

# **Dottorato di ricerca in Energia e Ambiente**

***Potenzialità e sviluppi dei sistemi di generazione distribuita nel settore civile. Analisi di producibilità su scala di laboratorio e su scala urbana.***

**Candidato : Angelo Albo**

**Docenti Guida:  
Prof. Livio de Santoli  
Prof. Fabrizio Cumo**

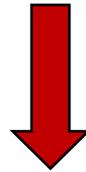


**SAPIENZA**  
UNIVERSITÀ DI ROMA

# Obiettivi

## Obiettivi

Analisi dei sistemi di generazione elettrica di piccola taglia, per applicazioni civili. Studio delle potenzialità di diffusione nel settore residenziale dei sistemi di micro-cogenerazione.



## Fasi della ricerca

- I. Analisi della diffusione dei sistemi di generazione distribuita;
- II. Analisi sperimentale sistema di micro-cogenerazione;
- III. Confronto tecnico economico tra i sistemi di micro-cogenerazione e le soluzioni impiantistiche tradizionali.

# Generazione distribuita

## Definizioni

### **I. Generazione distribuita:**

*“impianti di generazione connessi al sistema di distribuzione” (Direttiva 2009/72/CE);*

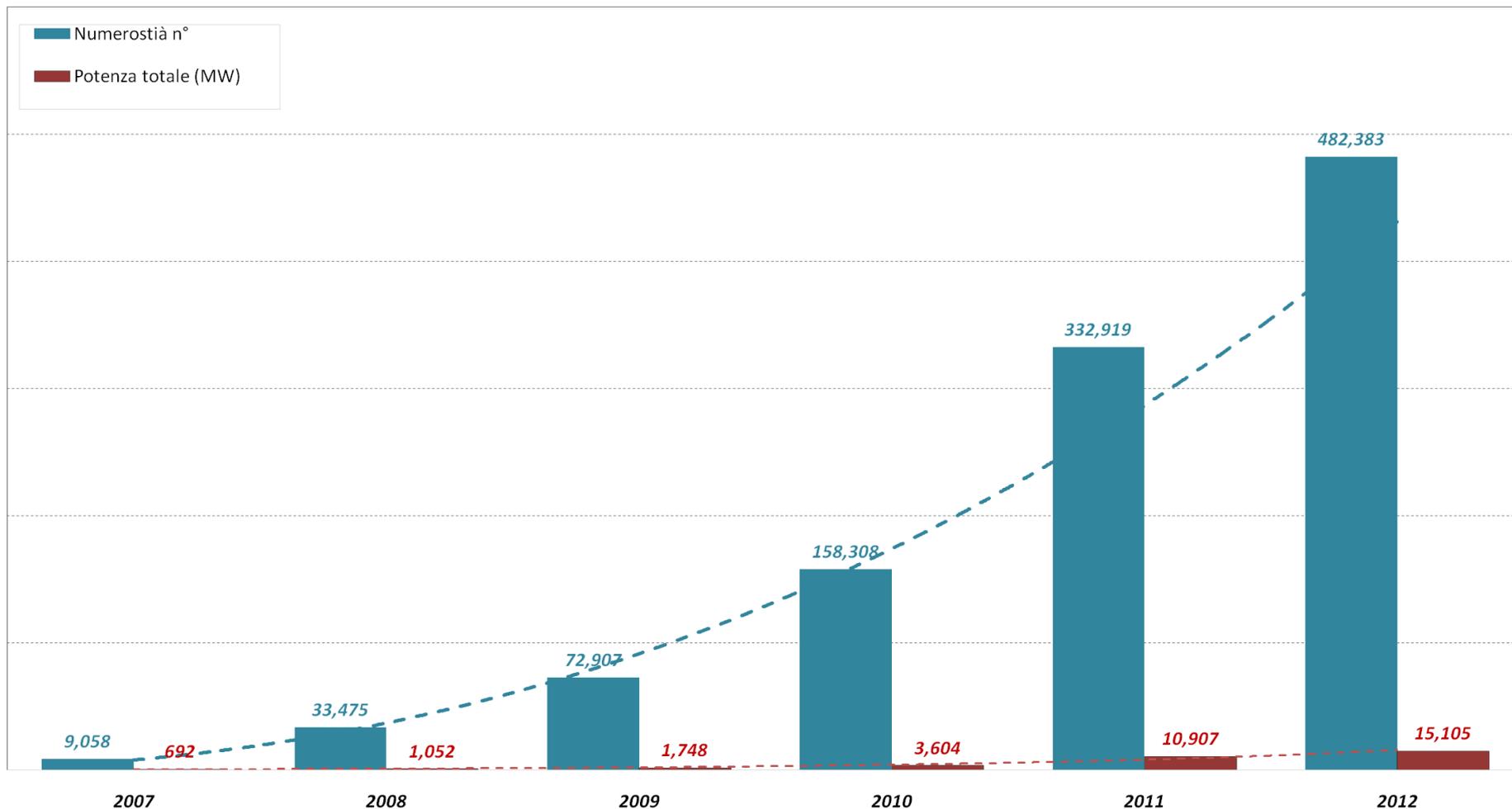
### **II. Piccola generazione (PG)**

*“..impianto per la produzione di energia elettrica, anche in assetto cogenerativo, con capacità di generazione non superiore a 1 MW; ” (Decreto Legislativo n. 20/07 )*

### **III. Micro generazione (MG)**

*“..impianto per la produzione di energia elettrica, anche in assetto cogenerativo, con capacità di generazione non superiore a 50 kWe ; ” (Decreto Legislativo n. 20/07 )*

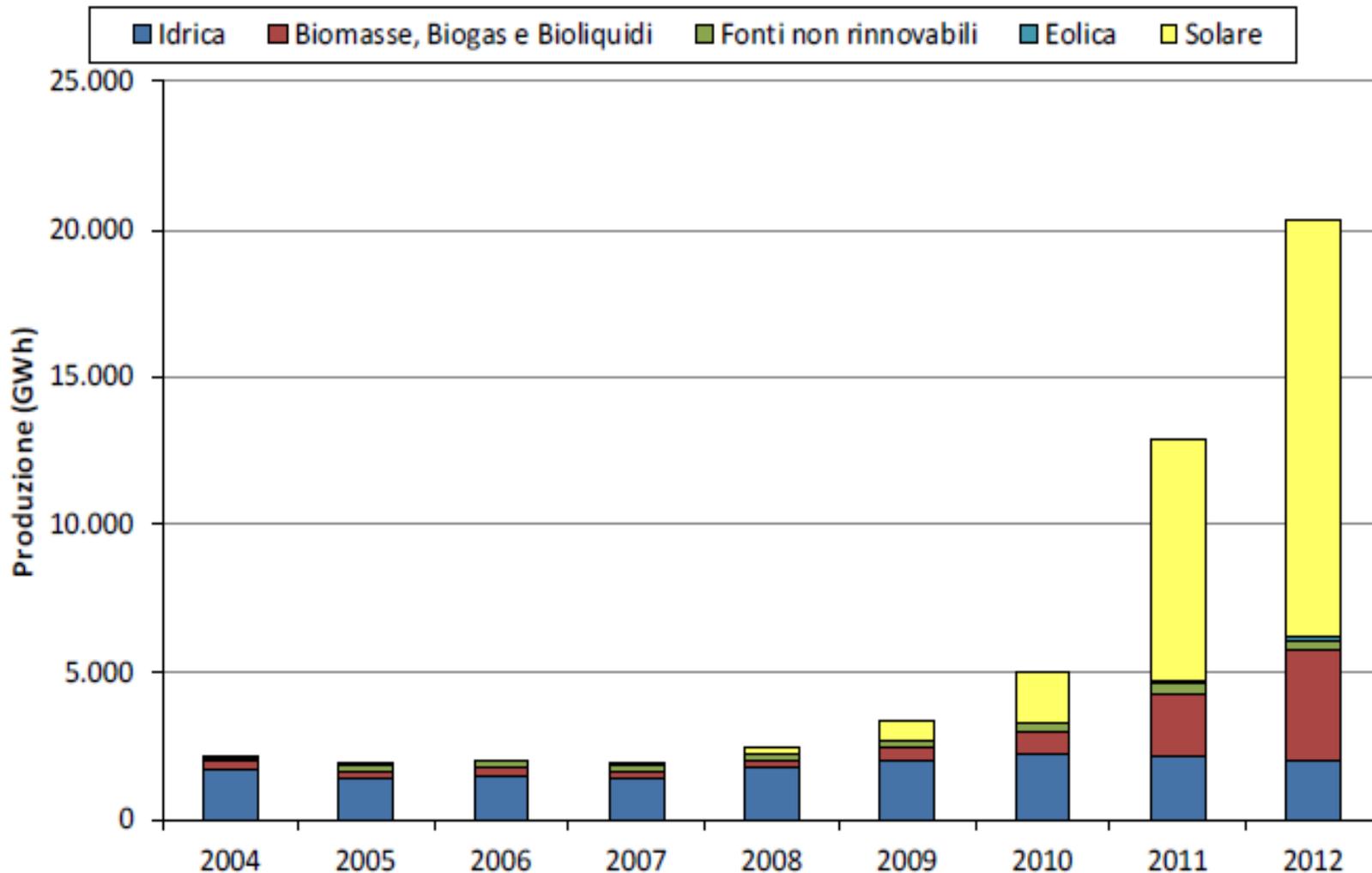
# Diffusione dei sistemi di piccola generazione distribuita



**Osservazioni:** in ambito nazionale si è riscontrato:

- ✓ Incremento esponenziale del numero di impianti;
- ✓ Incremento potenza totale installata modesta;

# Tecnologie di piccola generazione distribuita



**Osservazioni:** dati statici desunti da “RELAZIONE ANNUALE SULLA COGENERAZIONE IN ITALIA , ANNO 2012.” Aprile 2014. Percentuale di risparmio stimate in base alle caratteristiche degli impianti censiti dal GSE

