

**Bologna, 21 marzo 2016 - Regione Emilia Romagna**

**Verso il nuovo Piano Energetico Regionale  
Seminario "Riqualificazione energetica del patrimonio edilizio"**

**Sistemi energetici efficienti  
per distretti urbani intelligenti**  
*Ottimizzazione di reti trigenerative smart*

***Dott. Ing. Emanuele Martelli  
LEAP/Politecnico di Milano – Dip. di Energia***

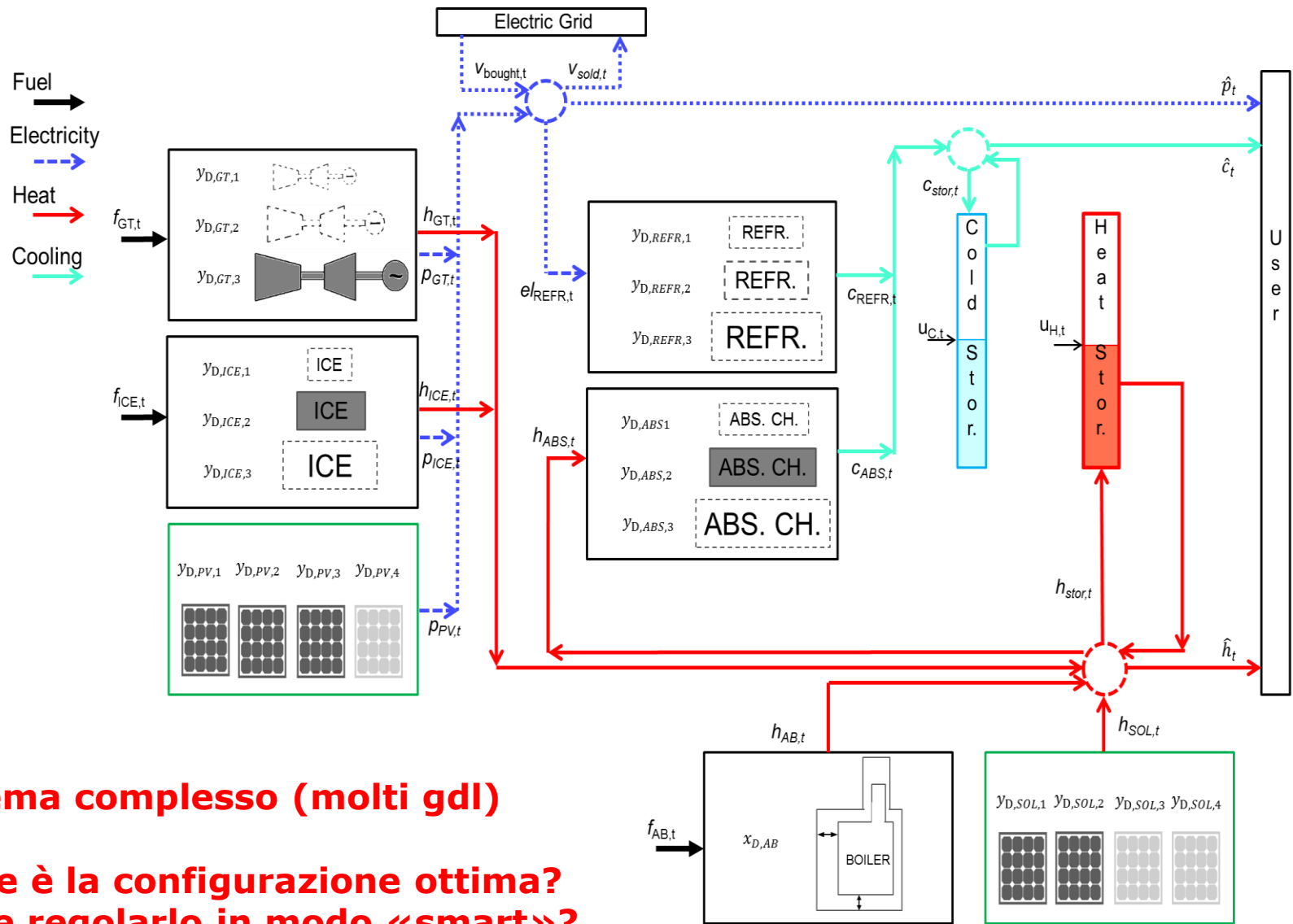
- 1. Introduzione;**
- 2. Ottimizzazione di reti trigenerative «smart»;**
- 3. Attività di ricerca LEAP e Politecnico di Milano;**
- 4. Ottimizzazione del progetto della rete trigenerativa;**
- 5. Ottimizzazione della gestione della rete trigenerativa;**
- 6. Pubblicazioni scientifiche;**
- 7. Sviluppi futuri.**



