



Geotermia e idrotermia

per il riscaldamento e il raffrescamento

**Progettazione e
gestione ottimizzata
degli impianti di
climatizzazione
multisorgente FER**

Paolo CONTI

paolo.conti@for.unipi.it





UNIVERSITÀ DI PISA

Unione Geotermica Italiana

*Il suo scopo è quello di promuovere
l'utilizzazione, la ricerca,
l'omogeneizzazione e la semplificazione
delle procedure
normative/amministrative e lo sviluppo
della geotermia in Italia*

Gruppo BETTeR

*(Building Energy Technique and
Technology Research group)*

University of Pisa – DESTEC

Attività

- Impianti climatizzazione
- Progettazione e gestione FER
- Ottimizzazione ed efficienza energetica



UGI – Unione Geotermica Italiana

International activities and collaborations

- Affiliated Member of IGA – International Geothermal Association
 - Two members in the Board of Directors
 - Ad hoc Research Committee/ Ad hoc Resources & Reserves Committee / Bylaws / Finance Committees / Educational Committee / Nominating Committee.



Affiliated Member of EGEC – European Geothermal Energy Council



Member of the IGA – UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) working group.

- Development of Geothermal Specifications for the application of the UNFC-2009 to Renewable Energy
- Propose an universally-accepted geothermal Classification scheme



UGI – Unione Geotermica Italiana

Political Activities (Recent and ongoing)

- Hearing of the 8th and 10th committees of the [Italian Parliament](#) on the environmental impact of the geothermal energy
- Official partner of the Italian "*Gestore dei Sistemi Energetici*" (GSE) for the implementation of the national statistical system on geothermal energy consumption.

(Implementation of Directive 2009/28/EC: 2020 climate & energy package, 20 – 20 -20)



- Consultor for the Italian «The Italian Ministry for Economic Development» (National Mining Office For Hydrocarbons And Georesources)



UGI – Unione Geotermica Italiana

Support for research activities

- Masters/ specialist thesis and Doctoral Thesis awards (2x1000 €)
- Online archive of the main relevant scientific articles and books on various field of the geothermal energy applications – WIP
- Geothermal section within the library of the Engineering school of the University of Pisa



Information and disseminating knowledge

- - International School on Geothermal Development – 2015
- - Specialist Lectures at Universities (E.g. Pisa, Camerino)
- - Basic lessons on geothermal energy for high school students
- - Support of “Geothermal Events”



Sommario

- ✓ Introduzione: l'**ottimizzazione** applicata ai **problemi ingegneristici** (es. sistemi energetici)
- ✓ **Approccio integrato** di sistema - multisorgente
- ✓ Analisi **costi-benefici** dell'intera **vita operativa**
- ✓ Tecniche di **ottimizzazione**
- ✓ Esempi/Casi studio

Introduzione

- L'approccio ingegneristico alla progettazione ed alla gestione di un qualsiasi sistema è tradizionalmente di tipo «cautelativo».
- Ci si riferisce alle **condizioni peggiori** di esercizio in modo da assicurare il funzionamento del sistema in ogni condizione operativa.
- In generale, questo comporta un **sovradimensionamento** dei componenti, con conseguente incremento dei **costi di installazione e penalizzazione delle prestazioni operative** (costi operativi).

Introduzione

- I moderni sistemi energetici sono generalmente costituiti da **differenti tecnologie e diverse fonti di energia**, ognuno con **differenti caratteristiche tecniche/economiche**.
- L'ottimizzazione del sistema può essere ottenuta attraverso la **valutazione delle prestazioni operative e delle interazioni tra i diversi sottosistemi/componenti**.

Obiettivi ingegneria energetica

Obiettivo energetico

$$\min\{E_{in}^{TOT}\} = \sum_{t=1}^{N_{life}} \sum_j^J E_{in,j}^t$$

t: tempo

j: j-esimo vettore energetico

Obiettivo economico

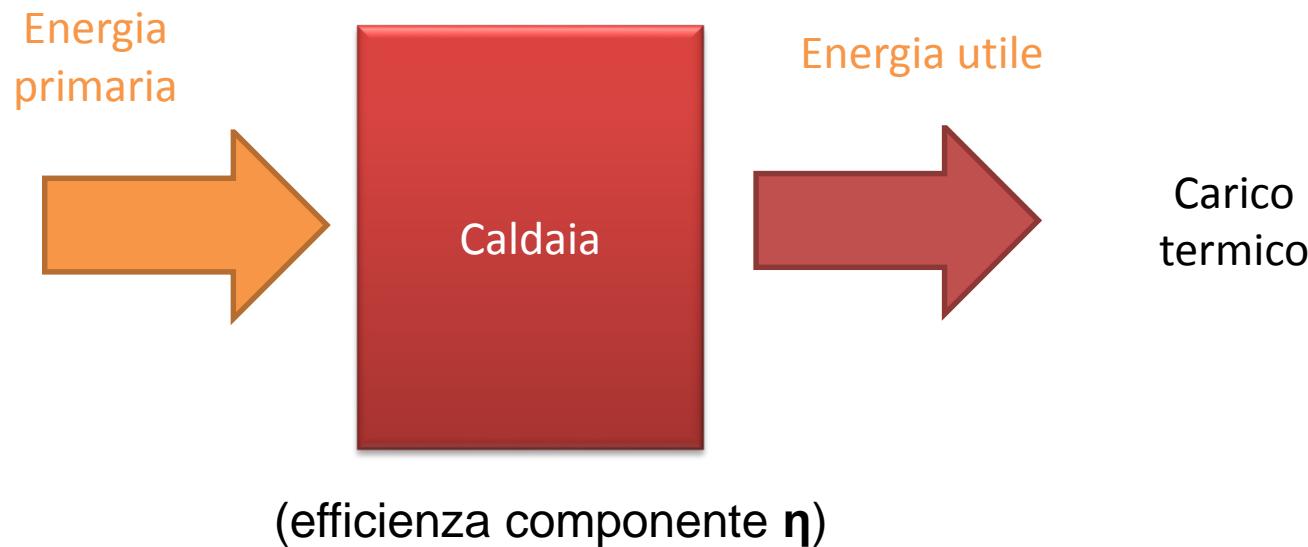
$$\min\{C^{TOT}\} = \sum_{j=1}^J C_j^0 + \sum_j^N c_j^t E_{in,j}^t$$