# Tecnologie di piccola generazione distribuita

## Tecnologie con maggior potere di diffusione in ambito urbano

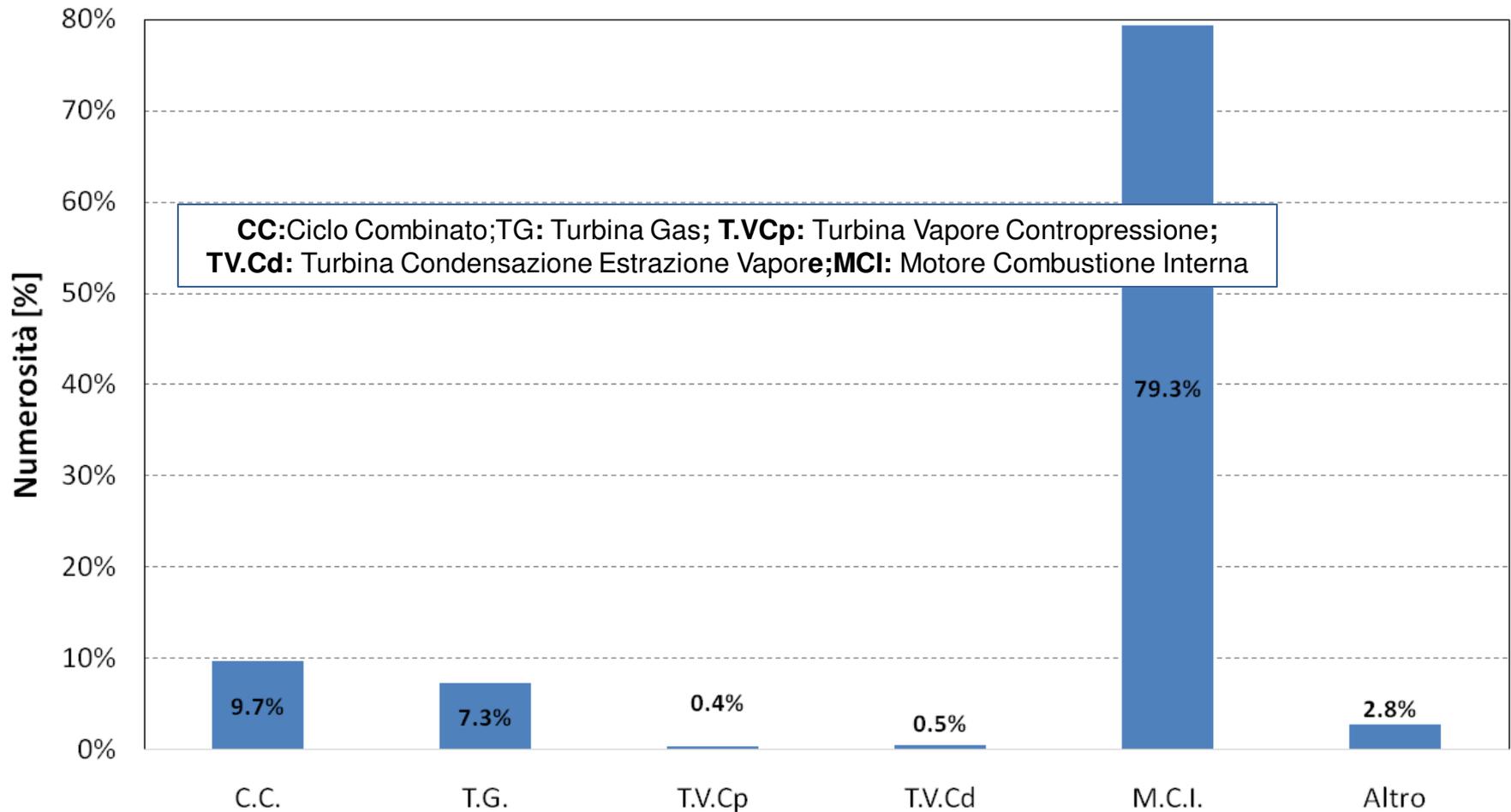
### **Rinnovabili : *Fotovoltaico***

1. Tecnologia consolidata;
2. Elevata producibilità annua sul territorio nazionale;
3. Ampiamente diffusa su tutto il territorio.

### **Non rinnovabili: Cogenerazione mediante motori a combustione interna (MCI)**

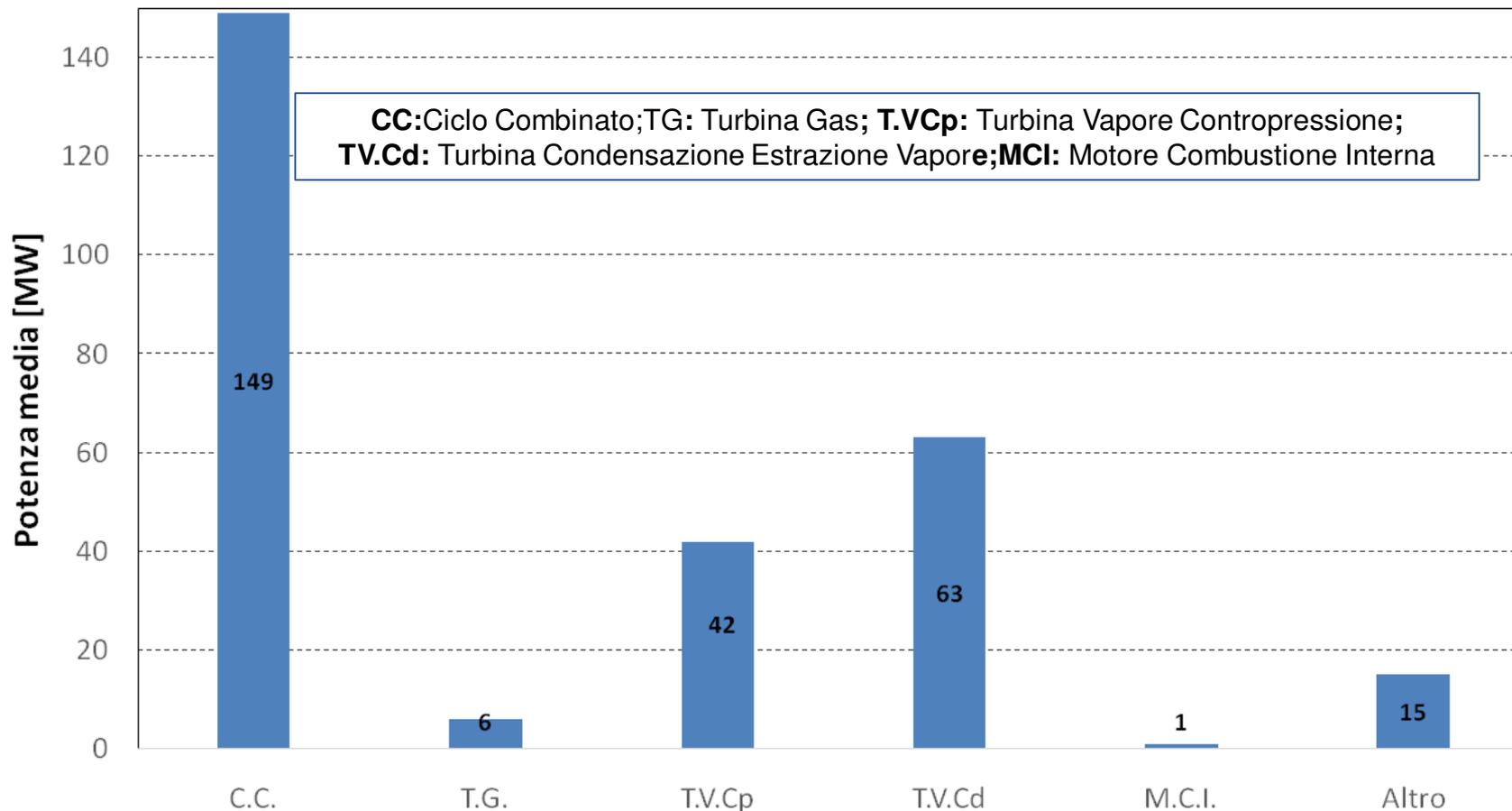
1. Tecnologia stabile ma poco diffusa in Italia;
2. Elevati risparmi di energia primaria, in ottimali condizioni di lavoro;
3. Potenziale diffusione su tutto il territorio nel caso di alimentazione a gas naturale.

# Ruolo della cogenerazione



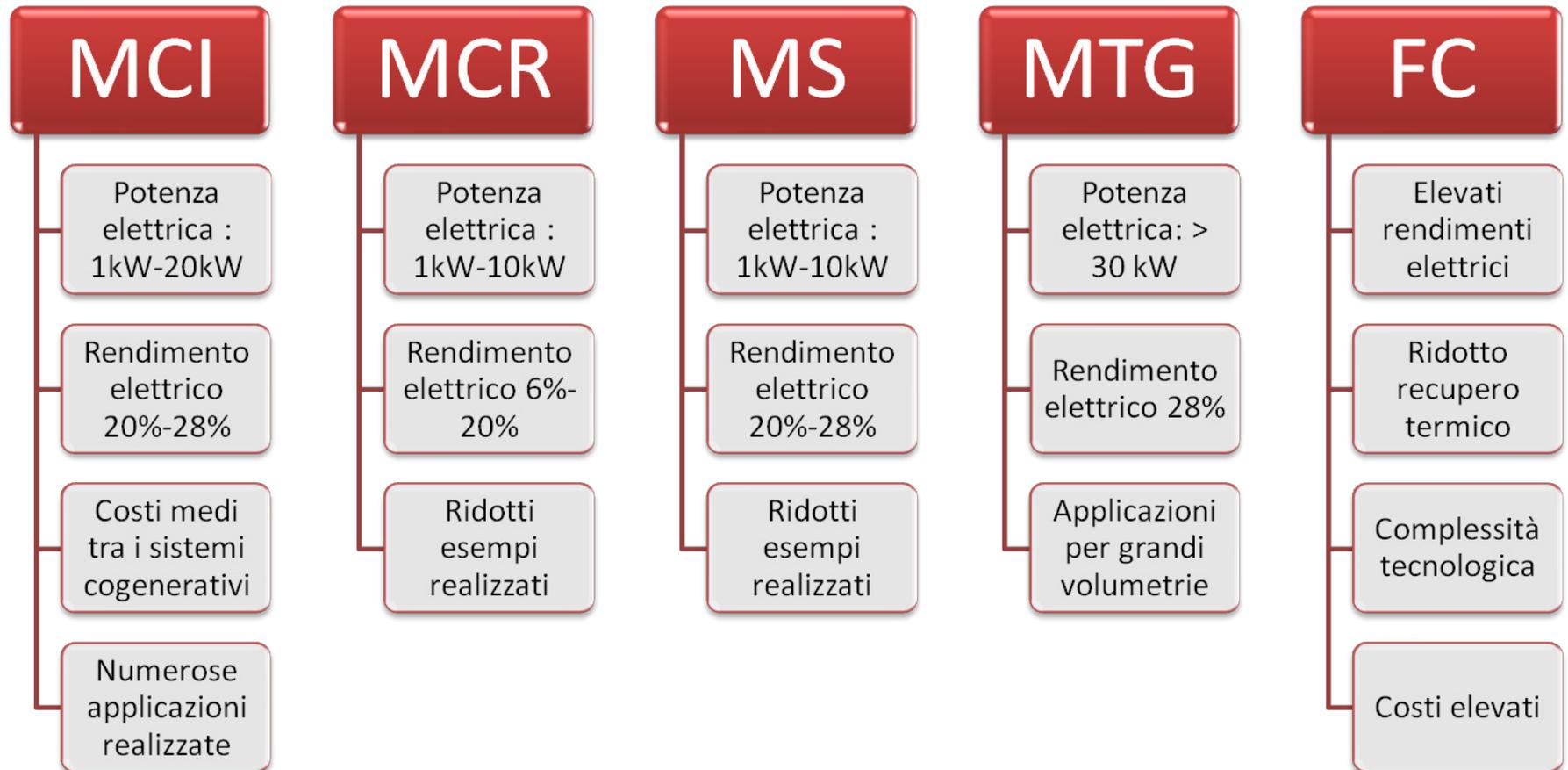
**Osservazioni:** dati statici desunti da “RELAZIONE ANNUALE SULLA COGENERAZIONE IN ITALIA , ANNO 2012.” Aprile 2014. Numerosità stimate in base alle caratteristiche degli impianti censiti dal GSE

