

24 maggio 2016  
Giornate della Sostenibilità

---

*LE EMISSIONI DI CO2 DEL POLITECNICO DI MILANO  
PRESENTAZIONE DEI RISULTATI DEL PROGETTO PILOTA 2015  
E PRIMI RISULTATI DEGLI STUDI DI APPROFONDIMENTO*

**Riduzione delle emissioni di CO2 del Politecnico di Milano tramite  
interventi sulle macchine frigorifere**

*Costacurta Mattia*

*Di Marco Andrea*

*Relatore: Molinaroli Luca*

*Politecnico di Milano*

# PROBLEMA EMISSIONI

## **Protocollo di Kyoto (11 dicembre 1997)**

- Strategia UE 20-20-20 (2007)

## **Copenaghen (Novembre 2009)**

- Riduzione emissioni del 30% entro il 2020
- Riduzione emissioni del 50% entro il 2050
- Sviluppo gas refrigeranti a basso Global Warming Potential

## **Cop21 Parigi (Dicembre 2015)**

## **Progetto pilota Politecnico di Milano**

- Stima e riduzione delle emissioni di CO2 dirette e indirette dell'Ateneo

## **Definizione dello stato attuale**

- Campionamento delle macchine frigorifere
- Valutazione assorbimenti elettrici ed emissioni nella configurazione estiva

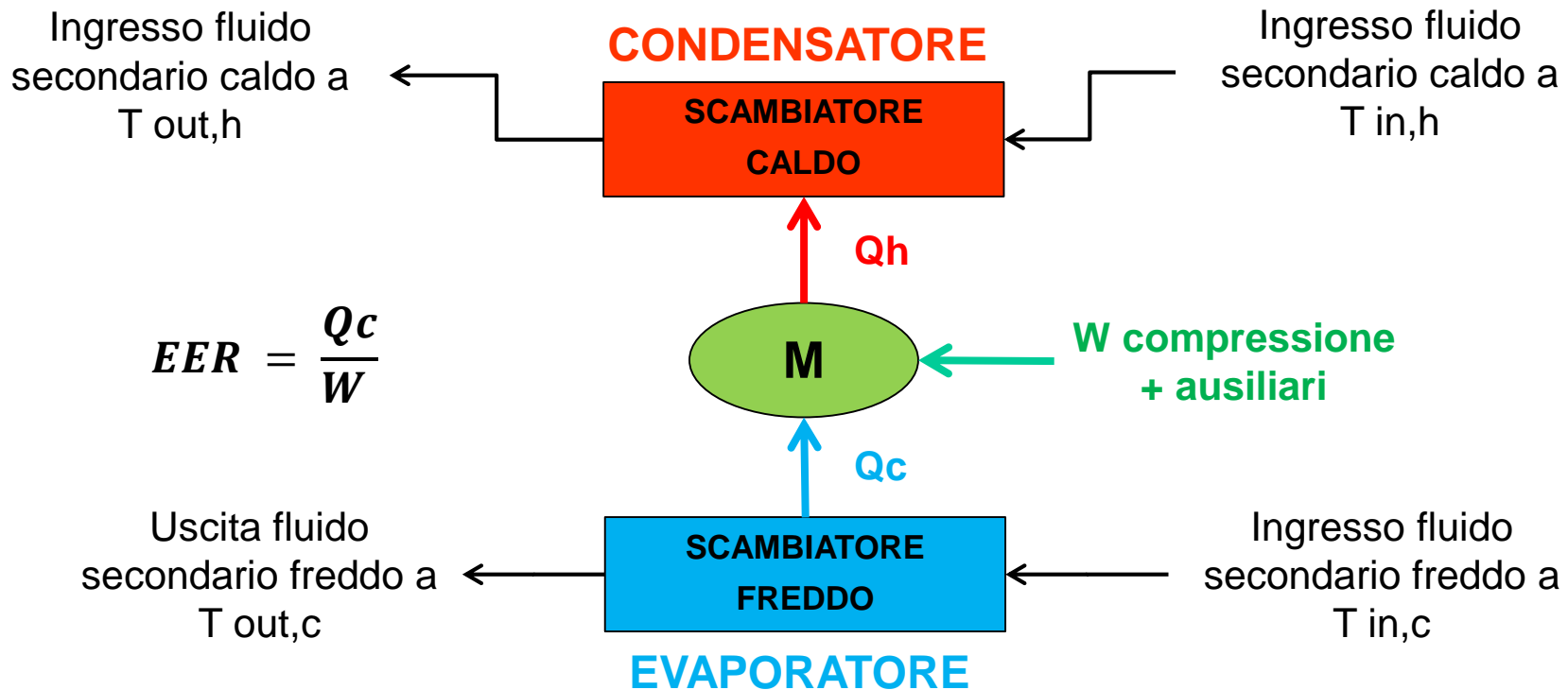
## **Proposta di miglioramenti tecnologici**