Costi installazione

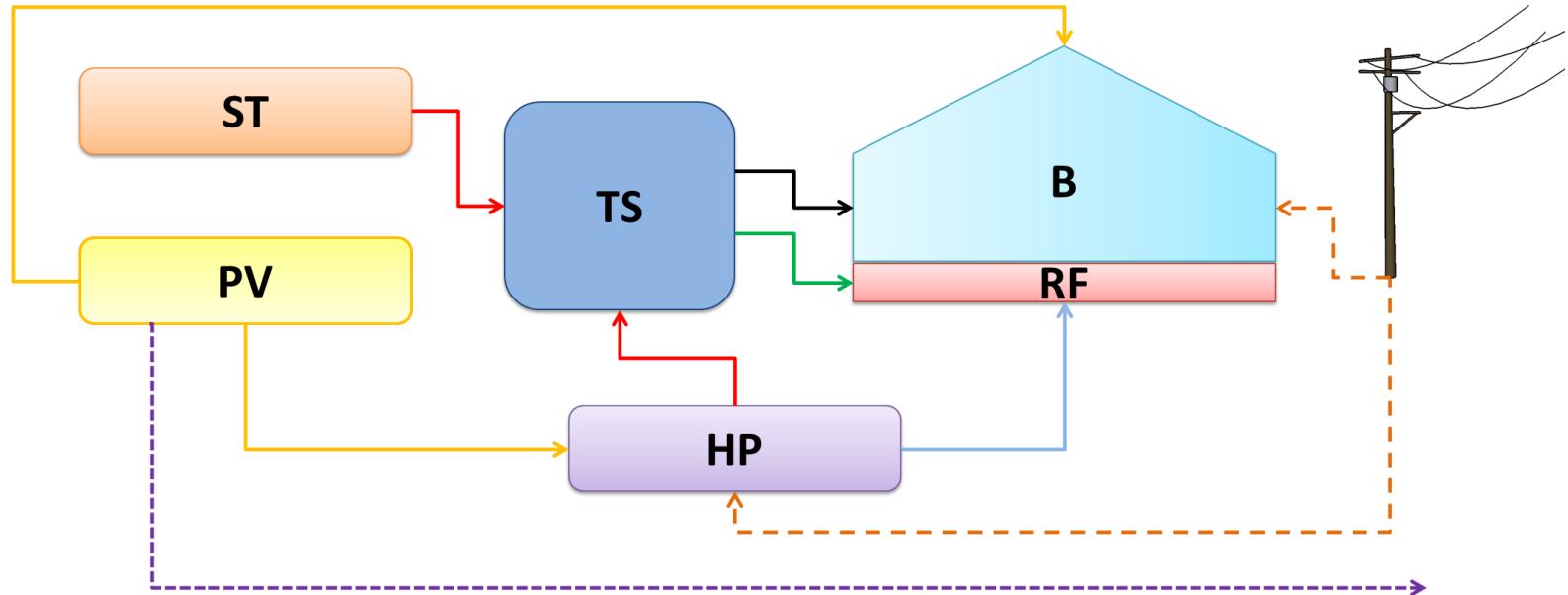
Costi operativi

Approccio integrato di sistema - multisorgente

- Impianto climatizzazione «tradizionale»



Approccio integrato di sistema - multisorgente



- TS recharge
- Heating/cooling share from HP
- Heating load share from TS
- DHW load
- Electrical load share from PV
- Electrical load share from the grid
- Electrical energy to the grid

- | | |
|------------|--------------------------|
| B | Building |
| DHW | Domestic hot water |
| HP | Heat pump |
| PV | Photovoltaic modules |
| RF | Radiant floor |
| ST | Solar thermal collectors |
| TS | Thermal storage |



Principali obiettivi e criticità ingegneria FER

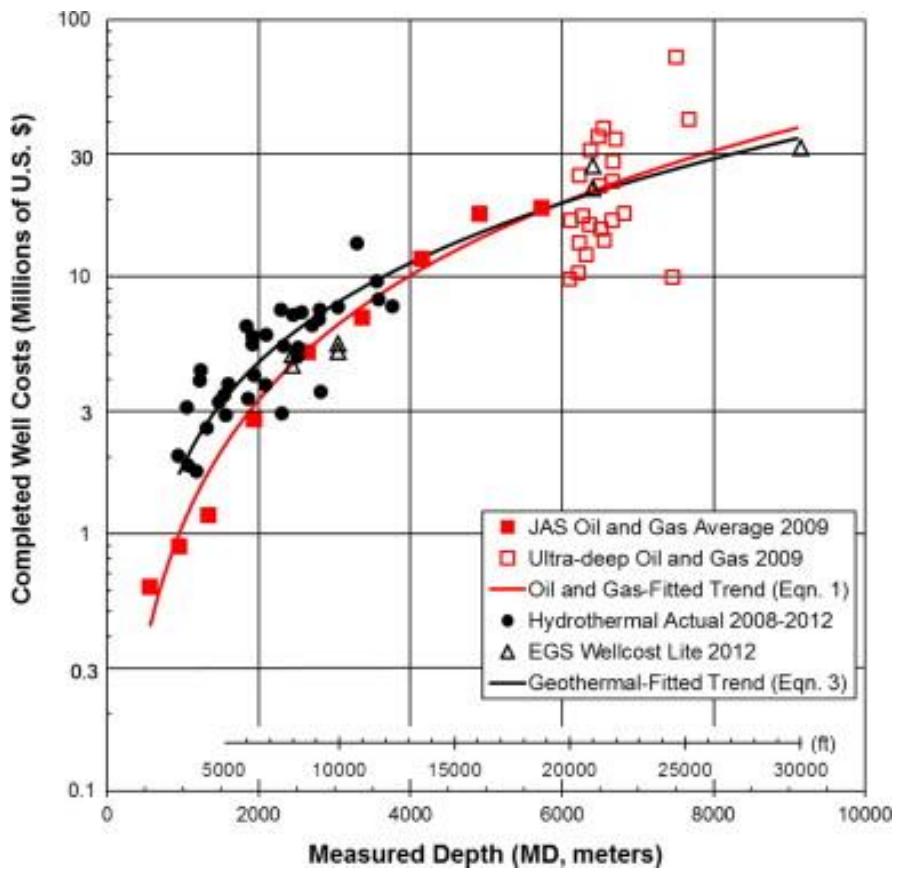
Obiettivi

- Diminuire il **sovradimensionamento**
- Diminuire i **costi installazione**
- Riduzione fabbisogno (**efficienza energetica**)

Criticità

- **Sostenibilità** dell'utilizzazione della fonte
- **Densità energetica** fonti rinnovabili
(alta per HC / bassa per rinnovabili)
- **Affidabilità** del servizio

Costi d'installazione



- **Pozzi d'acqua – Sonde geotermiche**
50 – 100 €/m
- **Pozzi geotermici profondi**
$$C_{well} = 1.72 \times 10^{-7} (D)^2 + 2.3 \times 10^{-3} - 0.62$$

«Rule of thumb» 1 km → 1 M€

Fonte: Lukawski et al. (2014)

Sostenibilità

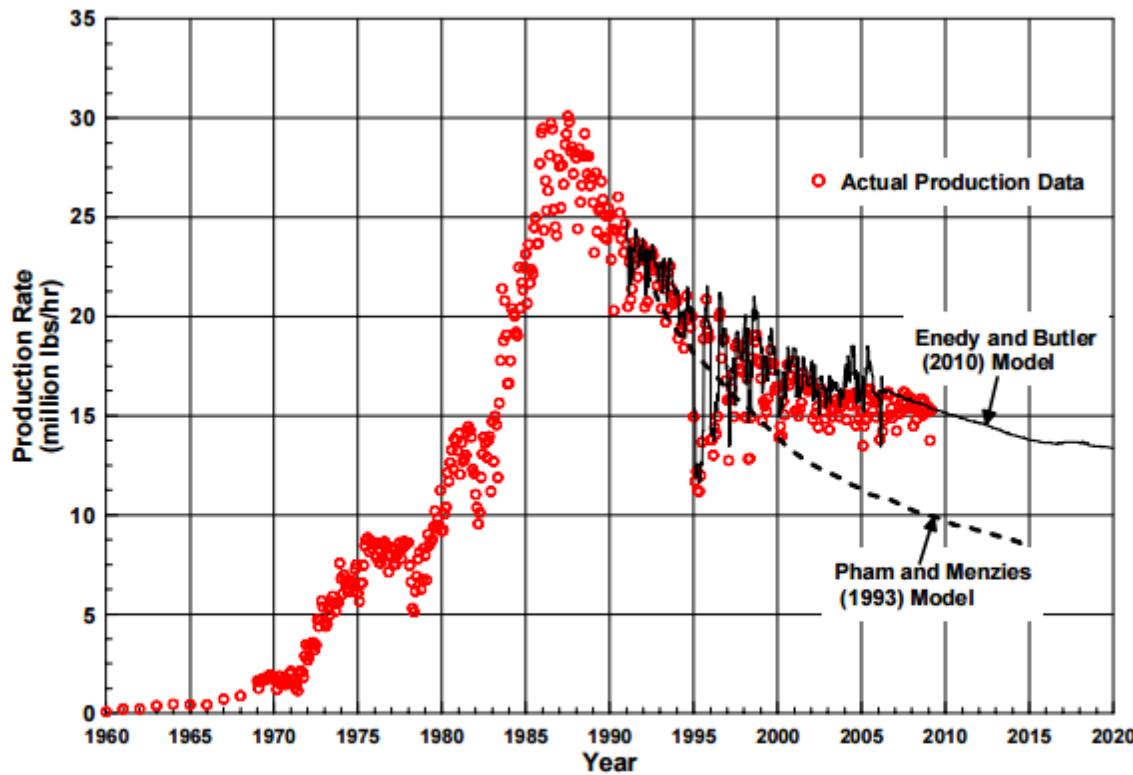


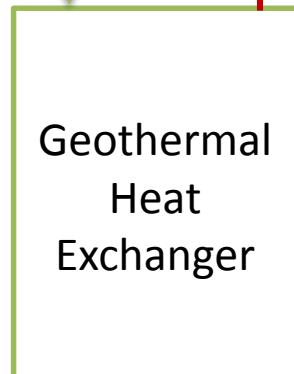
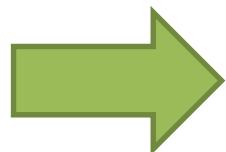
Figure 10: Production at The Geysers field – History and future (after Enedy and Butler, 2010).

