Fare i conti con l'ambiente
Rifiuti acqua energia
Ravenna 2016
18·19·20 maggio

La Micro-Cogenerazione: Tecnologie Disponibili ed Applicazioni

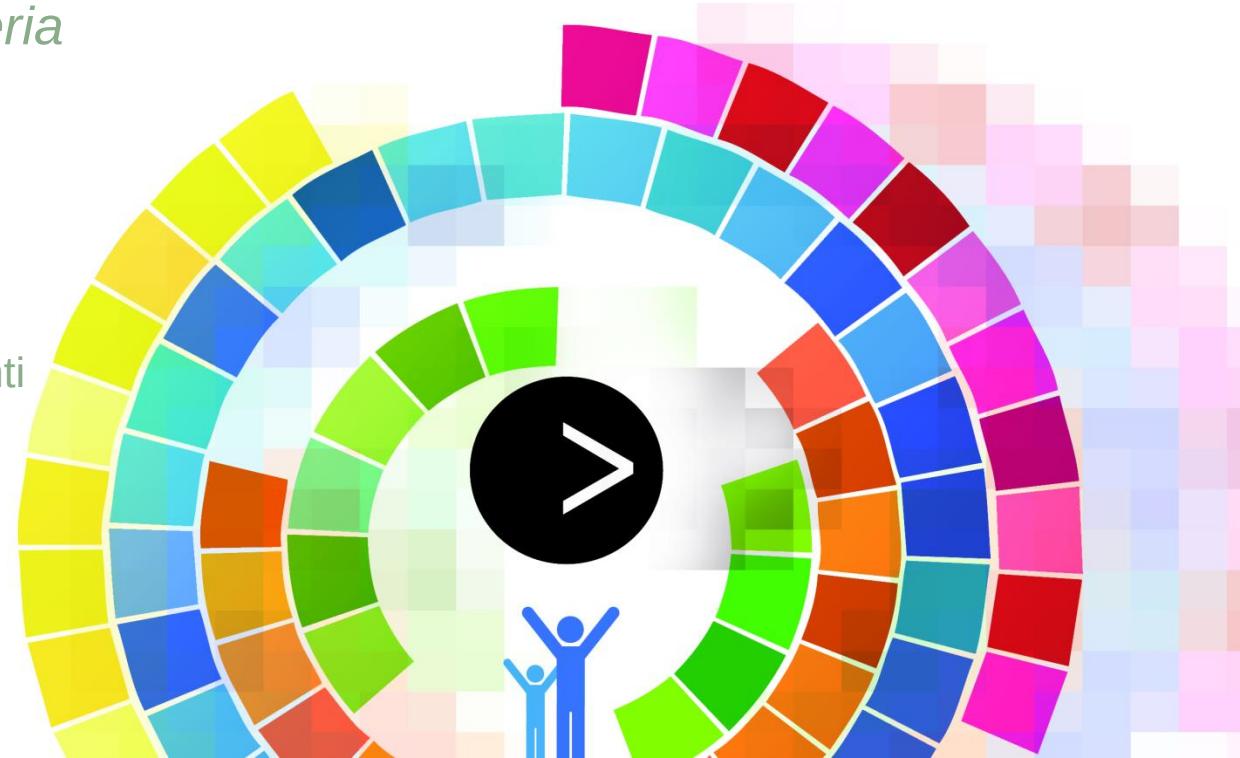
Ing. Valentina Orlandini

Dipartimento di Ingegneria Industriale –DIN

Università di Bologna

Workshop D

Generazione Distribuita e Fonti Energetiche Rinnovabili



www.ravenna2016.it

Agenda

- Introduzione alla micro-cogenerazione
- Sistemi convenzionali per la micro-cogenerazione
- Sistemi non convenzionali per la micro-cogenerazione e applicazioni
- Confronto tra le varie tecnologie
- Conclusioni

Introduzione alla piccola/micro cogenerazione

- Esistono varie tecnologie per la **piccola** e la **micro-cogenerazione**, ma solo alcune di queste sono tecnologie mature, consolidate e diffuse.

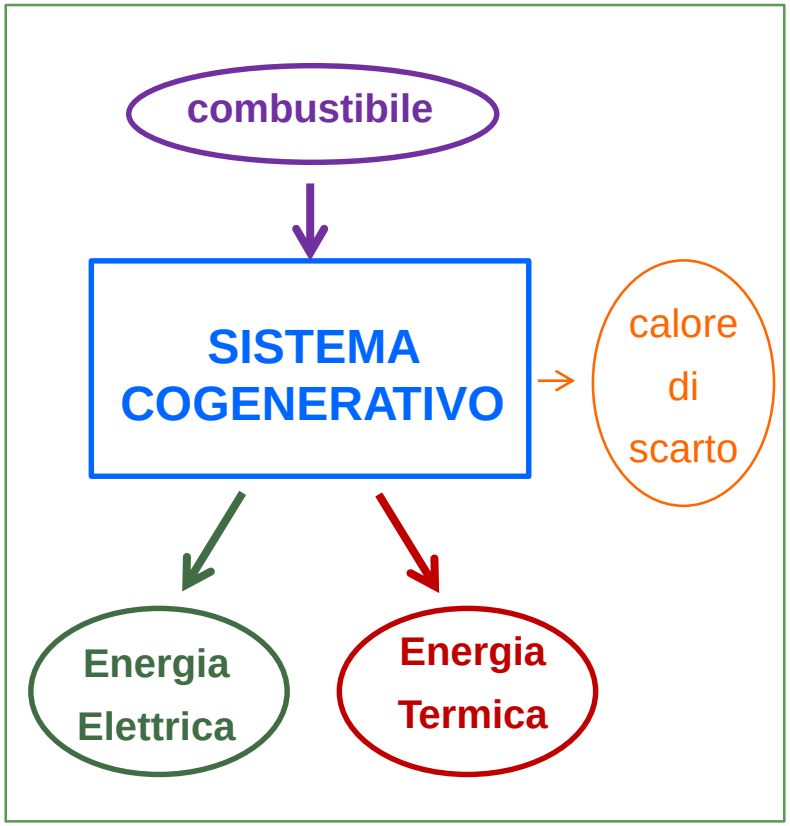
- **Negli ultimi anni**, alcune **tecnologie** molto **promettenti** hanno ricevuto una notevole attenzione e sono state **introdotte sul mercato** grazie a:
  - **progressi tecnologici e riduzione dei costi**
  - **attenzione** rivolta **all'utilizzo di calore di scarto** per produrre energia elettrica e all'**efficientamento**
  - **attenzione** rivolta alle **tecnologie** adatte alla micro-cogenerazione per il soddisfacimento dei fabbisogni energetici dell'edificio, per le quali **non** è strettamente **richiesto** il requisito di **elevati rendimenti elettrici**

Introduzione alla piccola/micro cogenerazione

Definizioni

- ***Cogenerazione*** **:**

  produzione combinata, in un unico processo, di energia elettrica/meccanica e calore



Introduzione alla piccola/micro cogenerazione

Definizioni

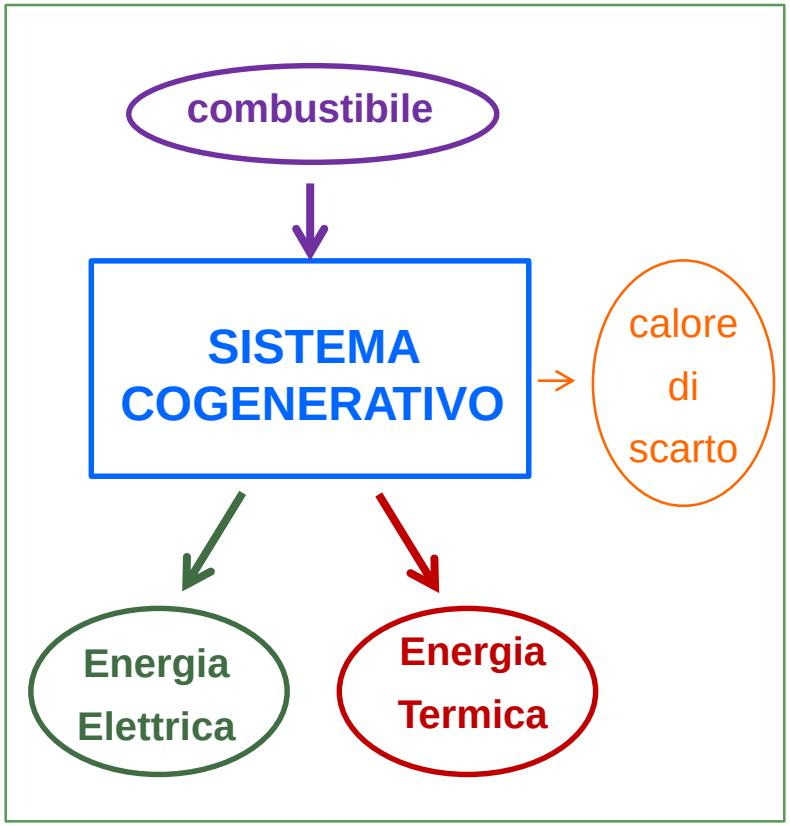
- ***Cogenerazione*** **:**

  produzione combinata, in un unico processo, di energia elettrica/meccanica e calore

- ***Piccola/Micro Generazione*** **:**

  impianto per la produzione di energia elettrica, anche in assetto cogenerativo, con capacità di generazione non superiore rispettivamente a 1 MW e 50 kW elettrici

  (D. Lgs. n°20 del 8/2/2007, in accordo con la DE 2004/8/CE)



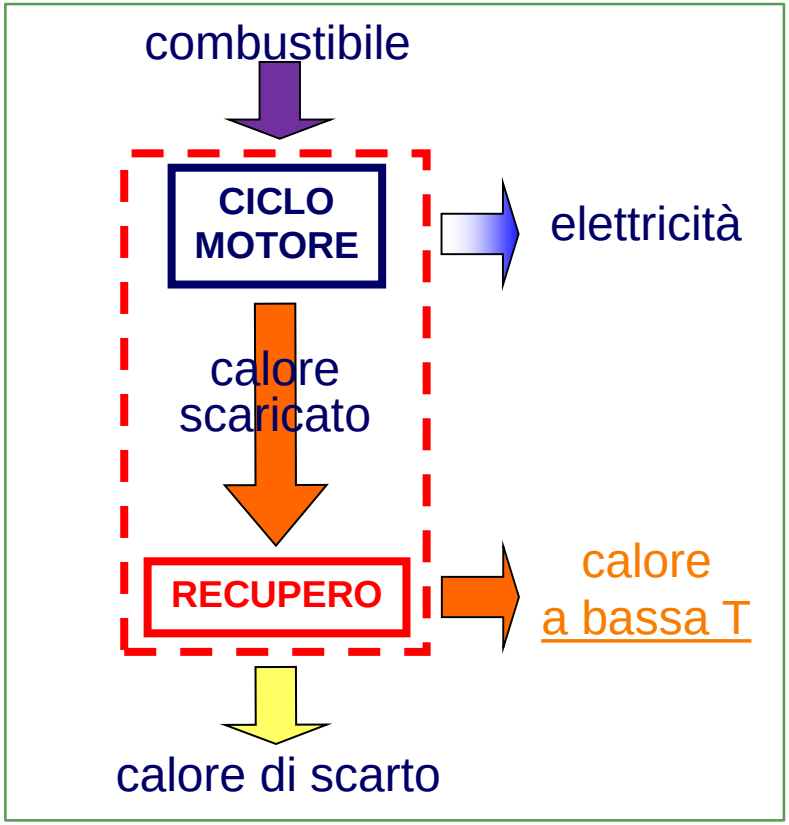
Tecnologie per la piccola/micro cogenerazione

- Motori a combustione interna
- Micro Turbine a Gas (MTG)
- Organic Rankinke Cycle (ORC) e
  Micro Rankine Cycle (MRC)
- Motori Stirling
- Celle a combustibile
- Sistemi termoelettrici
- Sistemi termo-fotovoltaici (TPV)

Tecnologie per la piccola/micro cogenerazione

- Motori a combustione interna
- Micro Turbine a Gas (MTG)
- Organic Rankinke Cycle (ORC) e Micro Rankine Cycle (MRC)
- Motori Stirling
- Celle a combustibile
- Sistemi termoelettrici
- Sistemi termo-fotovoltaici (TPV)

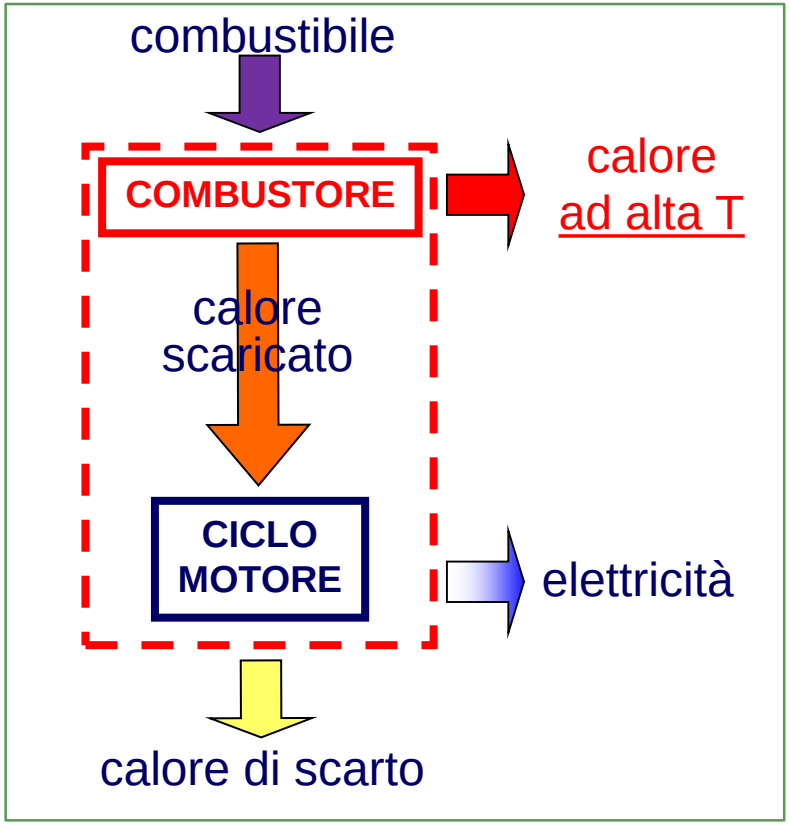
Tecnologie disponibili configurazione TOPPING



Tecnologie per la piccola/micro cogenerazione

- Motori a combustione interna
- Micro Turbine a Gas (MTG)
- Organic Rankinke Cycle (ORC) e Micro Rankine Cycle (MRC)
- Motori Stirling
- Celle a combustibile
- Sistemi termoelettrici
- Sistemi termo-fotovoltaici (TPV)

