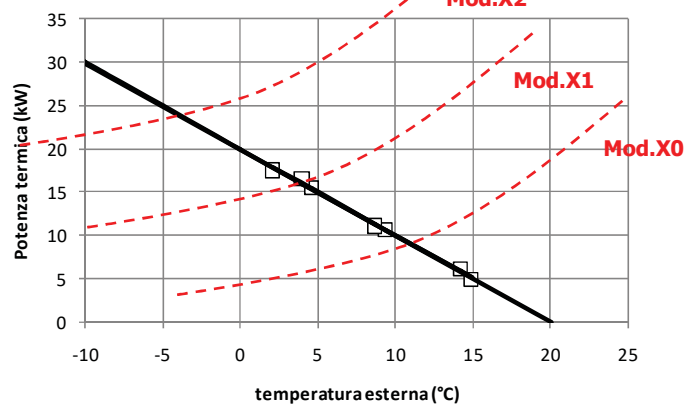
	Bologna	
	$\theta_{ar}$ [°C]	$Q_{g,out(k)}$ [kWh]
<b>Gen</b>	2.1	13000
<b>Feb</b>	4.6	10400
<b>Mar</b>	9.4	7900
<b>Apr</b>	14.2	2200
<b>Ott</b>	14.9	2000
<b>Nov</b>	8.7	8200
<b>Dic</b>	4	11900



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

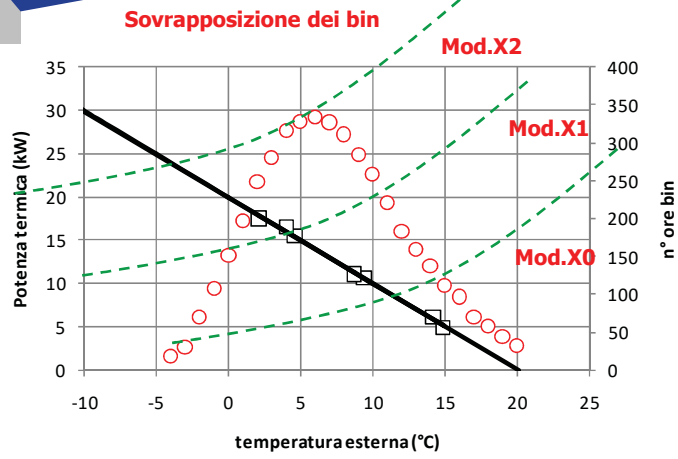
## Funzionamento Bivalente

### Determinazione della Firma di progetto Mod.X2



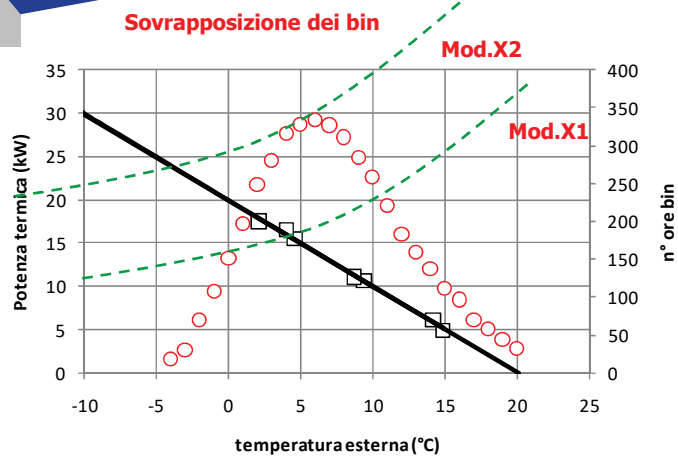
DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento Bivalente