Approccio integrato di sistema - multisorgente

Pozzo/i geotermico/i

\dot{m}_{geo} T_{geo}

Energia
geotermica



Integrazione

$T_{user,out}$

Back-up/Peaking
unit

$T_{user,sup}$

Carico
termico

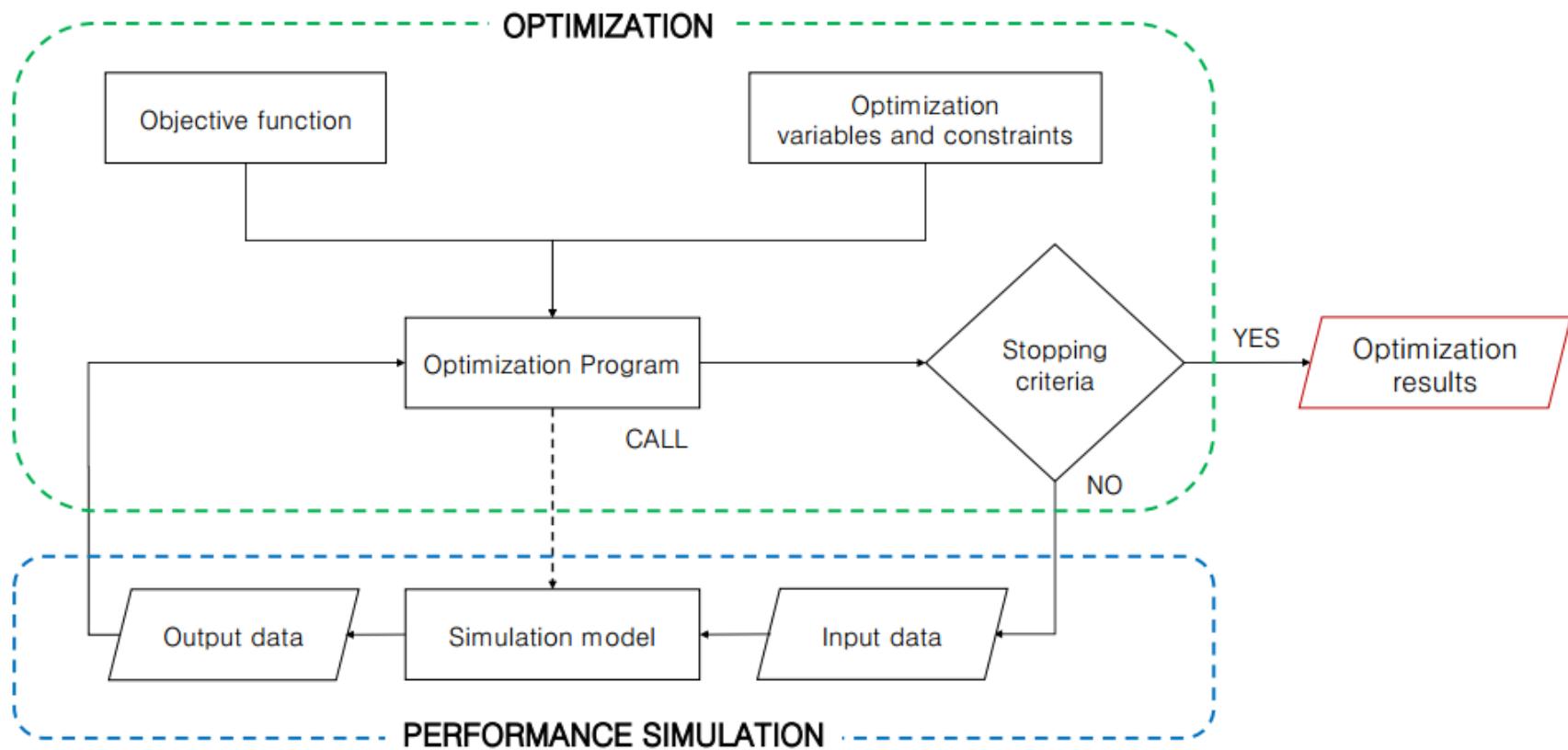
$T_{user,ret}$ \dot{m}_{user}



Optimized approach to systems design and management



“Simulation-based approach” for advanced/optimized design



Impostazione del problema di ottimizzazione e tecnica di risoluzione

Funzioni obiettivo

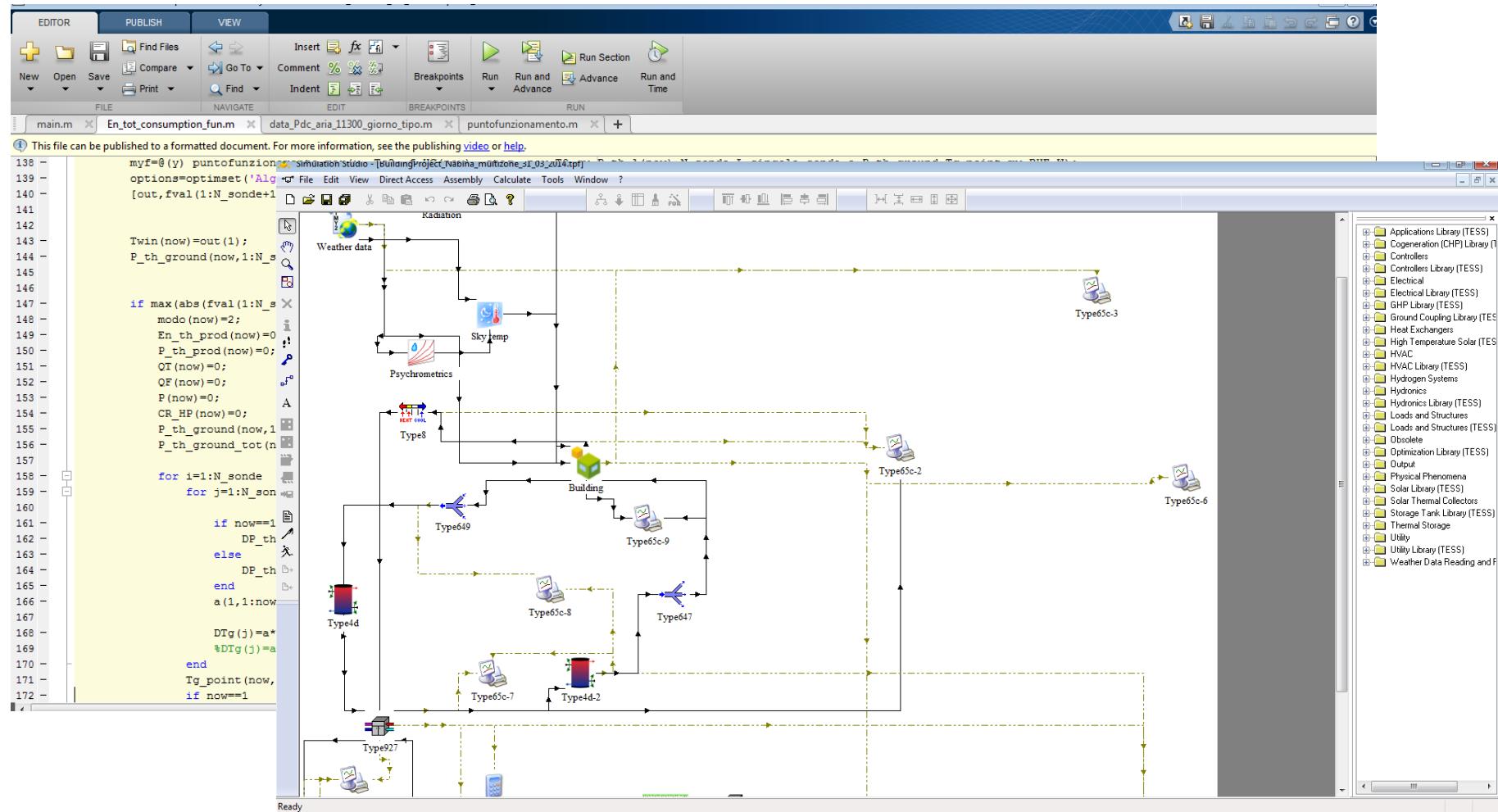
- Minimo consumo di energia
- Minimo costo di installazione
- Massima efficienza
- Minimo impatto ambientale
- Criteri multi-obiettivo