## Strategie per la riduzione del consumo di combustibili fossili nel settore edilizio (**lato sistemi di generazione dell'energia**):

- Aumento efficienza energetica dei sistemi di generazione tramite cogenerazione, trigenerazione, pompe di calore, etc.
- Utilizzo di fonti rinnovabili (pannelli solari termici e fotovoltaici, sorgenti geotermiche, caldaie a biomassa, etc).
- Utilizzo di sistemi di accumulo di energia termica (caldo/freddo) e/o elettrica per aumentare la flessibilità operativa e sfruttare le fonti rinnovabili intermittenti (non programmabili).
- Connessione in reti di più utenze ed unità di generazione (reti di teleriscaldamento/teleraffrescamento per città, quartieri, condomini) al fine di:
  - sfruttare le sinergie tra utenze e/o tecnologie di generazione
  - utilizzare sistemi di taglia maggiore (tipicamente più efficienti)

# Esempio di rete trigenerativa



**Sistema complesso (multi gdl)**

**Quale è la configurazione ottima?  
Come regolarlo in modo «smart»?**



# Ottimizzazione di reti trigenerative «smart»

- Quali unità (caldaie, motori cogenerativi, pannelli solari, etc) e di che taglie installare per minimizzare i consumi enegetici limitando i costi?
- Quali unità accendere / spegnere in ogni instante ed a che carico?
  - Quanta energia elettrica/termica sarà richiesta dagli utenti nelle prossime 24 ore / giorni?
  - Quanta energia elettrica/termica sarà generata dai pannelli solari nelle prossime 24 ore / giorni?
  - Quando conviene caricare/scaricare i sistemi di accumulo?

**Criteri progettuali e logiche di regolazione «classiche» non adeguate.**

**Non riescono a sfruttare le possibili sinergie della rete e le numerose informazioni oggi disponibili (sensori di monitoraggio, previsioni meteo).**

**NECESSARI METODI ED ALGORITMI DI OTTIMIZZAZIONE**



- **Ottimizzazione del progetto** di reti trigenerative smart e della riqualificazione di impianti.
- **Ottimizzazione della gestione** di reti trigenerative smart.

## Attività avviate nel 2013, in collaborazione con:

- Skolteck University, Mosca, Russia
- Politecnico di Losanna (EPFL), Svizzera
- Università di Bologna
- Università di Parma
- Confindustria Emilia Romagna Ricerca (CERR)
- Comune di Parma
- ANTAS srl
- CPL Concordia
- SIRAM
- Consorzio Centrale Termica PEEP Corticella di Bologna
- Imprese Edili: Cella, Croci (Piacenza), Allodi (Parma)
- OPTIT srl (società nata come spin-off di UniBO)
- Provincia di Piacenza
- Rete Condomini Intelligenti di Piacenza

**Rete imprese-ricerca  
della regione ER**



# Problema di ottimizzazione del progetto della rete

Qual è il problema da risolvere per **ottimizzare il progetto** della rete trigenerativa smart?

## Dati:

- Previsioni di domanda termica, frigorifera ed elettrica dell'utenza.
- Stima della producibilità energetica da fonti rinnovabili.
- Catalogo, prestazioni e costi delle tecnologie disponibili.

## Variabili decisionali:

- La scelta delle unità di generazione da installare (caldaie, motori cogenerativi, pannelli solari termici/fotovoltaici, etc)
- Le taglie delle singole unità di generazione.
- La tipologia e la taglia dei sistemi di accumulo termici/elettrici.