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

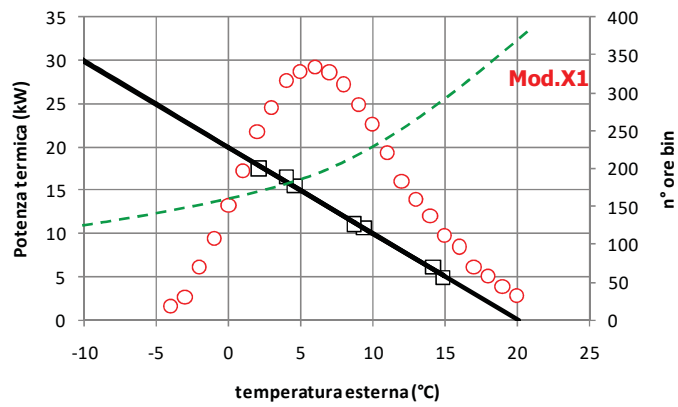
## Funzionamento Bivalente



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento Bivalente

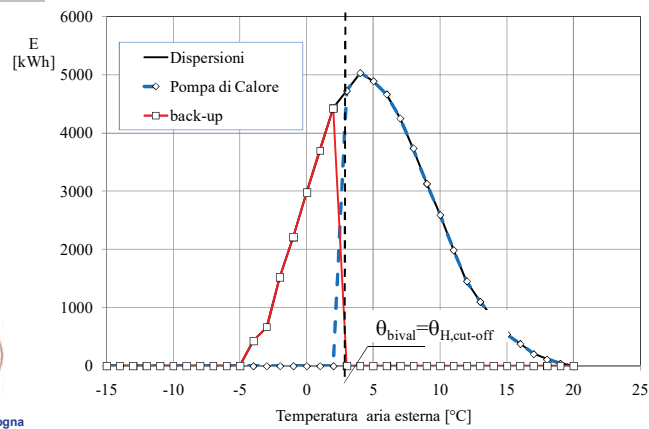
### Sovrapposizione dei bin e scelta della PdC



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento Bivalente

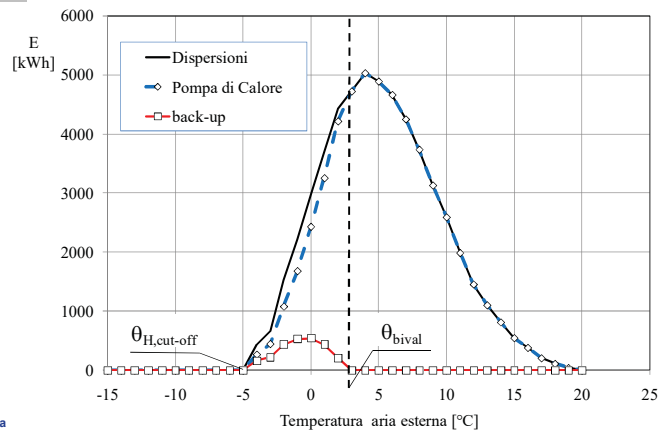
### Pompa di calore + Resistenze elettriche Funzionamento alternativo



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento Bivalente

### Pompa di calore + Resistenze elettriche Funzionamento bivalente parallelo



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Funzionamento Bivalente

### Dipendenza di SCOP dalla gestione del sistema bivalente

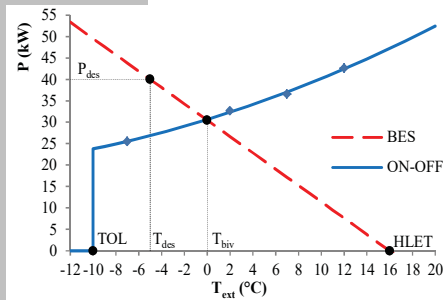
Impianto bivalente alternativo ( $\theta_{H,cut-off} = \theta_{bival}$ )				
	SCOP <sub>net</sub>	SCOP <sub>on</sub>	E <sub>pdc</sub> [kWh]	C <sub>pdc</sub> [%]
<b>Bologna</b>				
on-off	3.45	2.03	11494	71.4
inverter	3.7	2.09	10723	71.4
Impianto bivalente parallelo ( $\theta_{H,cut-off} = -5^{\circ}\text{C}$ )				
<b>Bologna</b>				
on-off	3.35	3.02	15852	95.4
inverter	3.52	3.16	15081	95.4



