



**POLITECNICO DI MILANO**  
Sede di Piacenza

***I PERCORSI DI RECUPERO ENERGETICO  
A VALLE DELLA RACCOLTA DIFFERENZIATA***

**Corso di Aggiornamento del Politecnico di Milano  
31 gennaio - 03 febbraio 2005**

**PROBLEMATICHE DEL  
RECUPERO DI ENERGIA DA RIFIUTI**

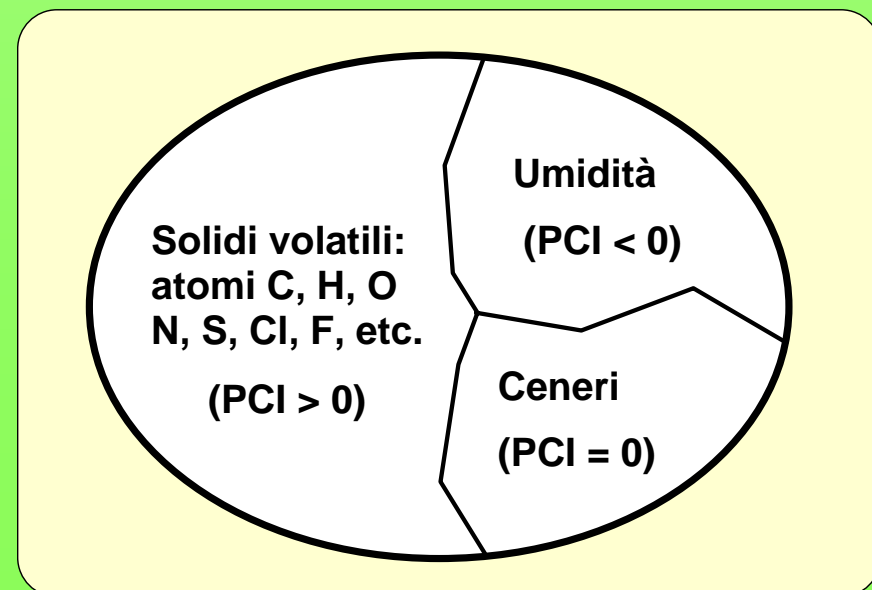
**Prof. Stefano Consonni  
Dipartimento di Energetica  
Politecnico di Milano**

# CARATTERIZZAZIONE RSU

**Composizione Merceologica:**  
classifica i componenti sulla base di  
caratteristiche fisiche macroscopiche  
rilevabili visivamente



**Composizione Elementare:**  
classifica i componenti sulla base  
della composizione chimica, rilevata  
con prove di laboratorio



# ENERGIA DA RSU

La materia che costituisce il RSU può liberare energia termica attraverso un processo di combustione, nel quale:

atomi C  $\rightarrow$  CO<sub>2</sub> + calore

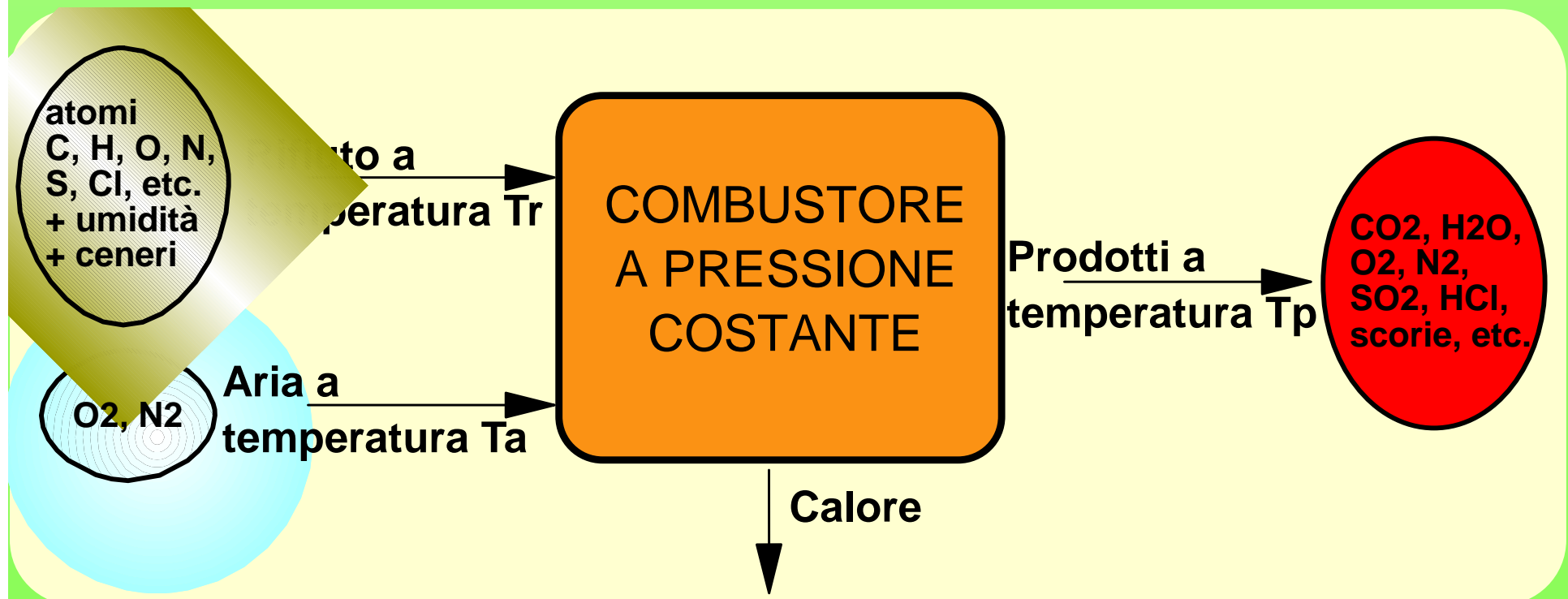
atomi H  $\rightarrow$  H<sub>2</sub>O + calore

atomi S  $\rightarrow$  SO<sub>2</sub> + calore

e inoltre:

atomi Cl  $\rightarrow$  HCl

atomi N  $\rightarrow$  N<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, etc.



## POTERE CALORIFICO INFERIORE (PCI)

PCI [J/kg o kcal/kg] è il calore liberato dalla completa ossidazione dell'unità di massa di RSU [1 kg] alle condizioni di riferimento (1 atm, 25°C) nel caso in cui tutta l'acqua nei prodotti di combustione sia allo stato di vapore.

Indicando con:

$y_{SV}$  = frazione massica dei solidi volatili [kg<sub>SV</sub>/kg<sub>RSU</sub>]

$y_{Um}$  = frazione massica di umidità [kg<sub>Um</sub>/kg<sub>RSU</sub>]

$y_{Ce}$  = frazione massica di ceneri [kg<sub>Ce</sub>/kg<sub>RSU</sub>]

$$PCI_{RSU} = y_{sv} \cdot PCI_{SV} - y_{Um} \cdot \Delta h_{ev} = (1 - y_{Um} - y_{Ce}) \cdot PCI_{SV} - y_{Um} \cdot \Delta h_{ev}$$

$$PCI_{RSU} = \left[ 1 - y_{Ce} - y_{Um} \cdot \left( 1 + \frac{\Delta h_{ev}}{PCI_{SV}} \right) \right] \cdot PCI_{SV}$$

## SOLIDI VOLATILI

In assenza di dati sperimentali (rarissimi !) la composizione elementare di ciascuna frazione può essere ipotizzata sulla base della composizione dei materiali prevalenti in ciascuna frazione

Potere calorifico può essere calcolato con formule empiriche come, per esempio, quella di Dulong-Berthelot:

$$PCS \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right] = 81,37 \cdot y_C + 345 \cdot \left( y_H - \frac{y_O + y_N - 1}{8} \right) + 22,5 \cdot y_S$$

	frazione volatile secca (RRD - umidità - ceneri)						PCS Dulong kcal/kg	PCI kcal/kg
	% in peso							
	C	Cl	H	O	N	S		
Carta e cellulose	46,4	0,7	6,4	46,1	0,2	0,2	4025	3690
Legno/Biomassa	49,1	0,0	6,3	44,4	0,1	0,1	4308	3976
Plastica	65,2	2,7	7,9	24,2	0,0	0,0	7017	6604
Vetro e inerti	46,5	12,0	6,5	35,0	0,0	0,0	4560	4219
Metalli	46,5	8,0	6,5	39,0	0,0	0,0	4387	4046
Organico	45,7	0,0	7,1	45,7	1,4	0,0	4194	3819
Sottovaglio	58,6	1,0	4,0	36,0	0,2	0,2	4635	4425

## DAI SOLIDI VOLATILI ALL'RSU

	<b>Umidità %</b>	<b>Ceneri %</b>	<b>PCI kcal/kg</b>	<b>conc. % peso</b>
<b>Carta e cellulose</b>	14,0	5,0	2907	<b>25,0</b>
<b>Legno/Biomassa</b>	22,0	1,5	2913	<b>6,0</b>
<b>Plastica</b>	6,0	9,0	5579	<b>19,0</b>
<b>Vetro e inerti</b>	4,5	95,0	-5	<b>3,5</b>
<b>Metalli</b>	4,5	95,0	-6	<b>3,5</b>
<b>Organico</b>	70,0	9,0	394	<b>31,0</b>
<b>Sottovaglio</b>	30,0	35,0	1374	<b>12,0</b>
<b>per 1 kg RRD</b>	<b>31,58</b>	<b>16,69</b>	<b>2248</b>	<b>100,0</b>
<b>per 1 kg SV</b>			<b>4701</b>	

<b>PCI, MJ/kgRSU</b>	<b>9,41</b>
<b>PCI, MJ/kgSV</b>	<b>19,68</b>

<b>valore ipotizzato</b>
<b>valore calcolato</b>

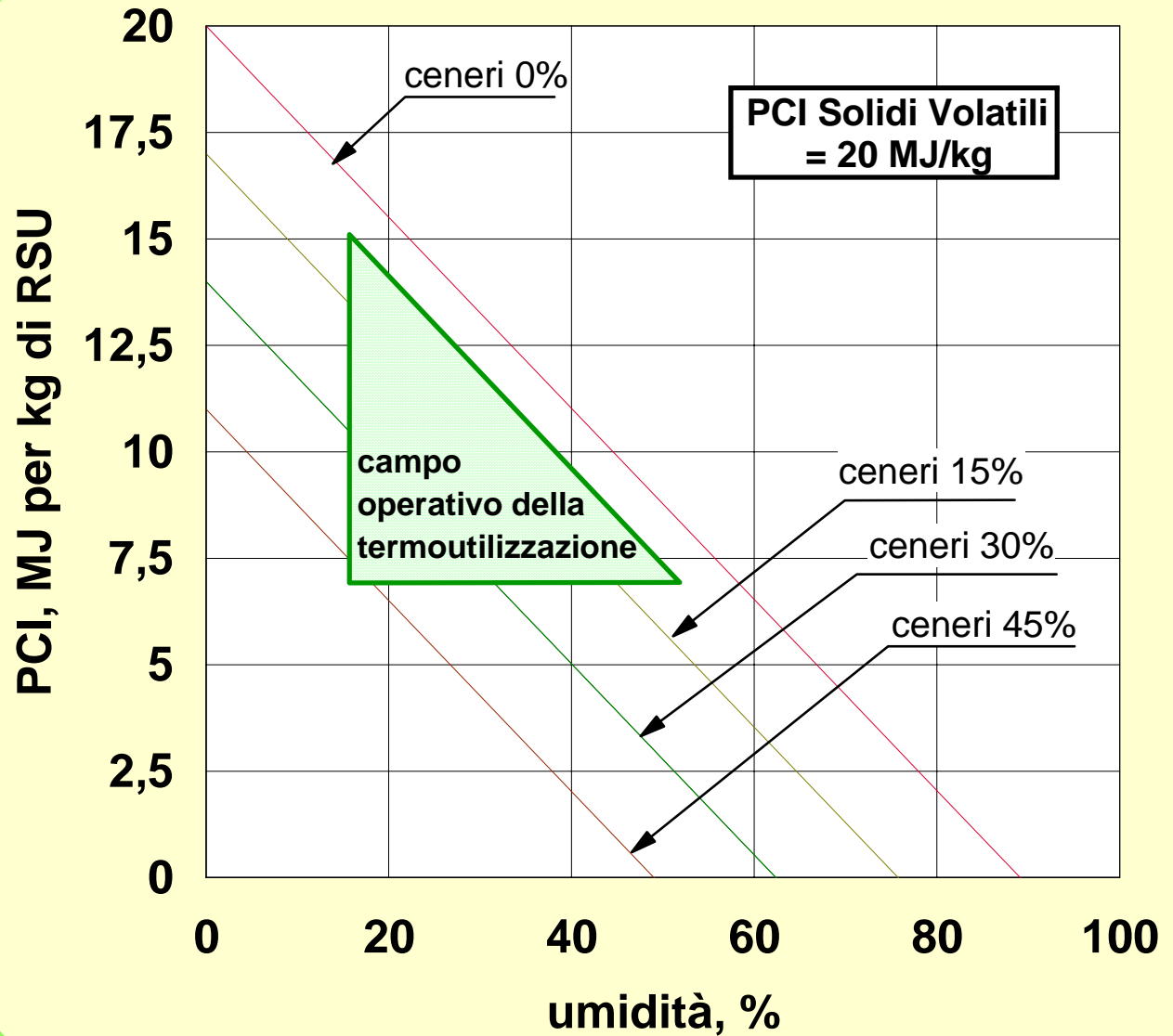
# Variazioni con tenore di umidità e di ceneri