Algoritmi di ottimizzazione

- Algoritmi di ottimizzazione multivariabile vincolata
- Optimal control theory
- Dynamic programming
- Genetic algorithms
- Greedy algorithm

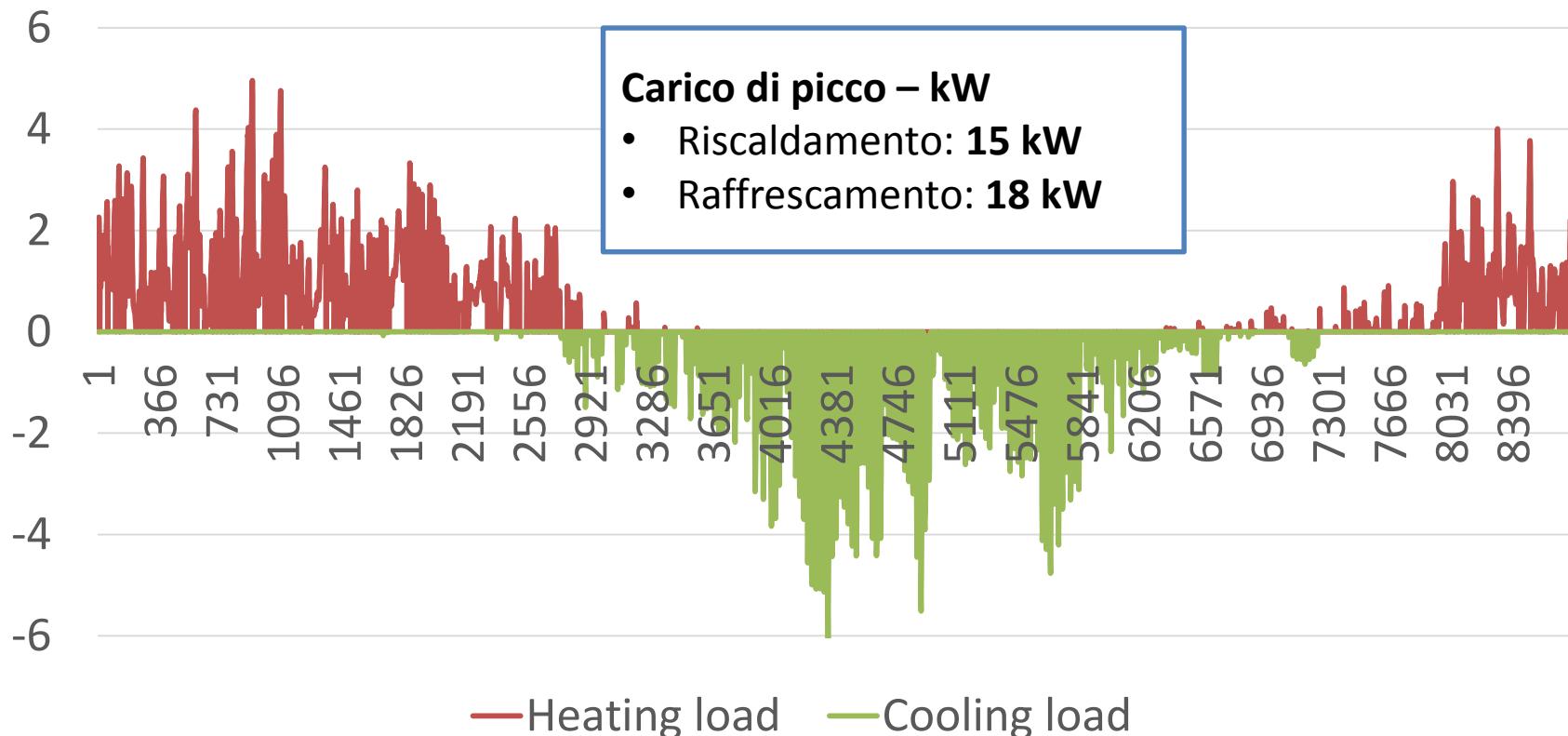
Paolo CONTI

Analisi costi-benefici dell'intera vita operativa

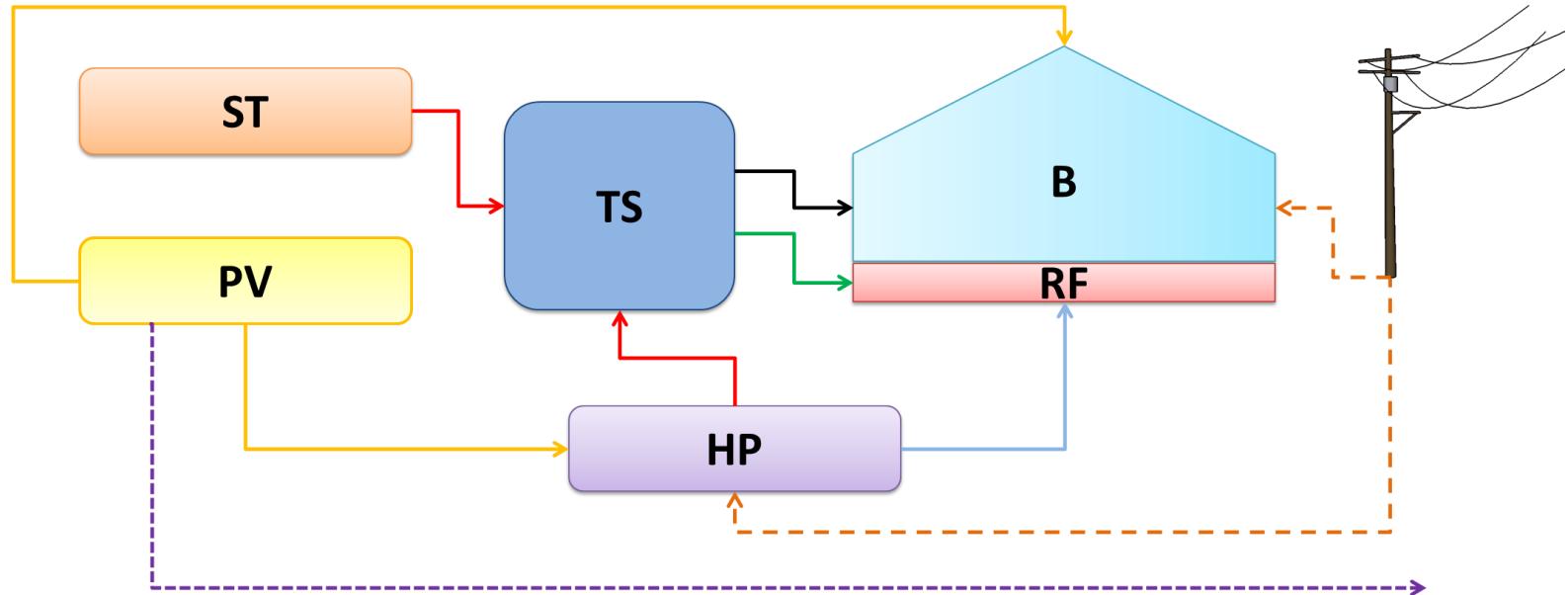


Analisi costi-benefici dell'intera vita operativa

Carico termico annuale - kW



Caso studio: struttura alberghiera rurale



- TS recharge
- Heating/cooling share from HP
- Heating load share from TS
- DHW load
- Electrical load share from PV
- Electrical load share from the grid
- Electrical energy to the grid

B	Building
DHW	Domestic hot water
HP	Heat pump
PV	Photovoltaic modules
RF	Radiant floor
ST	Solar thermal collectors
TS	Thermal storage



Ottimizzazione: impostazione del problema

Varialbili di ottimizzazione: n_{ST} – numero di pannelli ST - (da 0 a 8);
 n_{PV} – numero di pannelli FV - (da 0 a 60);
 V_{TS} – volume accumulo termico - (da 500 a 4000 l);
 $T_{TS,up}$ – set-point accumulo termico - (da 40 a 80 °C)

Strategia #1

Step 1: Individuazione della soluzione impiantistica di minor costo totale

$$C^{TOT} = c_{0,PV} n_{PV} + c_{0,ST} n_{ST} + c_{0,TS} V_{TS} + C_{0,HP} + \sum_{lifetime} \left\{ c_{el,in} \max[0; E_{el,grid}] + c_{el,out} \min[0; E_{el,grid}] \right\}$$

Costi installazione
Costi/Ricavi operativi

Step 2: Individuazione di soluzioni “quasi ottime” introducendo altri criteri di ottimizzazione (es. massimo risparmio energetico, minore investimento iniziale).