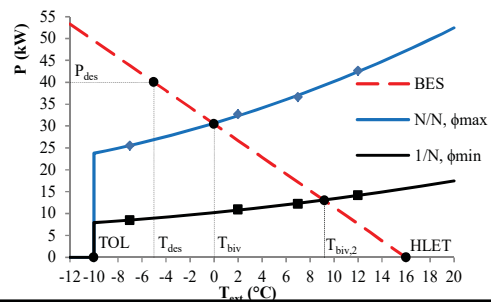
DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

### Balance Point – Balance Line



Pompa di calore on-off  
Pompa di calore multi-compressore  
Pompa di calore con inverter



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

### Caratteristiche tecniche

Heat pump typology	ON-OFF HP	MCHP	IDHP
Heating Capacity (kW)	35.6	34.2	34.9
COP	3.42	3.17	3.06
Total power input (kW)	10.4	10.8	11.4
Frequency range (Hz)	50	50	30-120
TOL (°C)	-10	-10	-18
Compressor number	1	2	1
Compressor model	Maneurop SH-140-4	SANYO 1: CSBN453H8H 2: CSBN453H8H	Siam ANB52FTTMT
Refrigerant	R410A	R410A	R410A
Refrigerant circuits	1	1	1

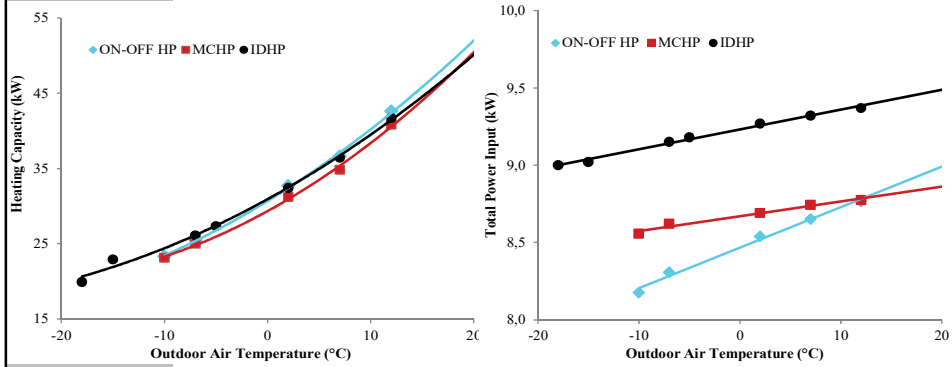
7°C dry bulb, 6°C wet bulb for outdoor air temperature; 40-45°C inlet/outlet water temperatures



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

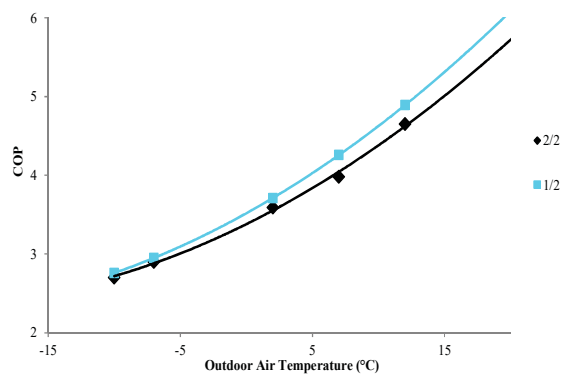
### Caratteristiche tecniche



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

### Caratteristiche tecniche



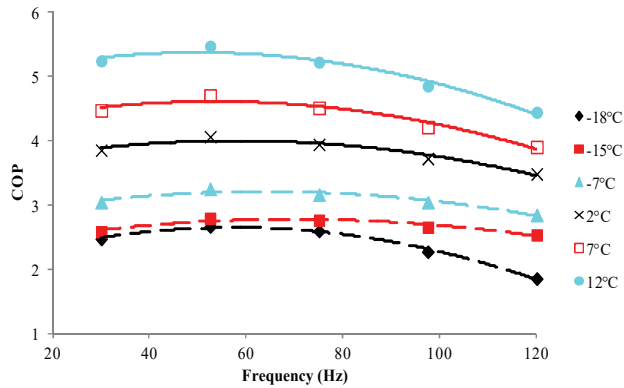
DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