## Funzione obiettivo:

- Minimo consumo annuale di combustibili fossili (o emissioni CO2 o costi).

## Vincoli:

- Soddisfare la domanda termica/frigorifera in ogni possibile condizione.
- Vincoli tecnologici (rampa di carico massima, numero massimo on/off, etc.)
- Vincoli associati alle reti di distribuzione (e.g., max export/import elettrico).



# Problema di ottimizzazione del progetto della rete

$$\min f(z_{D,i}, x_{D,i}, y_{D,i}, z_{O,i,t}, x_{O,i,t}, u_{H,t}, l_{H,\text{storage}})$$

$$g_D(z_{D,i}, x_{D,i}, y_{D,i}) \leq 0$$

$$z_{O,i,t} \leq z_{D,i} \quad \forall i \in All, \forall t \in T$$

$$f_{i,t} = z_{O,i,t} \varphi_{F,i}(x_{O,i,t}, y_{D,i}) \quad \forall i \in CA, \forall t \in T$$

$$p_{i,t} = z_{O,i,t} \varphi_{P,i}(x_{O,i,t}, y_{D,i}) \quad \forall i \in CA, \forall t \in T$$

$$h_{i,t} = z_{O,i,t} \varphi_{H,i}(x_{O,i,t}, y_{D,i}) \quad \forall i \in CA, \forall t \in T$$

$$f_{i,t} = z_{O,i,t} \varphi_{F,i}(x_{O,i,t}, x_{D,i}) \quad \forall i \in CU, \forall t \in T$$

$$p_{i,t} = z_{O,i,t} \varphi_{P,i}(x_{O,i,t}, x_{D,i}) \quad \forall i \in CU, \forall t \in T$$

$$h_{i,t} = z_{O,i,t} \varphi_{H,i}(x_{O,i,t}, x_{D,i}) \quad \forall i \in CU, \forall t \in T$$

$$\sum_{i \in All} h_{i,t} + (1 - u_{H,\text{losses}}) \cdot u_{H,t} - u_{H,t+1} = \hat{h}_t \quad \forall t \in T$$

$$v_{\text{sold},t} - v_{\text{bought},t} = \sum_{i \in All} p_{i,t} - \hat{p}_t \quad \forall t \in T$$

$$u_{H,t} \leq l_{H,\text{storage}} \quad \forall t \in T$$

$$u_{H,T_{\max}} = u_{H,1}$$

$$X_{D \min,i} \leq x_{D,i} \leq X_{D \max,i} \quad x_{D,i} \in \mathbb{R} \quad \forall i \in CU$$

$$X_{O \min,i} z_{O,i} \leq x_{O,i,t} \leq X_{O \max,i} z_{O,i} \quad \forall i \in All, \forall t \in T$$

$$y_{D,i} \in \{Y_{i,1}, Y_{i,2}, Y_{i,3}, \dots\} \quad \forall i \in CA$$

$$l_{H,\text{storage},\min} \leq l_{H,\text{storage}} \leq l_{H,\text{storage},\max} \quad l_{H,\text{storage}} \in \mathbb{R}$$

$$z_{D,i} \in \{0,1\} \quad \forall i \in All$$

$$z_{O,i,t} \in \{0,1\} \quad \forall i \in All, \forall t \in T$$

$$f_{i,t}, p_{i,t}, h_{i,t} \geq 0 \quad f_{i,t}, p_{i,t}, h_{i,t} \in \mathbb{R} \quad \forall i \in All, \forall t \in T$$

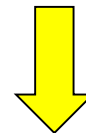
$$u_{H,t}, v_{\text{sold},t}, v_{\text{bought},t} \geq 0 \quad u_{H,t}, v_{\text{sold},t}, v_{\text{bought},t} \in \mathbb{R} \quad \forall t \in T$$

## Difficoltà del problema di ottimizzazione:

1. Variabili intere per la scelta delle unità di generazione
2. Funzioni di costo e prestazioni non-lineari
3. Variabili intere per modellizzare i cicli tipici di accensione/spegnimento settimanali delle unità
4. Centinaia di variabili e vincoli