Essendo

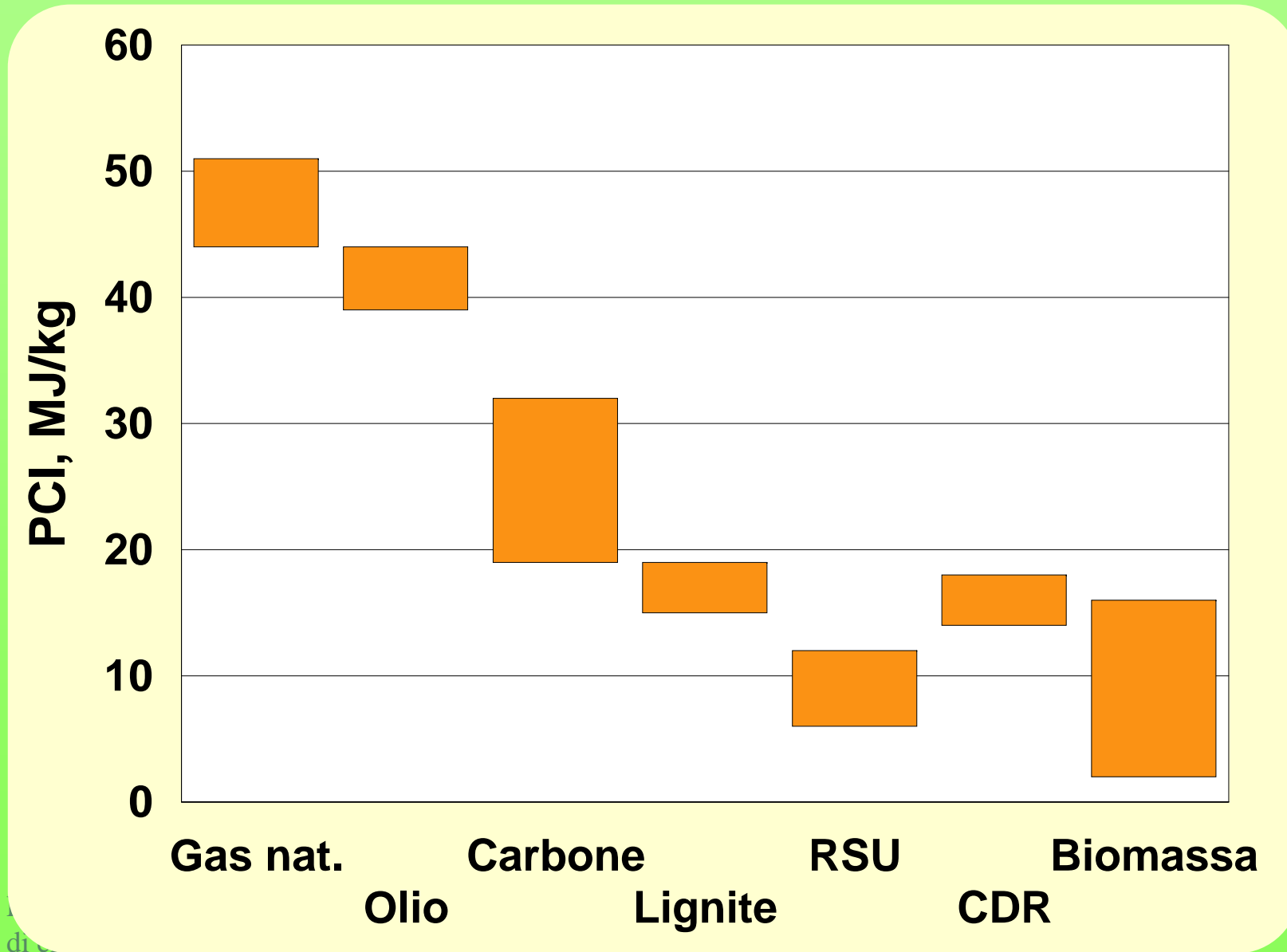
$$\Delta h_{ev} \approx 2,5 \text{ MJ/kg}$$

$$PCI_{SV} \approx 20 \text{ MJ/kg}$$

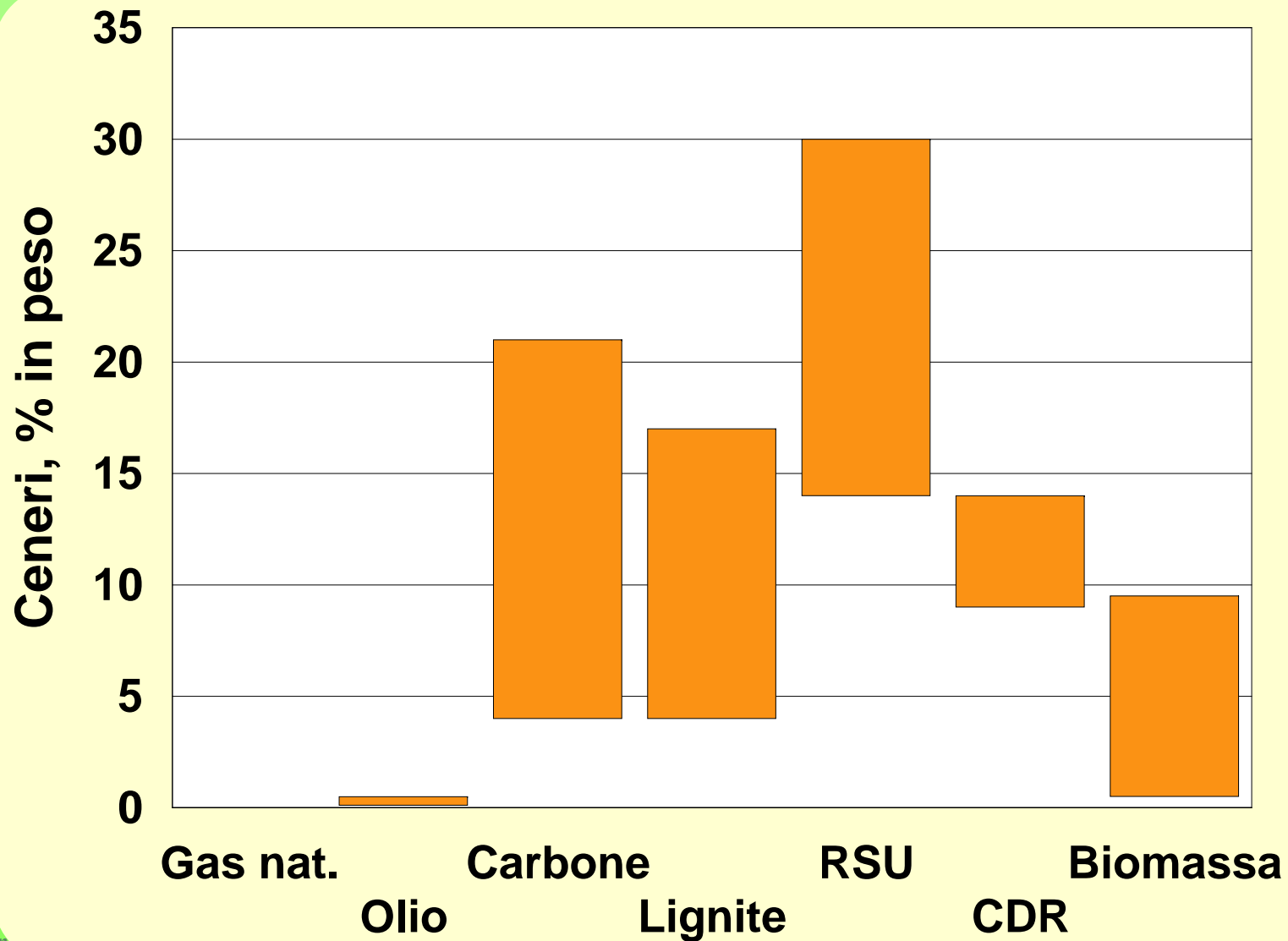
$$PCI_{RSU} \left[ \frac{\text{MJ}}{\text{kg}} \right] \approx 20 \cdot \left[ 1 - y_{Ce} - y_{Um} \cdot \frac{9}{8} \right]$$