- Centralizzazione
- Regolazione a modulazione continua
- Passaggio ad un condensatore ad acqua

## **Stima della riduzione di emissioni**

- Confronto della situazione prima e dopo il singolo intervento
- Determinazione del peso della componente diretta delle emissioni
- Estensione dei risultati ottenuti dai casi studio all'intero parco macchine

# MACCHINA A COMPRESSIONE DI VAPORE



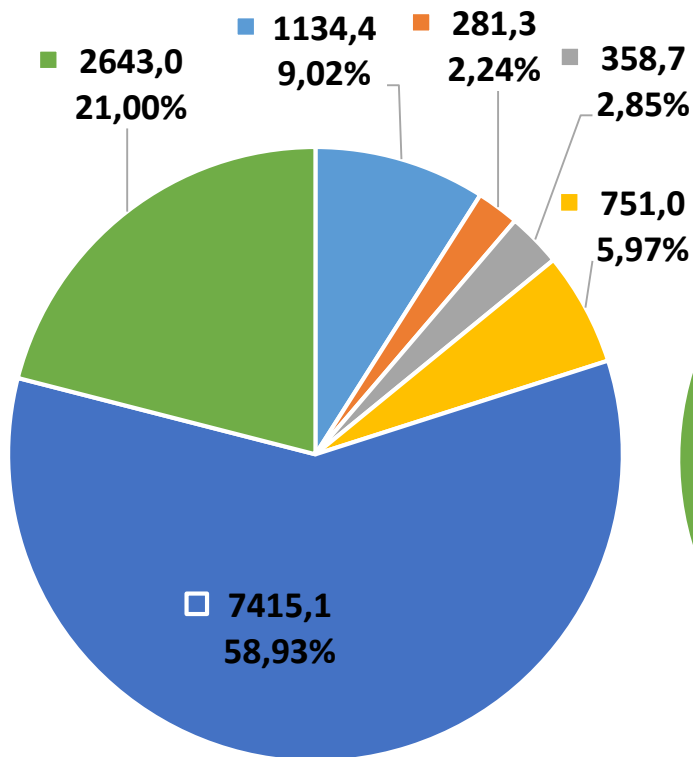
- Gli impianti sono classificati in base ai fluidi presenti al condensatore e all'evaporatore: aria-aria, aria-acqua, acqua-aria, acqua-acqua
- Nel caso in cui la macchina operi con un ciclo di Carnot tra le temperature costanti  $T_c$  e  $T_h$  si ha che  $EER = T_c / (T_h - T_c)$