## Problema di tipo Mixed Integer NonLinear (MINLP)

**Troppo complesso per gli algoritmi/software di ottimizzazione oggi disponibili**

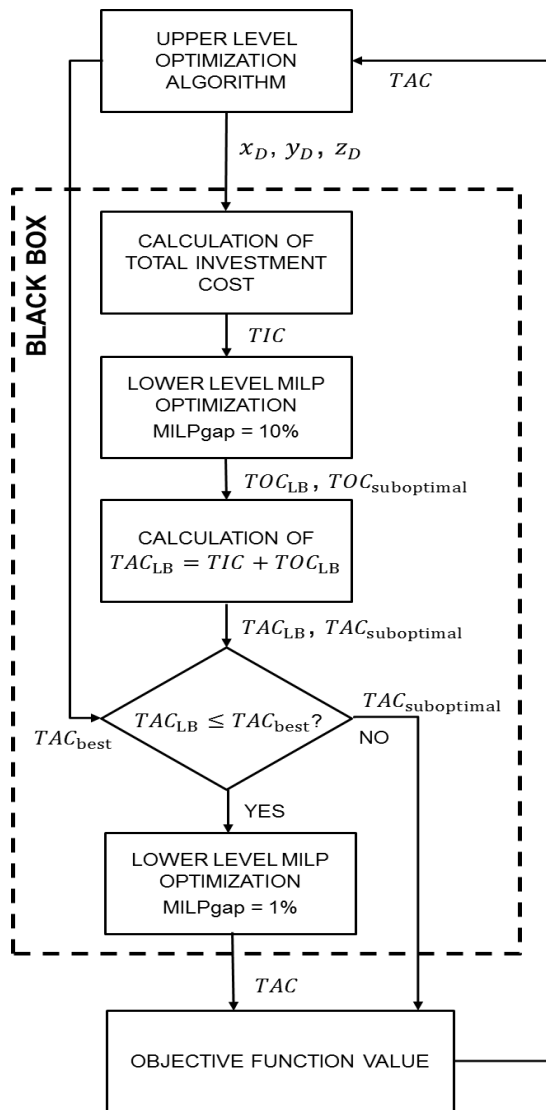


**Sviluppo di un algoritmo di ottimizzazione ad-hoc basato su:**

- know-how energetico
- approcci matematici di decomposizione e linearizzazione
- algoritmi evolutivi (intelligenza artificiale)



# Algoritmo di ottimizzazione del progetto



«Scatter Search» (algoritmo evolutivo)  
esplora possibili soluzioni progettuali

MILP solver (alg. deterministico)  
determina la gestione ottimale della rete

Tesi di Laurea «Alta Scuola Politecnica», 2015 (C. Elsidò, relatore: E. Martelli)

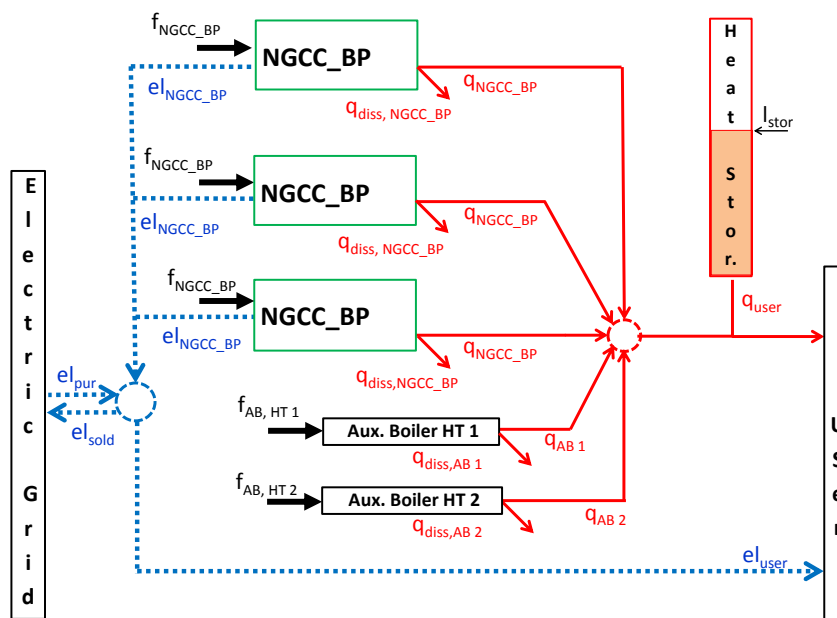
Pubblicazione rivista internazionale:  
Elsido, Bischi, Silva, Martelli, 2016. Energy (in review)