## CONFRONTO CON COMBUSTIBILI FOSSILI



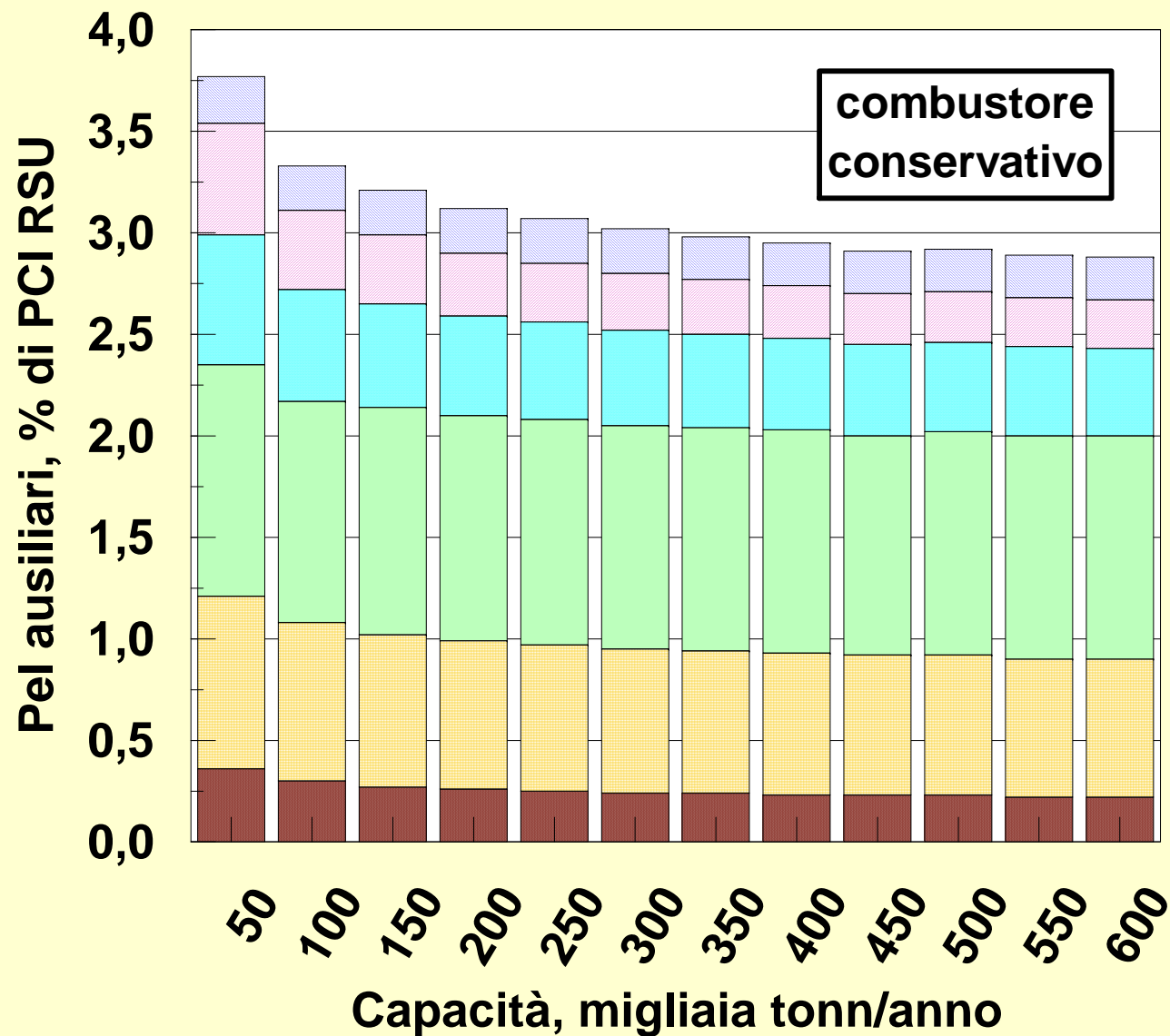
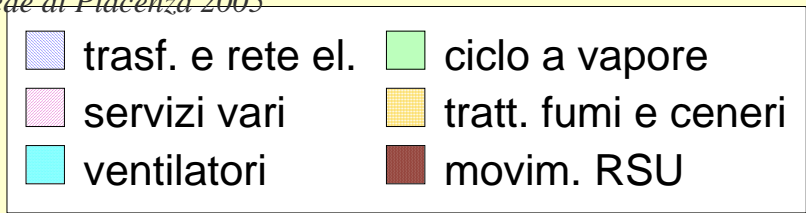
## CONFRONTO CON COMBUSTIBILI FOSSILI



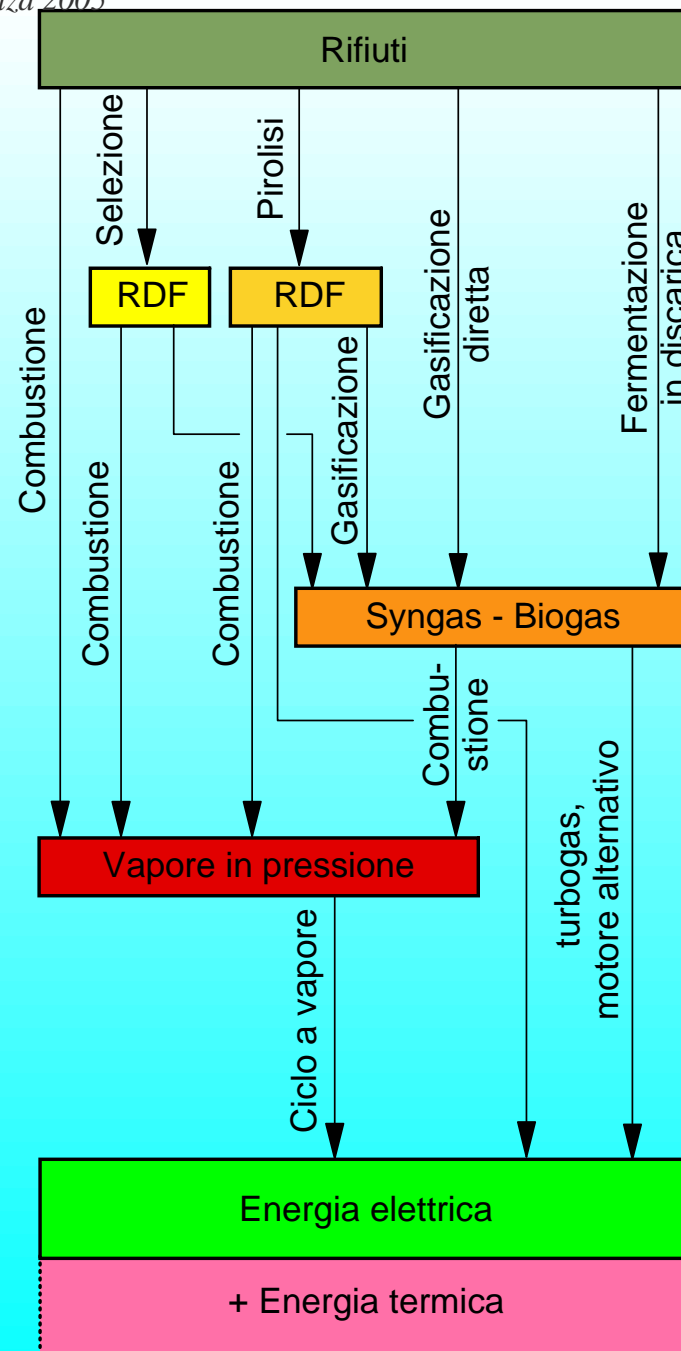
## **PROBLEMATICHE RECUPERO ENERGIA DA RSU**

- 1) Potere calorifico modesto per cui, a parità di potenza:
  - grandi portate → grande consumo ausiliari
  - grandi dimensioni → grandi costi di investimento**
- 2) Contenuto significativo di elementi che possono dar luogo a composti tossici (Cl, F, Br, metalli pesanti, etc.) → problemi di impatto ambientale + corrosione**
- 3) Composizione (e caratteristiche fisiche) dei rifiuti pressoché incontrollabili → indispensabile massima flessibilità degli impianti di trattamento**
- 4) Taglia di impianto molto inferiore a quella tipica di un impianto a combustibile fossile → prestazioni modeste e costi elevati**

# CONSUMO AUSILIARI



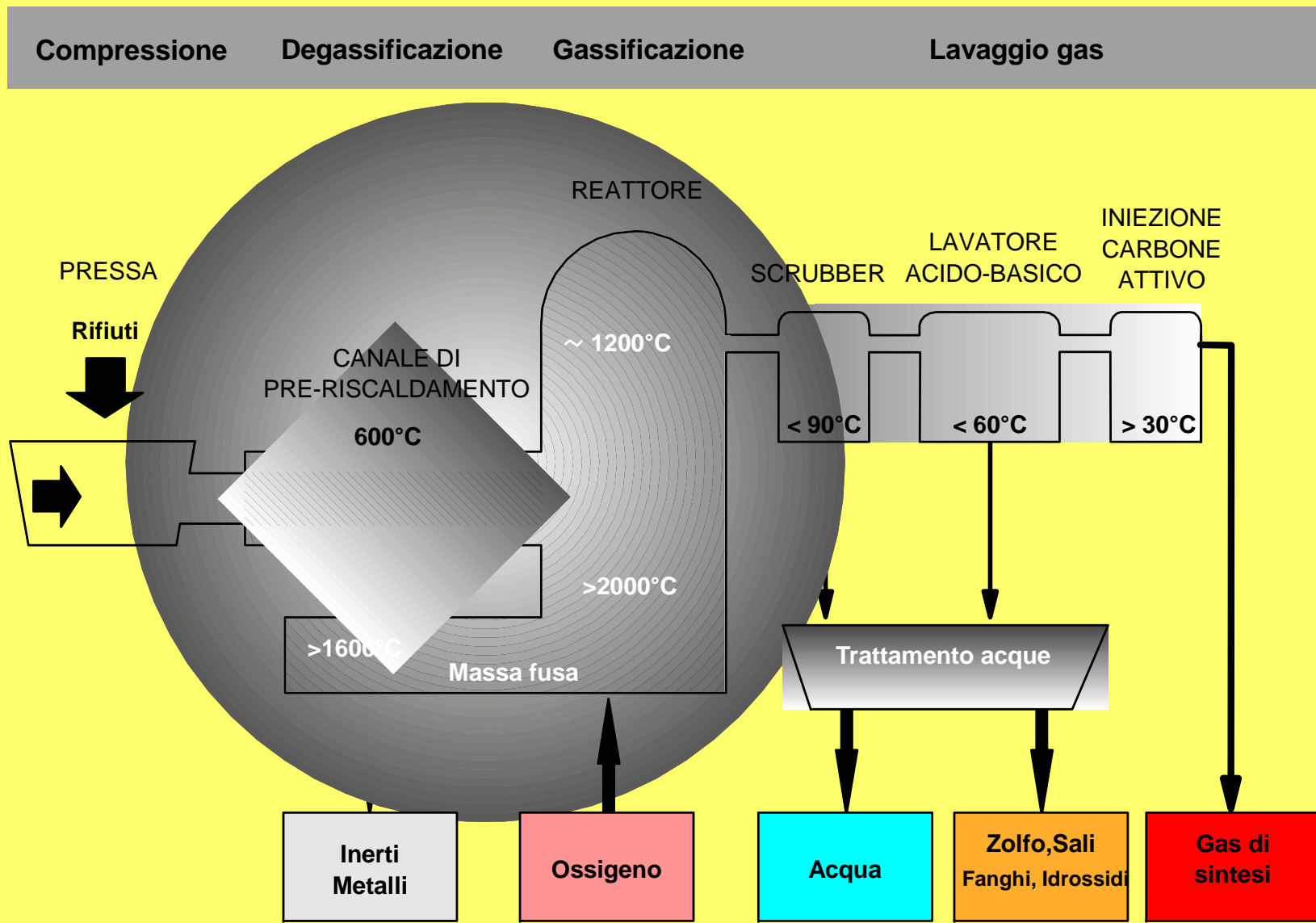
# PERCORSI PER IL RECUPERO DI ENERGIA DA RSU