# STATO ATTUALE, I DUE CAMPUS SEPARATI

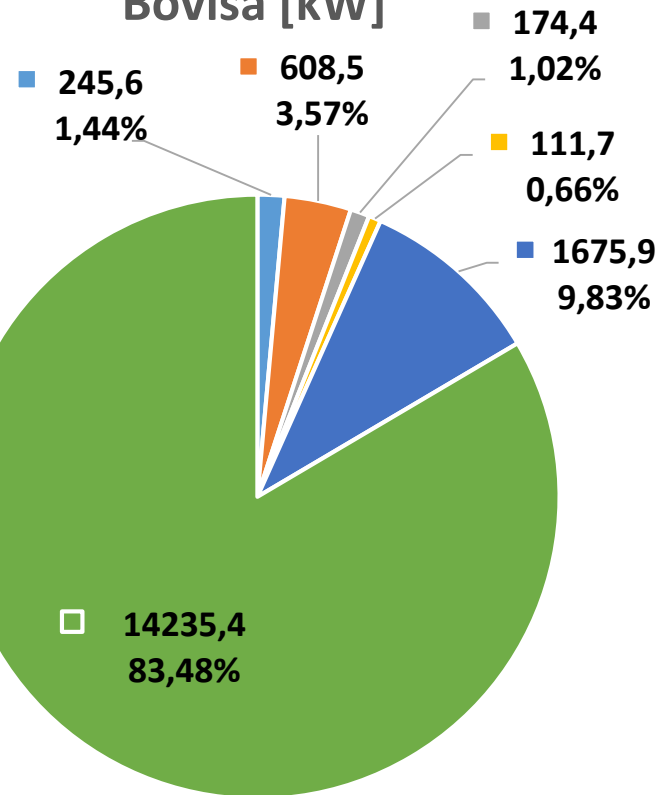
## Divisione parco gruppi frigo per fasce di potenza

- fino a 10 kW
- da 10 a 30 kW
- da 30 a 50 kW
- da 50 a 100 kW
- da 100 a 500 kW
- > 500 kW

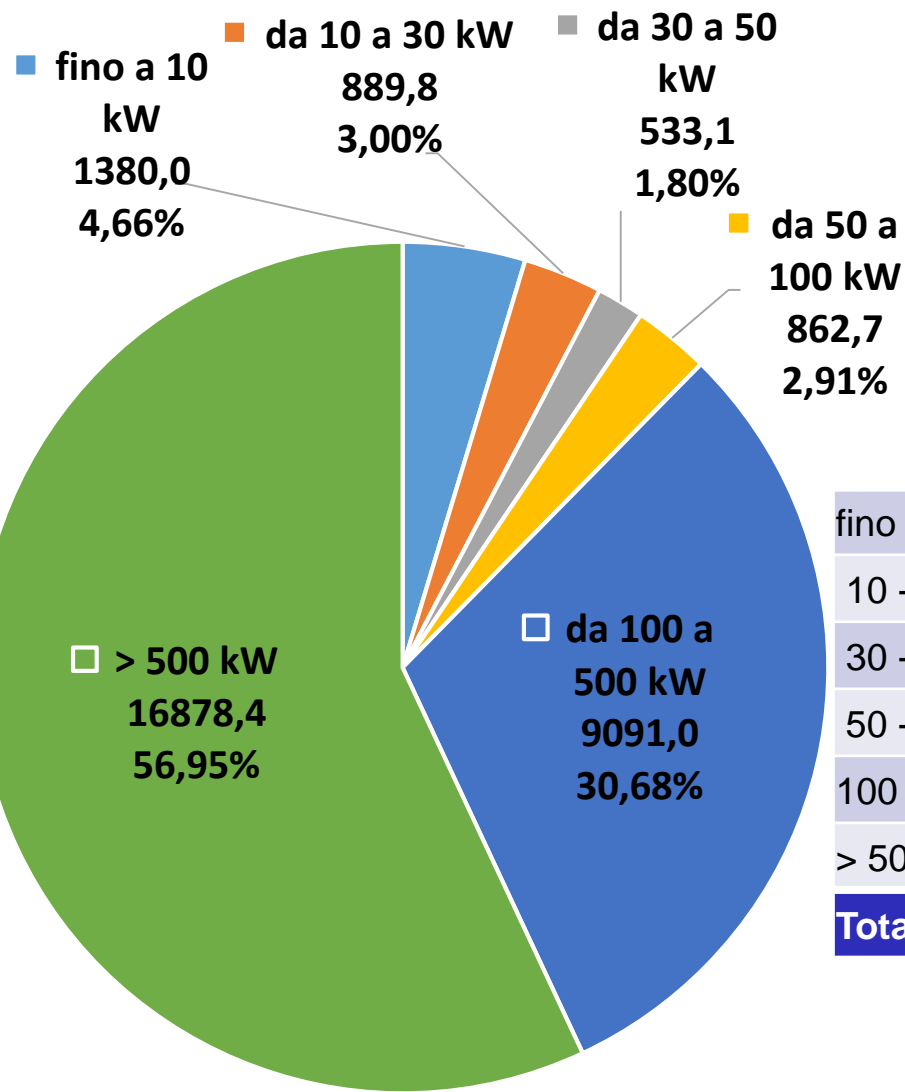
### Città studi [kW]