# Esempio applicativo di ottimizzazione di progetto

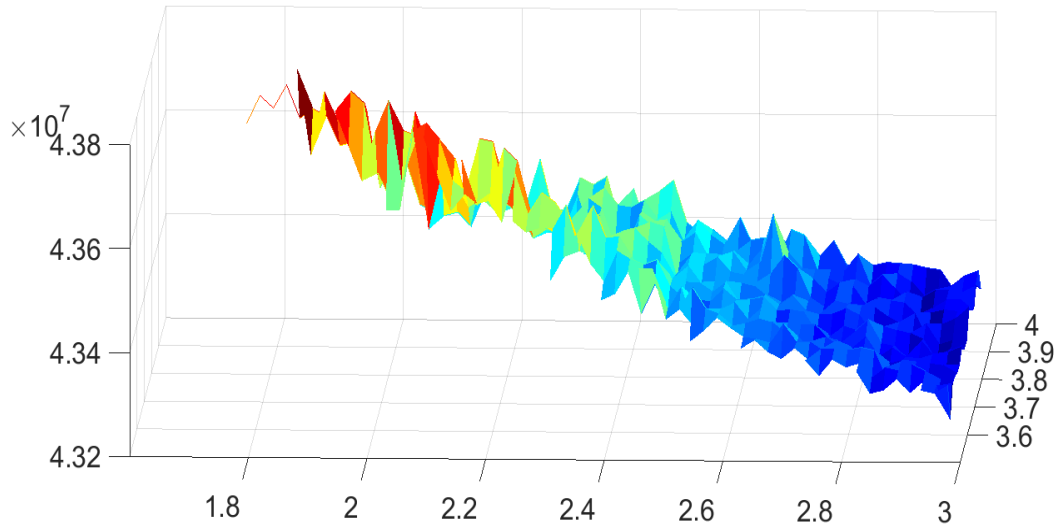
## Progetto rete di teleriscaldamento (200 MWth)

	Taglie disponibili
Turbine gas cogenerative	5042; 6460; 7784; 11176 kW <sub>el</sub>
Turbine gas cogenerative con post firing	16357; 21071; 25516; 27113 kW <sub>el</sub>
Cicli combinati a controcompressione	48753; 50369; 83352; 97854 kW <sub>el</sub>
Cicli combinati a estrazione e condensazione	398195; 413391; 435562; 444416 kW <sub>el</sub>
Caldaie	24750 – 99000 kW <sub>th</sub>
Accumuli termici	15000 – 80000 kWh



## Progetto rete di teleriscaldamento (200 MWth)

Consumo energetico soluzioni progettuali esplorate dall'algoritmo evolutivo «Scatter Search»



**100.000 soluzioni valutate (consumi e costi) in sole 12 ore!!**  
**Strumento ideale per la progettazione!**

**Caso senza rinnovabili:**

**Circa 10% risparmio combustibile rispetto a soluzione iniziale**

**Caso con rinnovabili:**

**Work in progress (sicuramente > 10%)**

# Problema di ottimizzazione della gestione della rete

Qual è il problema da risolvere per **ottimizzare la gestione della rete trigenerativa smart?**

## Dati:

- Curve caratteristiche, minimo tecnico, e vincoli di rampa delle macchine installate (motori, GTs, pompe di calore, etc).
- Sistemi di accumulo di calore.
- **Previsione della domanda termica ed elettrica.**
- **Previsione della produzione da rinnovabili.**
- **Prezzi dell'energia elettrica.**

## **Determinare per ogni ora del giorno/settimana:**

- Gli stati on/off delle unità di generazione.
- Le regolazioni delle unità di generazione (carichi).
- La gestione del sistema di accumulo.