# Pirolisi e Gasificazione

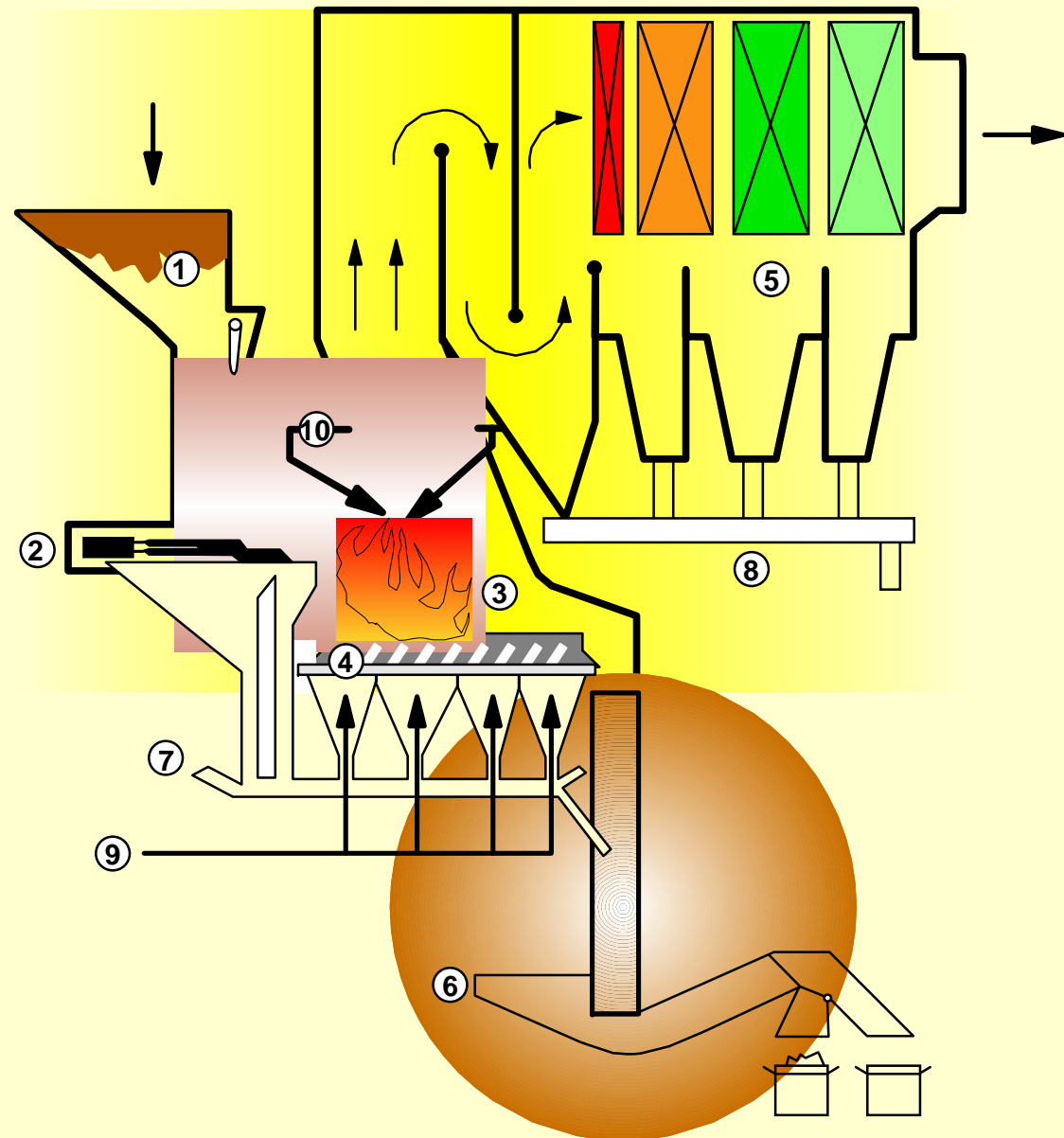
- 1) Possibile confinare il trattamento per la rimozione dei composti inquinanti PRIMA della combustione**
- 2) Possibile generare combustibile sintetico in pressione, con volumi e quindi costi ridotti**
- 3) Possibile utilizzare il combustibile sintetico depurato in cicli a combustione interna (motori c.i., cicli combinati) ad alta efficienza**
- 4) Possibile la produzione di combustibili commerciali per autotrazione o generazione di calore**
- 5) Non sufficientemente affidabile ed economica per applicazioni commerciali**

# Gasificazione: tecnologia Thermoselect

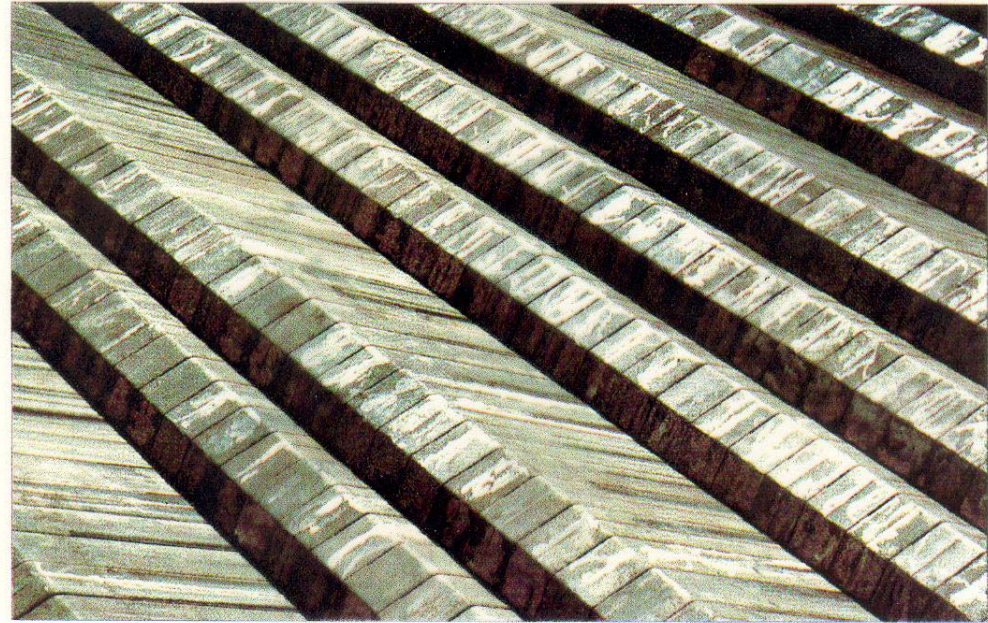


# COMBUSTORE A GRIGLIA ORIZZONTALE

- 1 Caricamento
- 2 Spintore
- 3 Camera di combustione
- 4 Griglia
- 5 Generatore di vapore
- 6 Estrattore scorie
- 7 Raccolta ceneri sottogriglia
- 8 Sistemi di trasporto ceneri leggere
- 9 Sistema aria primaria
- 10 Sistema aria secondaria