# Ruolo della cogenerazione

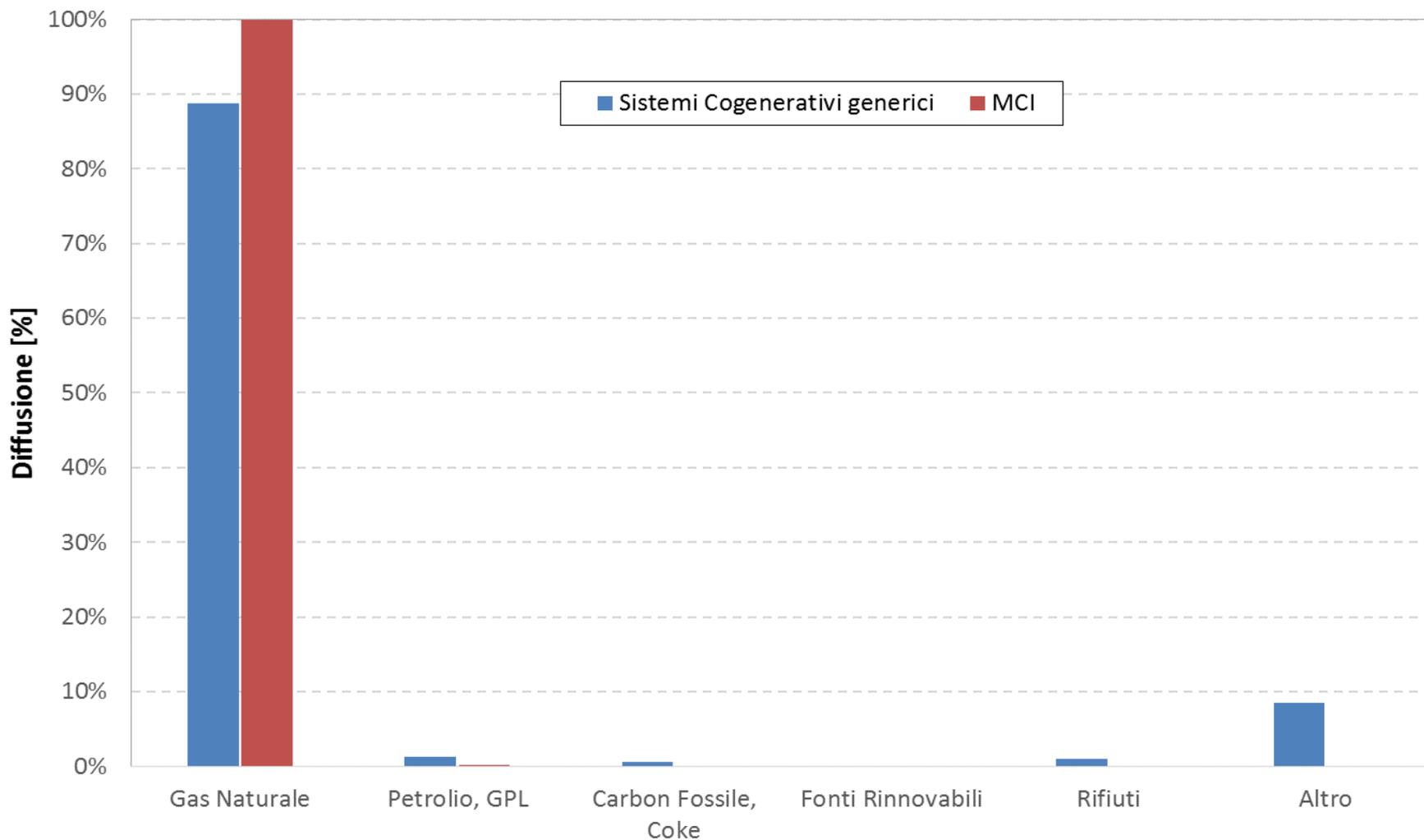


**Osservazioni:** dati statici desunti da “RELAZIONE ANNUALE SULLA COGENERAZIONE IN ITALIA , ANNO 2012.” Aprile 2014. Potenze medie installate stimate in base alle caratteristiche degli impianti censiti dal GSE

# Tecnologie di micro-cogenerazione



# Fonti energetiche in campo cogenerativo



**Osservazioni: dati statici desunti da "RELAZIONE ANNUALE SULLA COGENERAZIONE IN ITALIA , ANNO 2012." Aprile 2014.**

# Analisi sperimentale di micro-cogeneratore

## Apparato sperimentale

Dissipatore



Quadro di parallelo



Gruppo di Riempimento



μCHP

Adduzione combustibile



# Caratteristiche del micro-cogeneratore

## Tipo di motore

- Cilindrata: 499 cm<sup>3</sup>
- Ciclo Otto
- Alimentazione a Gas naturale
- Numero di metano > 80

## Potenze erogate

- Potenza termica 6-15 kW
- Potenza elettrica: 2-5 kW

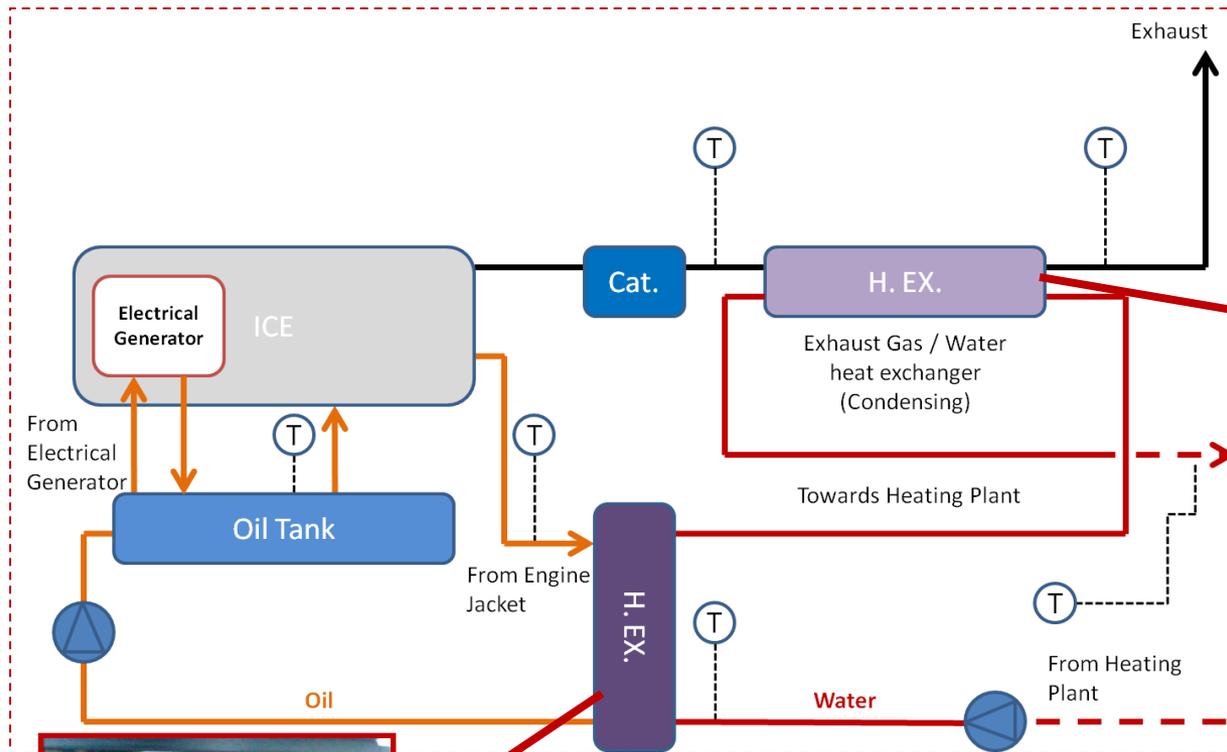
## Efficienze

- Rendimento termico: 76 %
- Rendimento elettrico: 26 %

## Temperature di lavoro

- Temperatura circuito utente in uscita: 70 °C
- Range Temperatura circuito utente in entrata : 25°C-60°C

# Sistema di recupero termico del $\mu$ CHP



# Analisi sperimentale micro-cogeneratore

## Fasi di sperimentazione

Alimentazione a  
Gas Naturale

Consumo  
combustibile

Potenze  
termiche ed  
elettriche  
erogate

Rendimento  
termico ed  
elettrico

Alimentazione a  
Idrometano  
(15 % Vol. di H<sub>2</sub>)

Consumo  
combustibile

Potenze  
termiche ed  
elettriche  
erogate

Rendimento  
termico ed  
elettrico

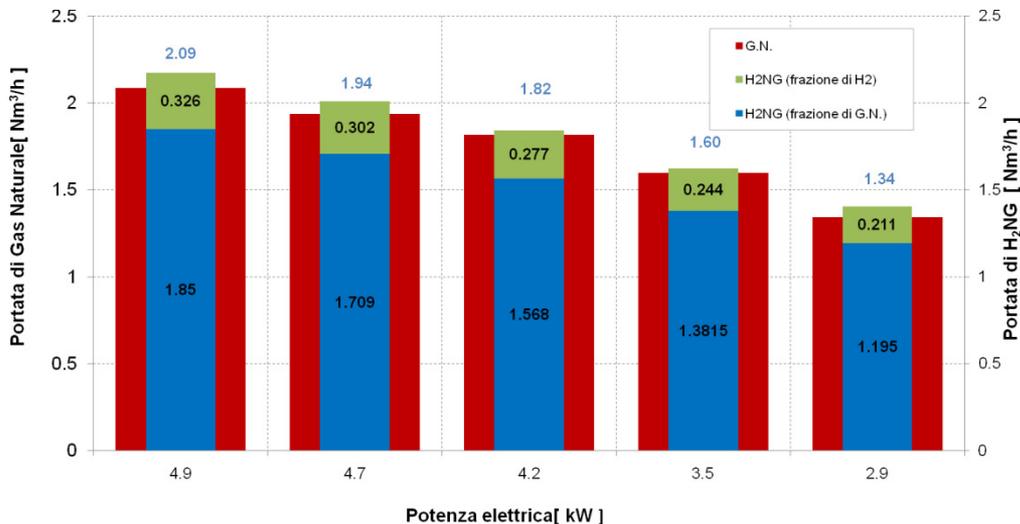
Confronto

Variazione di  
portata e di  
potenza termica  
del combustibile

Variazione  
potenze  
termiche  
recuperabili

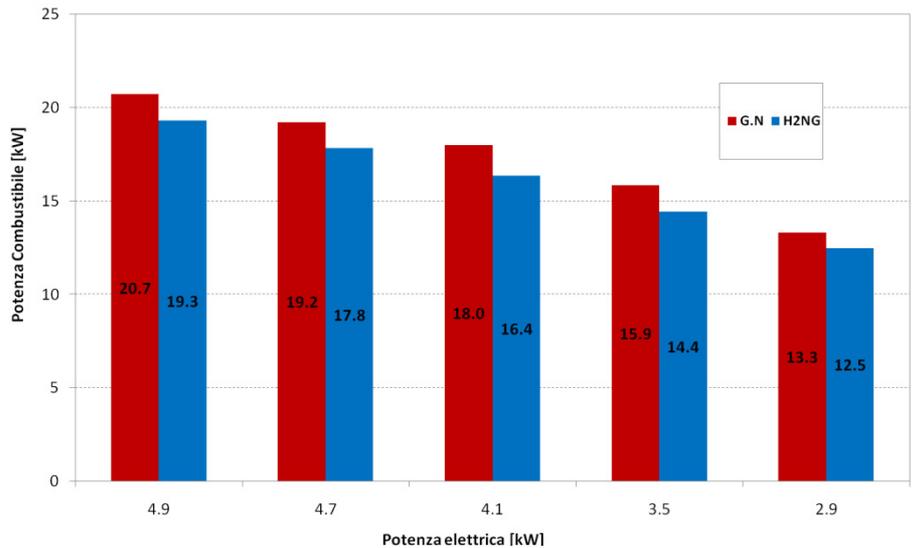
Variazione dei  
rendimenti  
termici ed  
elettrici