**In modo tale da minimizzare i consumi energetici (o costi operativi), soddisfacendo i vincoli di:**

- Bilanci elettrici e termici.
- I vincoli operativi delle macchine.
- Vincoli operativi delle reti elettriche (max import/export) e termiche.

**Problema di tipo MILP (Mixed Integer Linear Program)**



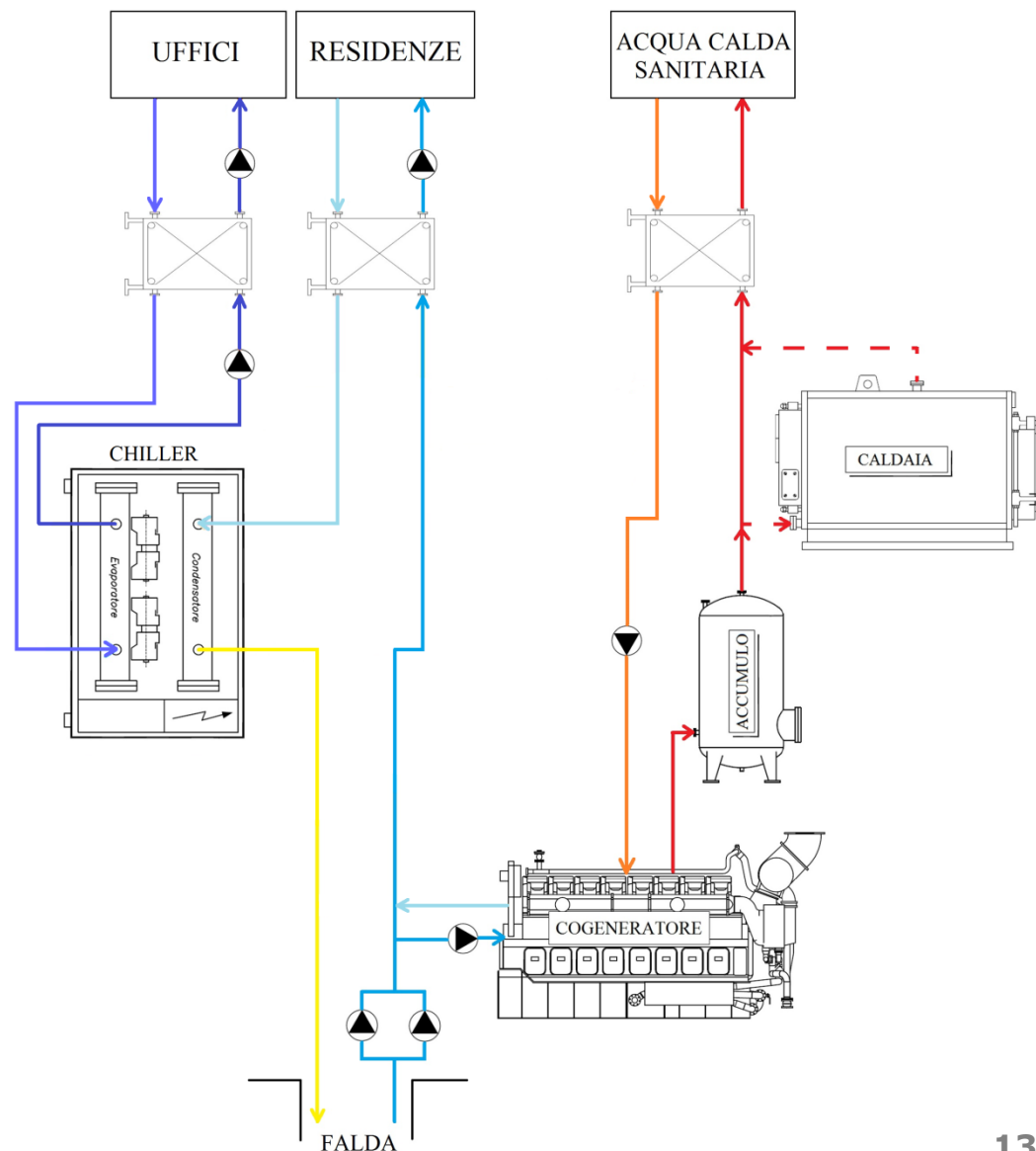
**Esistono algoritmi di ottimizzazione molto efficienti (CPLEX, GUROBI)**