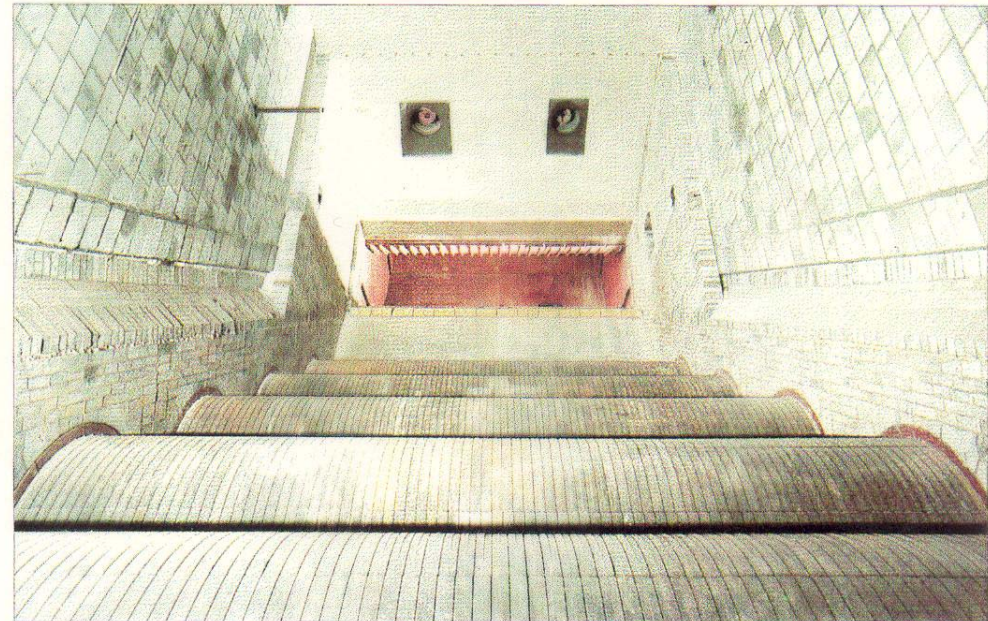


## Griglia a barrotti



Counter-reciprocating grate

## Griglia a rulli



Roller grate



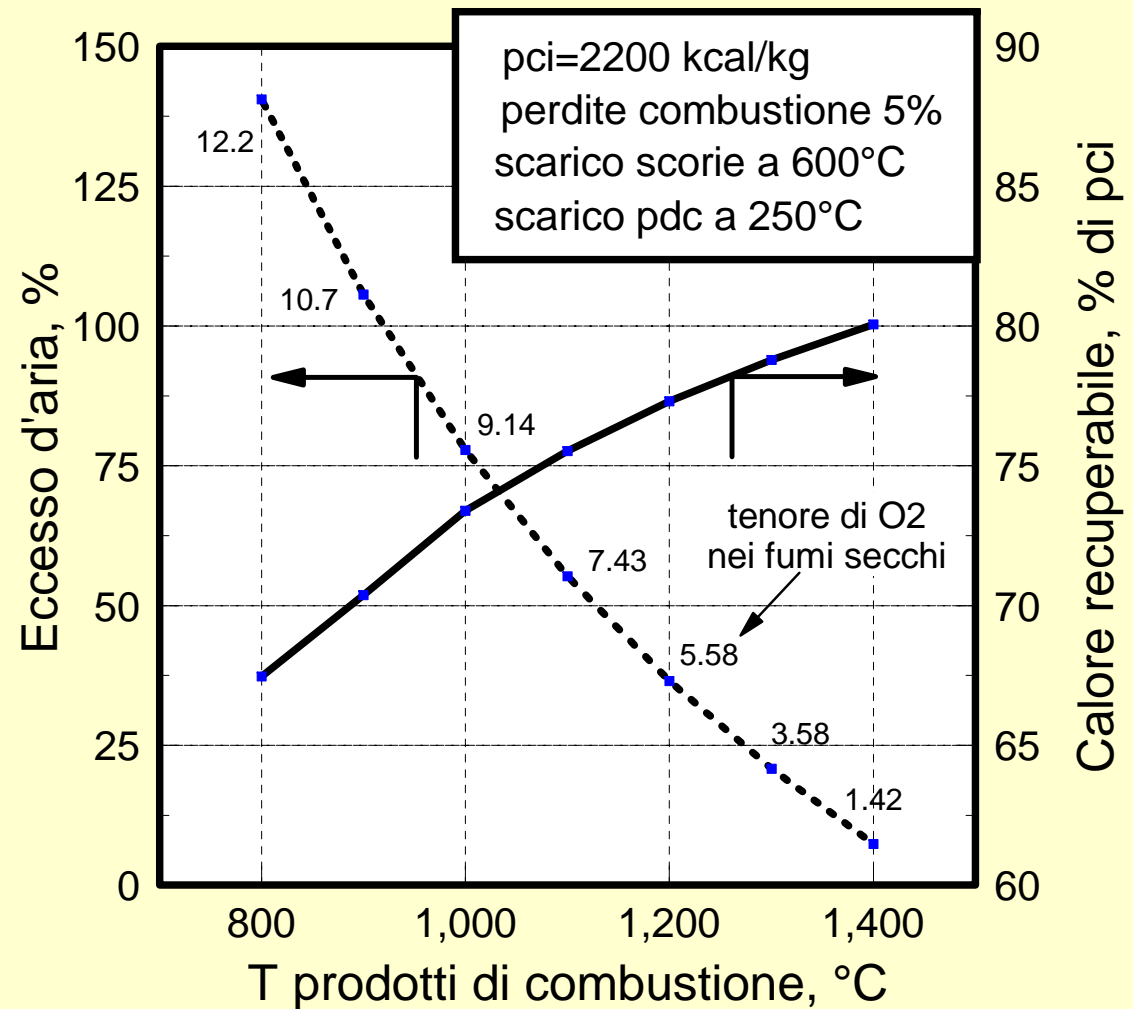
## **Fiamma di RSU su griglia**

Problematica recupero  
di energia - 01.02.05

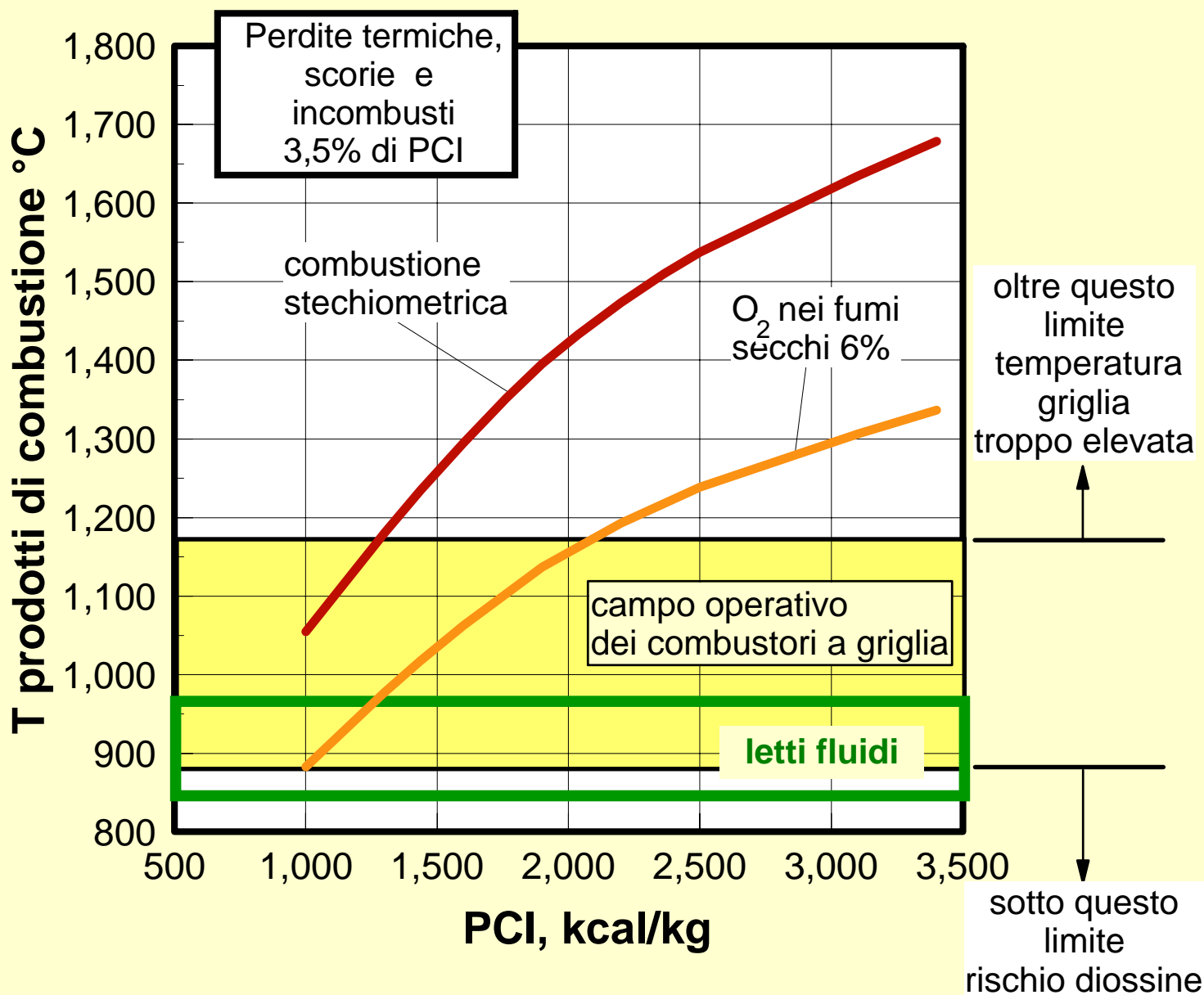


# Parametri di combustione

- 1) Al fine di aumentare il rendimento di caldaia, è interessante adottare piccoli eccessi d'aria
- 2) Valore minimo dell'eccesso d'aria è determinato dal tenore di ossigeno e/o dalla temperatura dei prodotti di combustione

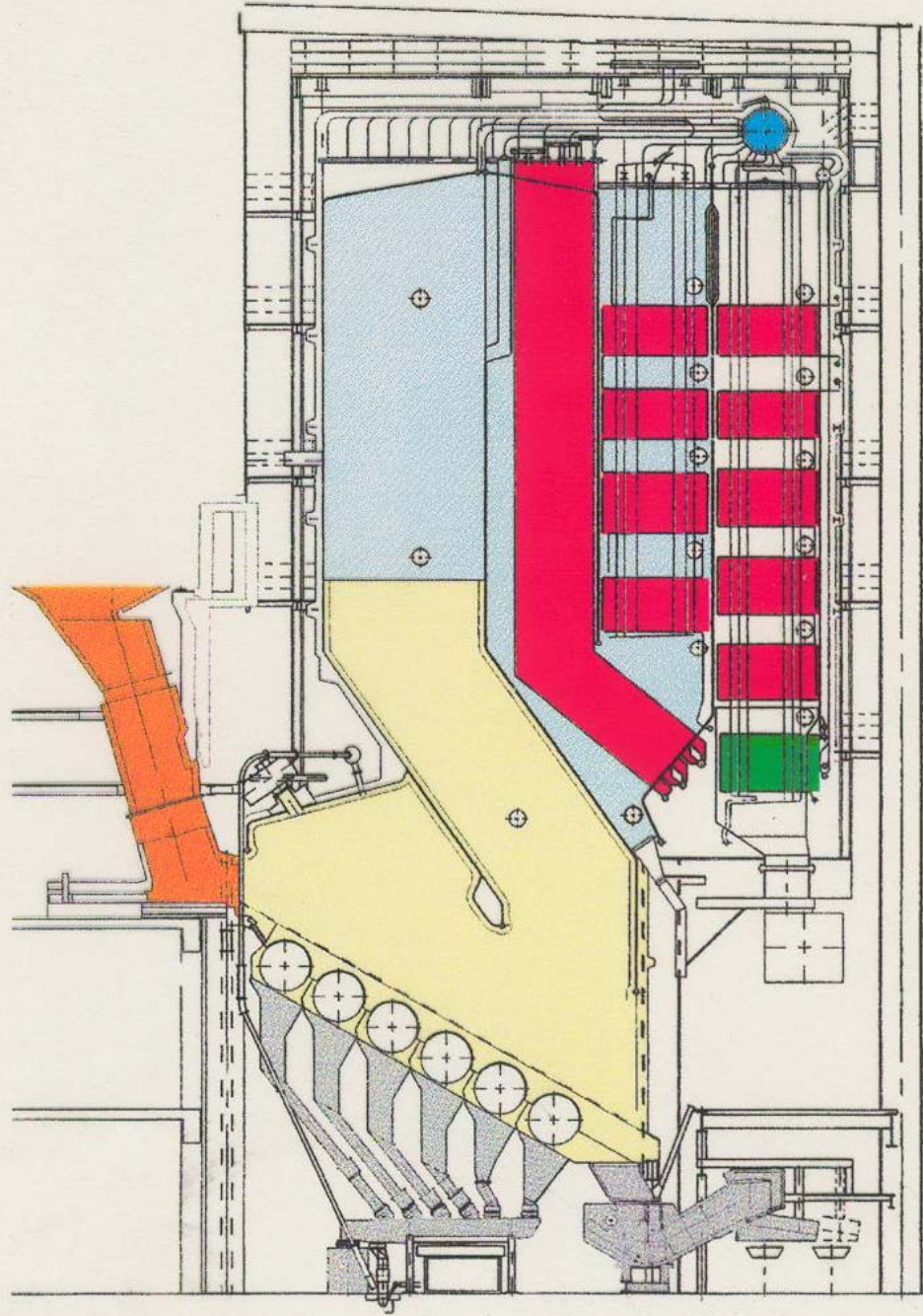


# Temperatura dei prodotti di combustione

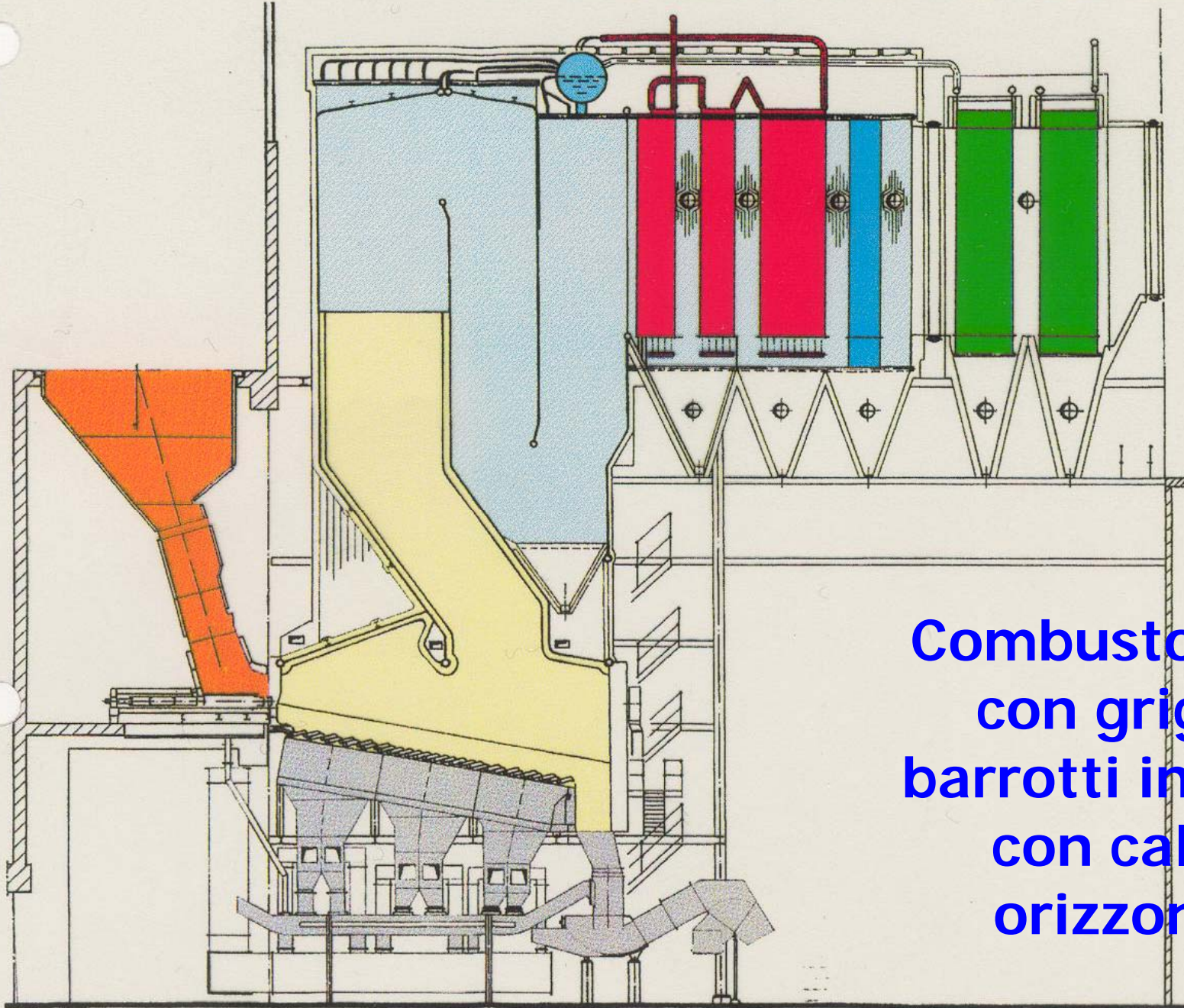


## Forno vs. Combustore

- 1) Negli impianti realizzati fino agli anni '70-'80, la camera di combustione era adiabatica (Forno) poiché per piccoli PCI del rifiuto il problema era riuscire a raggiungere effettivamente temperature di almeno 900°C
- 2) Negli impianti moderni la camera di combustione non è adiabatica (Combustore), poiché per PCI elevati il problema è limitare T<sub>max</sub>. Ciò viene realizzato estraendo calore mediante pareti membranate nelle quali scorrono i tubi dell'evaporatore (o dell'economizzatore). Si parla in tal caso di Combustore e Caldaia integrati