Tecnologie disponibili configurazione BOTTOMING

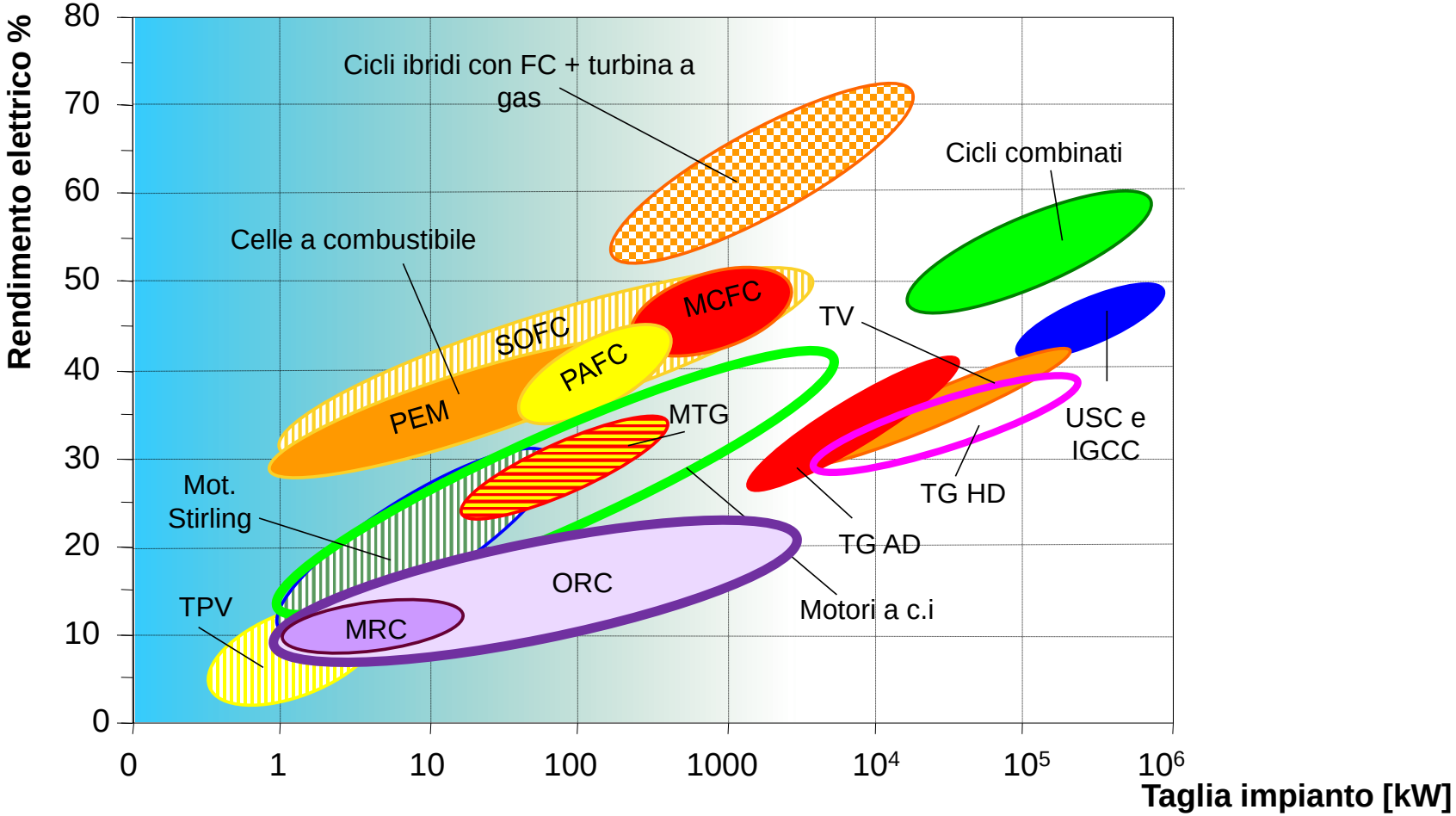


Tecnologie per la piccola/micro cogenerazione

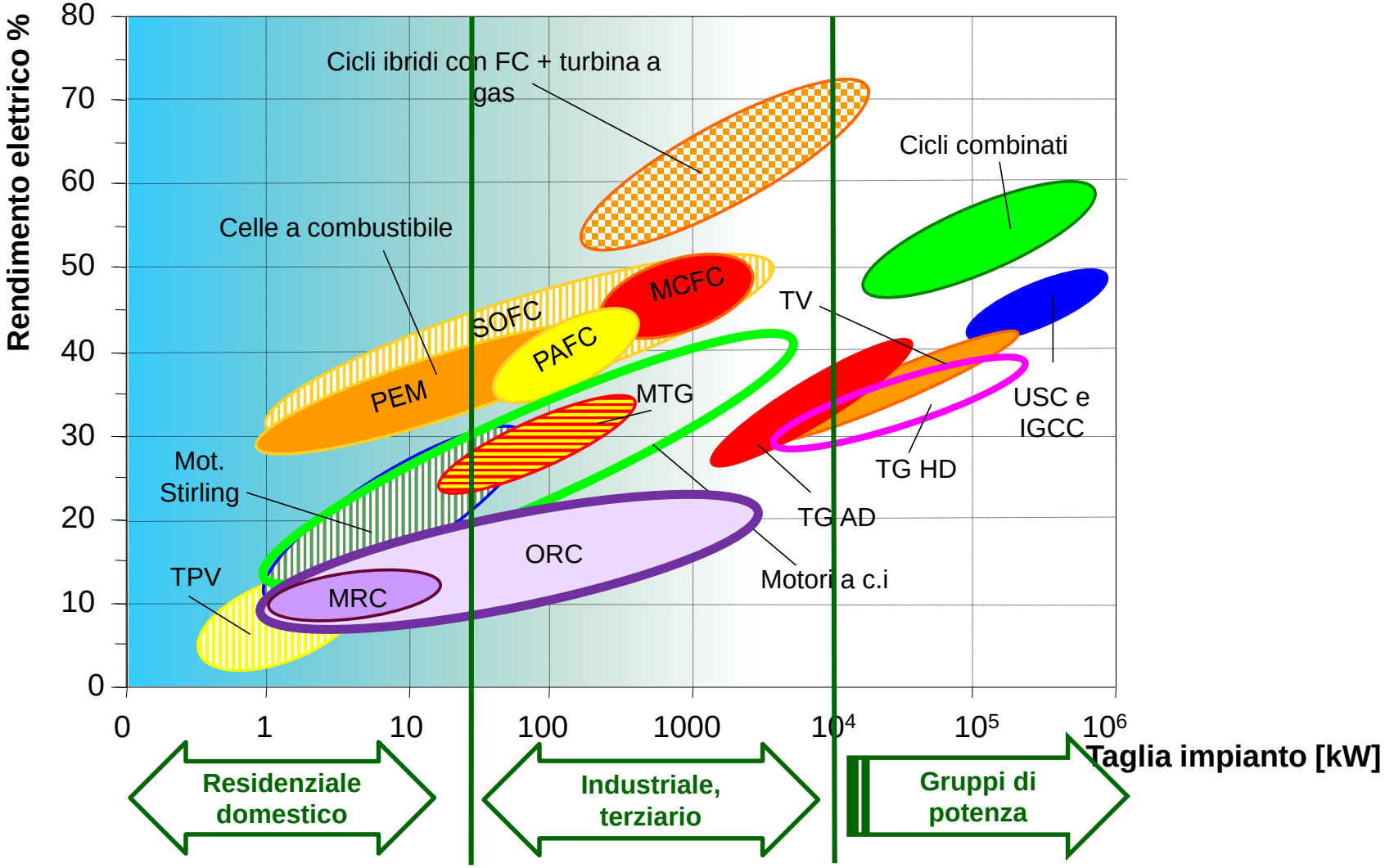
- Motori a combustione interna
- Micro Turbine a Gas (MTG)
- Organic Rankinke Cycle (ORC) e Micro Rankine Cycle (MRC)
- Motori Stirling
- Celle a combustibile
- Sistemi termoelettrici
- Sistemi termo-fotovoltaici (TPV)

Tecnologie in via di sviluppo

Tecnologie per la piccola/micro cogenerazione

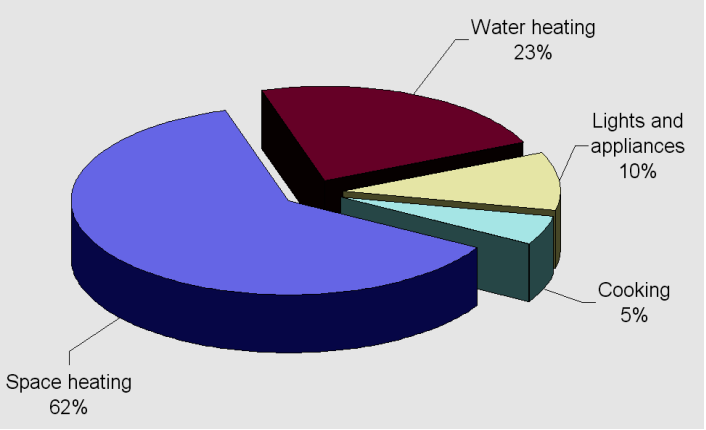


Tecnologie per la piccola/micro cogenerazione



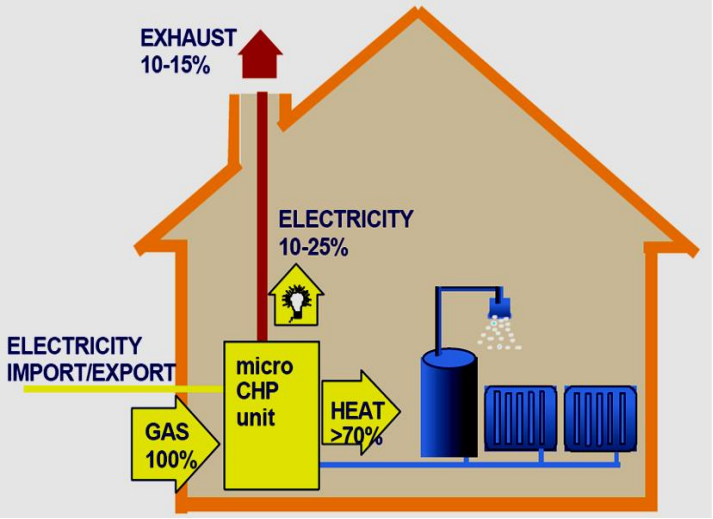
Tecnologie per la piccola/micro cogenerazione

Di tutta l'energia consumata in un edificio residenziale, circa **l'80%-85%** è utilizzata per la **produzione di acqua sanitaria e per il riscaldamento** degli ambienti



Attraenti per la cogenerazione residenziale unità micro-cognerative con **basso rendimento elettrico**, ma con:

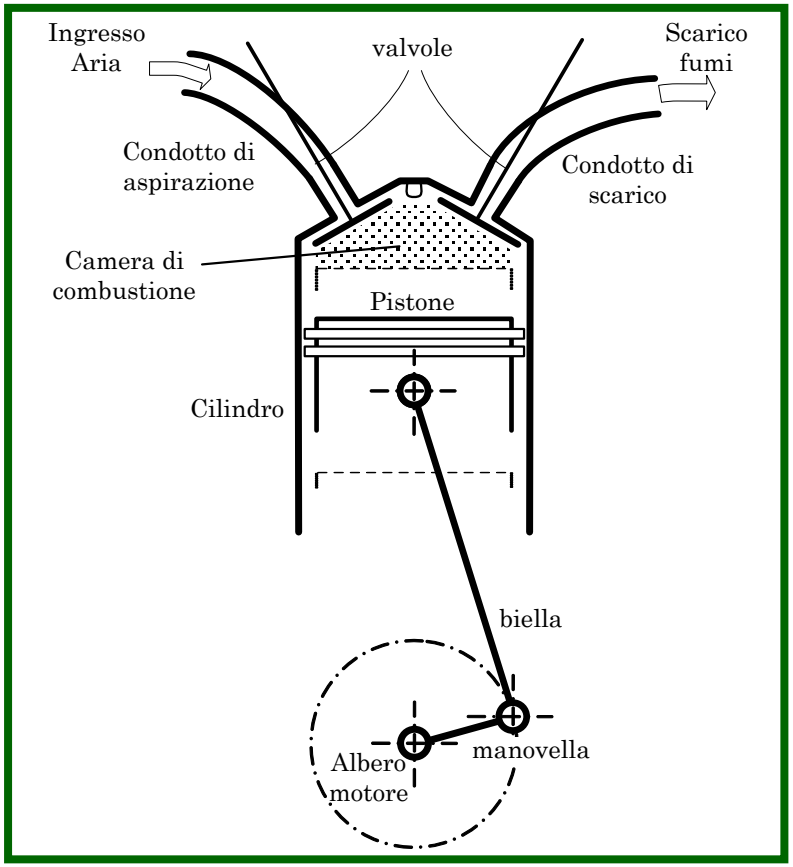
- **elevato** rapporto P_{th}/P_e
- **elevato** coefficiente di **utilizzo del combustibile**



Tecnologie consolidate (1)

Motori alternativi a Combustione Interna (MCI)

- Motori a ciclo “Otto” o ad accensione comandata
- Motori a ciclo “Diesel” o ad accensione spontanea
- Motori a 4 tempi
- Motori a 2 tempi



Tecnologie consolidate (1)

Motori alternativi a Combustione Interna (MCI)

VANTAGGI

- taglie da 1 kWe a circa 5 MWe
- tecnologia matura impiegata in diversi campi
- elevata affidabilità
- buoni rendimenti di conversione
- costi di investimento contenuti
- elevata flessibilità di esercizio

