# Problemi aperti nella generazione di energia elettrica

**Gennaro De Michele** 

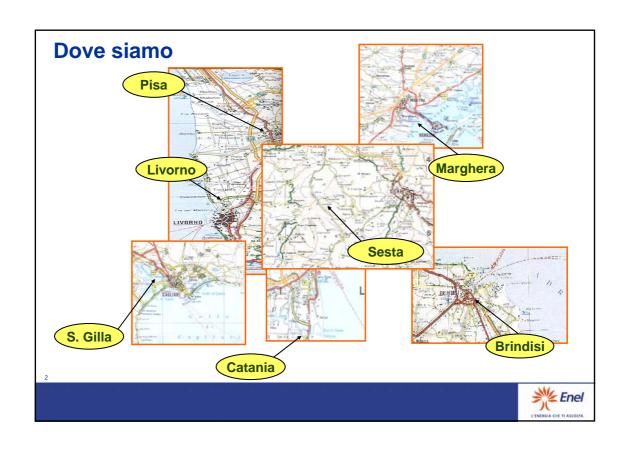
**Pisa, 29 maggio 2006** 

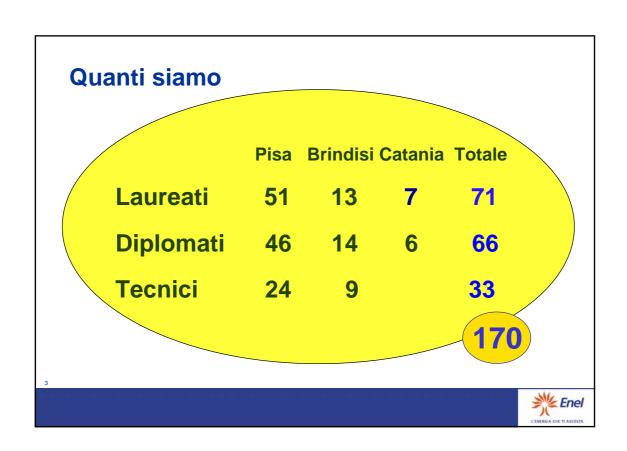


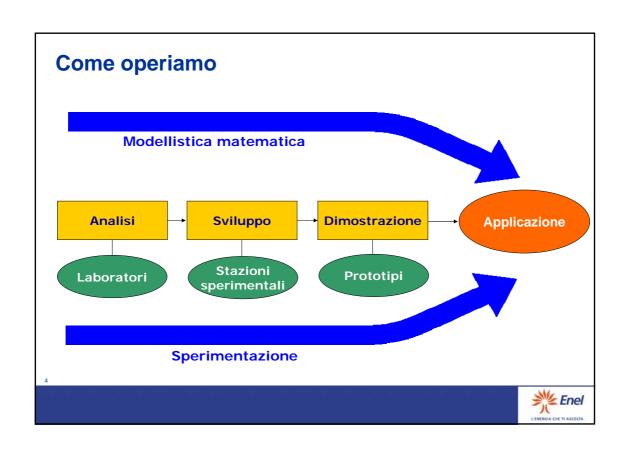
#### La missione della Ricerca Enel

La Ricerca, supportando le strategie aziendali,
propone idee e sviluppa progetti
tesi a promuovere l'innovazione e ad
aumentare la competitività











# L'area sperimentale di Livorno



Dal luglio 2006 l'Area diventerà anche la sede dell'International Flame Research Foundation