# Analisi sperimentale micro-cogeneratore



*Portate dei combustibili al variare del carico*

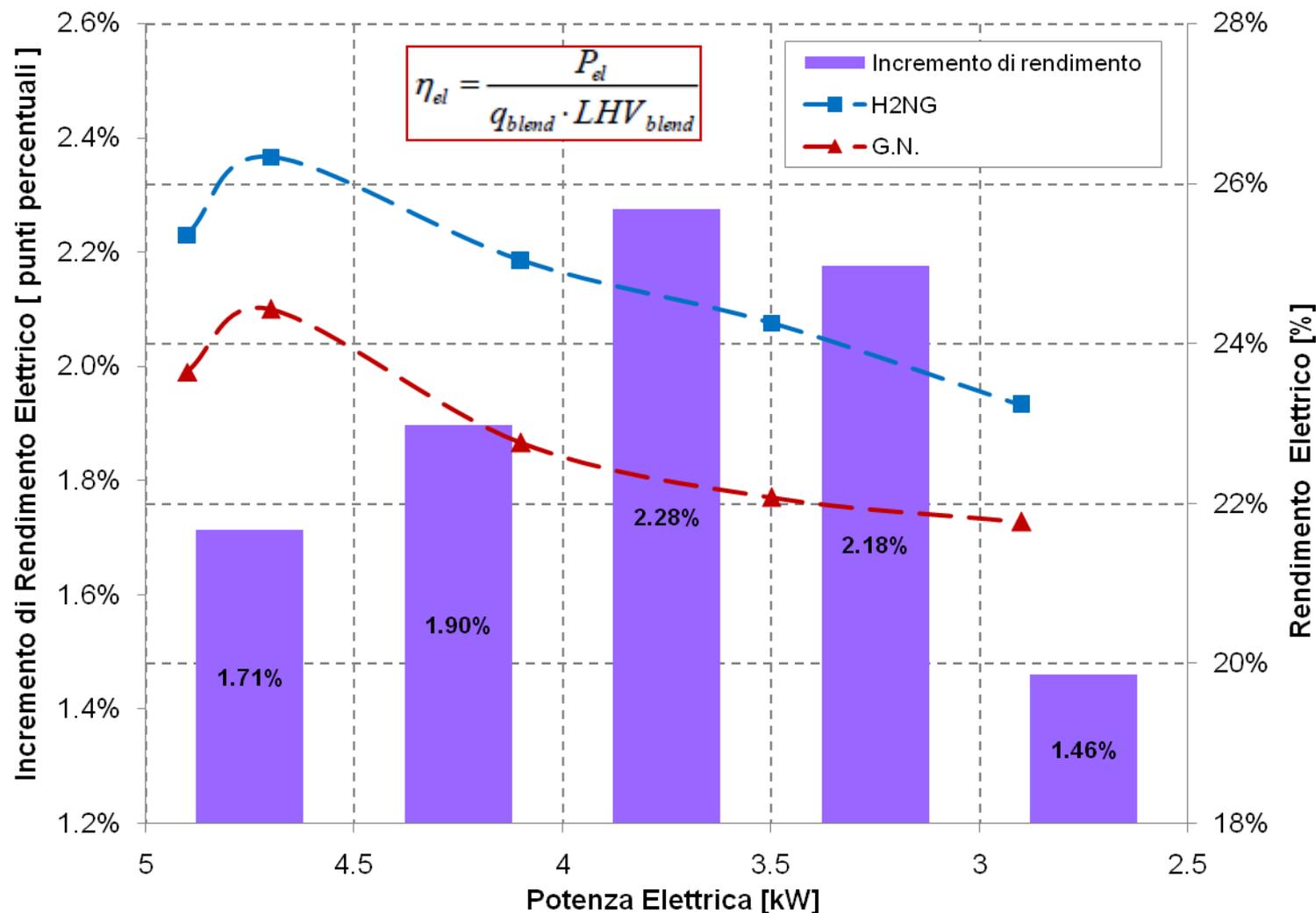
*Potenza dei combustibili al variare del carico*



## Osservazioni:

- La portata di idrometano è maggiore di quello del gas naturale in ogni condizione di carico;
- Il contenuto energetico dell'idrometano è inferiore a quella del Gas Naturale in ogni condizione di carico.

# Analisi sperimentale micro-cogeneratore

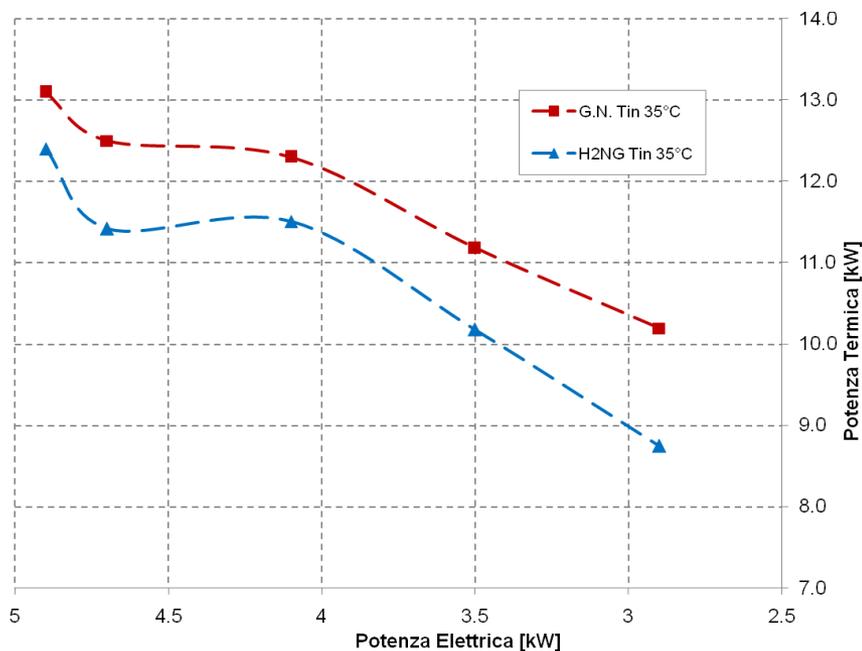


## Osservazioni:

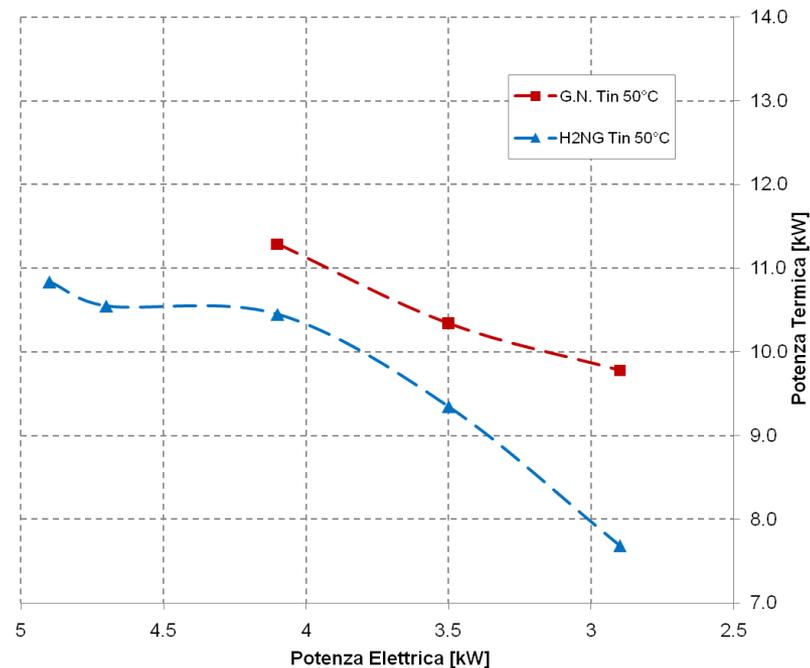
L'utilizzo di idrometano conduce a benefici in termini rendimento elettrico. Tali risultati non sono influenzati dalla temperatura del fluido termovettore del circuito utilizzatore.

# Analisi sperimentale micro-cogeneratore

## Potenza Termica Recuperata



*Temperatura di ritorno del fluido termovettore pari a 35 °C*

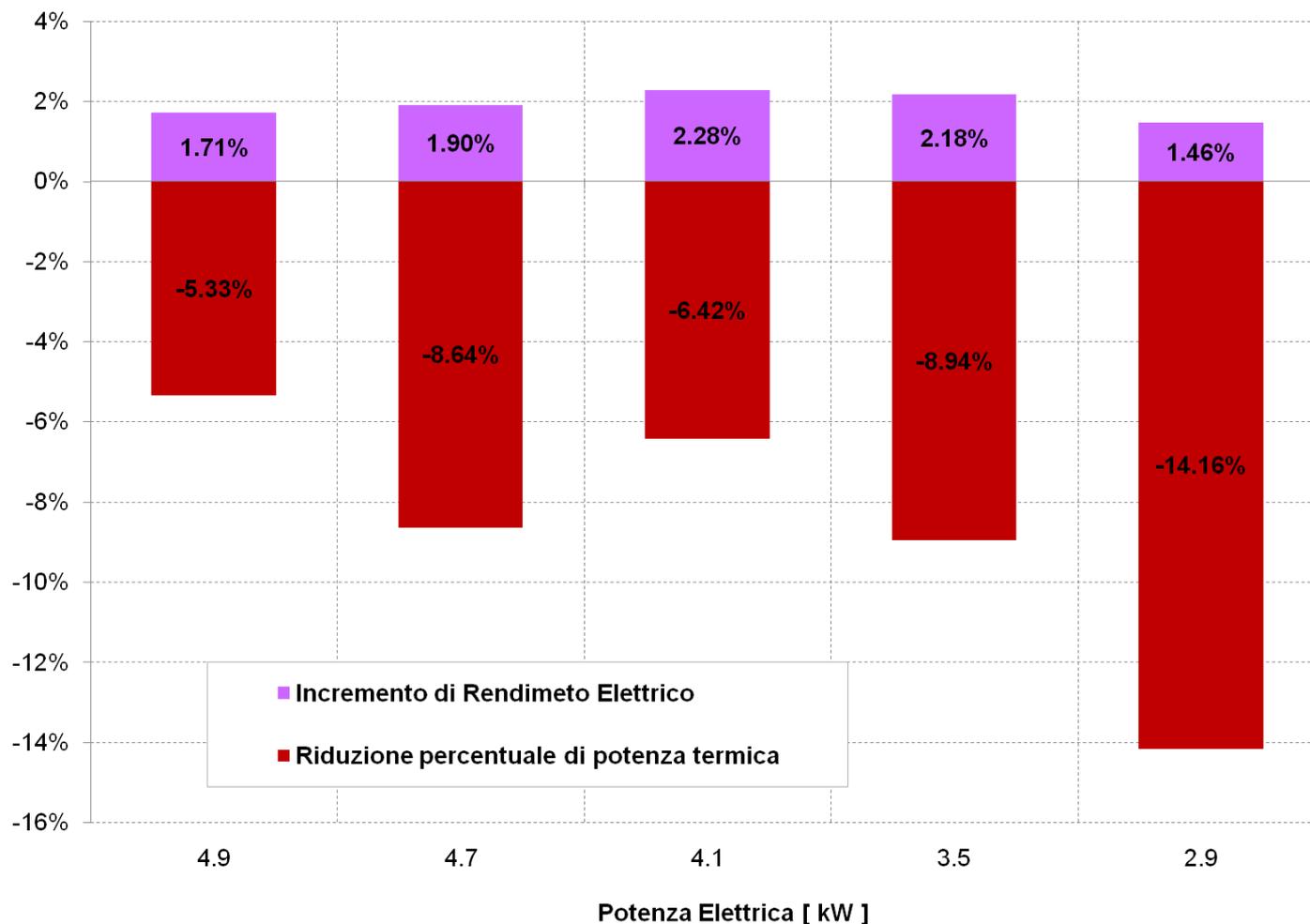


*Temperatura di ritorno del fluido termovettore pari a 50 °C*

**Osservazioni:** La minor densità energetica dell'idrometano conduce ad una minore potenza termica recuperabile, in ogni condizione di carico, sia a bassa sia ad alta temperatura del fluido termovettore di ritorno al  $\mu$ CHP.

Nel caso di alimentazione a gas naturale, per le alte temperature, il sistema  $\mu$ CHP raggiunge la temperatura massima consentita del circuito refrigerante, con conseguente impossibilità di completare la curva di funzionamento delle alte temperature.