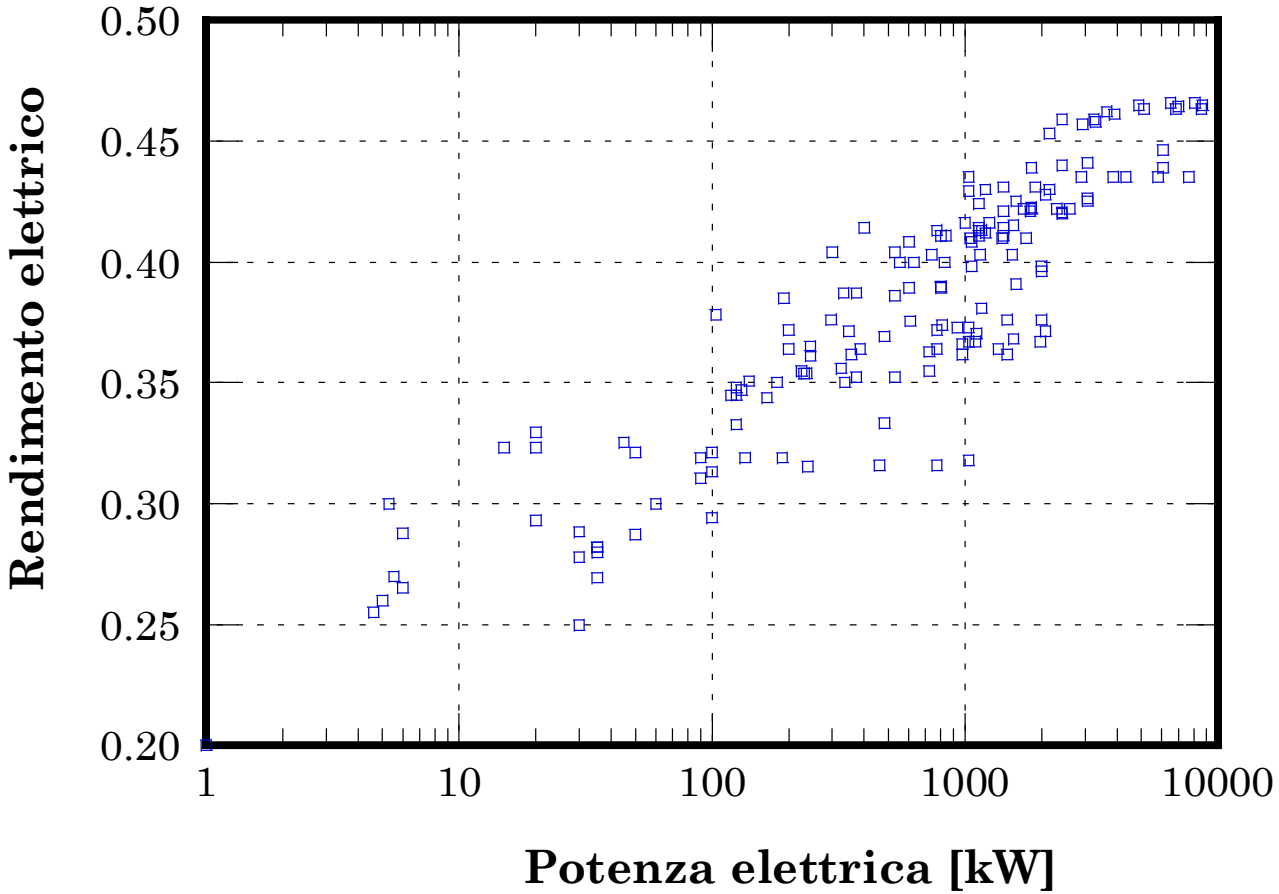
SVANTAGGI

- elevati costi di manutenzione (8÷25 €/MWh)
- rumorosità e vibrazioni
- elevati valori delle emissioni (NOx e CO)

Tecnologie consolidate (1)

Motori alternativi a Combustione Interna (MCI)

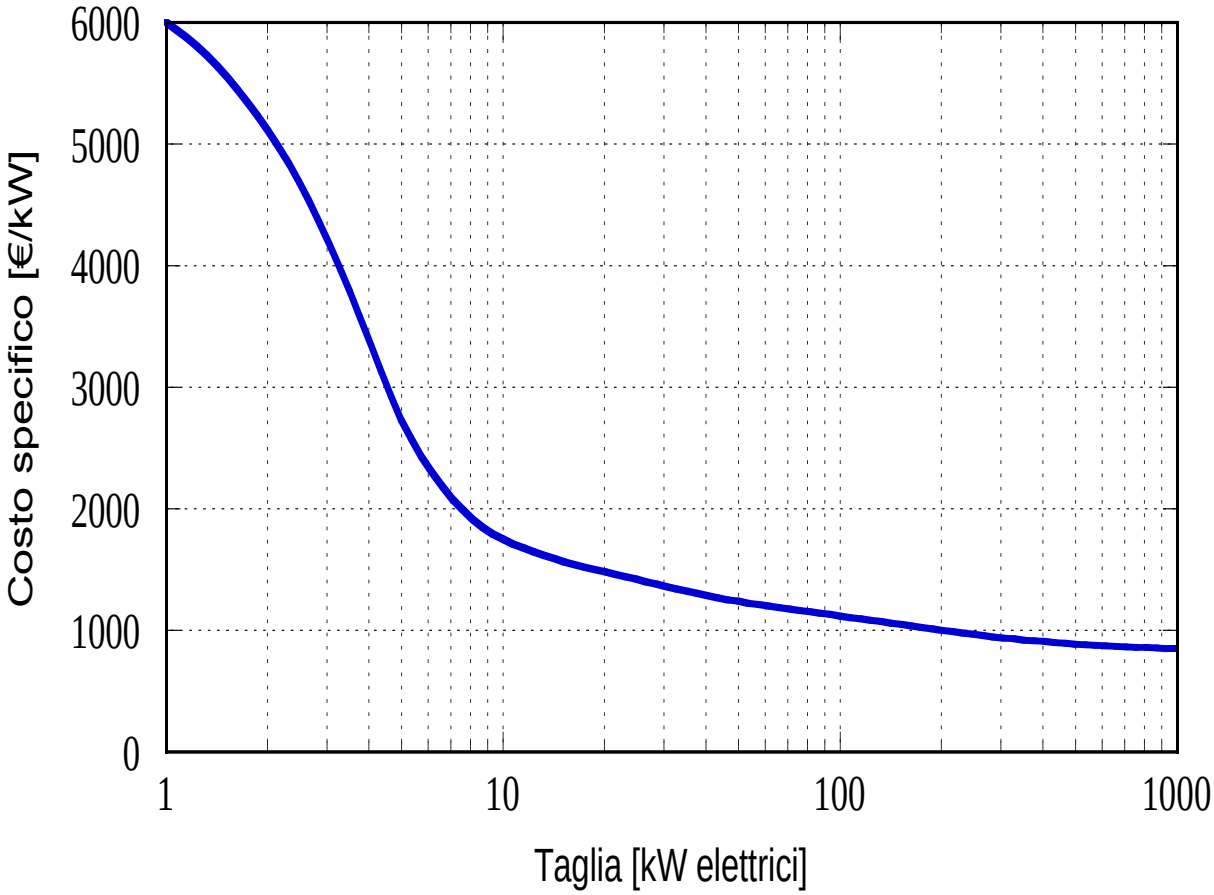
Aumento del rendimento al crescere della taglia elettrica



Tecnologie consolidate (1)

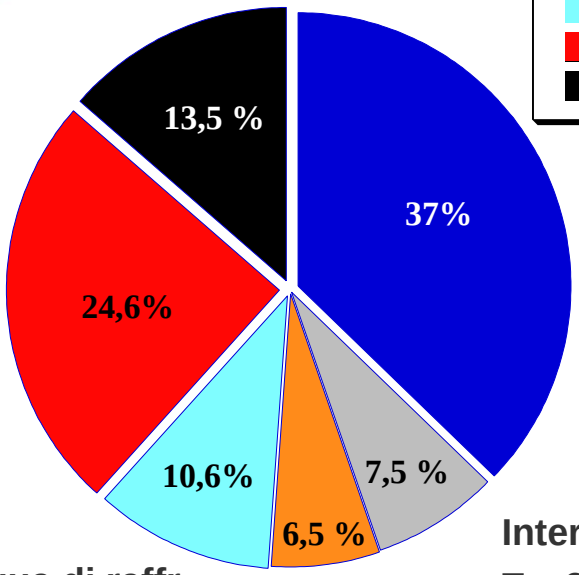
Motori alternativi a Combustione Interna (MCI)

Diminuzione del costo specifico all'aumentare delle taglia elettrica



Tecnologie consolidate (1)

Motori alternativi a Combustione Interna (MCI)



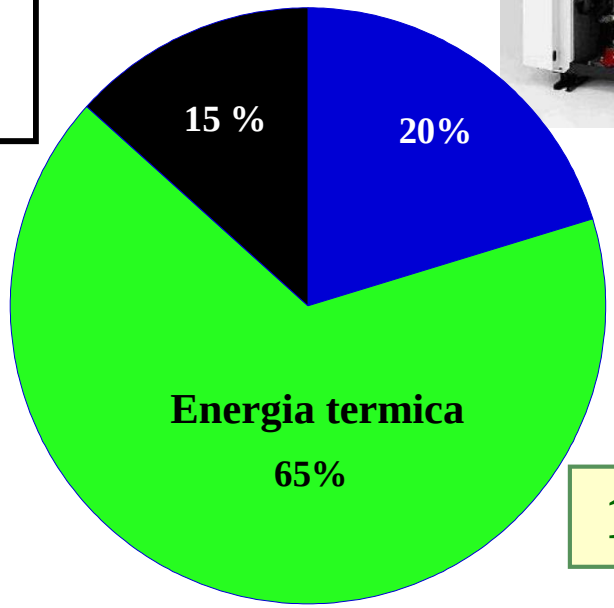
fumi
T > 400 °C

Intercooler
T ≈ 30/40 °C

Olio
T ≈ 75-85 °C

Acqua di raffr.
T ≈ 90-95 °C

1 MWe



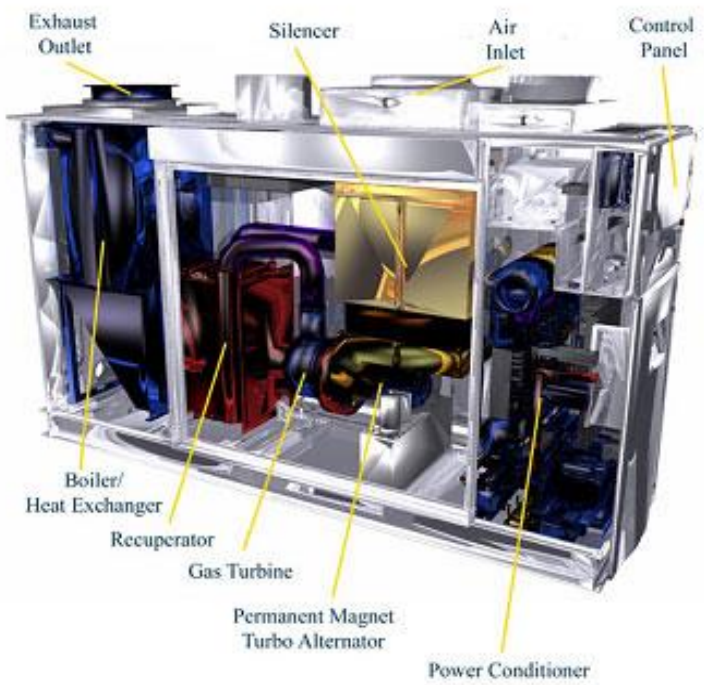
1 kWe

Tecnologie consolidate (2)

Micro Turbine a Gas (MTG)

Non sono uno scale-down delle turbine a gas industriali, ma nascono da una nuova progettazione:

- turbina e compressori radiali (β=4)
- ciclo rigenerativo a basso rapporto di compressione
- elevata velocità rotazione variabile (50.000 – 120.000 rpm)
- turbine non raffreddate (TIT < 950 °C)



Typical microturbine package

Tecnologie consolidate (2)

Micro Turbine a Gas (MTG)

Modelli di MGT disponibili sul mercato

Modello	Pel [kW]	Rendimento elettrico
CAPSTONE C30	30	25
CAPSTONE C60	60	28
Ingersoll Rand MT70	70	29
Bowman TG80	80	28
Elliott TA 100	100	29
Turbec T100	100	30
Capstone C200	200	33
Ingersoll Rand MT250	250	30

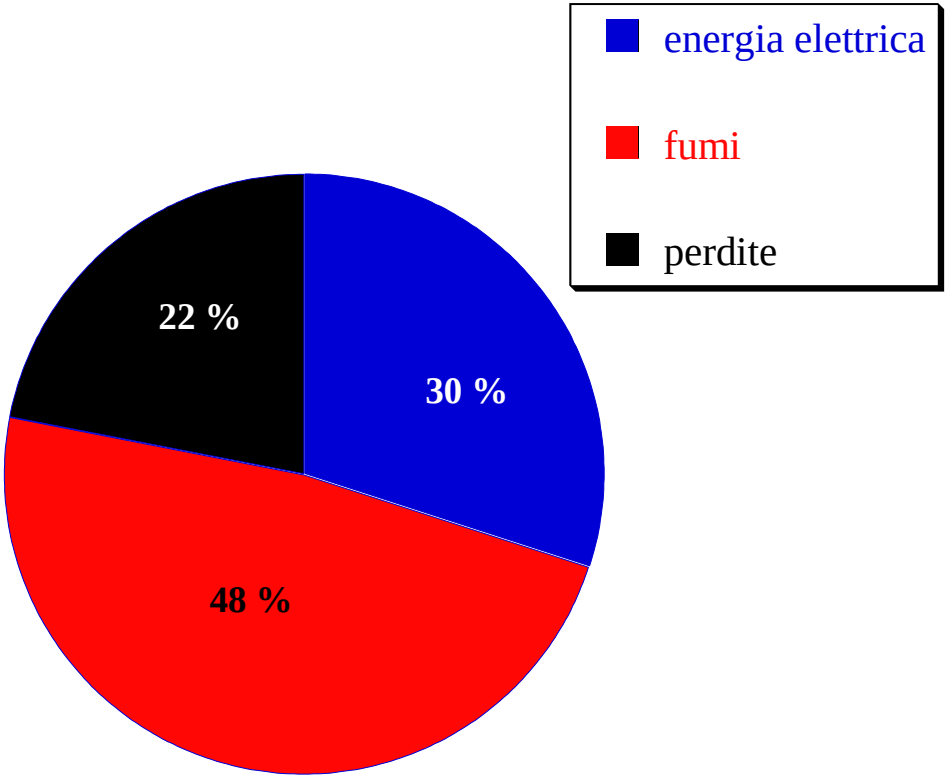
Tecnologie consolidate (2)

Micro Turbine a Gas (MTG)

Modelli di MGT disponibili sul mercato

Modello	Pel [kW]	Rendimento elettrico
CAPSTONE C30	30	25
CAPSTONE C60	60	28
Ingersoll Rand MT70	70	29
Bowman TG80	80	28
Elliott TA 100	100	29
Turbec T100	100	30
Capstone C200	200	33
Ingersoll Rand MT250	250	30

Bilancio energetico MTG da circa 100 kWe



Tecnologie consolidate (2)

Micro Turbine a Gas (MTG)

VANTAGGI

- ridotte emissioni di NOx e CO (<10 ppm @ 15% O2)
- ingombri e pesi contenuti
- bassa rumorosità e vibrazioni
- manutenzione ridotta (ogni 10.000 ore)
- elevata vita utile (80.000 ore)