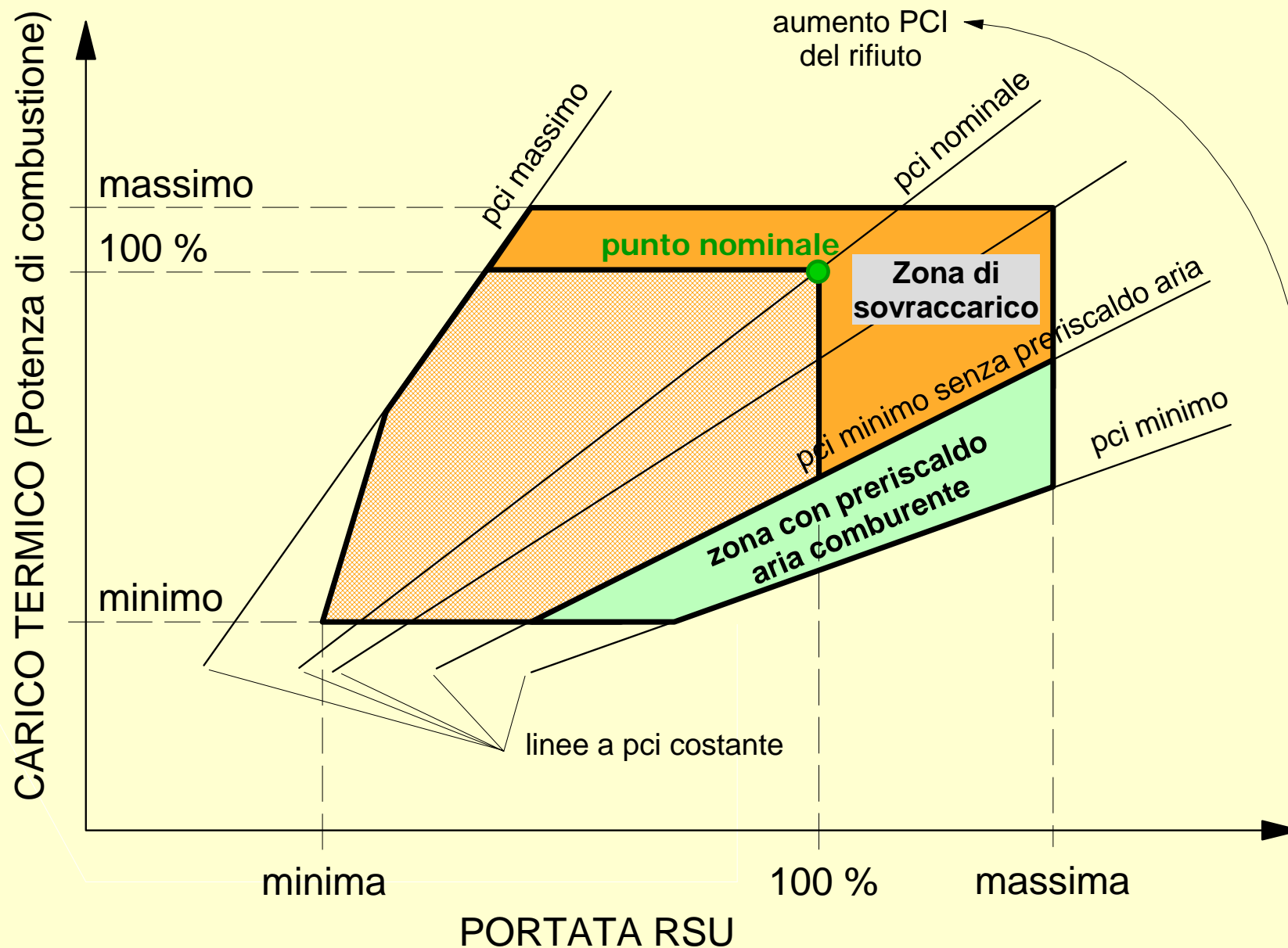


**Combustore RSU  
con griglia a rulli  
integrato con  
caldaia verticale**

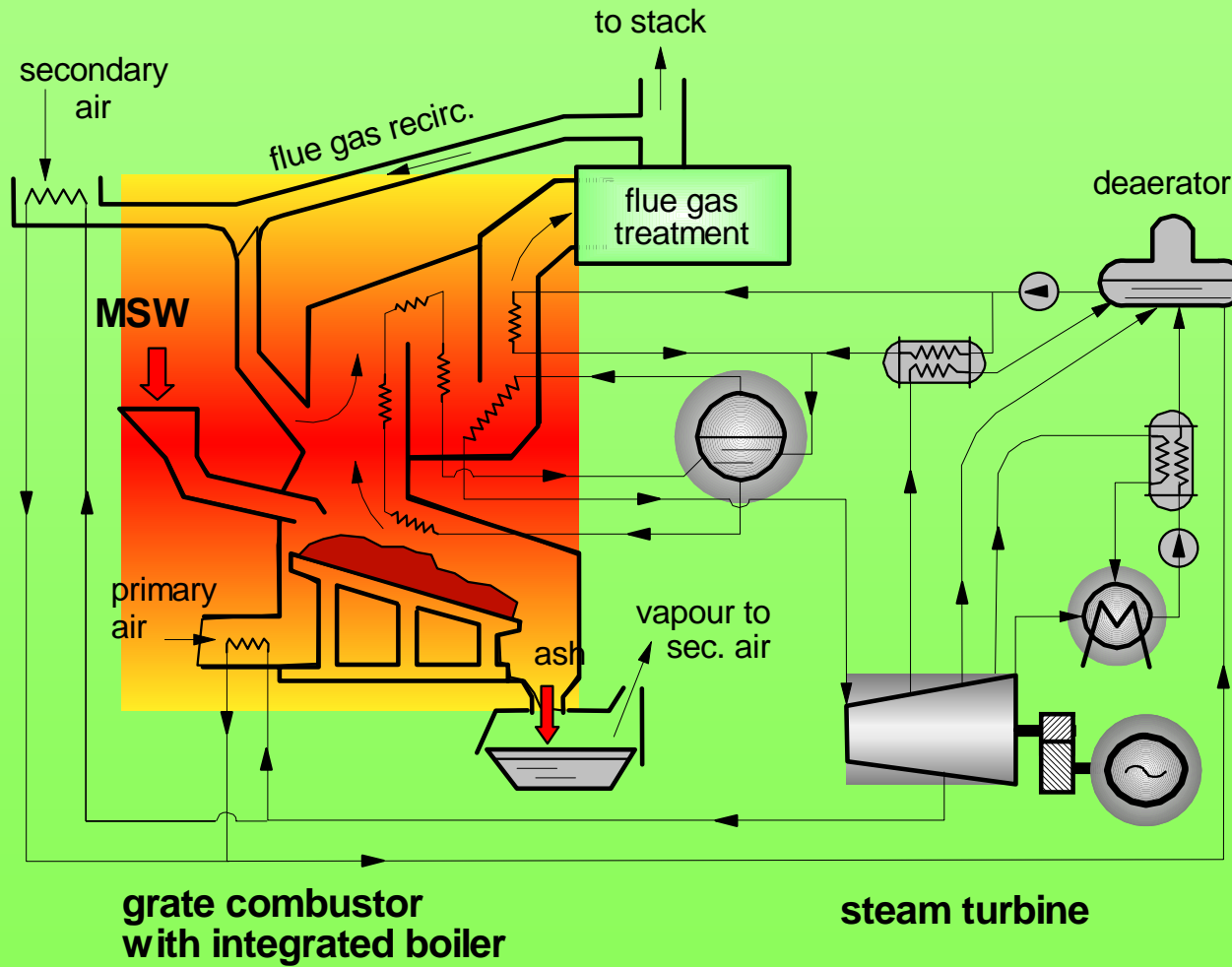


**Combustore RSU  
con griglia a  
barrotti integrato  
con caldaia  
orizzontale**

## Diagramma di griglia del combustore

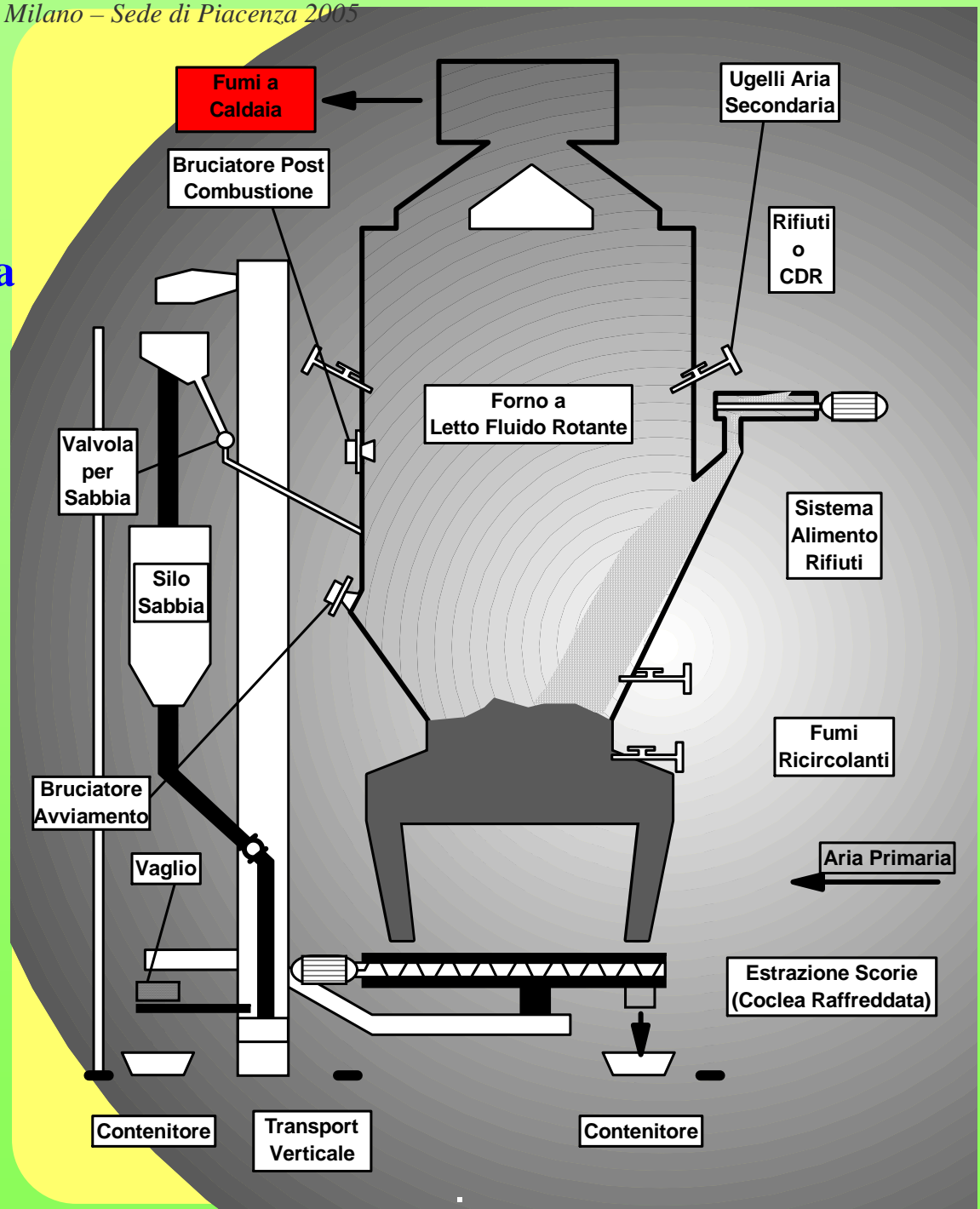


# Combustore a griglia + ciclo Rankine a vapore

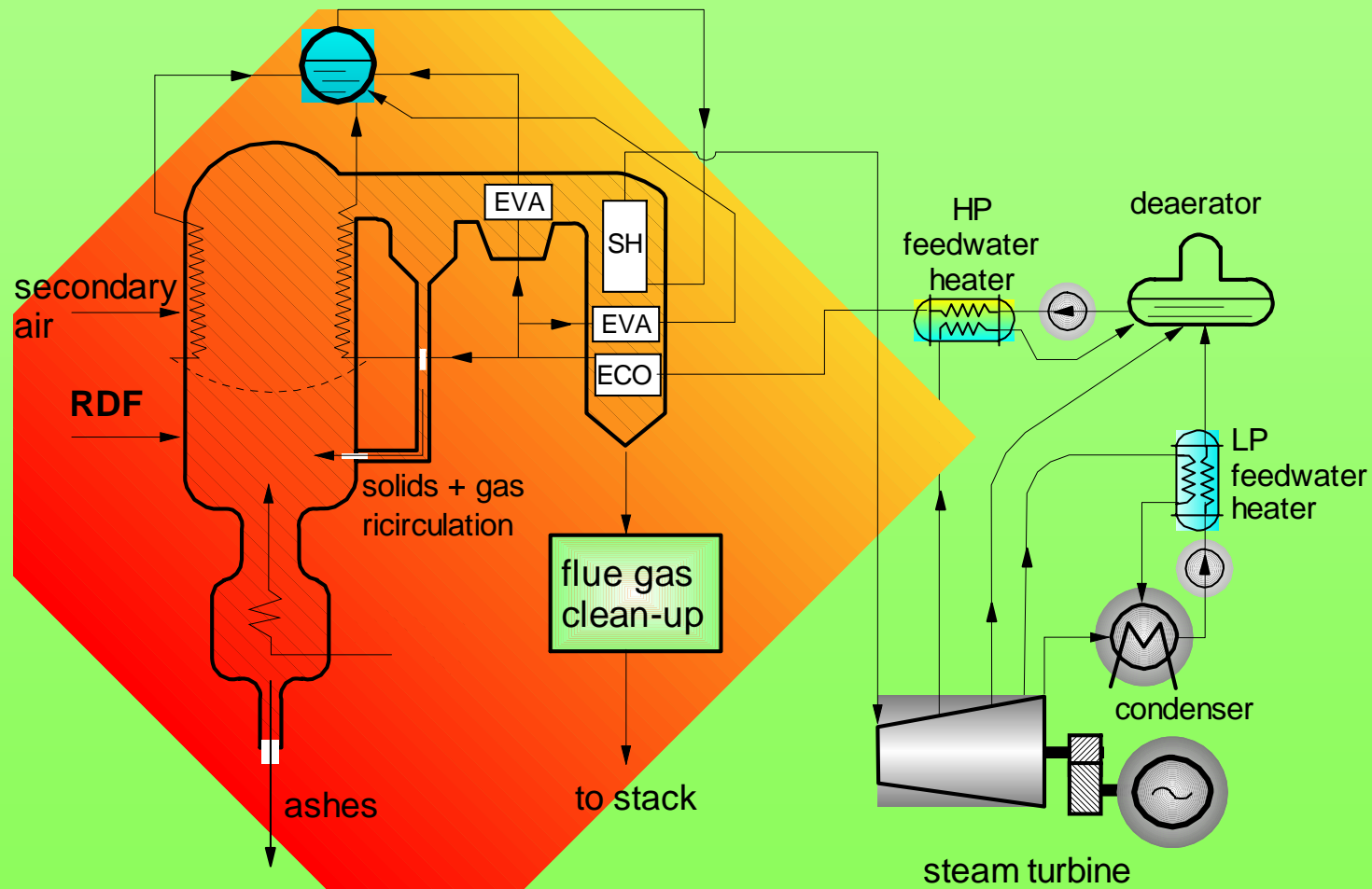


# LETTO FLUIDO

- 1) Non è necessario alcun organo di sostegno del materiale combustibile → evita problemi di materiali + possibile funzionamento con alti PCI
- 2) Sabbia aumenta la capacità termica → maggiore uniformità di funzionamento
- 3) Elevato tempo di residenza del materiale combustibile → più completa ossidazione di CO, HC, diossine, furani, etc.
- 4) Temperatura moderata → minori emissioni di NO<sub>x</sub>
- 5) E' indispensabile che il materiale introdotto sia in **PICCOLA PEZZATURA**



# Letto fluido + ciclo Rankine a vapore



# Ciclo a vapore

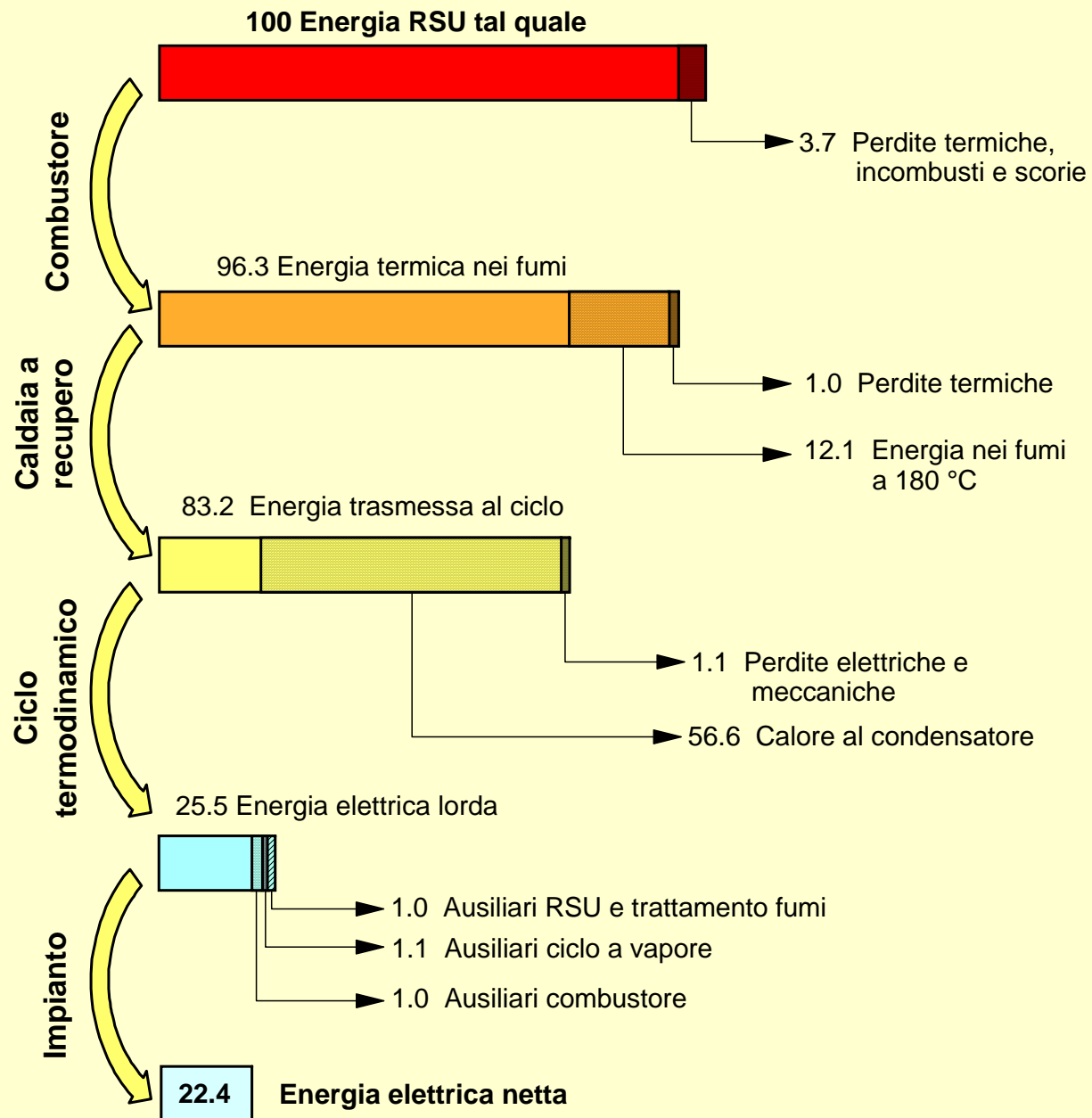
- ◆ Temperatura massima non oltre 420-450°C per evitare problemi di corrosione del surriscaldatore