### Bovisa [kW]



# STATO ATTUALE, SITUAZIONE COMPLESSIVA



Totale potenza installata:  
29,635 MW

	Numero macchine	Condensate ad acqua	% condensate ad acqua rispetto a potenza installata
fino a 10 kW	252	0	0%
10 - 30 kW	46	0	0%
30 - 50 kW	13	1	9,32%
50 - 100 kW	13	0	0%
100 - 500 kW	36	6	19,64%
> 500 kW	20	3	22,89%
<b>Totale</b>	<b>380</b>	<b>10</b>	<b>19,23%</b>

# SCelta DEI CASI STUDIO

	Ed. B12 e 24 Bovisa	Ed. 23 Città Studi	Ed. 8 Città Studi
Tipo di Refrigerante	R407C	R407C	R410A, R22
Potenza frigo [kW]	934 (x 2)	45 (x 4)	130+59+split(621)=810
Tipo di utenza/carico	Aule, uffici di dipartimento, mensa, sale studio	Aule informatizzate	Laboratori, uffici di dipartimento, 1 aula
Tipo di impianto	Aria primaria	Tutt'aria	Split, fan coil, tutt'aria
Condensazione	Aria	Aria	Aria



# STRUMENTI UTILIZZATI

## **POLIMESS (Lavoro di tesi specifico presso Politecnico di Milano)**

- Input: termofisica dell'edificio, carichi interni fissi e variabili, temperatura e umidità assoluta dell'aria esterna, dati sul percorso solare, orari di accensione dei gruppi frigoriferi
- Output: carico frigorifero orario richiesto all'impianto installato

## **Norma UNI EN 14825**

- Coefficienti di degradazione dell'Energy Efficiency Ratio
- EER ai carichi parziali (condizioni non nominali)

## **Dati relativi al funzionamento ai carichi parziali di macchine reali al variare della temperatura del fluido secondario al condensatore**

- Potenza frigorifera dichiarata
- EER



# INDICE DI VALUTAZIONE DELLE EMISSIONI

$$\begin{aligned} \textit{Total Equivalent Warming Impact} &= \textit{DGW} + \textit{IGW} \\ &= (F * \textit{GWP} * N) + [(1 - \alpha_{ric}) * M * \textit{GWP}] + n * k * E \end{aligned}$$

**F** = perdita di gas serra espressa in kg nel corso di un anno di funzionamento (ipotizzato pari a 4% della massa della carica di refrigerante)

**GWP** = potenziale di effetto serra del gas;

**M** = massa di refrigerante espressa in kg presente nella macchina;

$\alpha_{ric}$  = fattore rappresentante la percentuale di gas refrigerante recuperata con successo nella fase di smantellamento della macchina (pari a 0,9);

**k** = kg di anidride carbonica emessi per produrre 1 kWh elettrico *al contatore* (0,3524 kgCO<sub>2</sub>/kWh);

**E** = energia elettrica consumata in un anno dall'impianto;

**N** = numero di anni di funzionamento dell'impianto (pari a 10)

# COMPONENTE DIRETTA (DGW)

$$DGW = (F * GWP * N) + [(1 - \alpha_{ric}) * M * GWP]$$

Risulta tanto minore quanto:

- più basso è il valore GWP del refrigerante
- più basso è il contenuto di refrigerante nella macchina (a pari GWP)
- maggiore è l'accuratezza costruttiva (guarnizioni, giunzioni...) e di manutenzione dell'impianto
- più efficienti risultano essere i sistemi di recupero del refrigerante durante il processo di dismissione e smantellamento dell'impianto

	Global Warming Potential	Ozone Depletion Potential
<b>R11</b>	4000	1
<b>R22</b>	1700	0,05
<b>R404A</b>	3300	0
<b>R407C</b>	1610	0
<b>R410A</b>	1725	0
<b>R134a</b>	1300	0
<b>R1234yf</b>	4	0
<b>R1234ze</b>	1	0

# COMPONENTE INDIRECTA (IGW)

$$IGW = n * k * E$$

- Dipendente dal mix tecnologico per la produzione di energia elettrica, e dal rendimento di trasmissione della rete
- Ridurre la richiesta energetica degli edifici
- Aumentare l'efficienza degli impianti → E minore

## Vantaggi

- Possibilità di servire più zone/edifici
- Costi ridotti a pari potenza installata e maggiori EER (fattore di scala)
- Confinamento macchine più semplice nel caso di refrigeranti pericolosi
- Stato dell'arte più facilmente implementabile

## Svantaggi

- Nel caso di una singola macchina il guasto comporta il fermo totale dell'impianto (affidabilità)
- Inseguire e gestire carichi particolari e di piccola dimensione risulta difficoltoso (es: sala server)
- Perdite energetiche dovute alla rete di distribuzione

## Regolazione ON/OFF

- ✓ Basso costo tecnologico
- Alta potenza assorbita all'accensione del compressore (circa 3-4 volte quella che si ha a regime)
- Nella fase successiva all'accensione si ha assorbimento dell'energia senza produzione di effetto utile

## Regolazione a gradino

- ✓ Maggior efficienza rispetto a ON/OFF nei transistori
- ✓ Implementabile in macchine grandi tramite l'adozione di più circuiti
- Perdite termodinamiche nella valvola di ricircolo del refrigerante

## Regolazione a modulazione continua (inverter)

- Il sistema può produrre istantaneamente la potenza richiesta
- Avviamento graduale del compressore a frequenze basse
- Una volta che si raggiunge una frequenza minima, si passa ad una regolazione ON/OFF
- Utilizzata principalmente in macchine ad espansione diretta e macchine con compressore a vite o centrifugo
- A carichi parziali: frequenza diminuisce
  - Portata elaborata minore
  - T condensazione e T evaporazione sono più vicine (lo stesso vale per le pressioni)
  - EER aumenta

# CONDENSAZIONE AD ACQUA

## Vantaggi condensazione ad aria

- Semplicità costruttiva e manutenzione meno delicata
- No impianto di trattamento dell'acqua
- No problemi di incrostazioni o corrosione
- Soluzione semplice e meno costosa in zone dove è complicato l'approvvigionamento dell'acqua

## Vantaggi condensazione ad acqua

- Temperatura di condensazione minore
- Coefficienti di scambio termico più elevati
- Possibili altre soluzioni, ma molto dipendenti dalla località di installazione:
  - Sonda geotermica
  - Utilizzo di corsi d'acqua o bacini



## **Situazione attuale:**

100 macchine split, 50% ON/OFF, 50% ad inverter

## **Soluzione ottimale:**

sostituzione con macchina acqua-acqua centralizzata a modulazione continua

## **Passaggi intermedi:**

1. Macchina aria-acqua centralizzata a gradino
2. Macchina aria-acqua centralizzata a modulazione continua

## **Soluzione futura:**

soluzione ottimale con utilizzo di un fluido a GWP unitario (R1234ze)



# EDIFICIO 8: IGW

Vita utile: 10 anni

	Split base	Centralizzato gradino	Centralizzato reg. continua	Condensazione ad acqua (Torre)
<b>Compressore</b>	Scroll/Alternativo	Scroll	Vite	Vite
<b>Potenza frigorifera nominale [kW]</b>	622	632	634	638
<b>Emissioni indirette (IGW) [t CO2]</b>	256,2708	268,5565	250,1917	207,6947
<b>Miglioramento % incrementale</b>		- 4,79%	6,84%	16,99%
<b>% rispetto al caso base</b>		-4,79%	2,37%	18,95%