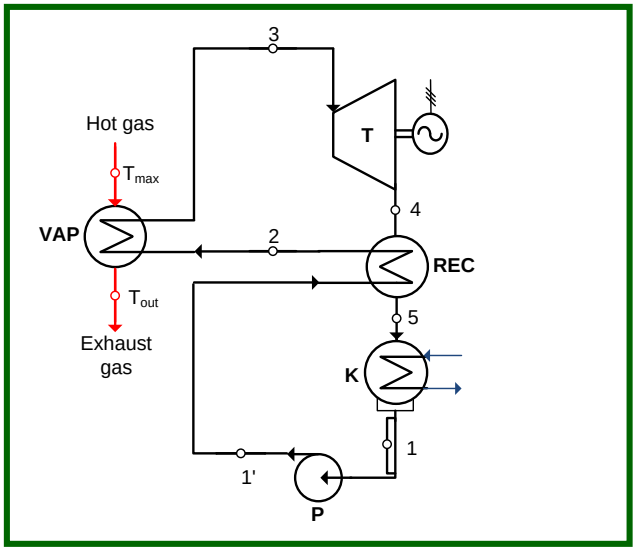
SVANTAGGI

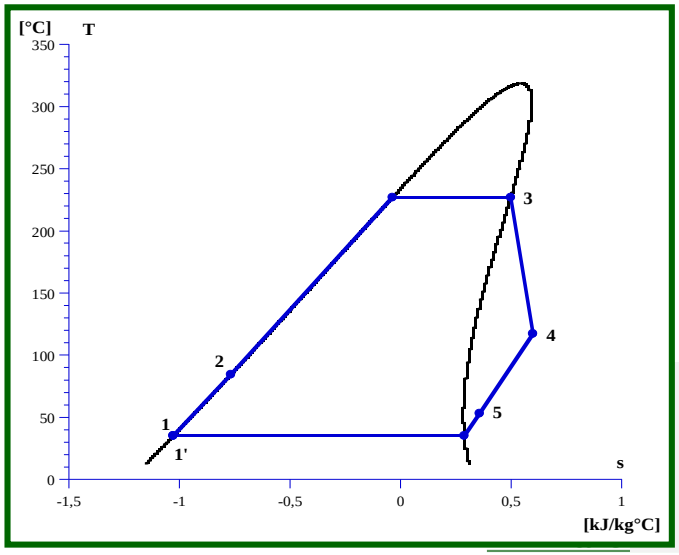
- tecnologia emergente
- costo specifico elevato (1100 €/kWe)
- rendimenti elettrici inferiori
- bassa temperatura fumi (280 °C)

Tecnologie non consolidate (1)

Cicli Organici di Rankine (ORC)

- Basati sul ciclo a vapore (ciclo Rankine): tecnologia consolidata e matura
- Possibilità di utilizzare una combustione esterna o di recuperare calore di scarto da TG, MTG o MCI: piccoli/micro cicli combinati
- Il calore introdotto è trasferito al fluido di lavoro tramite uno scambiatore che funge da caldaia a recupero
- <u>Il fluidi di lavoro sono fluidi organici</u>

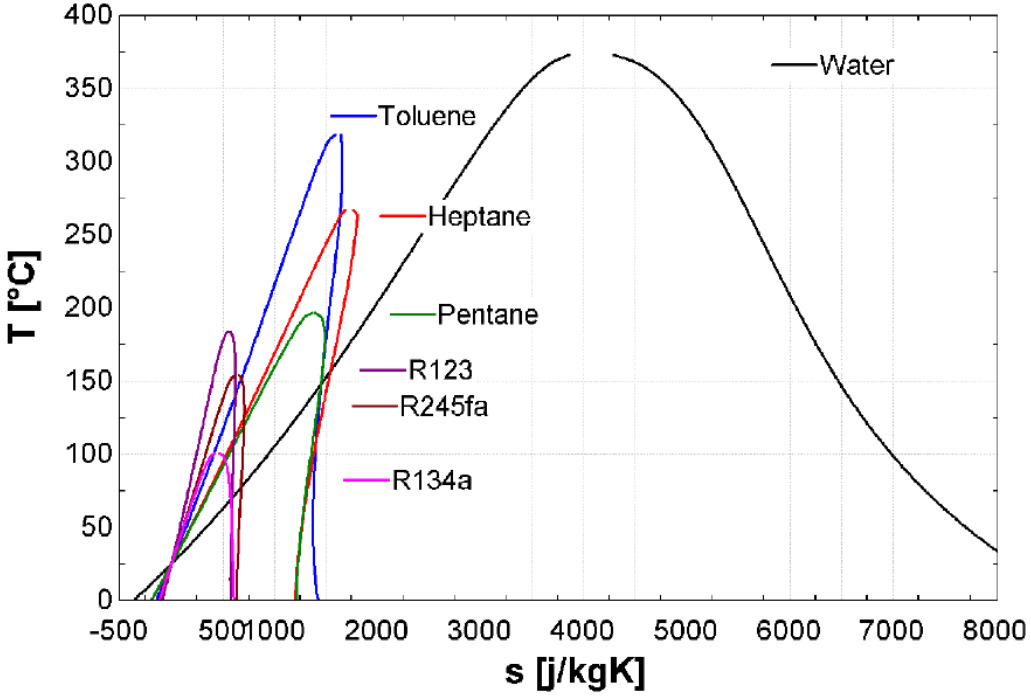




Sistemi ORC *(Organic Rankine Cycle)*

Fluidi Organici

- Possibilità di sfruttare sorgenti di calore a bassa temperatura (100 ÷ 400 °C)
- Basse pressioni di vaporizzazione, anche per condizioni prossime a quelle critiche

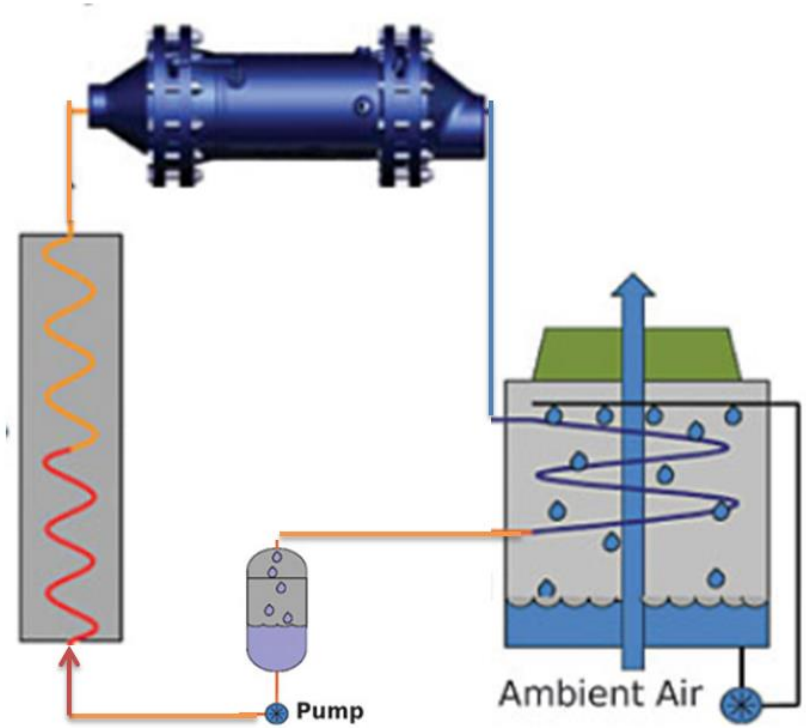


- Modesti salti entalpici da sfruttare ed elevati pesi molecolari del fluido di lavoro, con conseguente possibilità di utilizzare come espansori turbine con basso numero di stadi (anche uno solo) e dalle velocità di rotazione ridotte (accoppiamento diretto al generatore elettrico)
- Consentono di ottenere sistemi con dimensioni ridotte rispetto ai classici cicli a vapore d'acqua

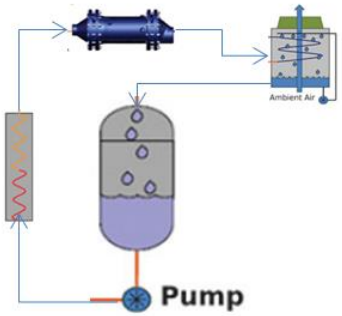
Sistemi ORC *(Organic Rankine Cycle)*

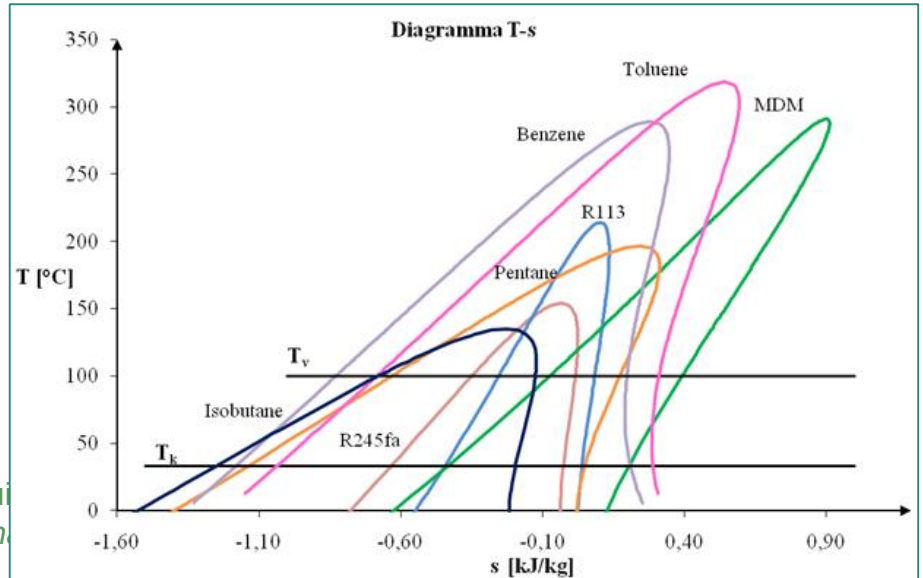
Influenza della tipologia di fluidi di lavoro sulle dimensioni del sistema

Toluene:



R245fa:





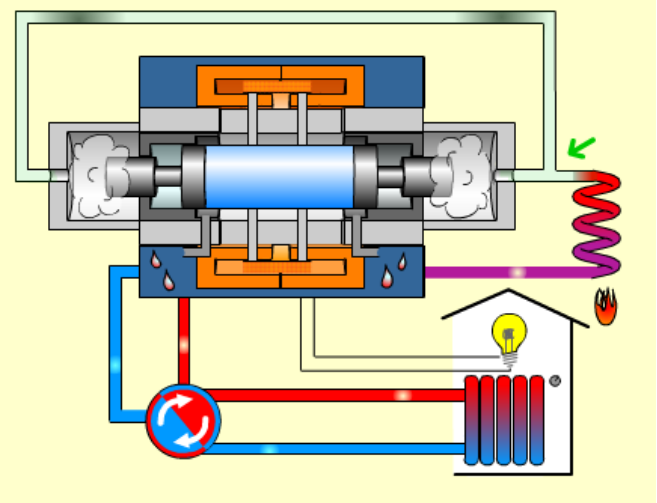
Sistemi ORC *(Organic Rankine Cycle)*

Tecnologie	Produttori	Potenze Elettriche [kW]
ORC	Turboden (ITA)	200-2000
	Infinity Turbine (USA)	30-500
	UTC Power (USA)	280
	Ormat (USA)	250 - 2000
	Ingeco (ITA)	100
MRC	Energetix Group (UK)	2.5
	Otag (GER)	2.1
	Ormat (USA)	0.2 - 4.5
	Cogen Microsystems (AUS)	2.5, 10

Sistemi ORC *(Organic Rankine Cycle)*

Otag Lion (Germania)

- H_2O
- espansore a pistone
- $P_e = 3\ kW_e$
- $P_{th} = 16\ kW_{th}$
- $\eta_{el} = 10\%$, $\eta_U = 94\%$
- $T_{H2O_MAX} = 350°C$; $p_{MAX} = 25\text{-}30bar$



lion®- Powerblock www.otag.de

CogenMicro (Australia)

- H_2O
- espansore tipo scroll
- $P_e = 2.5\text{-}10\ kW_e$
- $P_{th} = 11\text{-}44\ kW_{th}$

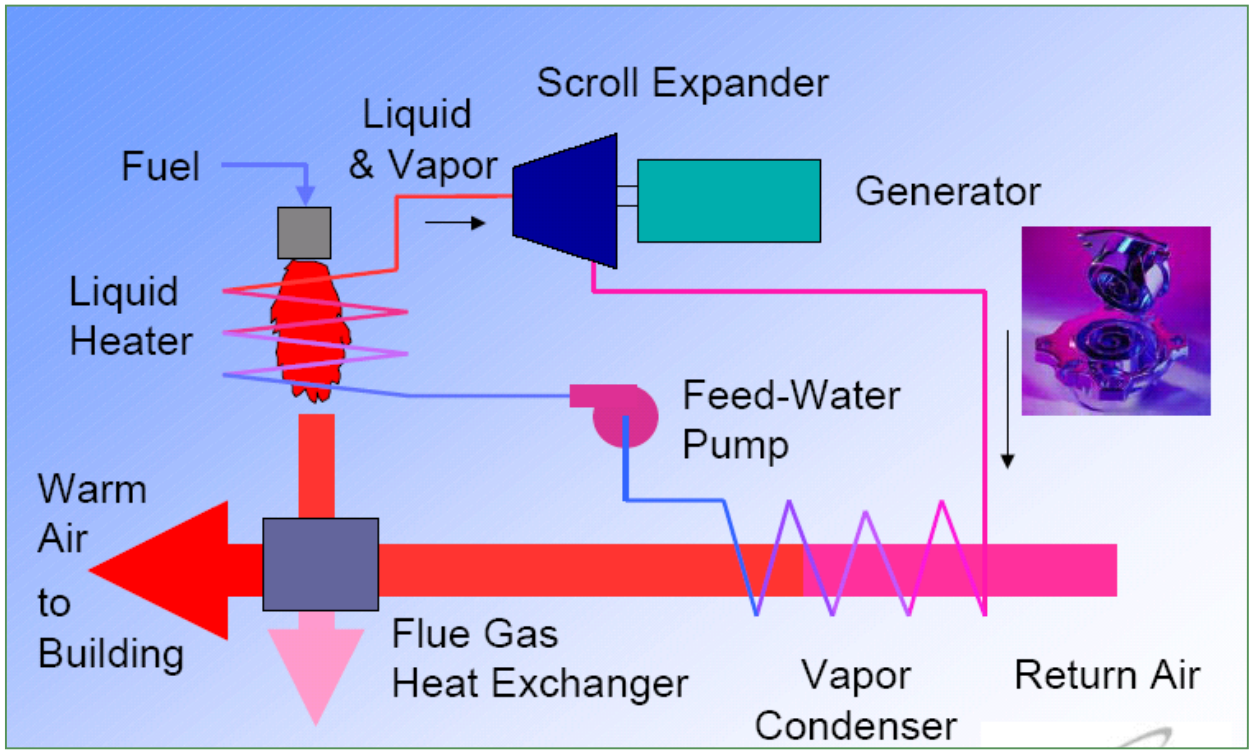
www.cogenmicro.com

www.ravenna2016.it

Sistemi ORC *(Organic Rankine Cycle)*

Climate Energy (UK)