Strategia #2

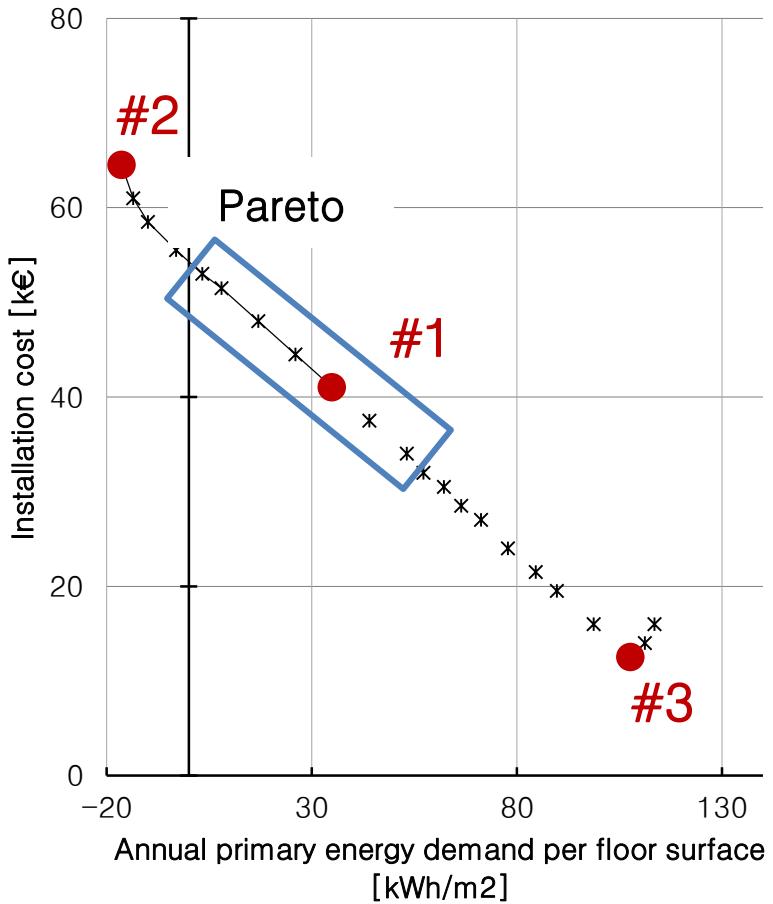
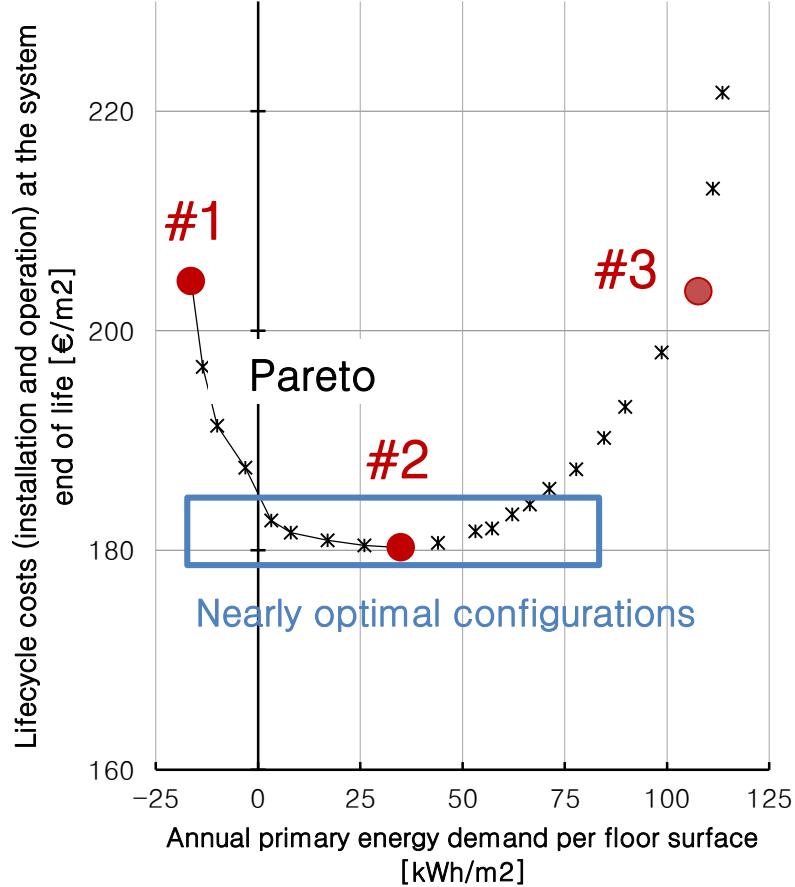
Individuazione dell'ottimo di Pareto tra C^{TOT} and consumo di energia primaria.

Ottimizzazione: impostazione del problema

Parametri economici:

- Costo pompa di calore, $C_{0,HP}$ 12,000 €;
- Costo unitario PV, $c_{0,PV}$ 700 €;
- Costo unitario ST, $c_{0,ST}$ 1 000 €;
- Costo accumulo termico, $c_{0,TS}$ 1 000 €/m³;
- Prezzo acquisto energia elettrica, $c_{el,in}$ 0.20 €/kWh;
- Costo vendita energia elettrica, $c_{el,out}$ 0.10 €/kWh.

Ottimizzazione: risultati



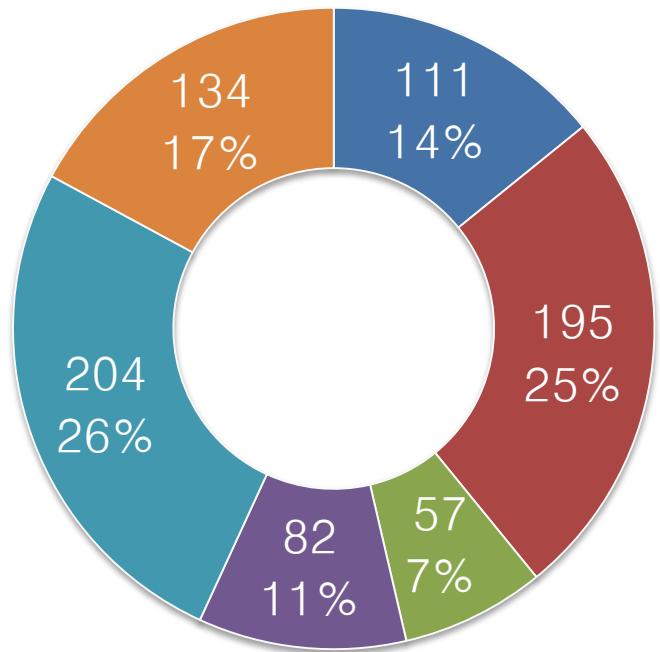
Ottimizzazione: risultati

Optimal configuration parameters			
# Test	n _{ST}	n _{PV}	V _{TS} [m ³]
1	4	35	0.50
2	8	60	4
3	0	0	0.50