- ◆ Pressione massima non oltre 65-70 bar per evitare eccessiva formazione di liquido in turbina e limitare temperatura tubi evaporatore in camera di combustione
- ◆ Pre-riscaldamento aria con vapore; no pre-riscaldatore Ljungstrom
- ◆ Pochi (se non zero) rigeneratori per limitare i costi e per limitare temperatura di mandata dell'acqua alla caldaia
- ◆ Rendimenti della turbina a vapore modesti in conseguenza della piccola taglia

# Parametri ciclo a vapore

design parameter	unit	plant size	
		small	large
evaporation pressure	<i>bar</i>	45	65
extraction for air pre-heating <sup>(1)</sup>		2.6	
deaerator pressure		2.0	
condensation pressure		0.08	0.06
gas temperature at SH inlet	<i>°C</i>	max 650 <sup>(2)</sup>	
steam temperature at SH outlet		400	440
gas temperature at ECO outlet		160	140
temperature of primary air		120	
temperature of secondary air		120	
LP feedwater heaters ahead of deaerator		1	2
MP feedwater heaters	none		
flue gas recirculated	<i>% mass</i>	15	
flue gas oxygen content	<i>% volume</i>	6.0	5.0
loss due to unburnt carbon <sup>(3)</sup>	<i>% LHV</i>	0.8	