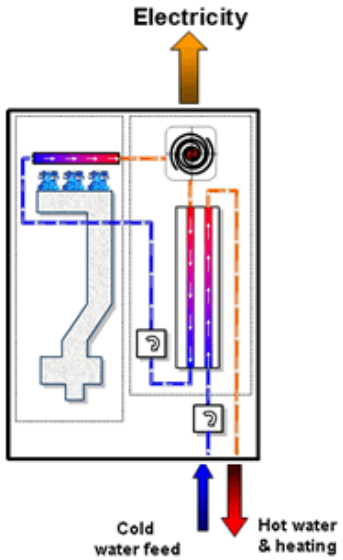
- H_2O
- espansore tipo scroll
- P_e = 1-10 kW_e, P_{th}/P_e = 8.5



Sistemi ORC *(Organic Rankine Cycle)*

Energetix (UK)

- Fluido organico
- espansore tipo scroll
- $P_e = 1\ kW_e$, $P_{th} = 10\ kW_{th}$
- Commercializzazione: 2008



Sistemi ORC *(Organic Rankine Cycle)*

Turboden (Italia) – Moduli ORC

	T500-CHP	T600-CHP	T800-CHP	T1100-CHP	T1500-CHP
Sorgente di calore	Olio diatermico in circuito chiuso	Olio diatermico in circuito chiuso	Olio diatermico in circuito chiuso	Olio diatermico in circuito chiuso	Olio diatermico in circuito chiuso
Temperatura nominale dell'olio diatermico (ingresso / *uscita)*	300 / *250 °C*	300 / *250 °C*	300 / *250 °C*	300 / *250 °C*	300 / *250 °C*
Potenza termica ceduta dall'olio	2900 kW	3500 kW	4500 kW	6200 kW	8700 kW
Temperatura dell'acqua calda (ingresso / *uscita)*	60 / *80 °C*	60 / *80 °C*	60 / *80 °C*	60 / *80 °C*	60 / *90 °C*
Potenza termica al teleriscaldamento	2320 kW	2800 kW	3580kW	4930 kW	6975 kW
Potenza elettrica attiva netta	500 kW	600 kW	800 kW	1100 kW	1500 kW
Rendimento elettrico	17 %	17 %	18 %	18 %	17 %
Rendimento I principio	97 %	97 %	97%	97 %	97 %

Applicazioni:

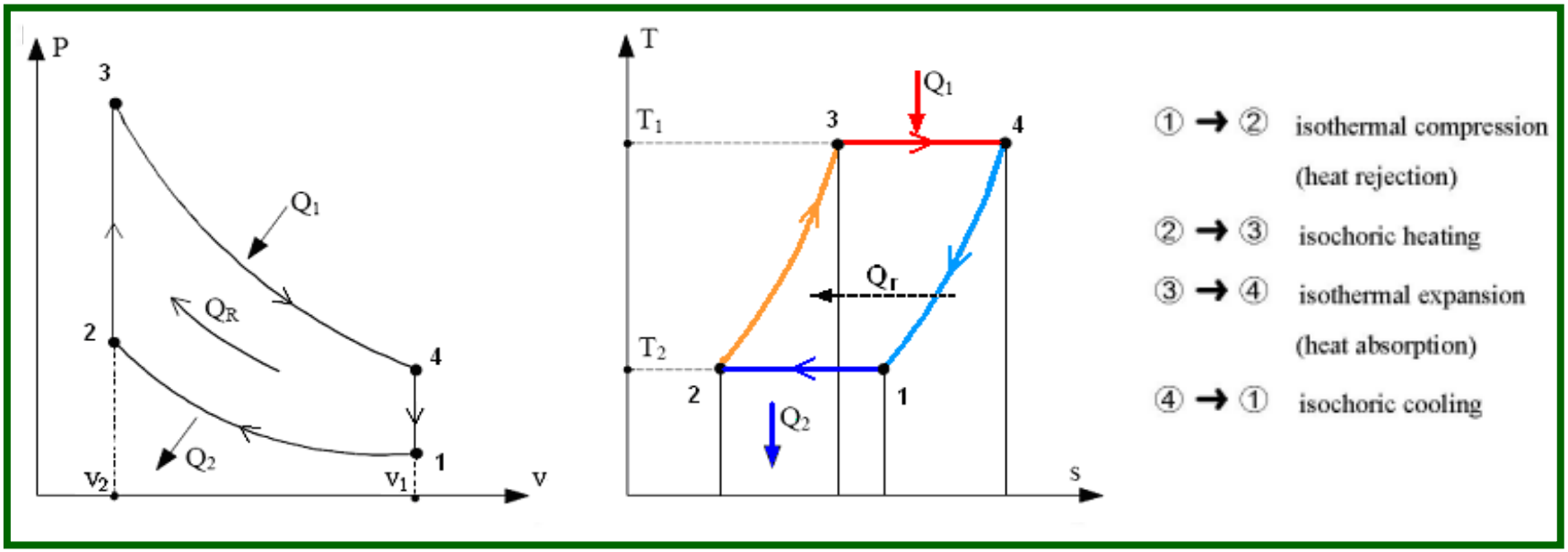
- **Biomassa**
- **Recupero di calore**
- **Geotermia**
- **Solare termodinamico**

Costo: 1000 ÷ 3000 Euro/kW$_e$

Tecnologie non consolidate (2)

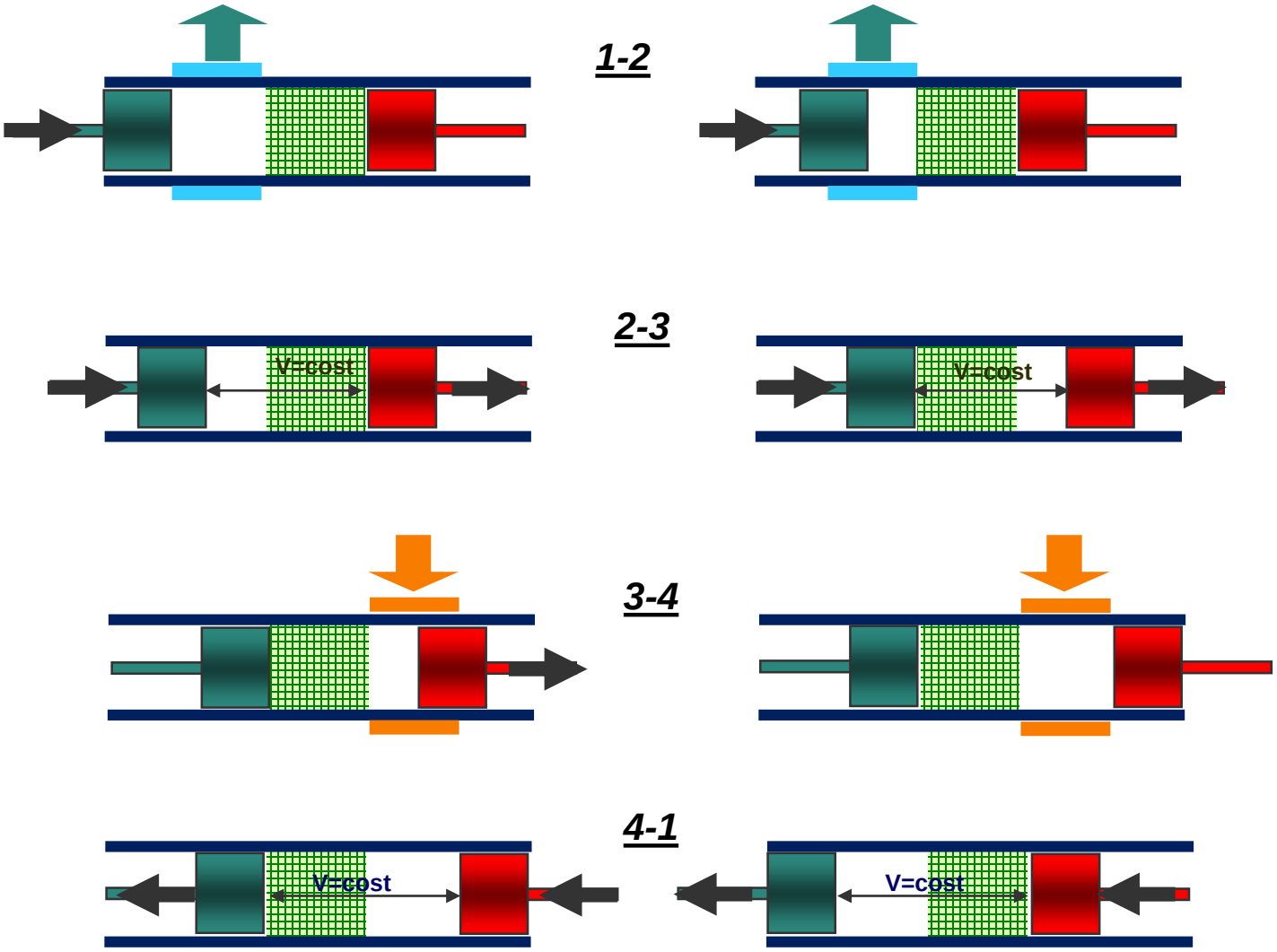
Motori Stirling (ORC)

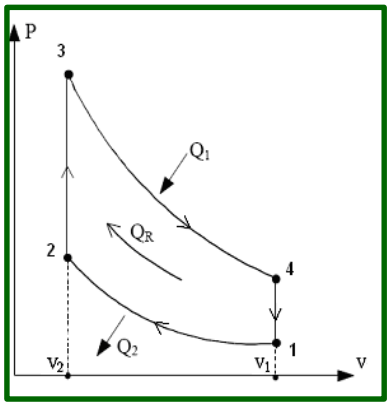
- Operano secondo un ciclo chiuso a gas (elio, azoto, aria)
- combustione esterna e continua (libertà sulla scelta del combustibile, minori emissioni gassose e sonore)
- calore introdotto e scaricato attraverso scambiatori di calore



Tecnologie non consolidate (2)

Motori Stirling (ORC)





① → ② isothermal compression (heat rejection)

② → ③ isochoric heating

③ → ④ isothermal expansion (heat absorption)

④ → ① isochoric cooling

Tecnologie non consolidate (2)

Motori Stirling (ORC)

VANTAGGI

- possibile recupero di flussi termici a bassa temperatura (250 °C)
- taglie fino a qualche centinaio di kWe
- Rendimenti elettrici = 10-35 %

SVANTAGGI

- elevati tempi di avviamento
- complessità e varietà di architetture
- costi ≈ 3000-3500 €/kWe

Motori Stirling

Infinia – applicazione solare

P_e = 3 kW_e (specchi puliti, T_{amb} = 20 °C, insolazione 850 W/m^2)

Motori Stirling

www.stirlingenergy.com

Stirling Energy Systems (SES)
(USA)

Motore Stirling ad energia solare

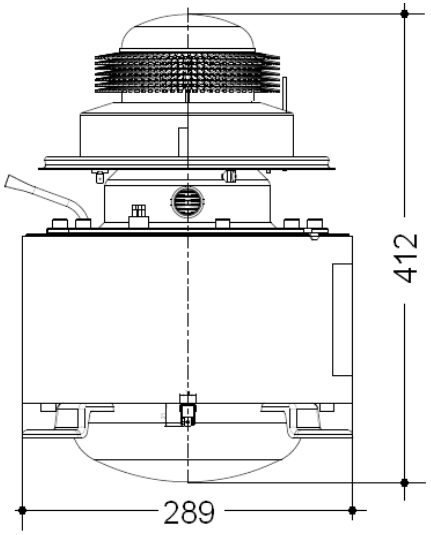
www.ravenna2016.it

Motori Stirling

www.microgen-engine.com

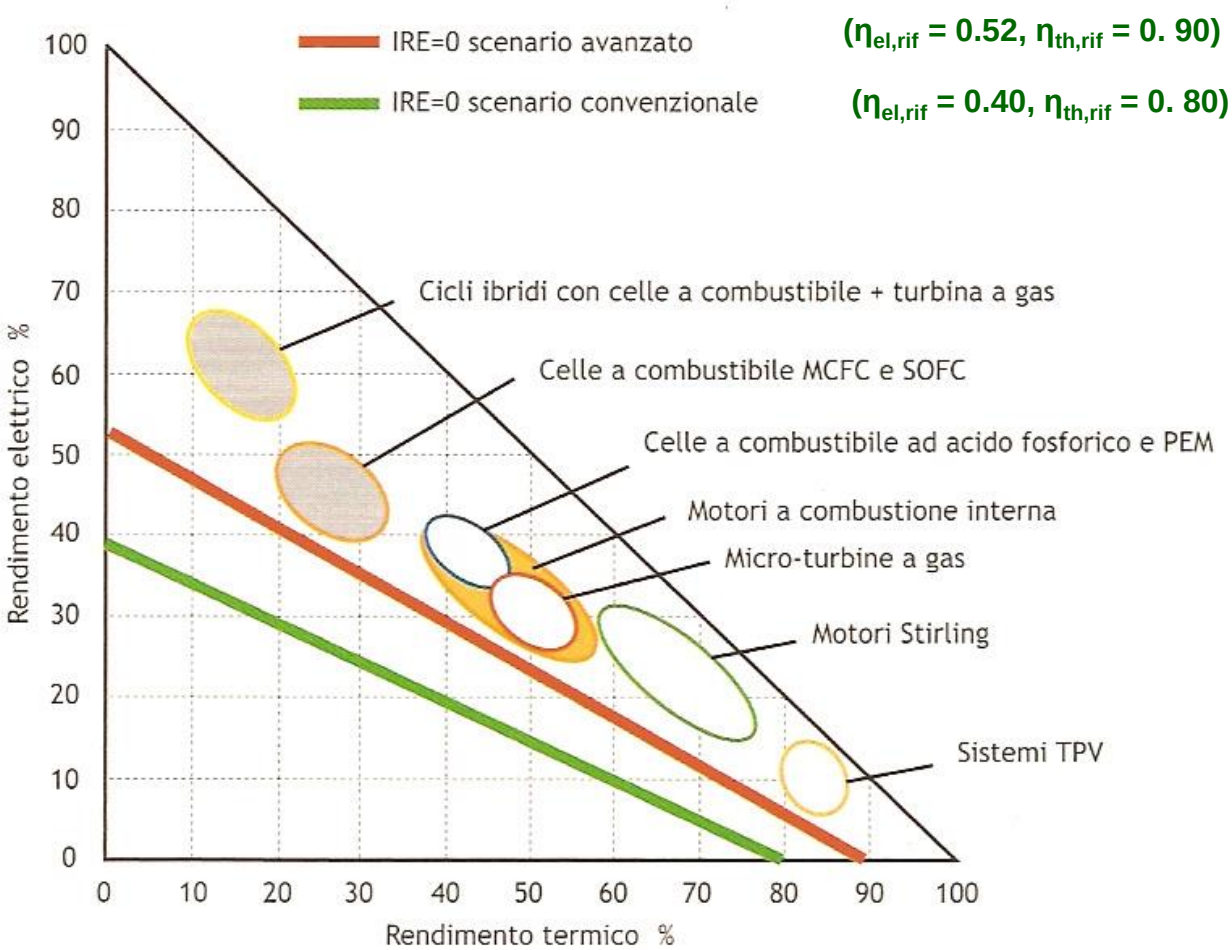
Microgen

- $P_e = 1\ kW_e$
- $P_{th} = 6\ kW_{th}$
- $\eta_e = 13.5\ \%$
- $\eta_{th} = 81.1\ \%$
- $\eta_U = 94.6\ \%$