# La stazione di Sesta



Enel

# **Combustione**



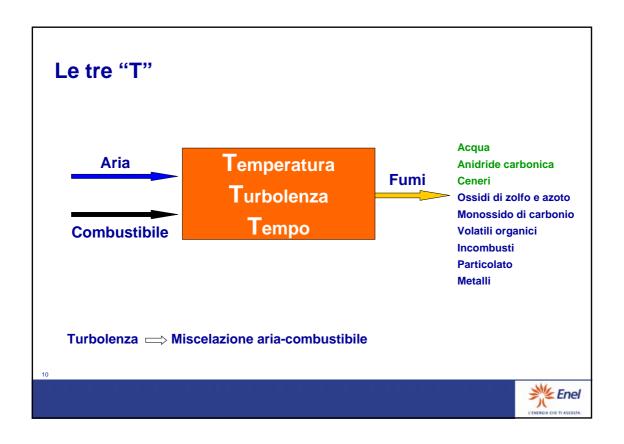
# Una citazione è d'obbligo

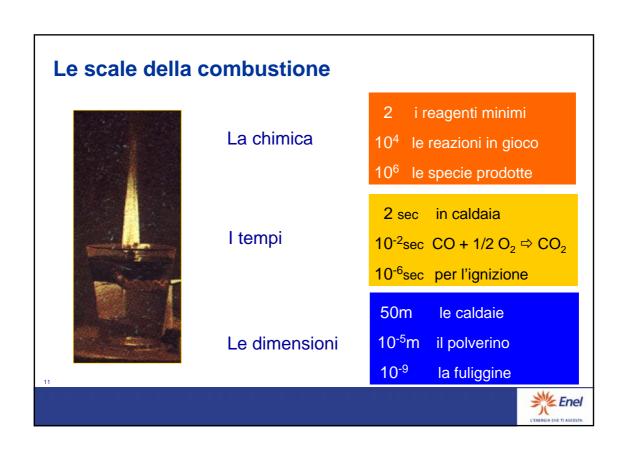


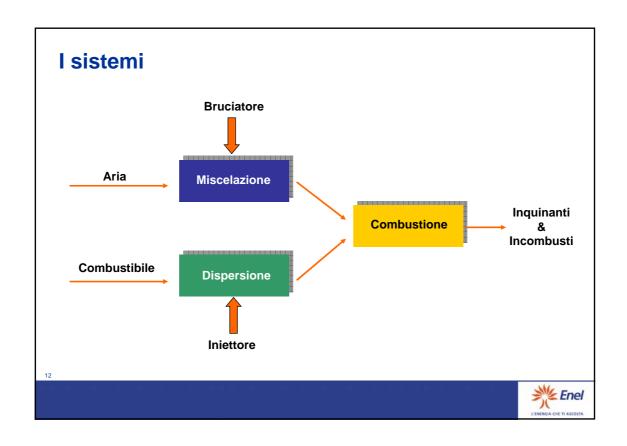
"Nella fiamma di una candela c'è tutta la chimica e la fisica che conosciamo"

Michael Faraday (1831)











### Il problema dello scaling

Le equazioni di bilancio fondamentali che governano l'aerodinamica lo scambio termico e la combustione nella corrente di aria, combustibile e di prodotti della combustione che attraversa la camera di combustione in condizioni stazionarie  $(\frac{Q}{\Delta E} = 0)$  sono:

i) il bilancio di quantità di moto:

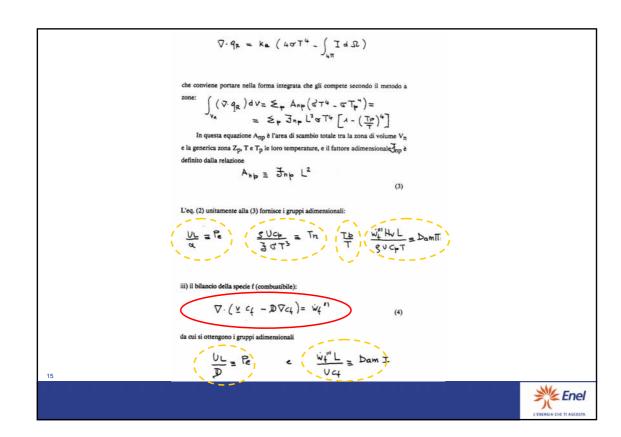
$$\frac{g}{\Delta h} - \rho \Delta_{\bar{A}} = -\frac{Df}{D} \bar{A}$$
 (1)

Nella eq. (1) si sono trascurate le forze gravitazionali, così come viene trascurata la convenzione naturale nel bilancio termico, sicchè essa fornisce i soli due gruppi adimensionali

ii) il bilancio termico:

$$\nabla \cdot (g y c_p T - k \nabla T + q_R) = -w_i^{"HV}$$
(2)





Al sistema di equazioni differenziali (1), (2), (4) corrisponde per il teorema di Buckingham(\*) <u>l'equazione adimensionale</u>

$$\frac{q_{w}}{\kappa T/L} = \phi \left( \frac{\Delta P}{\varsigma U^{2}}, \frac{UL}{V}, \frac{UL}{\alpha}, \frac{\varsigma U CP}{3 \sigma Ts}, \frac{TP}{T}, \frac{v_{s}^{"}HvL}{\varsigma UCP}, \frac{V_{s}^{"}HvL}{\varsigma UCP} \right)$$
in cui al primo membro figura il numero di Nusselt generalizzato (infatti esso dà

in cui al primo membro figura il numero di Nusselt generalizzato (infatti esso dà Nu=hL/k se il flusso termico alla parete è puramente convettivo), che introduce nel problema la variabile flusso termico alla parete (q<sub>V</sub>) fornita dalle condizioni ai limiti sull'equazione di bilancio termico.