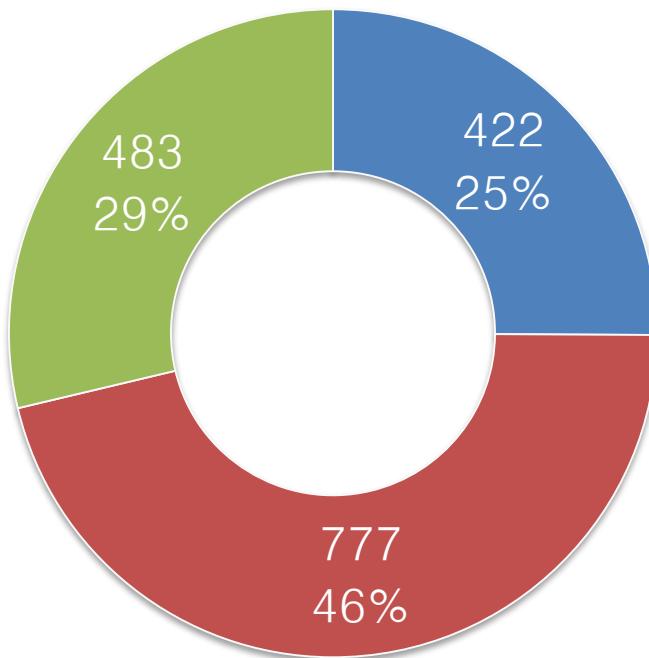
# Test	Objective function	Value	C ₀ [k€]	CoSE [€/kWh]	PER	FES	E _{in} ^{TOT} [kWh/m ² /y]
1	Lifecycle cost, C ^{TOT} [k€]	72.1	41.0	0.39	3.8	0.67	34.9
2	Net primary energy use, E _{in} ^{TOT} [kWh/m ² /y]	-16.3	66.0	0.42	< 0 (positive energy building)	1.15	-16.3
3	No-FER Configuration	-	12.5	-	-	0	107.7

Ottimizzazione: risultati

Annual El energy demand: 783 kWh



Annual Th energy demand: 983 kWh

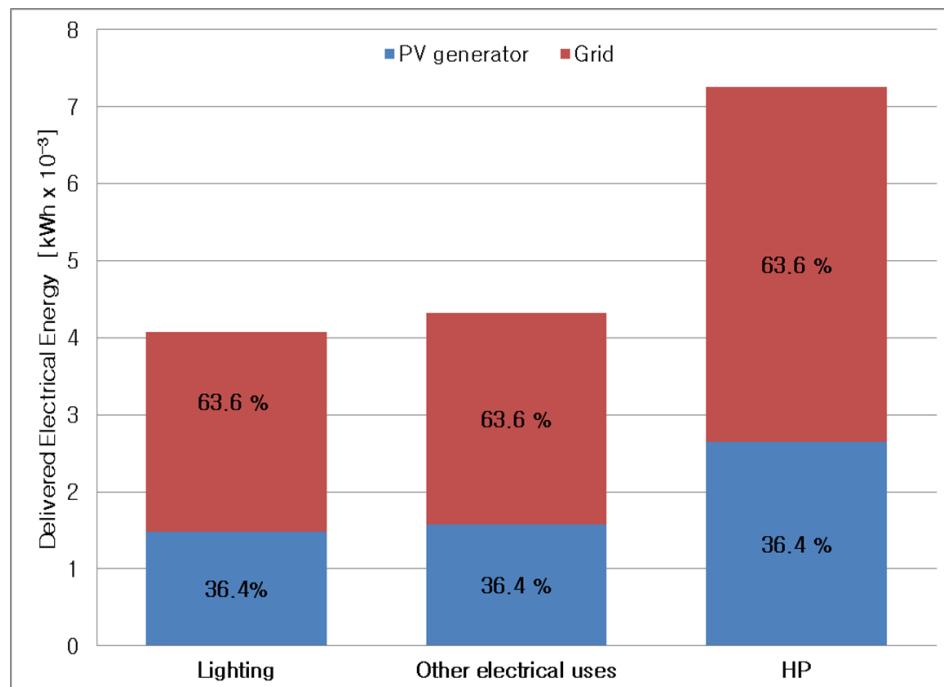
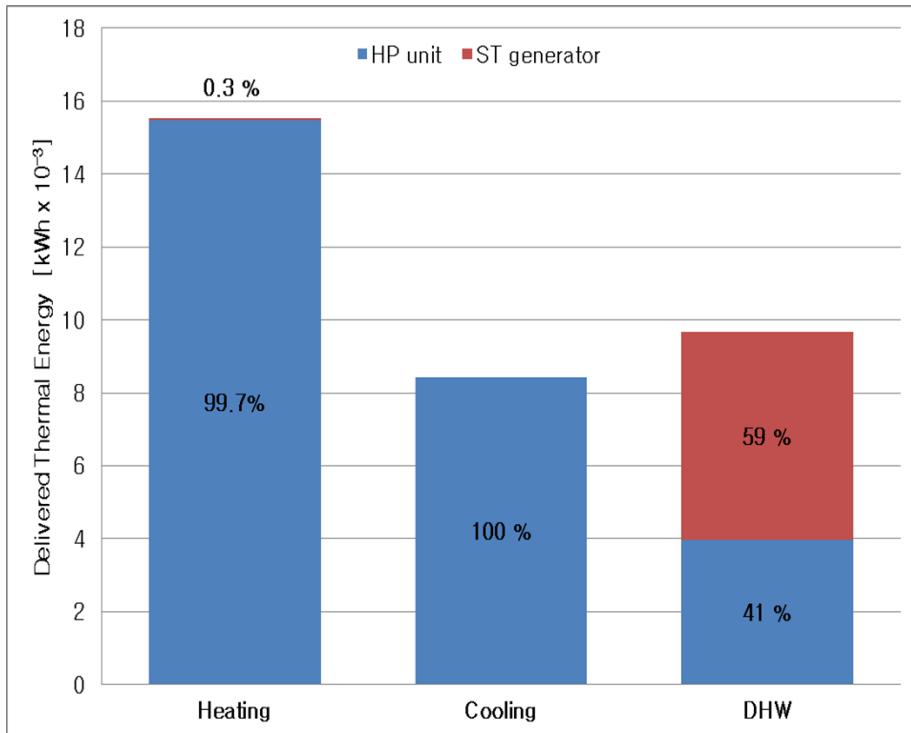


- Cooling
- DHW
- Lighting
- Heating
- Cooking
- Other electric uses

- Cooling
- Heating
- DHW

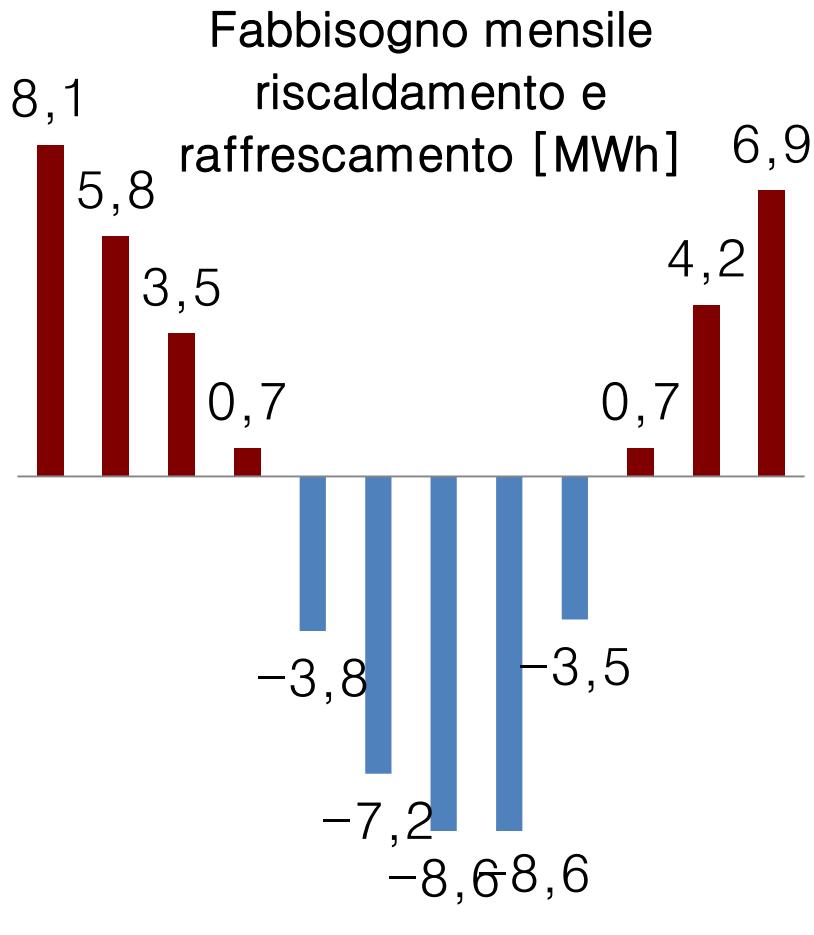
Ottimizzazione: risultati

Share of thermal and electrical uses delivered by each generator.