Tecnologie - confronto

Potenzialità cogenerative delle principali tecnologie (recupero totale del calore)



($\eta_{el,rif}$ = 0.52, $\eta_{th,rif}$ = 0. 90)

($\eta_{el,rif}$ = 0.40, $\eta_{th,rif}$ = 0. 80)

Delibera AEEG 42/02

$$IRE = 1 - \frac{Ec}{\frac{Ee}{\eta_{es}\,p} + \frac{Et}{\eta_{ts}}} > IRE_{lim}$$

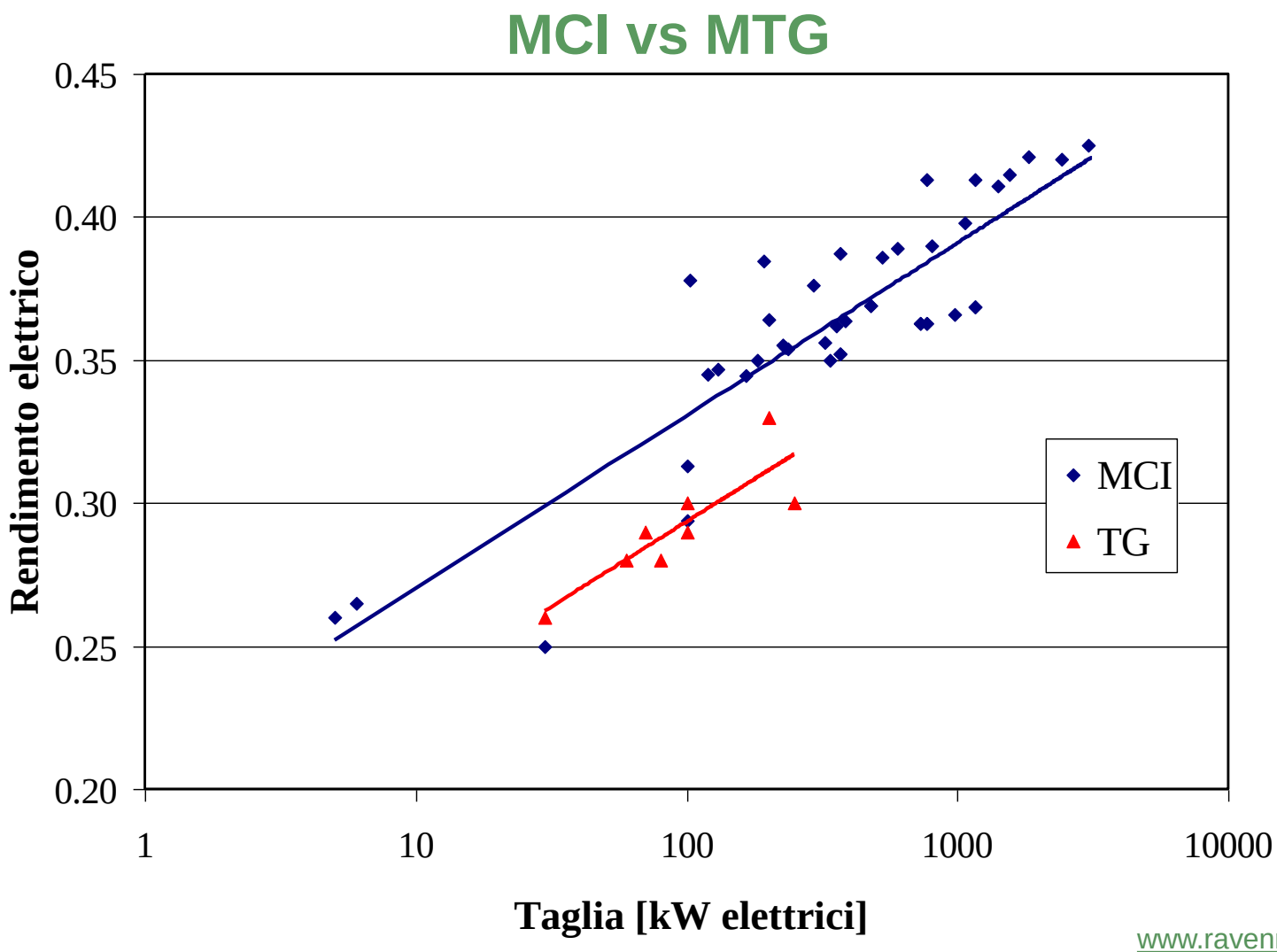
D.Lgs. 20/07
(in vigore dal 01/01/11, secondo D.M. 4/8/11)

$$PES(\cong IRE) > PES_{lim} \begin{cases} 0{,}1 \\ \boxed{0} \end{cases}$$

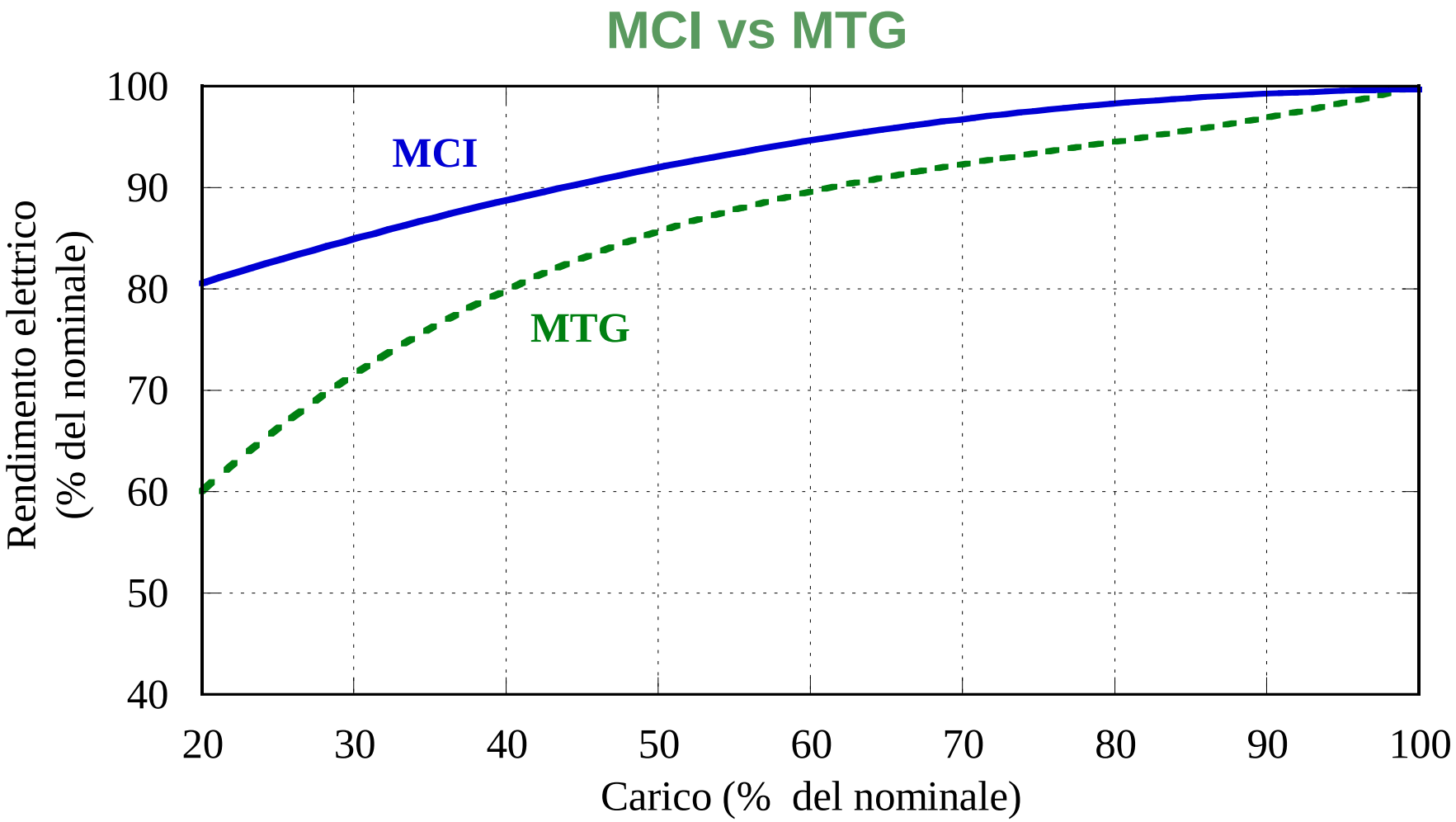
per piccola cog. (P_e < 1 MW)

www.ravenna2016.it

Tecnologie consolidate - confronto



Tecnologie consolidate - confronto



LA COGENERAZIONE di PICCOLA TAGLIA applicazioni

- Generazione continua in parallelo con la rete elettrica nazionale (“grid connected”)
- Generazione continua “ad isola”
- “Stand-by” per garantire sicurezza nella fornitura elettrica
- “Peakshaving” per far fronte ad elevate richieste di potenza per periodi di tempo limitato
- “Power quality” per garantire tensione e frequenza costante a salvaguardia di un processo produttivo

LA COGENERAZIONE di PICCOLA TAGLIA problematiche

Per l'installatore

- Iter autorizzativi
- Aspetti economici (elevato costo specifico delle soluzioni più innovative, scarsa valorizzazione dell'energia elettrica ceduta alla rete, ecc.)
- Conciliazione della domanda elettrica/termica/ frigorifera (scelta della taglia e della tipologia di impianto)

Per il sistema elettrico e del gas

- Impatto sul sistema elettrico (utilizzo delle reti di distribuzione in maniera attiva e non più passiva)
- Necessità di potenziare reti di distribuzione del gas

Per gli enti locali

- Introduzione di nuove sorgenti emissive in aree urbane o comunque densamente popolate

Fare i conti con l'ambiente
Rifiuti acqua energia
Ravenna 2016
18·19·20 maggio

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

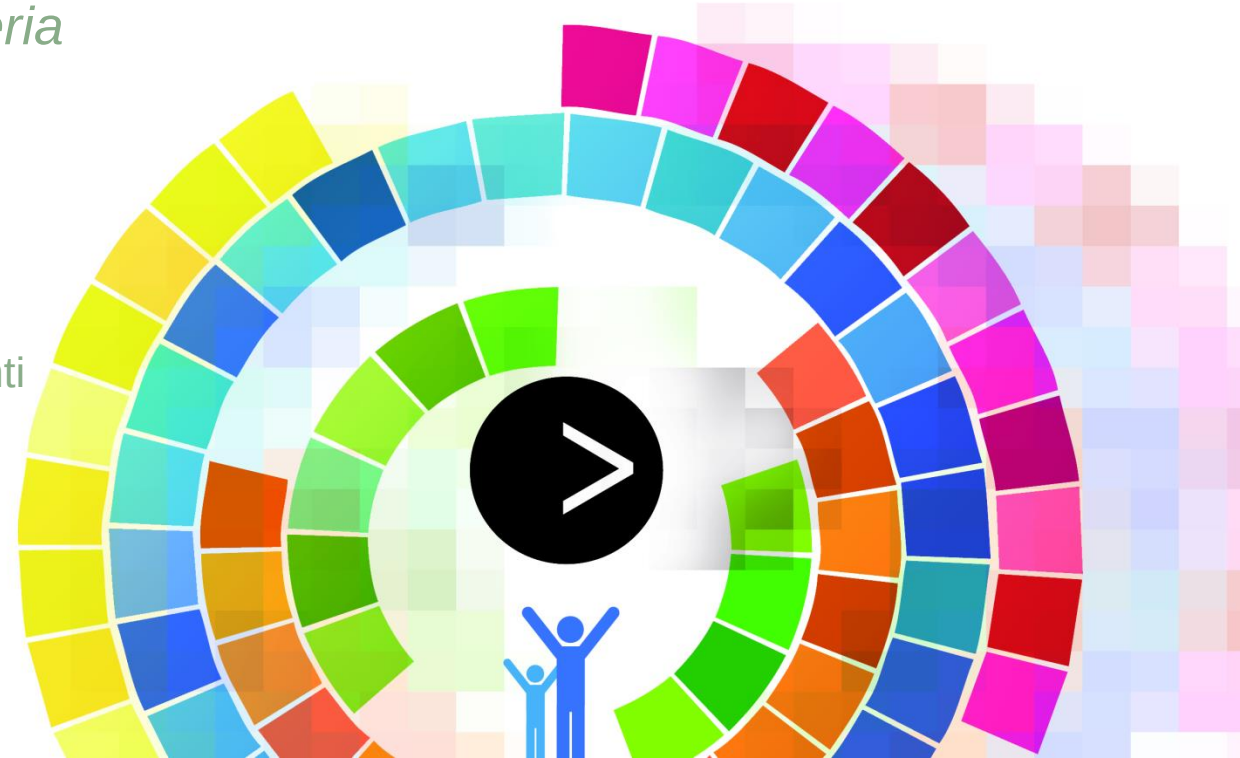
Ing. Valentina Orlandini

Dipartimento di Ingegneria Industriale –DIN

Università di Bologna

Workshop D

Generazione Distribuita e Fonti Energetiche Rinnovabili



www.ravenna2016.it

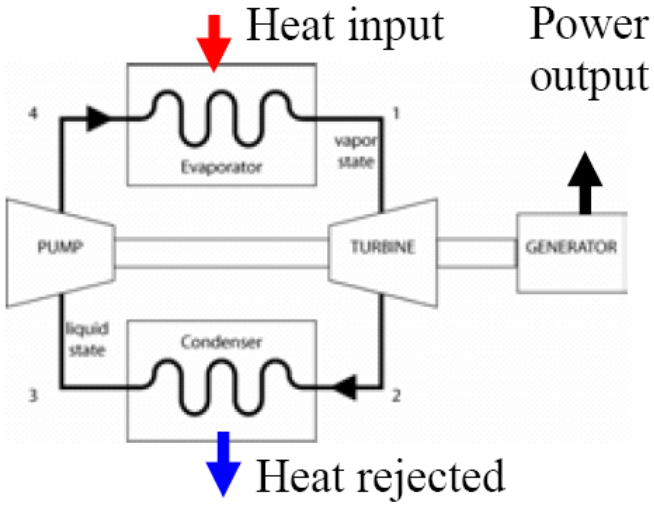
Micro cicli Rankine

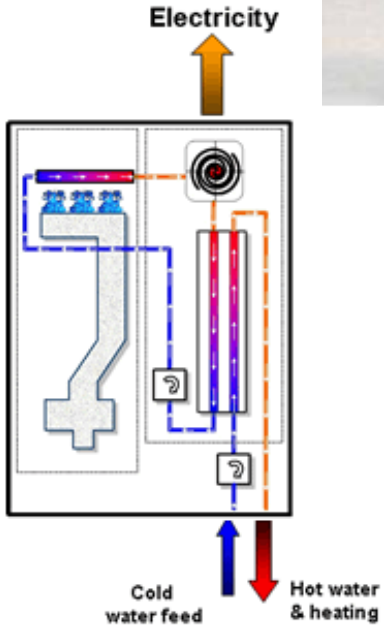
✓Ciclo di Rankine ad H_2O di taglia modesta (1-10 kW) per applicazioni domestiche