# Analisi sperimentale micro-cogeneratore

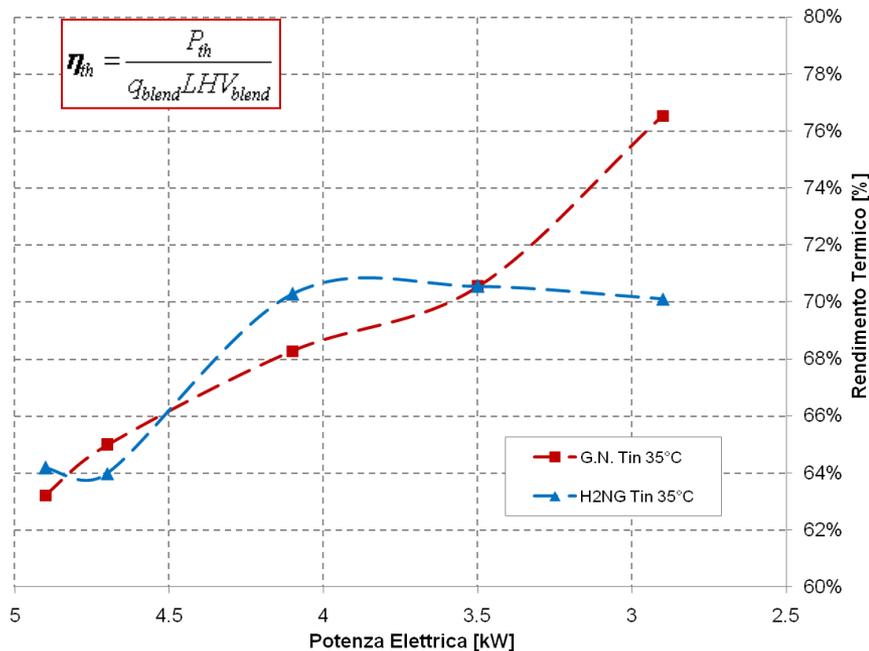


*Temperatura di ritorno del fluido termovettore pari 35 °C*

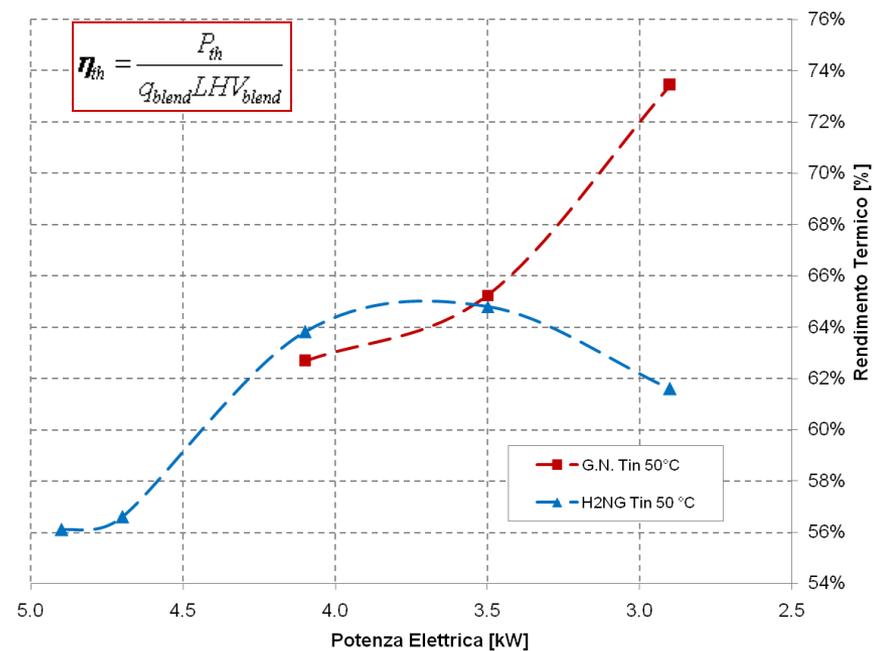
**Osservazioni:** Focalizzando l'attenzione nella condizione di lavoro con massimo recupero di calore latente, si osserva una riduzione percentuale di potenza recuperata compresa tra il 5.33 % e il 14.16% nel caso di alimentazione ad Idrometano.

# Analisi sperimentale micro-cogeneratore

## Rendimento termico



Temperatura di ritorno del fluido termovettore pari 35 °C



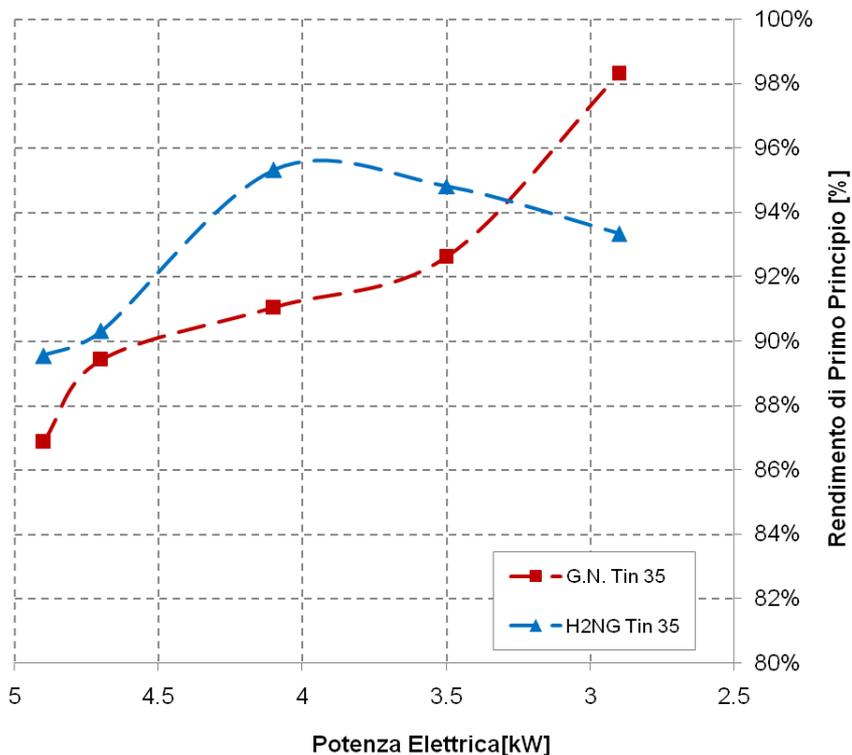
Temperatura di ritorno del fluido termovettore pari 50 °C

### Osservazioni:

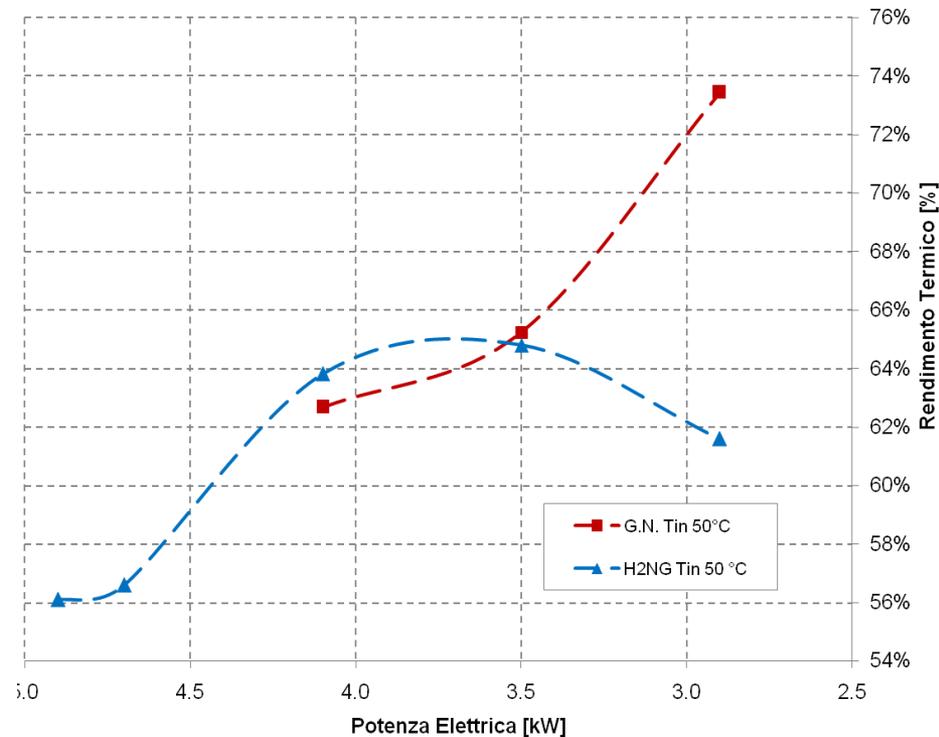
- A carico parziale il rendimento termico è sempre maggiore nel caso di alimentazione a gas naturale.
- Nei restanti valori del carico elettrico, non si riscontrano differenze significative di rendimento termico.
- Nel caso di alimentazione a gas naturale, per le alte temperature, il sistema  $\mu$ CHP raggiunge la temperatura massima consentita del circuito refrigerante, con conseguente impossibilità di completare la curva di funzionamento delle alte temperature.

# Analisi sperimentale micro-cogeneratore

## Rendimento di primo principio



*Temperatura di ritorno del fluido termovettore pari 35 °C*



*Temperatura di ritorno del fluido termovettore pari 50°C*

### Osservazioni:

In termini di Rendimento di Primo Principio, a causa dell'incremento di rendimento elettrico si ha un conseguente incremento di rendimento globale del sistema. Questo effetto è riscontrabile sia a bassa sia ad alta temperatura del fluido termo vettore di ritorno al CHP.

# Analisi tecnico-economica

## Modello energetico utenza residenziale priva di sistema di generazione elettrica (M1)

### Tipologia

- Utenza bifamiliare
- Superficie utile: 2x250 m<sup>2</sup>
- Zona Climatica D; Centro Italia

### Fabbisogno termico riscaldamento

- Fabbisogno energia primaria per riscaldamento: 79 kWh/(m<sup>2</sup> anno);

### Fabbisogno elettrico

- Fabbisogno di energia elettrica per usi domestici: 25 kWh/(m<sup>2</sup> anno);

### Sistema alimentazione

- Energia Termica : caldaia a condensazione (rendimento termico di primo principio: 103 %)
- Energia Elettrica: rete nazionale ( Potenza impegnata: 4.5 kW)

# Analisi tecnico-economica

## Modello energetico utenza residenziale con $\mu$ CHP (M2)

### Tipologia

- Utente bifamiliare
- Superficie utile: 2x250 m<sup>2</sup>
- Zona Climatica D; Centro Italia

### Fabbisogno termico

- Fabbisogno energia primaria per riscaldamento: 79 kWh/(m<sup>2</sup> anno);

### Fabbisogno elettrico

- Fabbisogno di energia elettrica per usi domestici: 25 kWh/(m<sup>2</sup> anno);

### Sistema alimentazione

- Energia Termica :  $\mu$ CHP (Rendimento Termico 75%, potenza termica 10 kW) + caldaia a condensazione
- Energia Elettrica:  $\mu$ CHP (Rendimento elettrico 22%, potenza elettrica 3 kW) + rete nazionale
- Ore di lavoro  $\mu$ CHP : funzione della durata del periodo di riscaldamento: 1800 ore annue