# EDIFICIO 8: IGW + DGW

Vita utile: 10 anni

	Split base	Centralizzato gradino	Centralizzato reg. continua	Condensazione ad acqua (Torre)
<b>Compressore</b>	Scroll/Alternativo	Scroll	Vite	Vite
<b>Potenza frigorifera nominale [kW]</b>	622	632	634	638
<b>Emissioni indirette (IGW) [t CO2]</b>	256,2708	268,5565	250,1917	207,6947
<b>Miglioramento % incrementale</b>		- 4,79%	6,84%	16,99%
<b>Refrigerante</b>	R410A/R22	R410A	R134a	R134a
<b>Quantità refrigerante [kg]</b>	193	80	112	136
<b>Emissioni dirette (DGW) [t CO2 eq]</b>	166,6817	69	72,8	88,4
<b>Influenza % DGW</b>	39,41%	20,44%	22,54%	29,86%
<b>Emissioni Totali [t CO2 eq]</b>	422,9525	337,5565	322,9917	296,0947
<b>Miglioramento % incrementale</b>		20,19%	4,31%	8,33%
<b>% rispetto al caso base</b>		20,19%	23,63%	<b>29,99%</b>

# EDIFICIO 8: comparazione con il caso

Vita utile: 10 anni

	Split base	Centralizzato gradino	Centralizzato reg. continua	Condensazione ad acqua (Torre)	R1234ze GWP 1
<b>Compressore</b>	Scroll/Alternativo	Scroll	Vite	Vite	Vite
<b>Potenza frigorifera nominale [kW]</b>	622	632	634	638	638
<b>Emissioni indirette (IGW) [t CO2]</b>	256,2708	268,5565	250,1917	207,6947	207,69465
<b>Miglioramento % incrementale</b>		- 4,79%	6,84%	16,99%	0%
<b>Refrigerante</b>	R410A/R22	R410A	R134a	R134a	R1234ze
<b>Quantità refrigerante [kg]</b>	193	80	112	136	136
<b>Emissioni dirette (DGW) [t CO2 eq]</b>	166,6817	69	72,8	88,4	0,272
<b>Influenza % DGW</b>	39,41%	20,44%	22,54%	29,86%	0,13%
<b>Emissioni Totali [t CO2 eq]</b>	422,9525	337,5565	322,9917	296,0947	207,96665
<b>Miglioramento % incrementale</b>		20,19%	4,31%	8,33%	29,76%
<b>% rispetto al caso base</b>		20,19%	23,63%	29,99%	<b>50,83%</b>

# ULTERIORI OSSERVAZIONI

- Energia elettrica assorbita annualmente nelle diverse configurazioni:

	Split base	Centralizzato gradino	Centralizzato reg. continua	Condensazione ad acqua (Torre)
E el totale [MWh]	7,2722	7,6208	7,0997	5,8937

- I miglioramenti significativi proposti sono riferiti a una percentuale delle macchine pari a circa il 5% della potenza totale installata
- Percentuale di riduzione delle emissioni intervenendo sui sistemi centralizzati a gradino:

	Centralizzato reg. continua	Condensazione ad acqua (Torre)	R1234ze GWP 1
% rispetto a caso a gradino	4,31%	<b>12,28%</b>	<b>38,39%</b>

- **Edificio B12 e 24 Bovisa:**
  - 2 macchine di circa 900 kWf in serie
  - Carichi prevalentemente legati ad aule
  
- **Edificio 23 Città Studi:**
  - aria-aria
  - centralizzazione
  
- **Estensione** risultati a tutto il parco macchine
  
- **Fluidi naturali** (CO<sub>2</sub>, Ammoniaca, Propano)

# Grazie per l'attenzione!

*Costacurta Mattia*

*Di Marco Andrea*