✓Evaporatore affacciato alla fiamma

✓Espansori volumetrici di tipo scroll o alternativi

✓Prestazioni elettriche molto limitate (η_e<10%)





LA COGENERAZIONE di PICCOLA TAGLIA
applicazioni

- ✓ Generazione continua in parallelo con la rete elettrica nazionale (“*grid connected*”)
- ✓ Generazione continua “*ad isola*”
- ✓ *“Stand-by”* per garantire sicurezza nella fornitura elettrica
- ✓ “*Peakshaving*” per far fronte ad elevate richieste di potenza per periodi di tempo limitato
- ✓ “*Power quality*” per garantire tensione e frequenza costante a salvaguardia di un processo produttivo

www.ravenna2016.it

LA COGENERAZIONE di PICCOLA TAGLIA

problematiche

Per l'installatore

- ✓ Iter autorizzativi
- ✓ Aspetti economici (elevato costo specifico delle soluzioni più innovative, scarsa valorizzazione dell'energia elettrica ceduta alla rete, ecc.)
- ✓ Conciliazione della domanda elettrica/termica/ frigorifera (scelta della taglia e della tipologia di impianto)

Per il sistema elettrico e del gas

- ✓ Impatto sul sistema elettrico (utilizzo delle reti di distribuzione in maniera attiva e non più passiva)
- ✓ Necessità di potenziare reti di distribuzione del gas

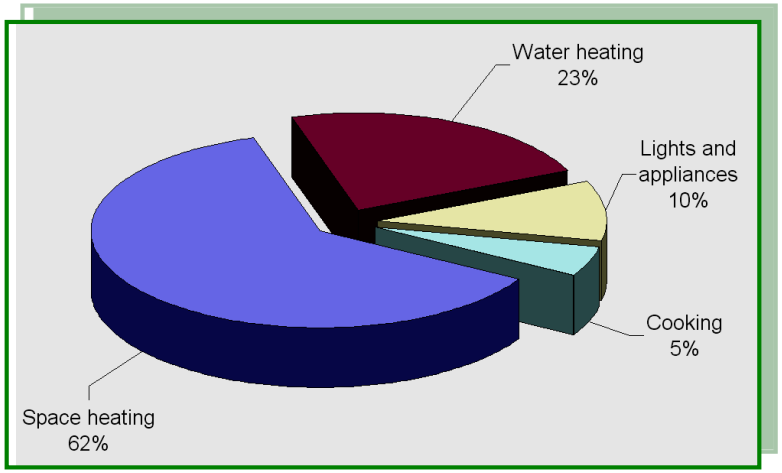
Per gli enti locali

- ✓ Introduzione di nuove sorgenti emissive in aree urbane o comunque densamente popolate

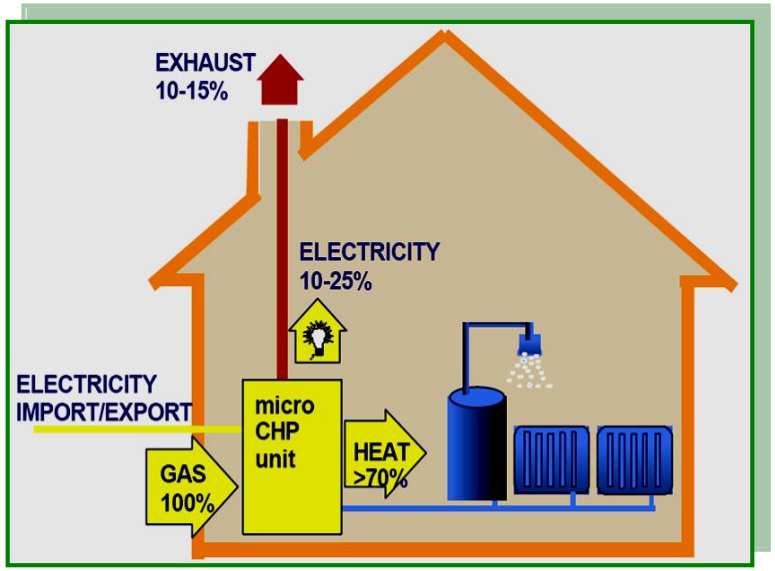
www.ravenna2016.it

Introduzione (2)

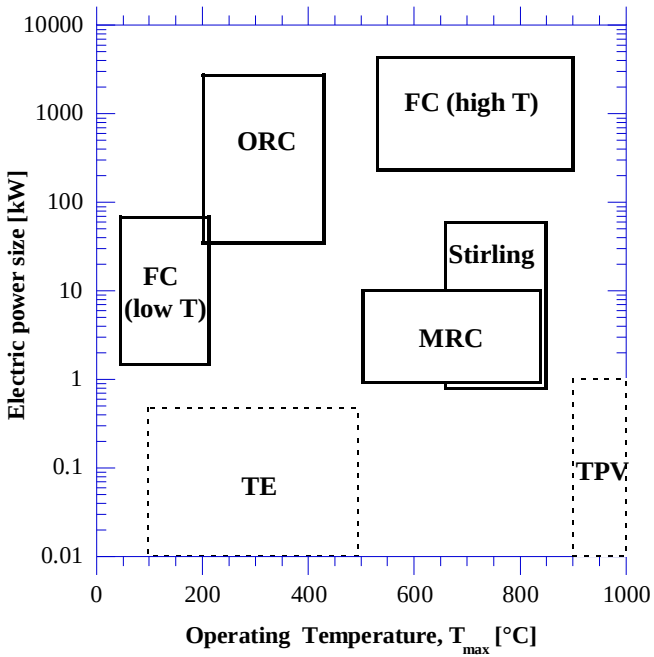
- Di tutta l'energia consumata in un edificio residenziale, circa **l'80%-85%** è utilizzata per la **produzione di acqua sanitaria e per il riscaldamento** degli ambienti

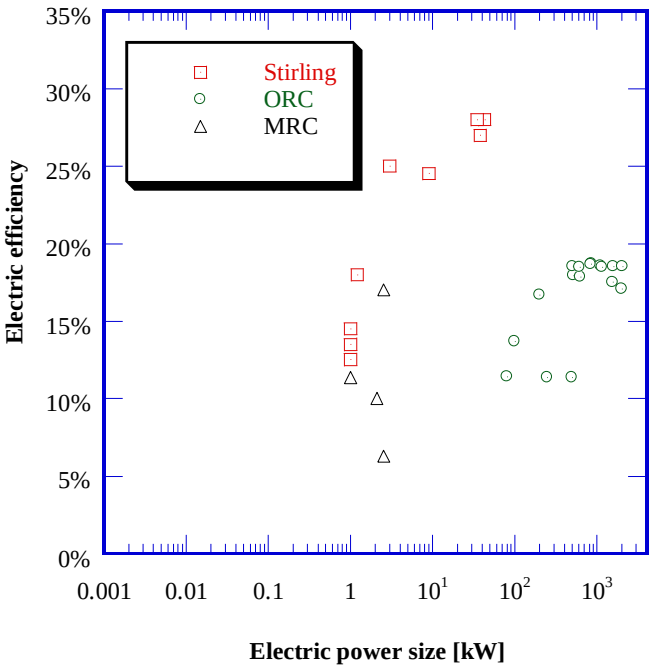


- Attraenti per la cogenerazione residenziale unità micro-cognerative con **basso rendimento elettrico**, ma con:
  - **elevato** rapporto P_{th}/P_e
  - **elevato** coefficiente di **utilizzo del combustibile**