# Analisi tecnico-economica

## Confronto tecnico economico tra M1 e M2

Step 1

- Variazione % autoconsumo elettrico

Step 2

- Variazione costo del kWh<sub>el</sub> prelevato

Step 3

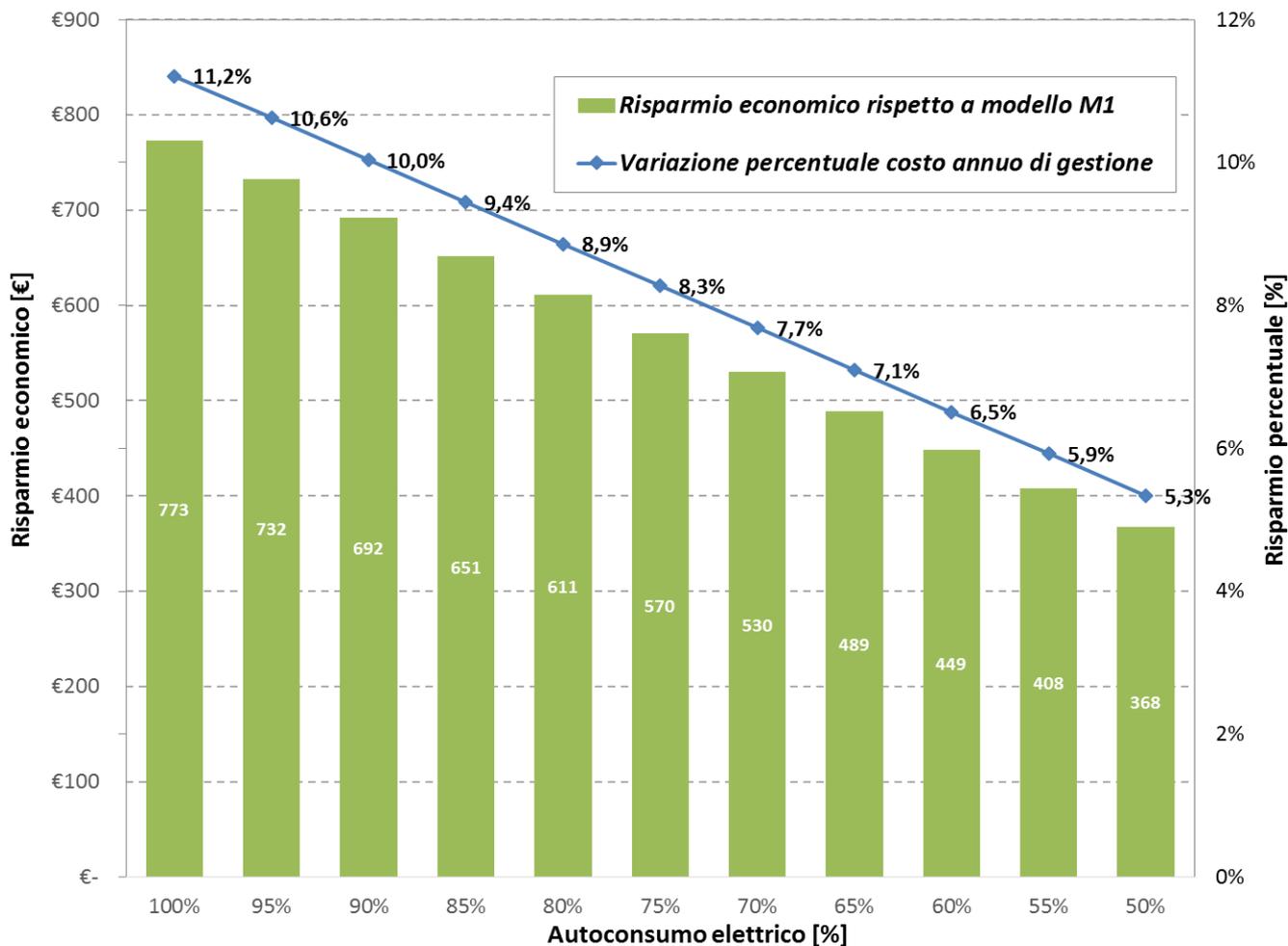
- Variazione costo combustibile alimentazione  $\mu$ CHP

Step 4

- Variazione Zona Climatica

# Analisi tecnico-economica

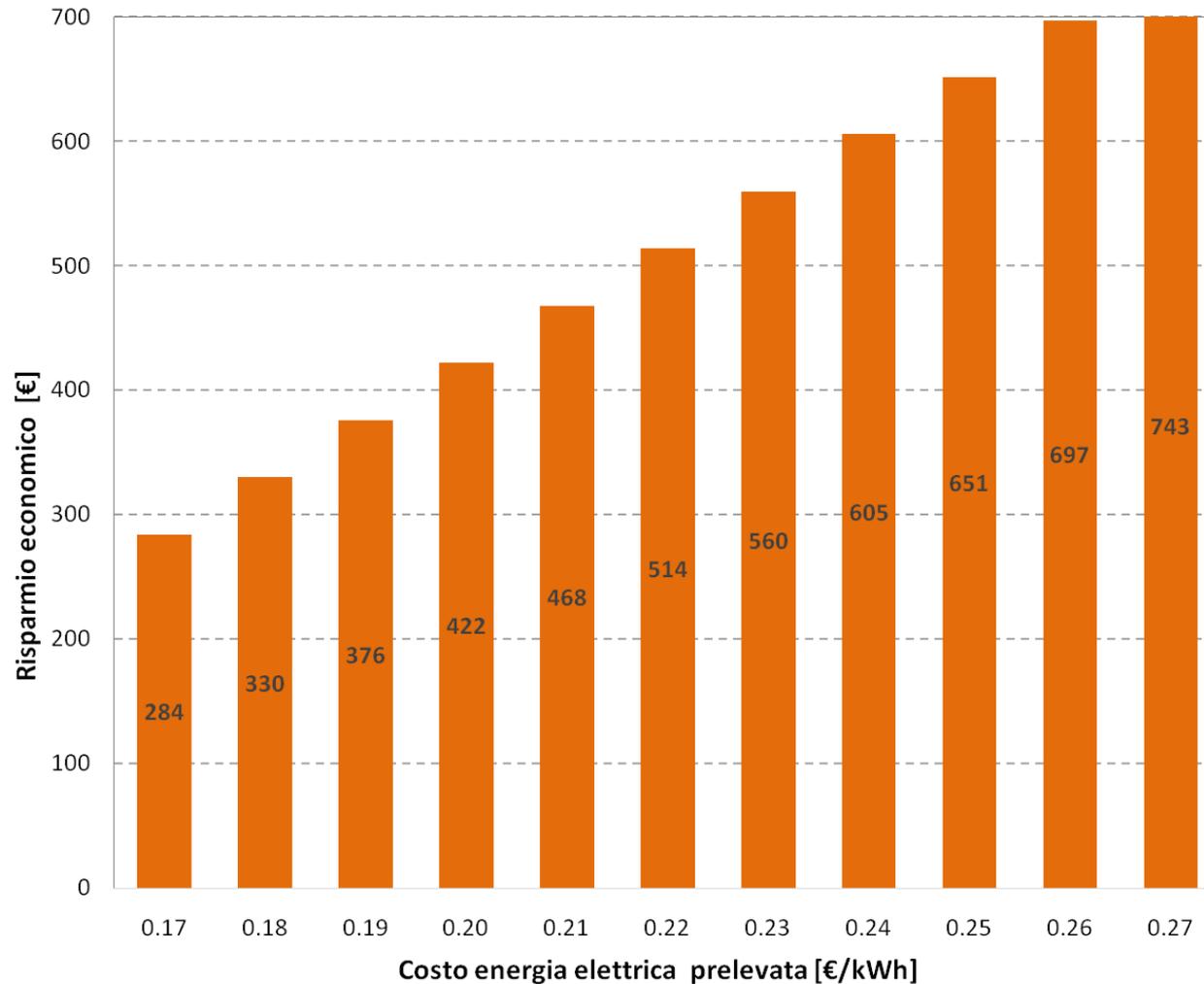
## Influenza dell'autoconsumo elettrico sul risparmio economico annuo



**Dati di Calcolo Step 1:** Tariffa metano  $\mu$ CHP: non defiscalizzato; Costo Gas Naturale: 0.98 €/m<sup>3</sup>; Costo energia elettrica: 0.25 €/kWh; Valorizzazione energia elettrica immessa in rete: 0.10 €/kWh

# Analisi tecnico-economica parametrica

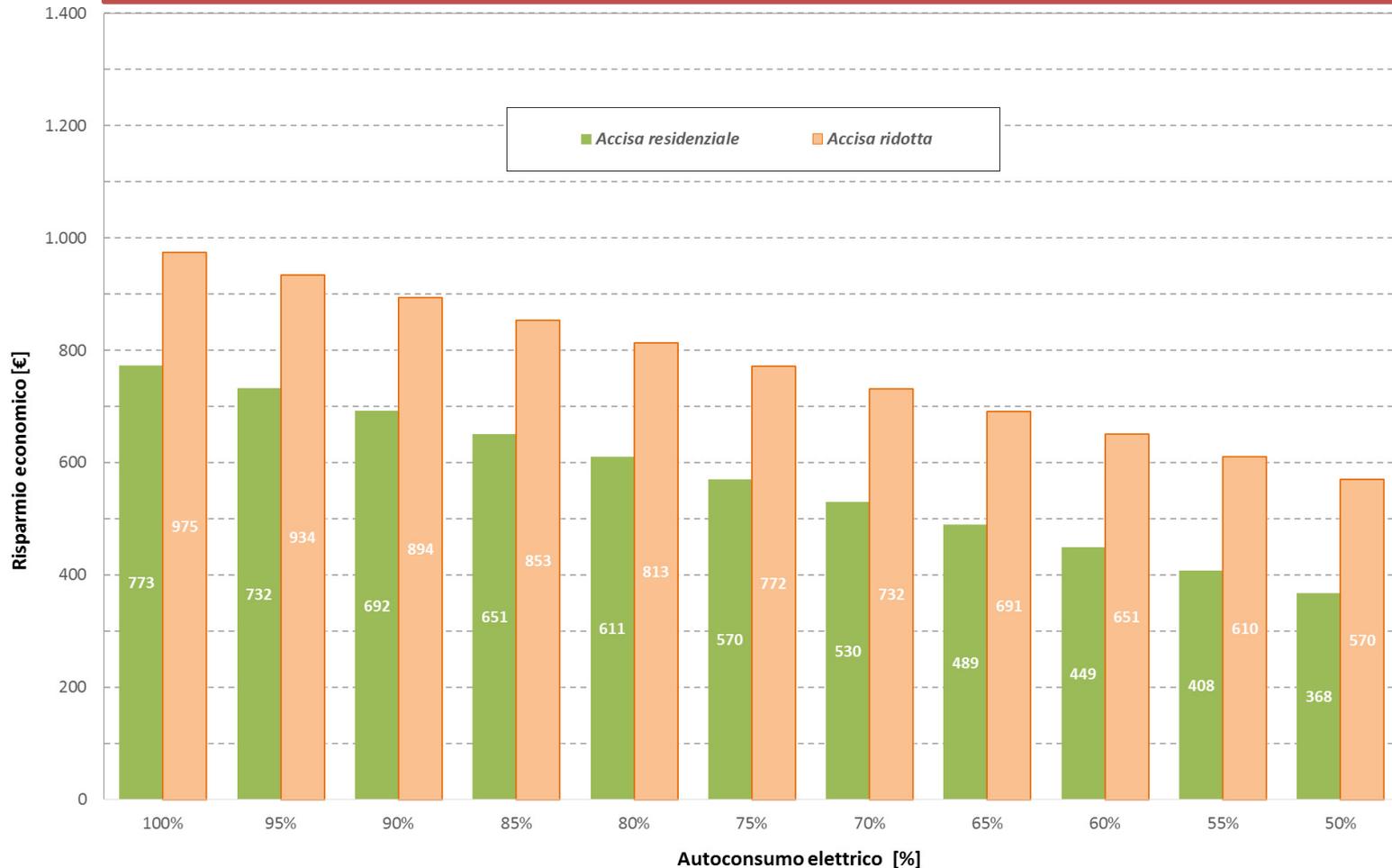
Influenza costo energia elettrica prelevata dalla rete sul risparmio economico annuo