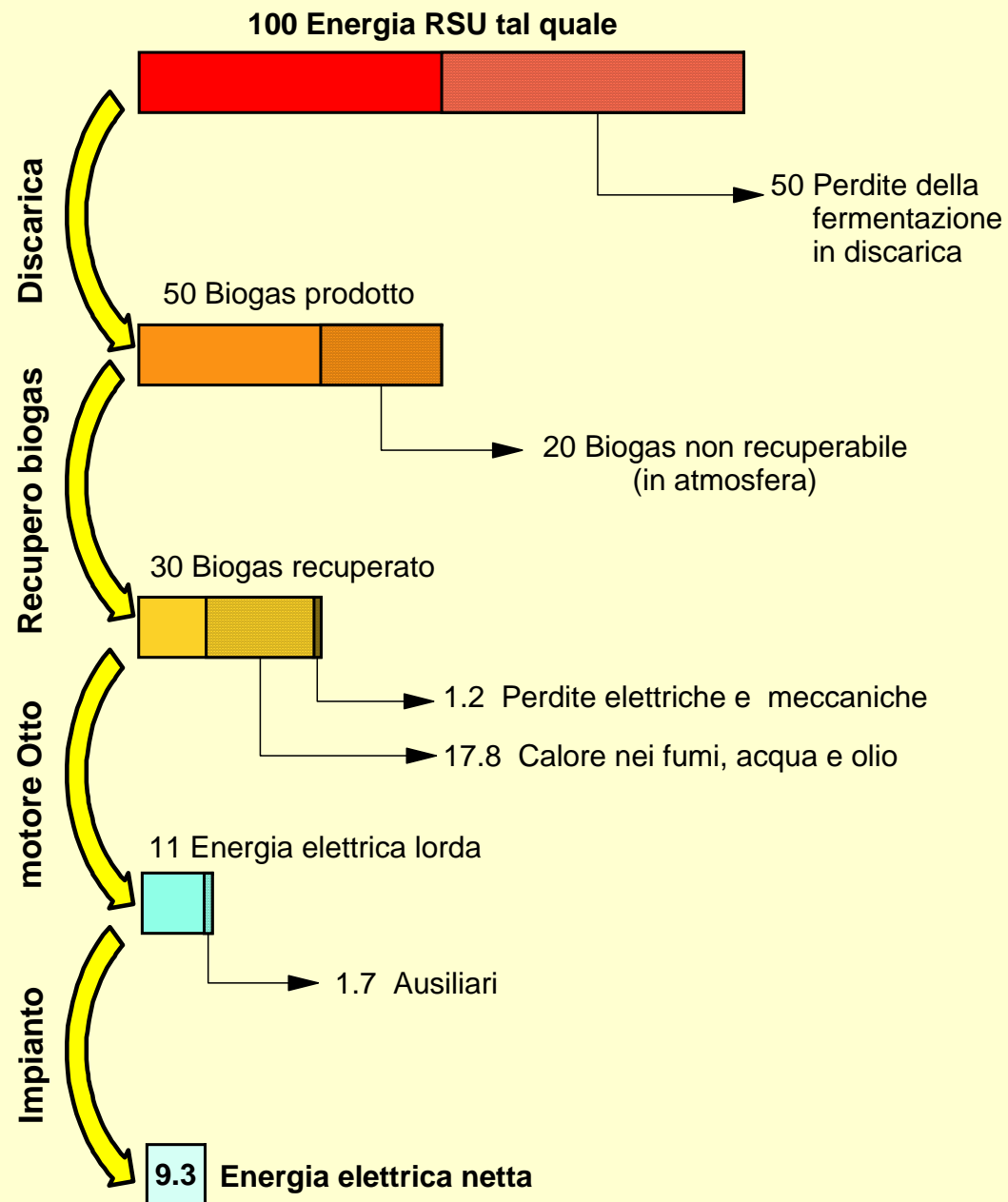
## COMBUSTIONE DIRETTA + CICLO A VAPORE

Flussi di energia per un termo-utilizzatore di piccola taglia di ultima generazione



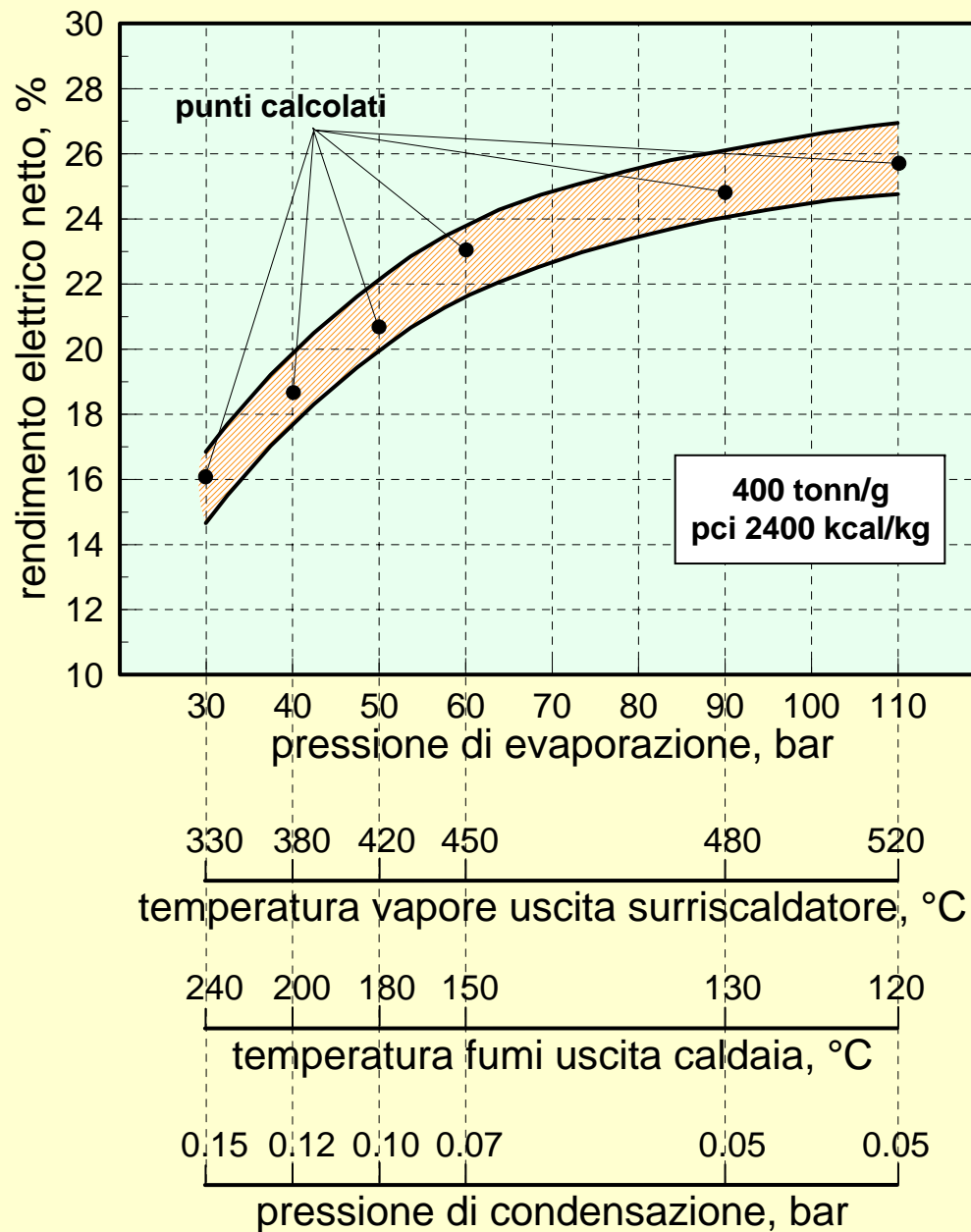
## BIOGAS DA DISCARICA

# Flussi di energia per la generazione di elettricità da biogas di discarica

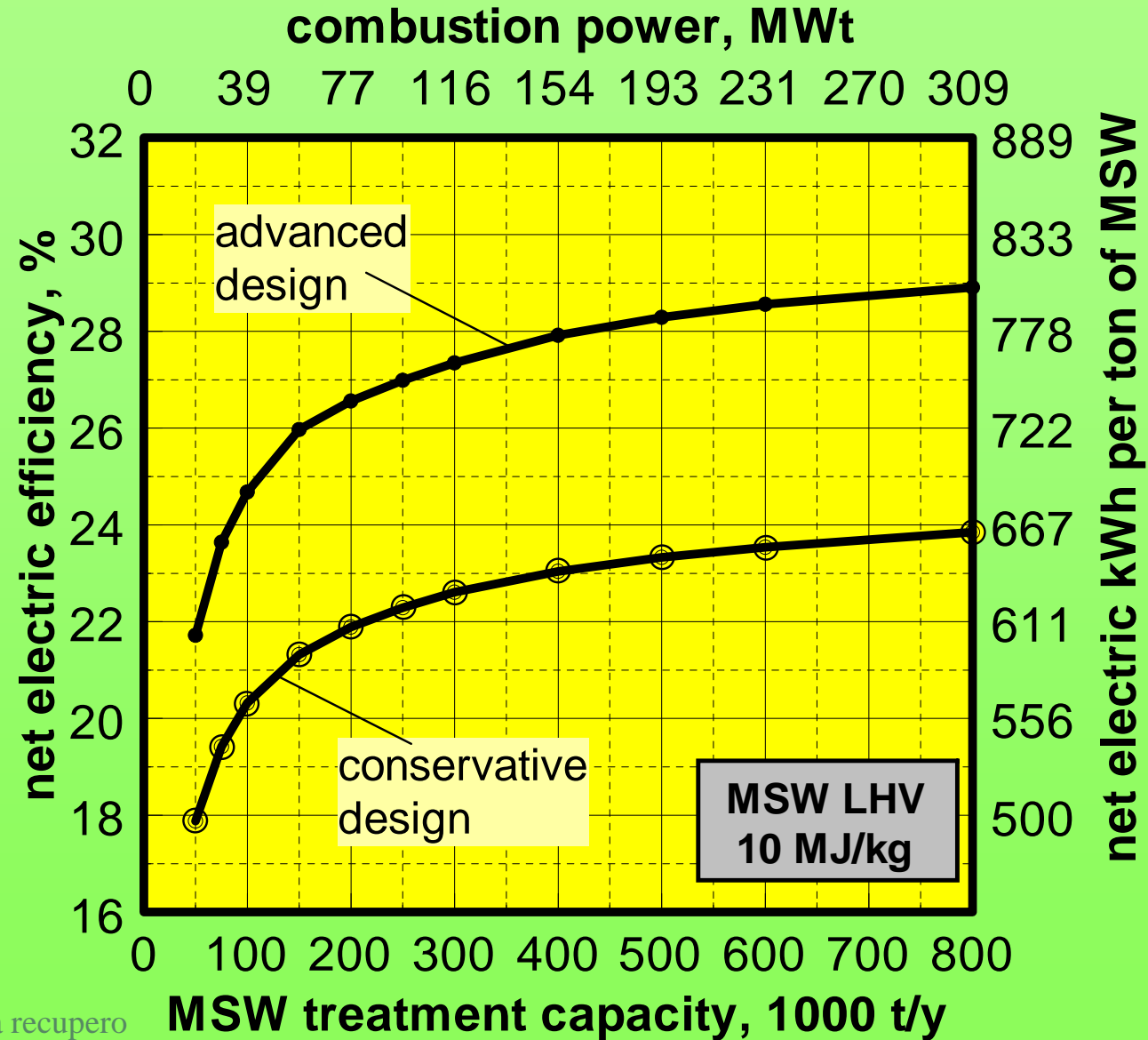


# Rendimento termoutilizzatore a griglia al variare dei parametri del ciclo termodinamico

## Rendimento netto in funzione della sofisticazione di impianto



# Effetto scala sul rendimento netto



## Esempio prestazioni impianti di grande taglia (solo generazione elettrica)

		Impianto AMSA Milano	Impianto ASM Brescia
Capacità nominale	tonn/h	3 x 14,7	2 x 23
	MW <sub>t</sub> del combustore	3 x 61,5	2 x 88,3
Vapore ammissione turbina	pressione, bar	50	60
	temperatura, °C	440	450
Raffreddamento condensatore		ad acqua	ad aria
Pressione di condensazione, bar		0,05	0,10
Rigeneratori ciclo a vapore		si	si
Temperatura fumi uscita caldaia, °C		150	130
Produzione elettrica lorda	potenza, MW <sub>el</sub>	59,1	54,7
	rendimento, %	32,0	31,0
Produzione elettrica netta	potenza, MW <sub>el</sub>	51,1	49,2
	rendimento, %	27,7	27,8

# Conclusioni

- ◆ **Problematica del recupero di energia da RSU dominata dalle caratteristiche del “combustibile rifiuto”:**
  - PCI basso
  - generazione di inquinati
  - imprevedibilità delle caratteristiche del combustibile
  - taglia molto piccola rispetto a centrali termo-elettriche
- ◆ **Negli impianti moderni, soluzione combustore+caldaia integrati ha sostituito il vecchio “forno di incenerimento”**
- ◆ **Letto fluido consente di raggiungere rendimenti di produzione elettrica circa uguali alla griglia. Indispensabile che la pezzatura del materiale sia controllata**
- ◆ **Nel campo di taglie rilevanti per il nostro Paese, fortissimo effetto scala sulle prestazioni (e sui costi). Auspicabile la realizzazione di impianti da almeno 200-300.000**