Tecnologie micro-CHP non consolidate





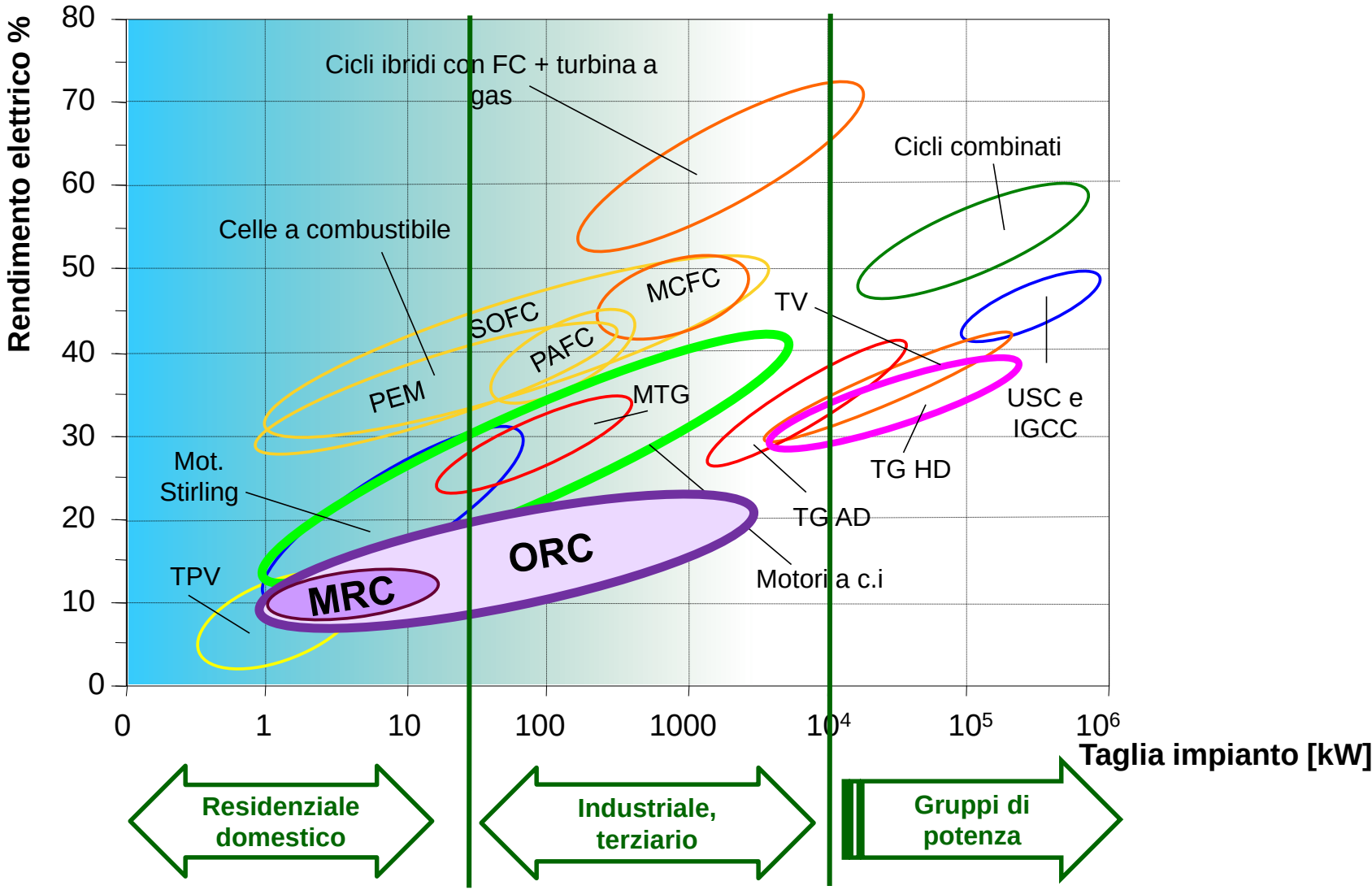
www.ravenna2016.it

Sistemi ORC *(Organic Rankine Cycle)*

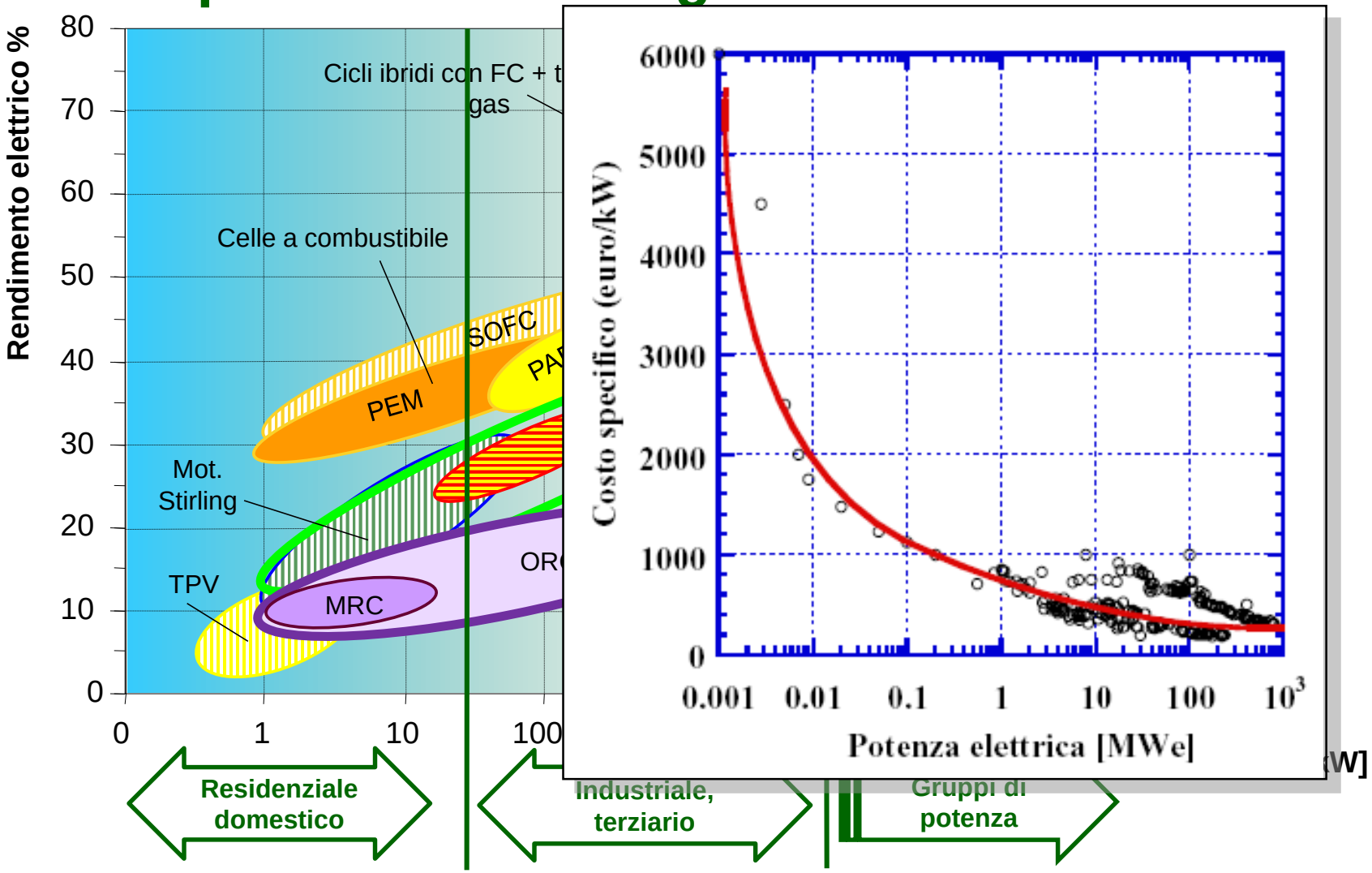
Fluidi Organici

	Fluido organico	Acqua
Pressione Critica	Bassa	Alta
Temperatura Critica	Bassa	Alta
Punto di ebollizione	Basso	Alto
Pressione di condensazione	Accettabile	Bassa
Calore specifico	Basso	Alto
Viscosità	Relativamente Alta	Bassa
Infiammabilità	Dipende dal fluido	No
Tossicità	Sì, dipende dal fluido	No
Impatto ambientale	Alto, dipende dal fluido	No
Disponibilità	Problemi di fornitura	Disponibile
Costo	Alto	Basso

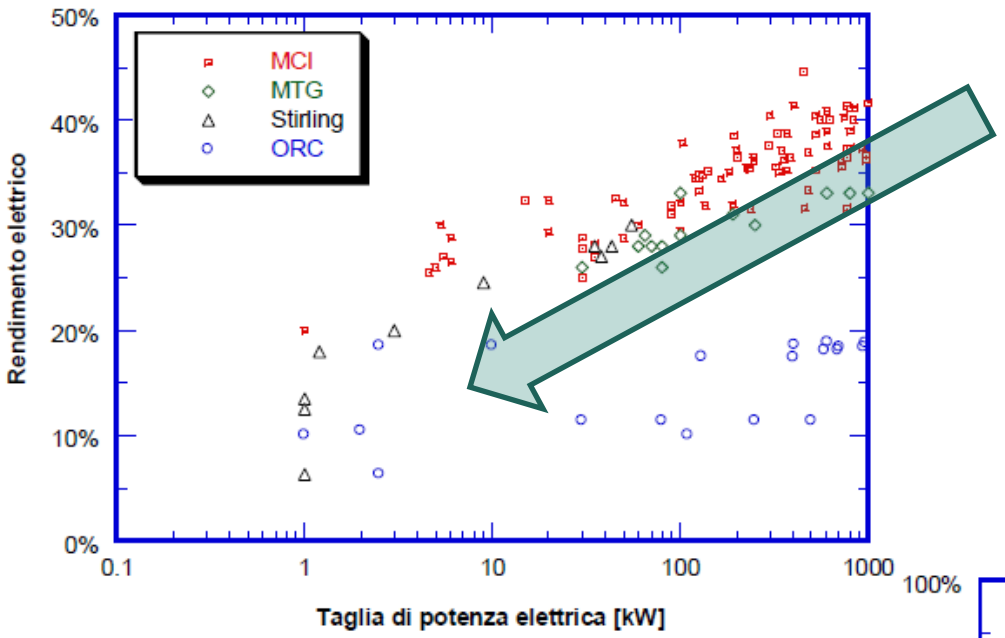
Tecnologie per la cogenerazione



Tecnologie per la piccola/micro cogenerazione

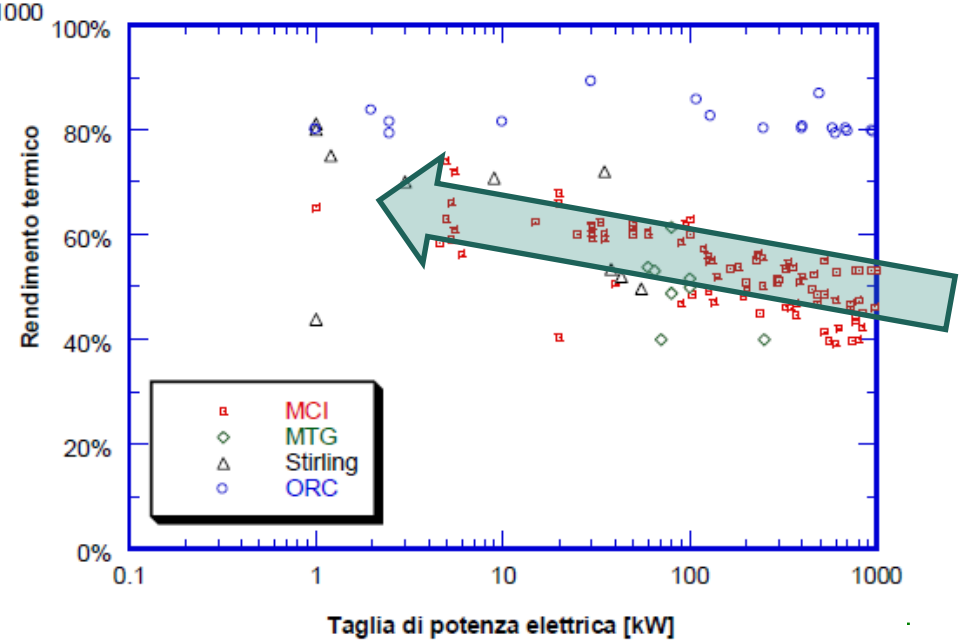


Tecnologie per la microcogenerazione



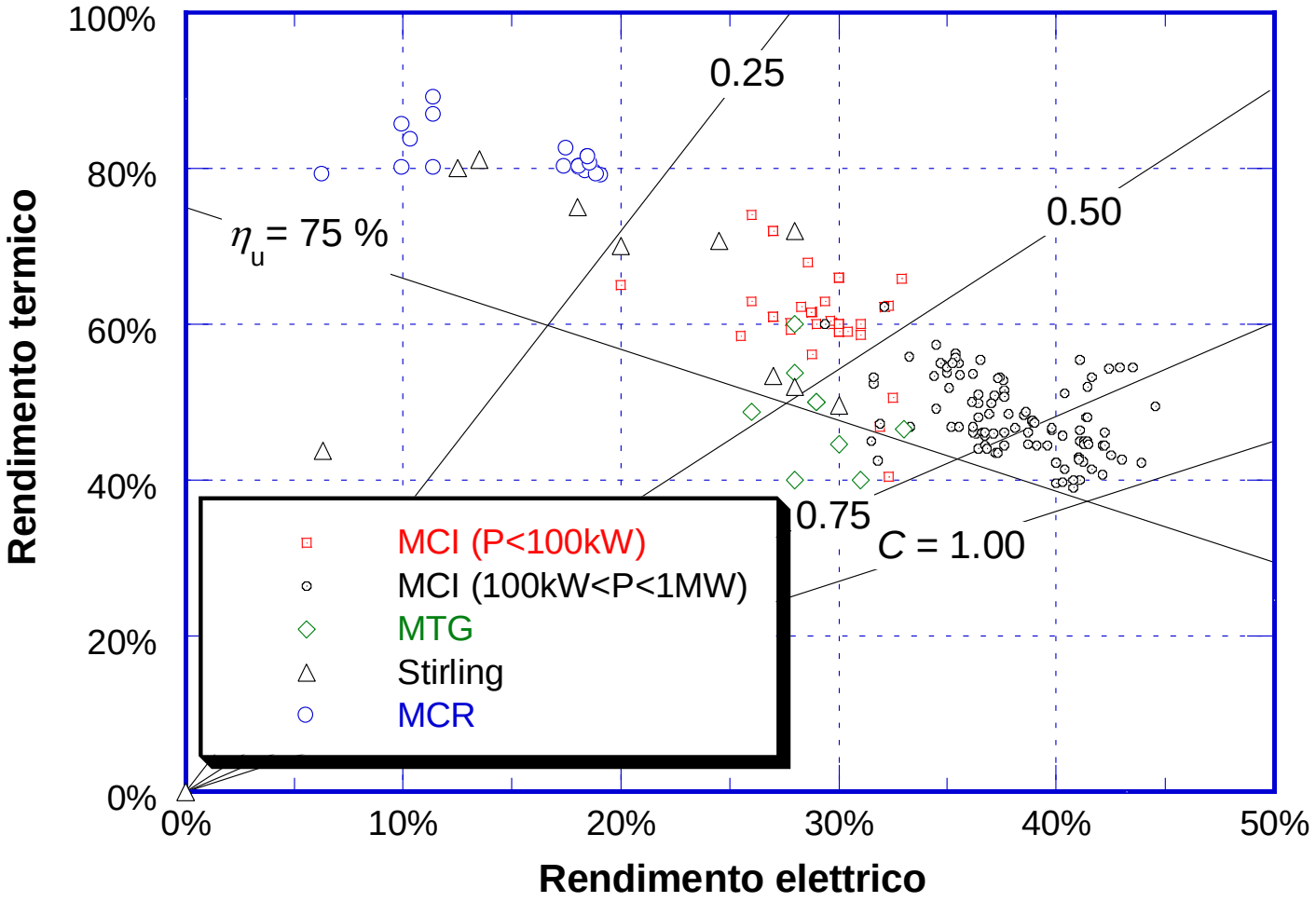
Rendimento elettrico

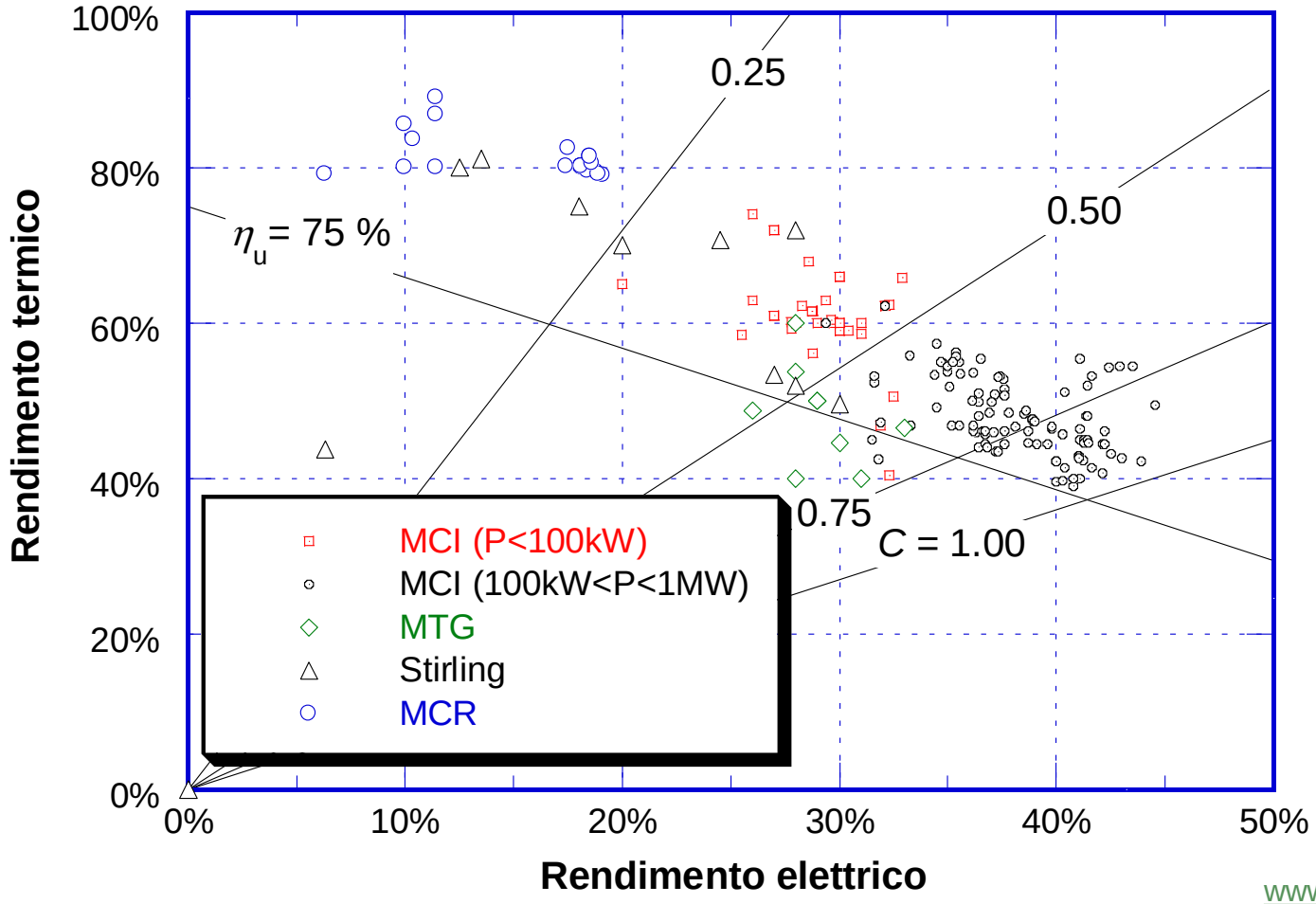
Rendimento termico



-Report **RSE/2009/18**
Ricognizione sulle tecnologie di cogenerazione, MSE-ENEA-UniBO-UniFE-FIRE
- Report **RdS/2010/220** (MSE-ENEA-UniBO)
Integrazione di sistemi CHP innovativi di piccolissima taglia nelle reti di distribuzione

Tecnologie per la microcogenerazione



Tecnologie - confronto

Rendimento elettrico e termico a confronto