Le pompe di calore multi-compressore hanno un COP maggiore quando cala il numero di compressori attivati



## Esempio dimensionamento

### Caratteristiche tecniche



Le pompe di calore ad inverter hanno un COP che diventa massimo in corrispondenza di valori intermedi di frequenza



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

### Valori di T bivalente in 11 edifici diversi per la stessa pompa di calore

Case	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
Design load (kW)	28	31	34	37	40	45	50	55	60	67	75	
ON-OFF HP	$T_{biv}$	-4.45	-3.12	-1.97	-0.96	-0.06	1.22	2.30	3.23	4.04	5.00	5.92
MC HP	$T_{biv}$	-4.00	-2.63	-1.46	-0.45	0.45	1.72	2.78	3.69	4.48	5.42	6.31
ID HP	$T_{biv,2}$	3.08	4.01	4.82	5.51	6.13	7	7.73	8.34	8.87	9.5	10.09
	$T_{biv}$	-4.64	-3.25	-2.05	-1.00	-0.08	1.23	2.34	3.29	4.10	5.08	6.01
	$T_{biv,2}$	8,21	8,84	9,37	9,83	10,22	10,78	11,24	11,63	11,95	12,33	12,69

Non uso il back-up a Bologna

Uso molto il back-up a Bologna

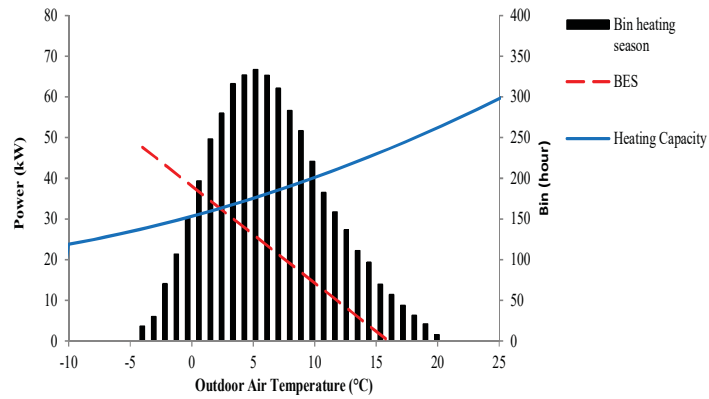


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

Caso #7: T bivalente=2.3°C

Pompa on-off (Bologna)



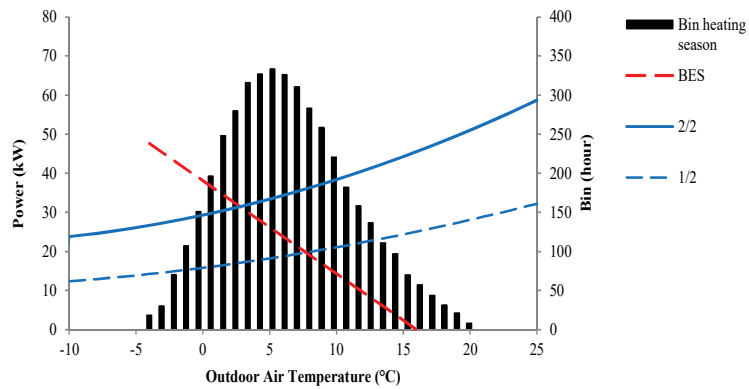
DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

Table 2: Studied buildings and relative bivalent temperatures

## Esempio dimensionamento

Caso #7: T bivalente=2.3°C

Pompa multi-compressore (Bologna)