# Esempio applicativo di gestione ottimizzata

## Gestione ottimizzata della rete trigenerativa a servizio di un grattacielo.

### FUNZIONAMENTO ESTIVO

- Il cogeneratore serve l'utenza di acqua calda sanitaria
- Il ciclo frigorifero raffresca gli uffici tramite fancoil
- Acqua di falda utilizzata prima per il free cooling degli appartamenti, poi come pozzo caldo per il ciclo frigorifero



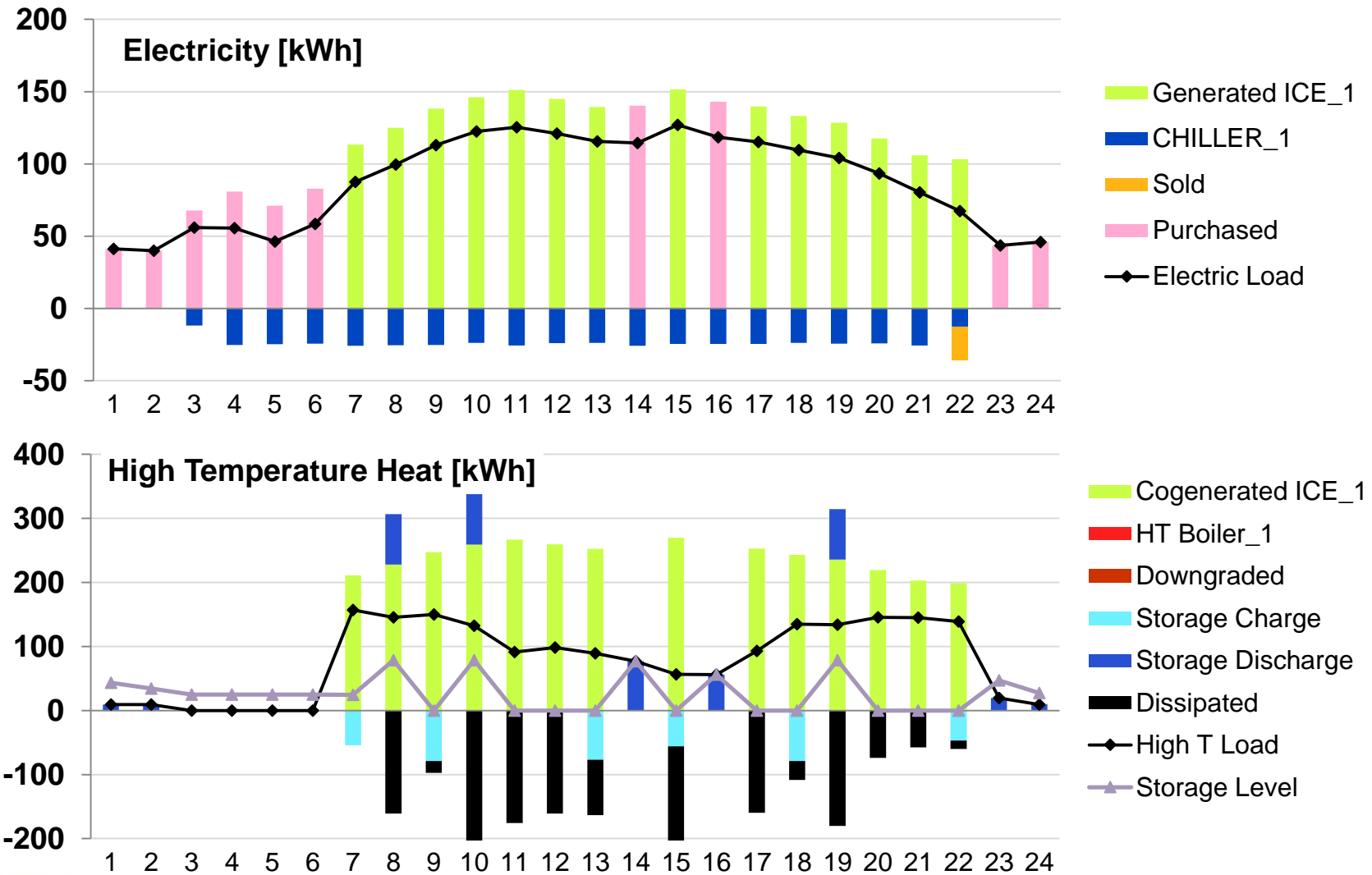
Tesi di Laurea (G.M. Gentilini)