Il sistema qui oggetto di studio essendo una fiamma che si sviluppa nel campo di moto di un getto turbolento, le diffusività che compaiono nelle equazioni (1), (2), (4), e di riflesso nei numeri di Peclet e d Reynolds, devono intendersi quelle turbolente, per cui

$$0 = 0.7 \omega \simeq 0.7 D \tag{6}$$

In conseguenza delle relazioni (6) e (7) l'equazione (5) risulta indipendente dal numero di Reynolds e dai numeri di Peclet, in accordo con la nota proprietà di similitudine dei profili di velocità, temperatura e concentrazione dei getti



turbolenti, il numero di Nusselt generalizzato diviene

e l'equazione adimensionale (5) si semplifica in

#### CRITERI DI SIMILITUDINE

#### i) Regime diffusionale

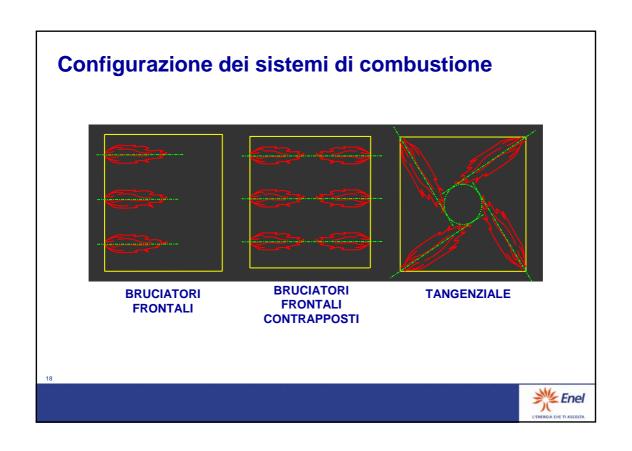
In questo regime combustibile ed ossigeno reagiscono istantaneamente arrivando al fronte di fiamma (v. fig. 2A) in proporzioni stechiometriche con velocità controllata dalla diffusione turbolenta. Ossigeno e combustibile non possono coesistere in alcun punto, ed il fronte di fiamma coincide con la superficie ideale che li separa. Una stima del tempo di combustibile per una fiamma turbolenta di gas in regime diffusionale è data da

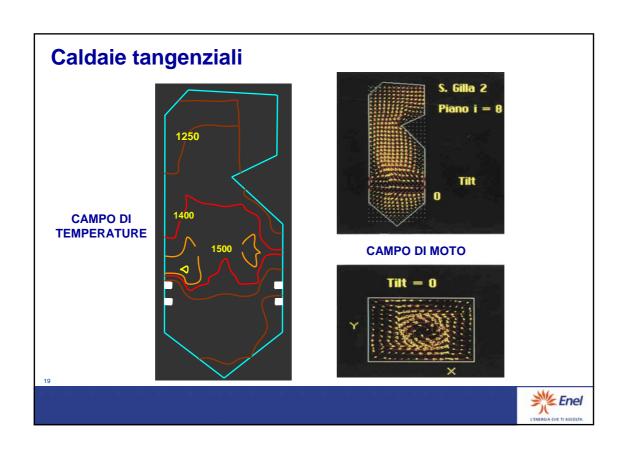
$$t_c \sim \frac{L^2}{D}$$
 (8)

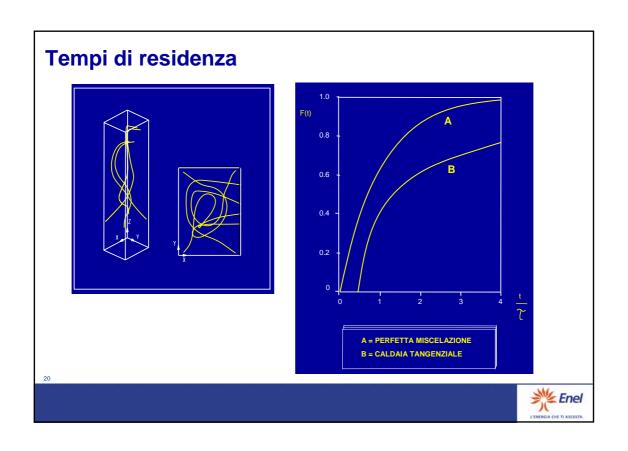
e per la (7)