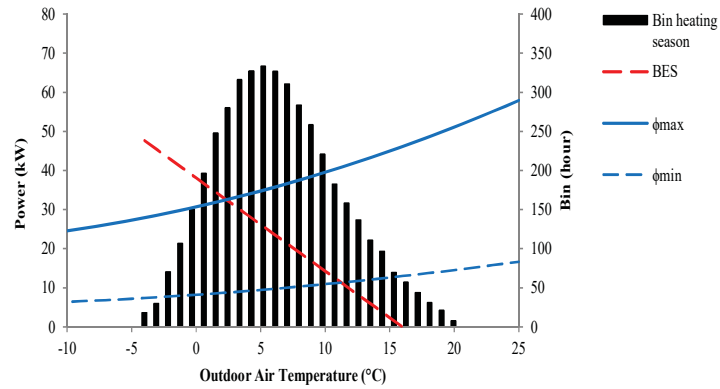


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

Caso #7: T bivalente=2.3°C

Pompa con inverter (Bologna)

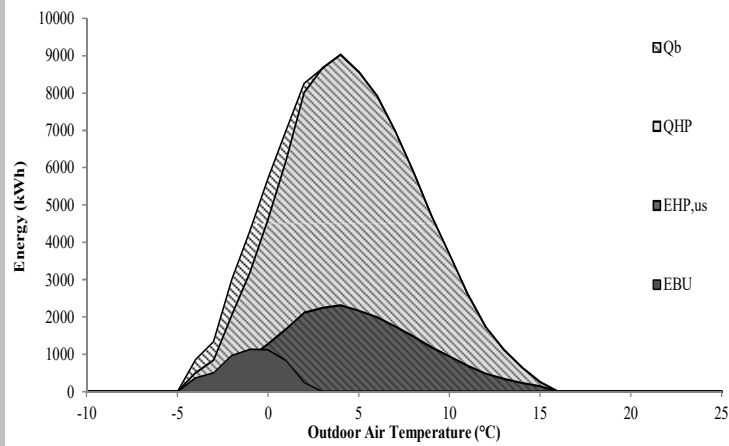


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

Caso #7: T bivalente=2.3°C

Pompa on-off (Bologna)



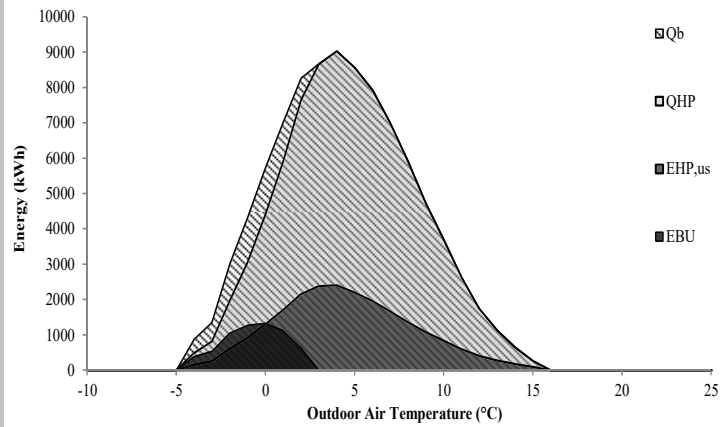
DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

Table 2: Simulated buildings and relative outdoor temperatures

## Esempio dimensionamento

Caso #7:  $T_{bivalente}=2.3^{\circ}\text{C}$

Pompa multi-compressore (Bologna)

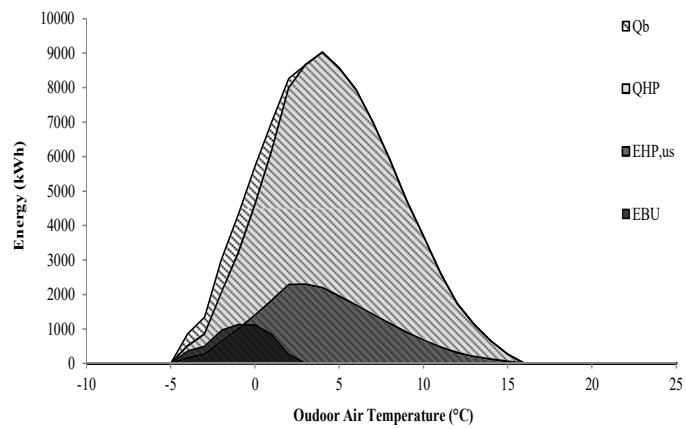


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

Caso #7:  $T_{bivalente}=2.3^{\circ}\text{C}$

Pompa con inverter (Bologna)