**Dati di Calcolo Step 2:** Tariffa metano  $\mu$ CHP: non defiscalizzato; Costo Gas Naturale: 0.98 €/m<sup>3</sup>; Valorizzazione energia elettrica immessa in rete: 0.10 €/kWh; Autoconsumo elettrico 85%

# Analisi tecnico-economica parametrica

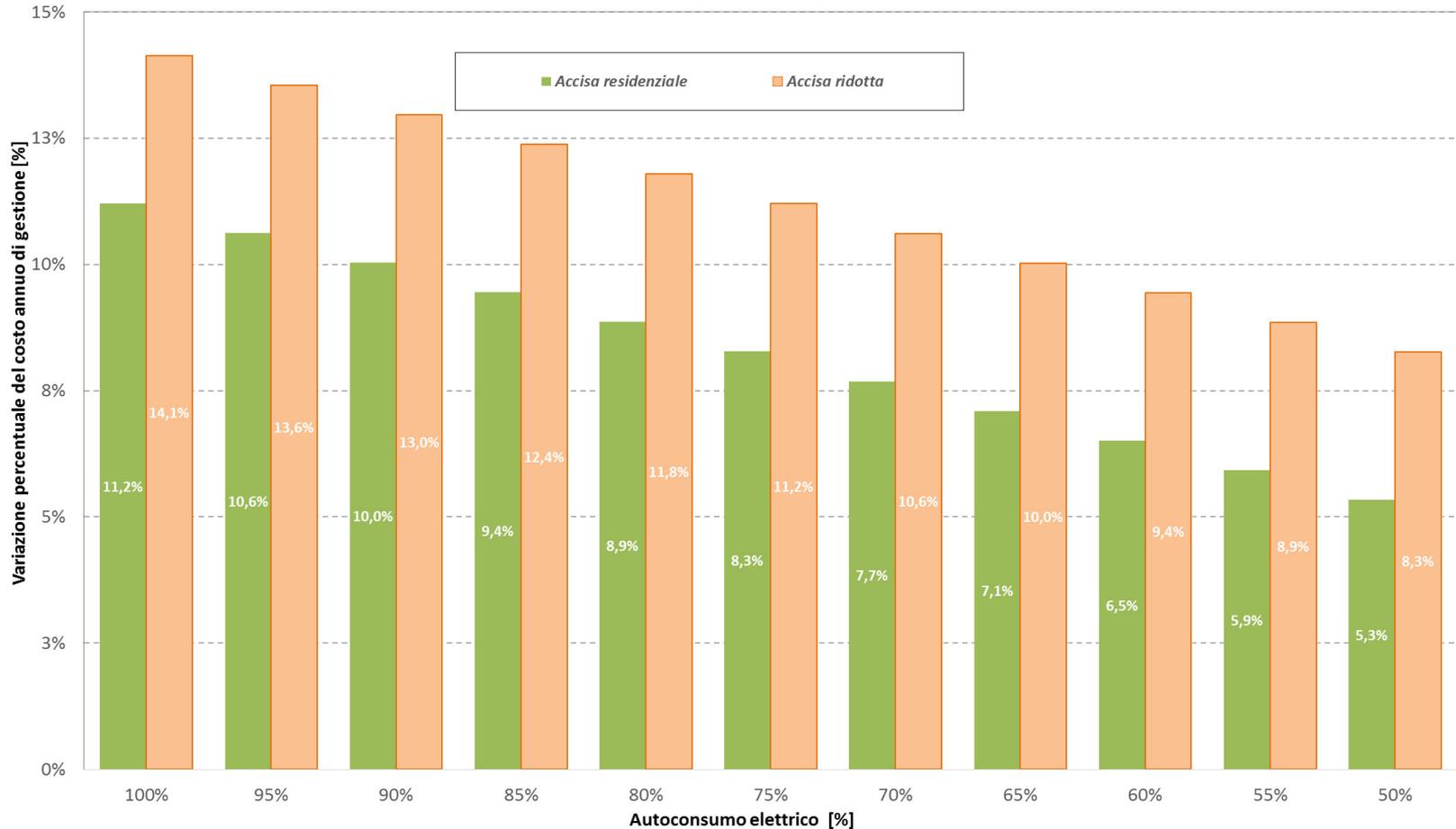
## Influenza della riduzione dell'accisa sul risparmio economico annuo



**Dati di Calcolo Step 3:** Tariffa metano  $\mu$ CHP: accisa autoconsumo elettrico per la quota parte di  $0.22 \text{ m}^3/\text{kWh}_{\text{el}}$  ; Costo Gas Naturale non defiscalizzato:  $0.98 \text{ €/m}^3$ ; Valorizzazione energia elettrica immessa in rete:  $0.10 \text{ €/kWh}$ ; Autoconsumo elettrico 85%.

# Analisi tecnico-economica parametrica

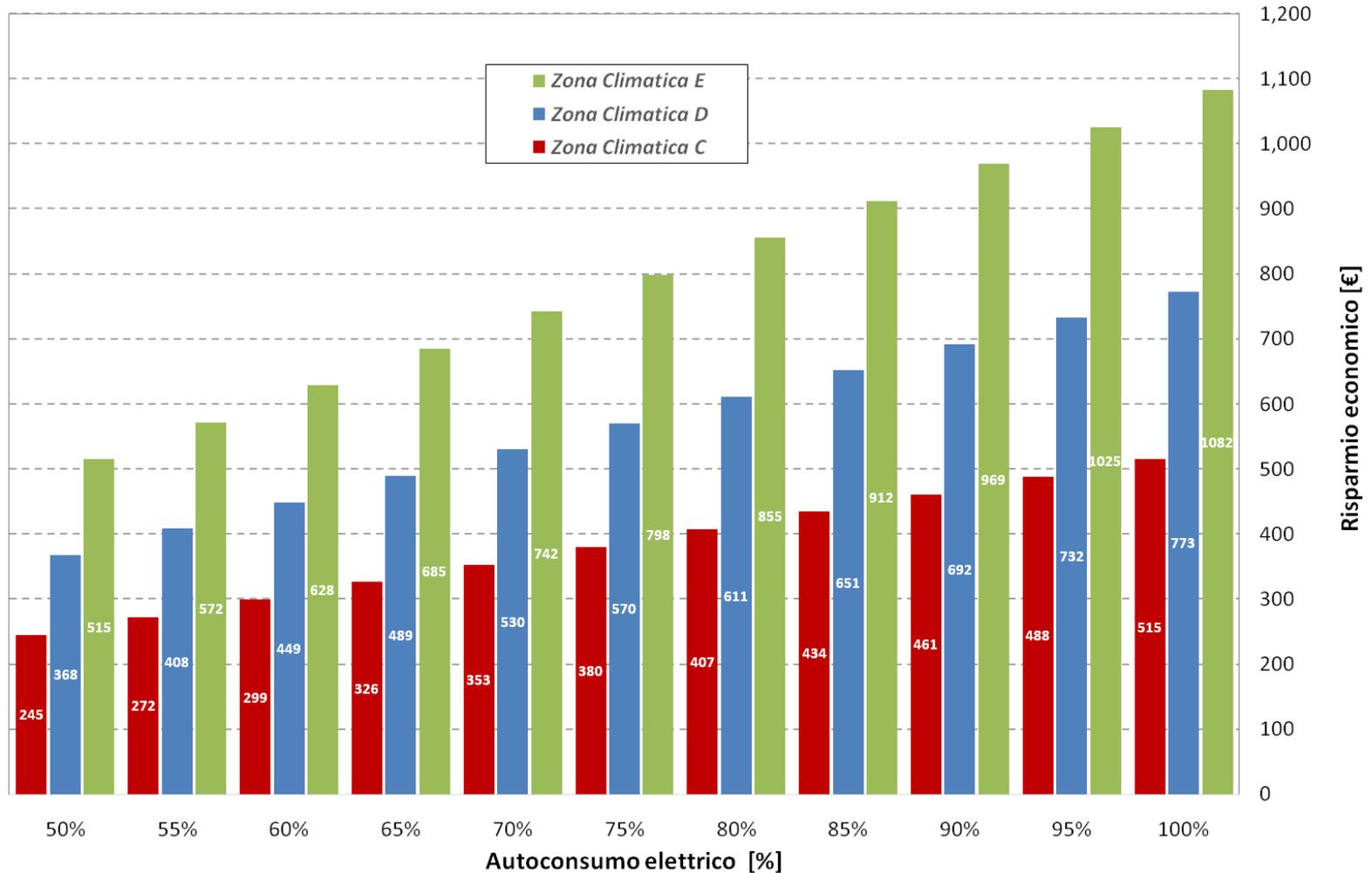
## Influenza della riduzione dell'accisa sulla variazione percentuale del costo annuo di gestione



**Dati di Calcolo Step 3:** Tariffa metano  $\mu$ CHP: accisa autoconsumo elettrico per la quota parte di  $0.22 \text{ m}^3/\text{kWh}_{\text{el}}$  ; Costo Gas Naturale non defiscalizzato:  $0.98 \text{ €/m}^3$ ; Valorizzazione energia elettrica immessa in rete:  $0.10 \text{ €/kWh}$ ; Autoconsumo elettrico 85%.

# Analisi tecnico-economica

## Influenza della Zona Climatica sul risparmio economico ottenibile



**Dati di Calcolo Step 4:** Tariffa metano : non defiscalizzato; Costo Gas Naturale: 0.98 €/m<sup>3</sup>; Valorizzazione energia elettrica immessa in rete: 0.10 €/kWh; Autoconsumo elettrico 85%; Numero ore di lavoro annue  $\mu$ CHP in funzione del periodo di riscaldamento: Zona E 2500 h (Nord Italia) , Zona D 1800 h (Centro Italia) , Zona C 1200 h (Sud Italia) .

# Analisi tecnico-economica

## Modello energetico utenza residenziale con FV (M3)

### Tipologia

- Utente bifamiliare
- Superficie utile: 2x250 m<sup>2</sup>
- Zona Climatica D; Centro Italia

### Fabbisogno termico

- Fabbisogno energia primaria per riscaldamento: 79 kWh/(m<sup>2</sup> anno);