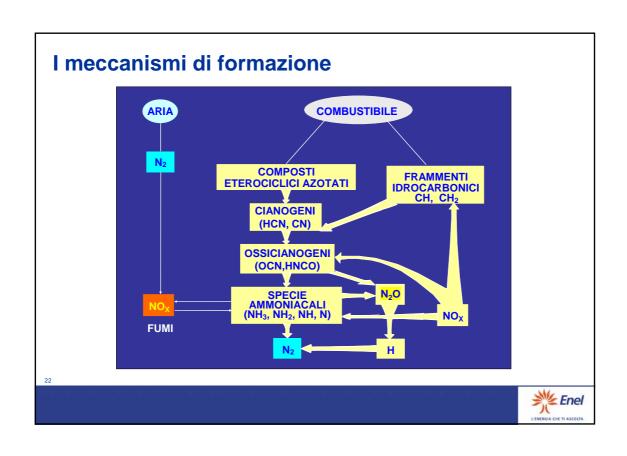
<sup>(\*)</sup> Il teorema di Buckingham dice che se è possibile scrivere una serie di variabili sufficienti a descrivere l'aspetto fisico di un problema, la relazione funzionale tra q quantità, le cui unità possono essere espressas mediante "u" unità fondamentali può scriversi in funzione di "q-u" gruppi adimensionali.