	Cooling	Heating	DHW
Overall COP (system COP) for each service	3.8	4.0	8.5

Caso studio: impianto GSHP risc/raff



Possibili alternative progettuali

		Conf# 1	Conf# 2	Conf# 3	Conf# 4
GHP	Heating DC	35	10.7	12.1	-
	Cooling DC	40.5	12.1	8.88	-
Boiler	-	-	23.9	23.9	33.5
Air chiller	-	-	29.1	33.5	44.2

- **CONF#1:** GHP sized on the peak load
- **CONF#2:** GHP sized on the average power demand of the design months
- **CONF#3:** GHP sized on the seasonal average power demand
- **CONF#4:** No GSHP solution

Ottimizzazione: impostazione problema

Parametri tecnici

- ✓ Pompa di calore elettrica
- ✓ BHE a doppia U
- ✓ Proprietà termofisiche
 - *Ground thermal conductivity* **1.7 W/(m·K)**
 - *Ground thermal diffusivity* **0.68 mm²/s**
 - *BHE diameter* **15 cm**
 - *BHE pipe diameter* **2.62-3.2 cm**
 - *Spacing between BHEs* **8 m**
 - *Grouting thermal conductivity* **1.7 /(m·K)**
 - *BHE thermal resistance* **0.062m·K/W**

Parametri economici

- ✓ Prezzi energia
 - *Energia elettrica* **0.2 €/kWh**
 - *Energia termica* **0.08 €/kWh**

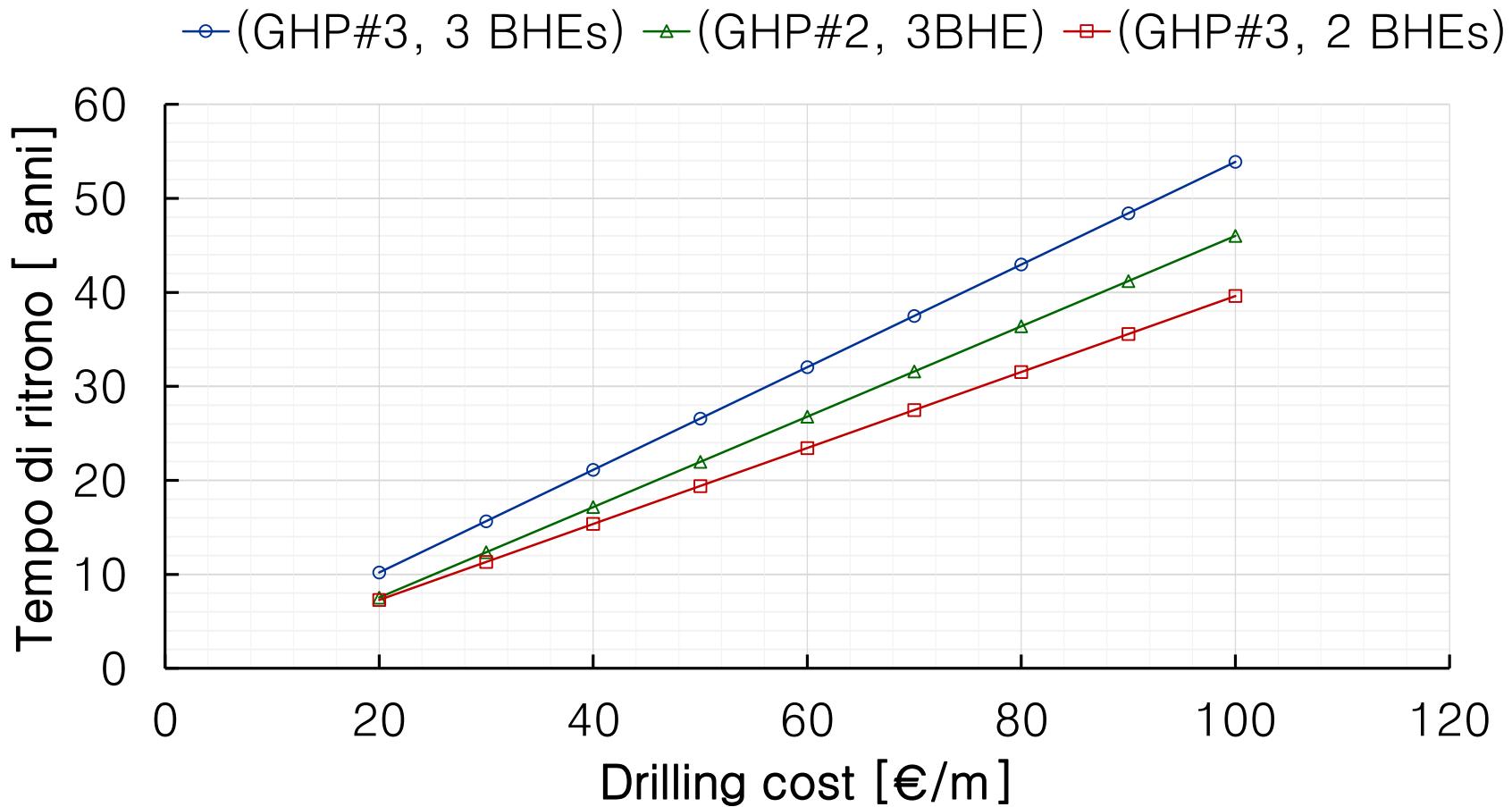
- ✓ Prezzi acquisto – k€

GHP #1	18.5	Boiler #2	4.0
GHP #2	5.2	Boiler #3	4.6
GHP #3	4.0	Boiler #4	5.0
Air unit #2	8.5		
Air unit #3	10.0		
Air unit #4	14.0		