# Esempio applicativo di gestione ottimizzata

**Tempo di calcolo per la gestione giornaliera < 5 secondi**

**Risparmio energetico rispetto a gestione originale: -18%**



# Publicazioni sul codice di gestione ottimale

1. Bischi, A., Pérez-Iribarren, E., Campanari, S., Manzolini, G., Martelli, E., Silva, P., Macchi, E., Pedro Sala-Lizarraga, J., 2016. Distributed cogeneration systems optimization: multi-step and mixed integer linear programming approaches. *International Journal of Green Energy*.
2. Bischi A., Taccari L., Martelli E., Amaldi E., et al., 2015, "A Rolling-Horizon MILP Optimization Method for the Operational Scheduling of Tri-generation Systems with Incentives. ECOS Internationel Conference, France.
3. Taccari, L., Amaldi, E., Martelli, E., Bischi, A., 2015. Short-term planning of cogeneration power plants: a comparison between MINLP and piecewise-linear MILP formulations. *Computer Aided Chemical Engineering*, 37, pp. 2429-2434.
4. Bischi, A., Campanari, S, Castiglioni A., Manzolini, G. Martelli, E. et al. 2014. Tri-Generation Systems Optimization: Comparison of Heuristic and Mixed Integer Linear Programming Approaches. *Proceedings of ASME Turbo-Expo 2014, June 16-20 2014 Düsseldorf, Germany*.
5. Bischi, A., Taccari L., Martelli, E, Amaldi, E. et al., 2014. A detailed optimization model for combined cooling, heat and power system operation planning. *Energy*, 74, pp. 12-26
6. Bischi, A., Taccari L., Martelli, E, Amaldi, E. et al., 2013. A Detailed Optimization Model for Combined Cooling, heat and power system operation planning. *ECOS Conference 2013, China*.
7. Taccari, L., Amaldi, E., Martelli, E., Bischi, A., 2013. Optimization models for planning the operations of cogeneration systems. *COST Workshop on Mixed Integer Nonlinear Programming, 30 September - 2 October, Institute Henri Poincare (IHP), Paris (FR)*.
8. Bischi, A., Pérez-Iribarren, E., Campanari, S., Manzolini, G., Martelli, E., Silva, P., Macchi, Sala-Lizarraga 2013. Distributed Cogeneration System Optimization: Multi-Step and Mixed Integer Linear Programming Approaches. *5th International Conference on Applied Energy (ICAE)*.
9. Amaldi E., Bischi A., Martelli E., Taccari L., 2015. Short-term planning of cogeneration energy systems via MINLP. Book chapter for the SIAM (Society for Industrial and Applied Mathematics) book "Advances and Trends in Optimization with Engineering Applications"



## 1. Applicazione a casi studio con sorgenti rinnovabili

## 2. Ottimizzazione tenendo conto dell'incertezza

- Incertezza della previsione dei carichi termici ed elettrici
- Incertezza della produzione da fonti rinnovabili (solare, eolico, etc)
- Incertezza dei prezzi dell'energia

La soluzione ottimizzata deve essere «robusta», cioè soddisfare il «worst case scenario», senza penalizzare eccessivamente i costi (non troppo conservativo).

## 3. Miglioramento previsione della domanda

**Attività proposte nel progetto «EFFICITY – Efficient energy systems for smart urban districts»** presentato al «Bando per progetti di ricerca industriale strategica rivolti all'innovazione in ambito energetico» della Regione Emilia-Romagna e attualmente in corso di valutazione.