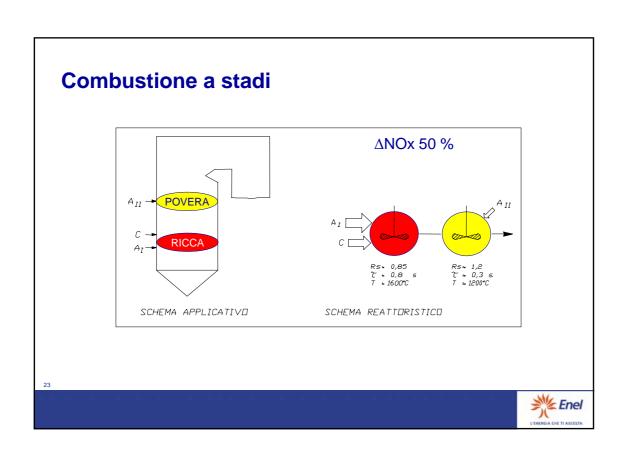


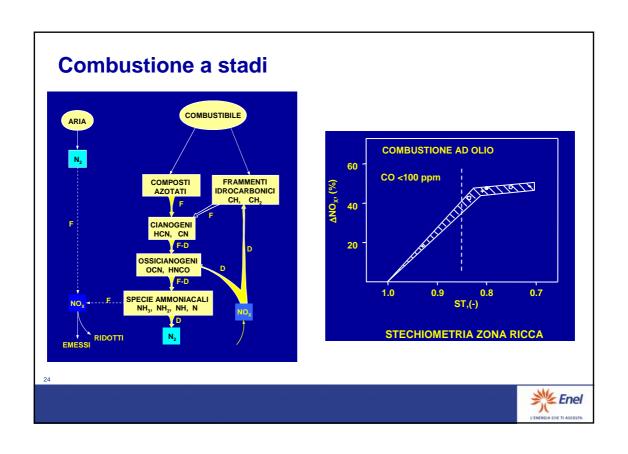


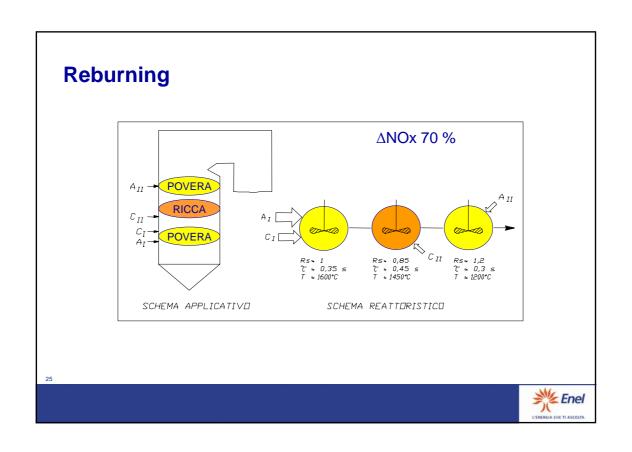


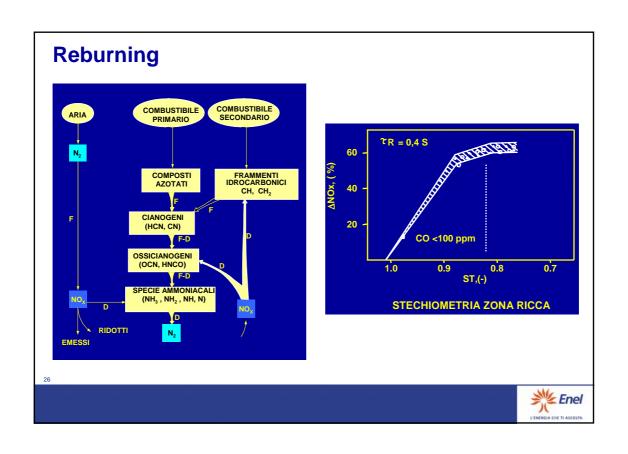














# **Scale dimensionali**

Parametro	Caldaia	Turbogas
Scala trasversale al flusso [m]	10	0.5
Velocità medie flusso [m/s]	20	50
Potenza specifica [MW/mc MPa]	10	100
Pressione [MPa (a) ]	0.1	10
Ossigeno fumi [%]	1-5	15
Adiabaticità camera combustione	NO	SI
Vita componenti in servizio [h]	<b>10</b> <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>
Accop. mecc. con il motore primo	Basso	Elevato