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

### Caso #7:

Heat pump	SCOP <sub>net</sub>	SCOP <sub>on</sub>	T <sub>biv</sub> (° C)	T <sub>biv,2</sub> (° C)	Q <sub>b</sub> (kWh)	Q <sub>HP</sub> (kWh)	E <sub>HP,us</sub> (kWh)	E <sub>BU</sub> (kWh)
HP	3.80	3.29	2.30	/	92509.3	87336.5	22971.8	5172.8
MCHP	3.82	3.21	2.78	7.73	92509.3	86209.4	22542.8	6299.9
IDHP	4.15	3.53	2.34	11.24	92509.3	87353.0	21033.0	5156.3

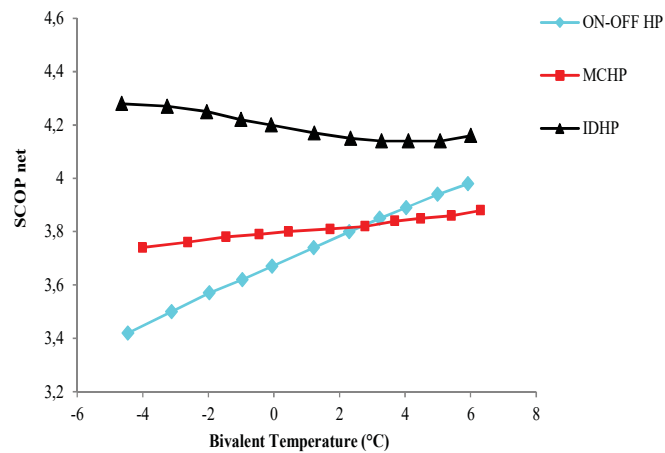


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

$$SCOP_{net} = \frac{\sum_i Q_{HP}(i)}{\sum_i E_{HP,us}(i)}$$

### Confronto in termini di SCOPnet

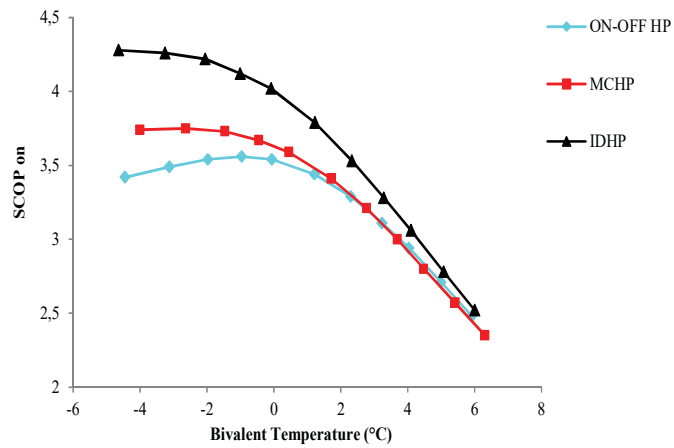


DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## Esempio dimensionamento

$$SCOP_{on} = \frac{\sum_i Q_b(i)}{\sum_i [E_{HP,us}(i) + E_{BU}(i)]}$$

Confronto in termini di SCOPon



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it

## POR-FESR 14-20



# HEGOS

Progetto e test sperimentali su Pompe di calore DUAL SOURCE

- Due serbatoi termici esterni (aria-terreno)
- Nuove logiche di regolazione per ottimizzare lo sfruttamento dei due serbatoi
- Utilizzo di sonde geotermiche «corte»



DIN  
Università di Bologna  
www.unibo.it