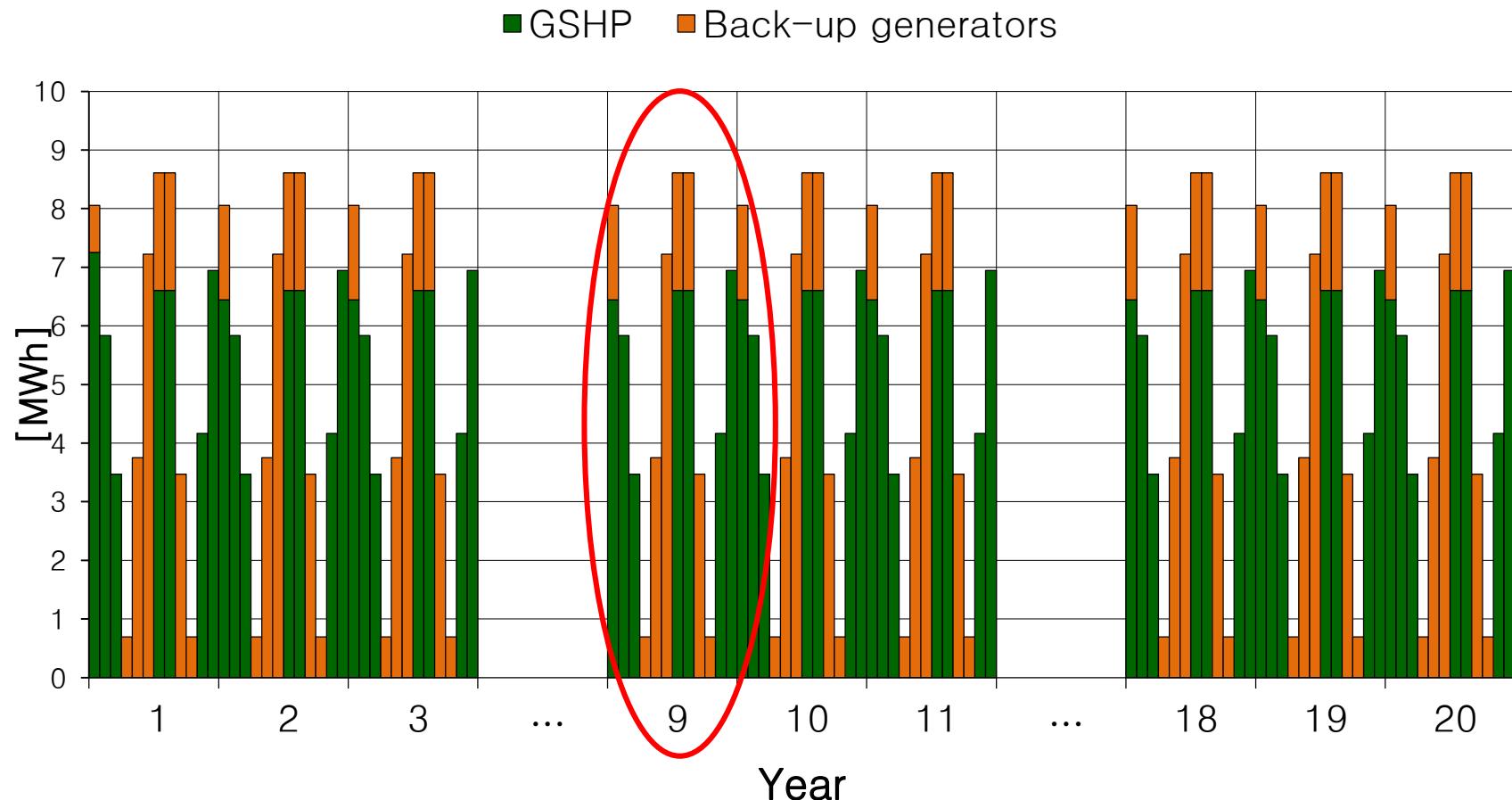
Ottimizzazione: risultati

	GHP#2 – 3 BHEs	GHP#3 – 3 BHEs	GHP#3 – 2 BHEs	GHP#1 – 7 BH
Total length of BHEs [m]	100 x 3	100 x 3	100 x 2	100 x 7
f_H (heating season)	0.94	0.85	0.65	1
f_C (cooling season)	0.84	0.23	0.23	1
SCOP	3.42	3.46	3.59	2.53
SEER	3.52	3.55	3.50	3.40
CR (winter/summer)	0.39 / 0.65	0.61 / 0.56	0.47 / 0.56	0.14 / 0.24
Condensing boiler efficiency	1.09	1.09	1.09	-
SEER Air chiller	1.88	3.33	3.33	-
CR Air chiller	0.29	0.81	0.81	-
Heat flow per unit length (winter/summer) [W/m]	19.4 / 34.5	17.2/20.6	19.7/31.6	7.3/10.3
Primary energy consumption (after 20 years) [MWh]	956 (-19.2%)	917 (-22.5%)	931 (-21.3%)	1 055 (-10.8%)

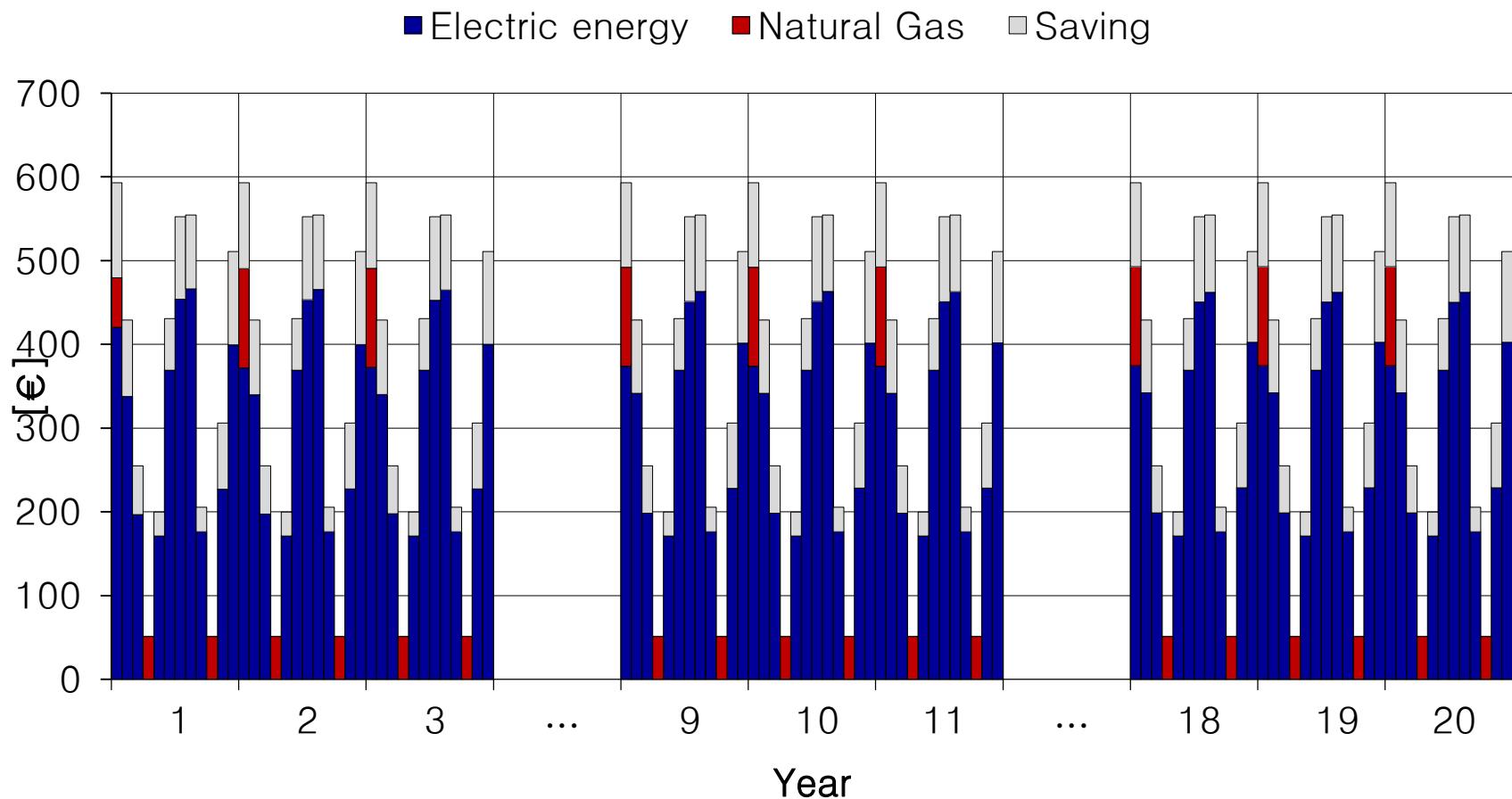
Ottimizzazione: risultati



Ottimizzazione: risultati



Ottimizzazione: risultati



Conclusioni

- Le moderne tecniche di progettazione/gestione dei sistemi energetici si sono indirizzate verso la ricerca di soluzioni a **alta efficienza** e all'**utilizzo di fonti rinnovabili**.
- Necessità di un **nuovo approccio progettuale** e di gestione che sia basato sull'**efficienza energetica** (prestazioni), sulla **fattibilità economica** (bassi costi) e la **sostenibilità ambientale** (caratteristiche delle fonti energetiche).
- Analisi **costi-benefici**. Non si cerca più la condizione “peggiore”, ma la **condizione ottima**.
- Valutazione/simulazione di tutta la **vita operativa** del sistema.



UNIVERSITÀ DI PISA

Paolo CONTI

paolo.conti@for.unipi.it

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!