### Fabbisogno elettrico

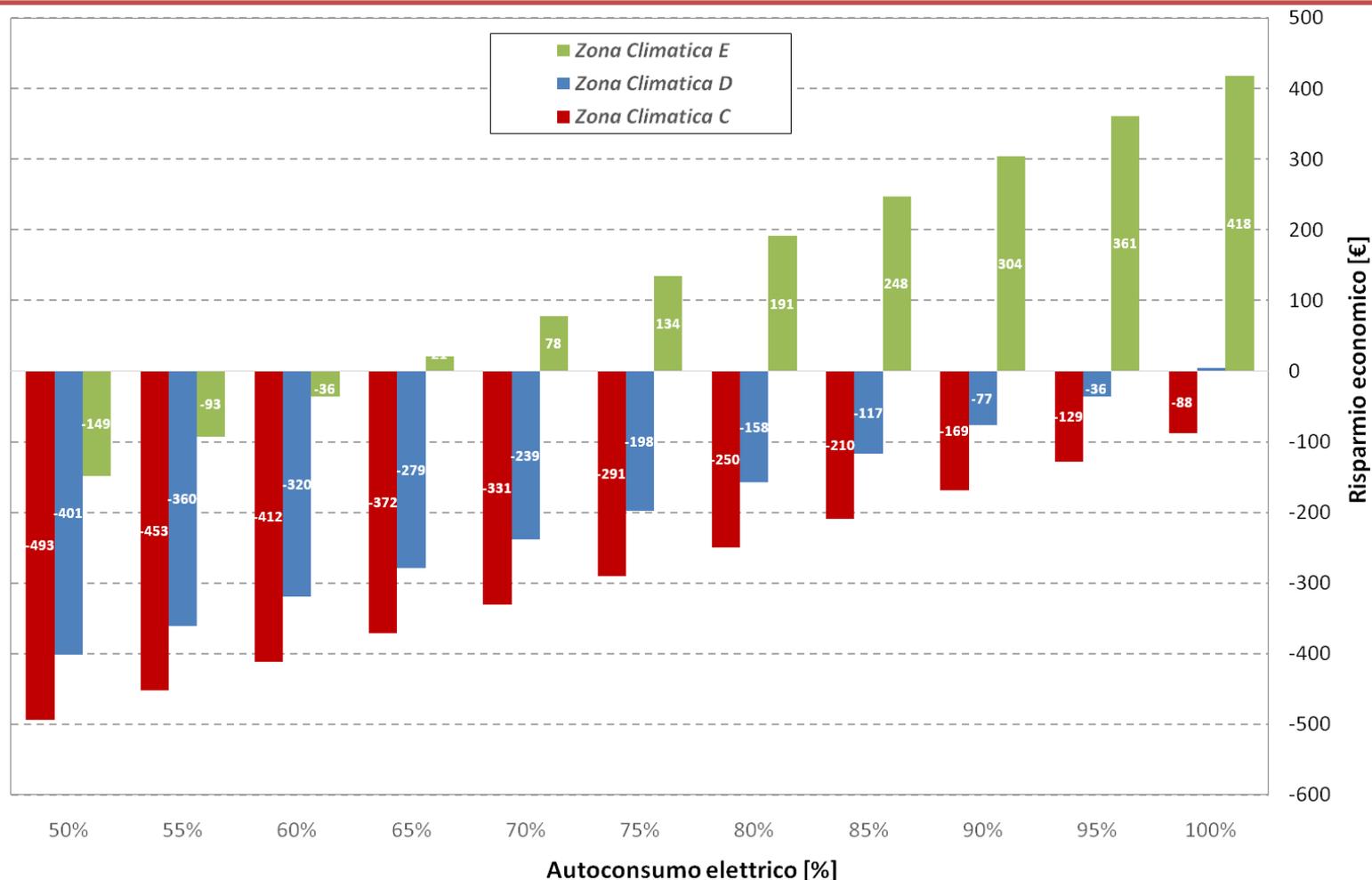
- Fabbisogno di energia elettrica per usi domestici: 25 kWh/(m<sup>2</sup> anno);

### Sistema alimentazione

- Energia Termica : Caldaia a condensazione
- Energia Elettrica: FV (Potenza di picco 3 kW) + rete nazionale
- Autoconsumo energia elettrica fotovoltaica, in un anno: 70%

# Analisi tecnico-economica

Confronto tra la soluzione M2 ( con sistema con  $\mu$ CHP) e soluzione M3 ( con impianto FV)



**Dati di Calcolo :** Tariffa metano : non defiscalizzato; Costo Gas Naturale : 0.98 €/m<sup>3</sup>; Valorizzazione energia elettrica immessa in rete: 0.10 €/kWh; Numero ore di lavoro annue  $\mu$ CHP in funzione del periodo di riscaldamento: Zona E 2500 h (Nord Italia) , Zona D 1800 h (Centro Italia) , Zona C 1200 h (Sud Italia) .

# Simulazione di tipo dinamico

## Analisi dinamica del modello M2

### Tipologia

- Utenza bifamiliare
- Superficie utile: 2x250 m<sup>2</sup>
- Zona Climatica D; Centro Italia

### Fabbisogno termico

- Fabbisogno energia primaria per riscaldamento: 79 kWh/(m<sup>2</sup> anno);
- Curve dei carichi termici variabili nel tempo.

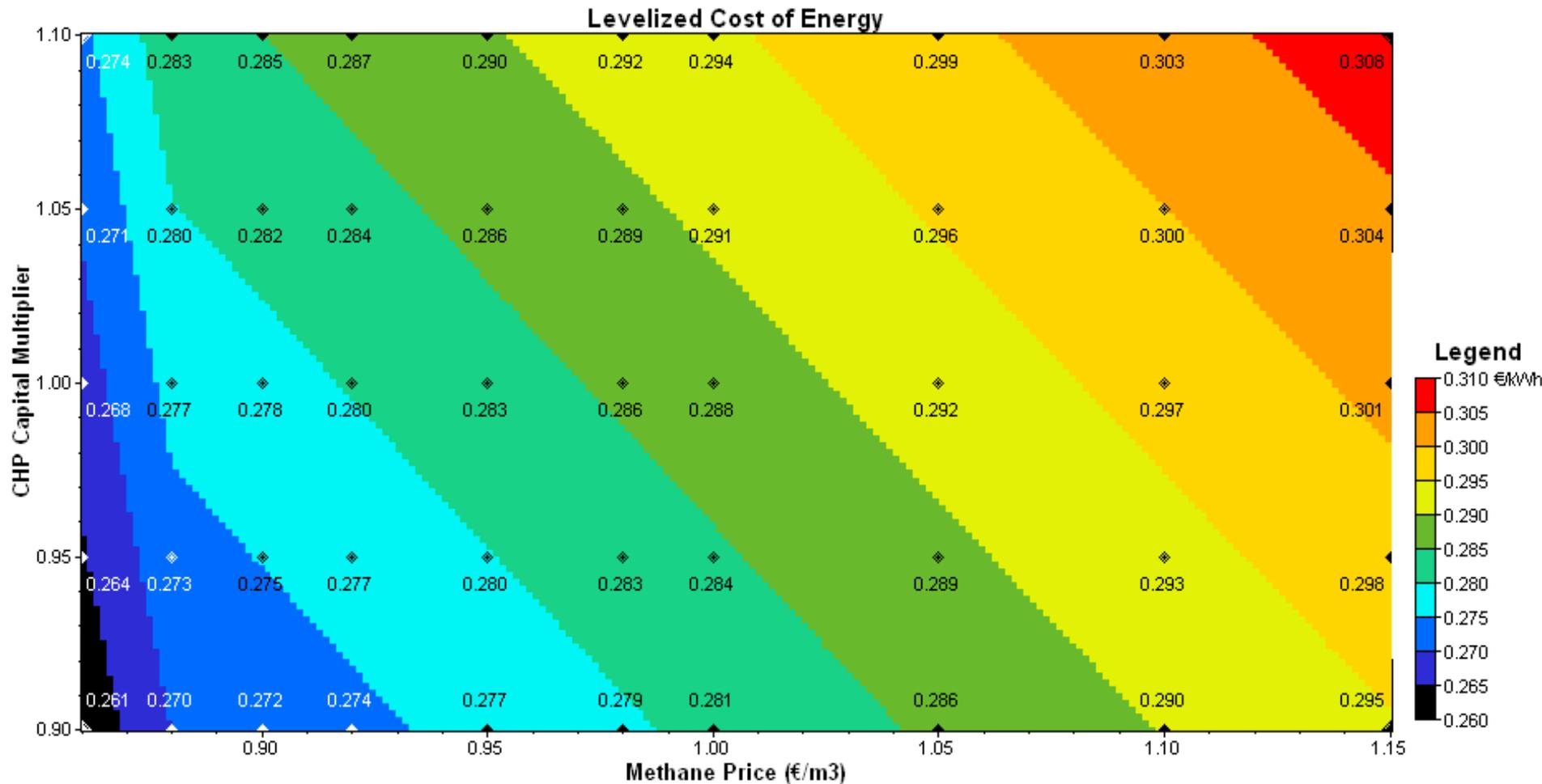
### Fabbisogno elettrico

- Fabbisogno di energia elettrica per usi domestici: 25 kWh/(m<sup>2</sup> anno);
- Curve dei carichi elettrici variabili nel tempo.

### Sistema alimentazione

- Curva di potenza e rendimento termico del micro-cogeneratore sperimentato
- Curva potenza elettrica e rendimento elettrico del micro-cogeneratore sperimentato
- Rete elettrica nazionale
- Caldaia di compenso

# Analisi tecnico-economica



## Osservazioni:

A fronte di una riduzione del 10 % del costo del combustibile, a parità di costo iniziale dell'impianto, si ha la riduzione del LCOE di circa 3.5 %;

Riducendo del 10% il costo dell'investimento iniziale, si ha una riduzione di LCOE del 2.4 %.

# Conclusioni

## Risultati Analisi Sperimentale

- I. I sistemi cogenerativi a condensazione, grazie al recupero di calore latente, risultano essere una tecnologia valida per applicazioni in campo residenziale, soprattutto se abbinati a sistemi di distribuzione a bassa temperatura;
- II. I rendimenti elettrici dei motori a combustione interna, anche di piccola taglia, garantiscono un elevato risparmio di energia primaria;
- III. Il Gas Naturale allo stato attuale, risulta essere la fonte energetica più idonea nel campo della micro-cogenerazione a combustione interna;
- IV. Le miscele di Idrometano permettono un incremento del rendimento elettrico, a svantaggio della potenza termica resa dal sistema cogenerativo;

# Conclusioni

## Risultati Analisi Tecnico-economica

- I. Al fine di ottenere un risparmio economico superiore al 7% rispetto ad una utenza tradizionale, è necessario garantire un autoconsumo elettrico non inferiore al 65 % ;
- II. I maggiori benefici in termini di risparmio economico annuo, si hanno per utenze con un costo di acquisto dell'energia elettrica maggiore di 0,20 €/kWh<sub>el</sub> ;
- III. L'accesso all'accisa ridotta comporta un incremento del risparmio economico annuo. In particolare per un autoconsumo pari al 65 % si ottiene un risparmio del 10% rispetto ad una utenza tradizionale;
- IV. Dal punto di vista del costo annuo, i sistemi di micro-cogenerazione sono concorrenziali rispetto alla tecnologia fotovoltaica solo in Zone Climatiche E e F nel caso in cui sia garantito un autoconsumo elettrico superiore al 75 %.
- V. Dall'analisi dinamica emerge che una riduzione del 10 % del costo del combustibile, produce riduzione del LCOE di circa 3.5 %; Mentre una riduzione del 10% del costo dell'investimento iniziale, sia ha una riduzione di LCOE del 2.4 %.

## Publicazioni connesse alla ricerca

- ✓ Single cylinder internal combustion engine fuelled with H<sub>2</sub>NG operating as micro-CHP for residential use: preliminary experimental analysis on energy performances and numerical simulations for LCOE assessment. Gianluigi Lo Basso, Livio de Santoli, Angelo Albo, Daniele Bruschi, Benedetto. s.l. : Energy Procedia 00 (2014) 000–000, 2014.
- ✓ RES (Renewable Energy Sources) availability assessments for Ecofuels production at local scale: carbon avoidance costs associated to a hybrid biomass/H<sub>2</sub>NG-based energy scenario. s.l. : 69th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2014 Energy Procedia 00 (2014), 2014.
- ✓ Hydrogen-Natural Gas mixtures (H<sub>2</sub>NG) effects on energy performances of a condensing micro-CHP for residential applications: an expeditious assessment of water condensation and experimental analysis; Gianluigi Lo Basso ,, Livio de Santoli , Angelo Albo , Benedetto Nastasi ; 2014 ( in fase di accettazione presso la rivista Energy-Elsevier );
- ✓ A preliminary energy and environmental assessment of a micro wind turbine prototype in natural protected areas. Livio de Santoli, Angelo Albo , Davide Astiaso Garcia , Daniele Bruschi, Fabrizio Cumo. 2014, Vol. Sustainable Energy Technologies and Assessments 8 (2014) 42–56.
- ✓ A.Albo, A. Scaini, S. Vassallo. Energy consumption. [aut. libro] Fabrizio Cumo. *SoURCE Towards Smart City*. 2012.
- ✓ A.Albo, A.Scaini e Vassallo, S. Energy Balance of the Urban Cells. [aut. libro] Cumo Fabrizio. *SoURCE Towards Smart City*. Roma : s.n., 2012.

**Grazie per l'attenzione**