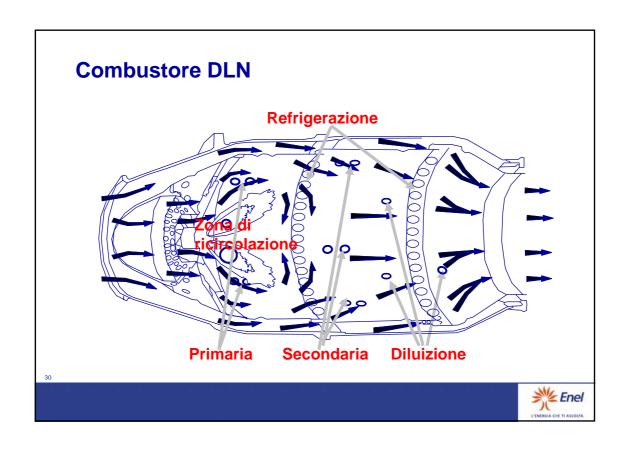
28

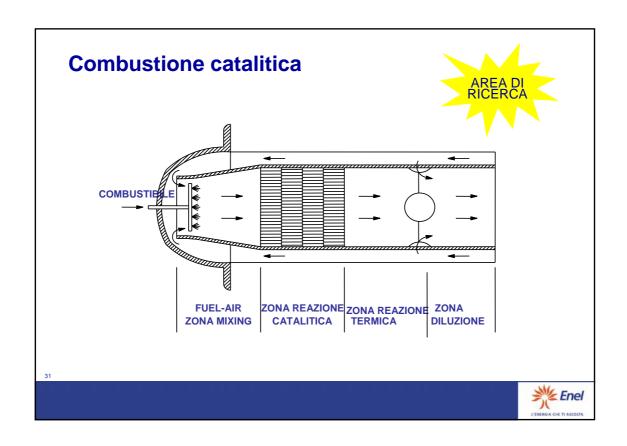


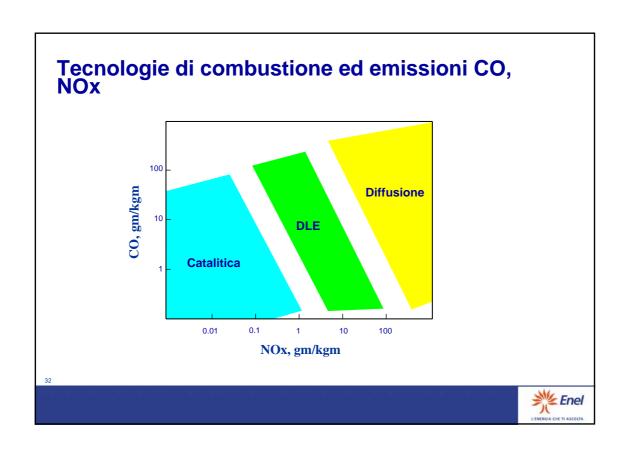
# **Evoluzione dei TG**

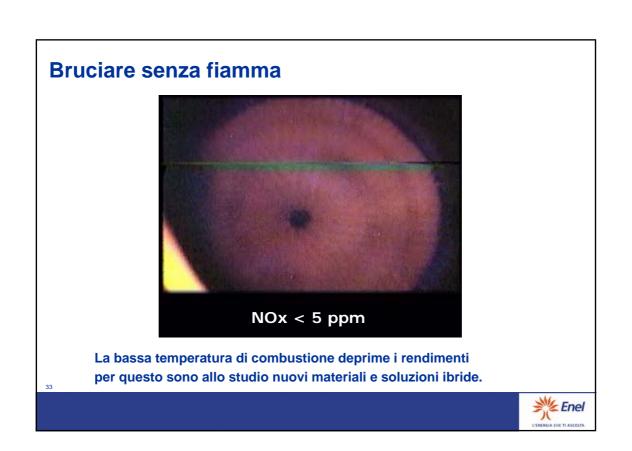
Macchine	TG50D5 STD	TG50D5 DLN	701FD V94.3A DLE DLE
TIT (°C)	1170	1170	1408 1460
NO <sub>x</sub> (mg/Nm³)	360	<100	<60 <50
ηСС (%)	46.5	47	54 58

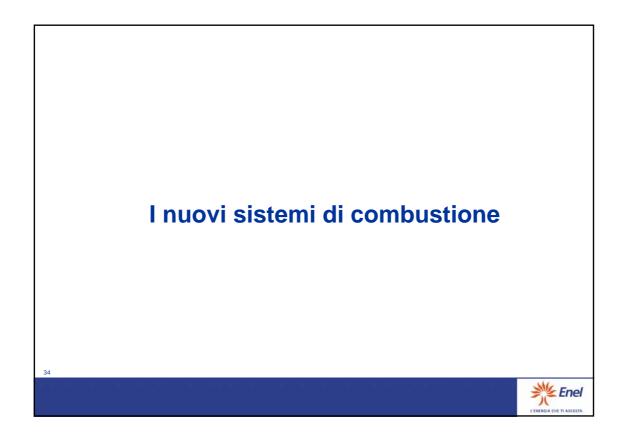


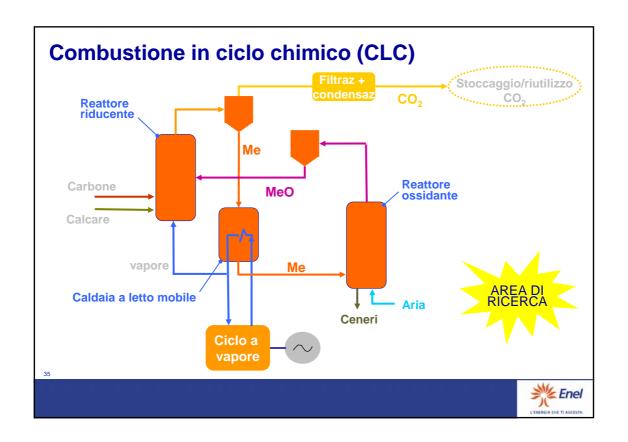


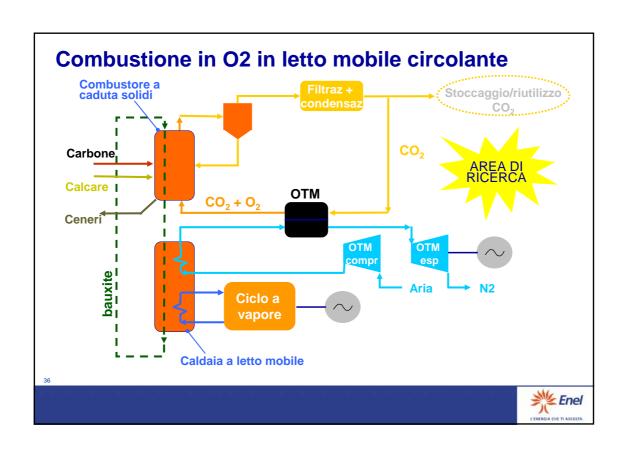


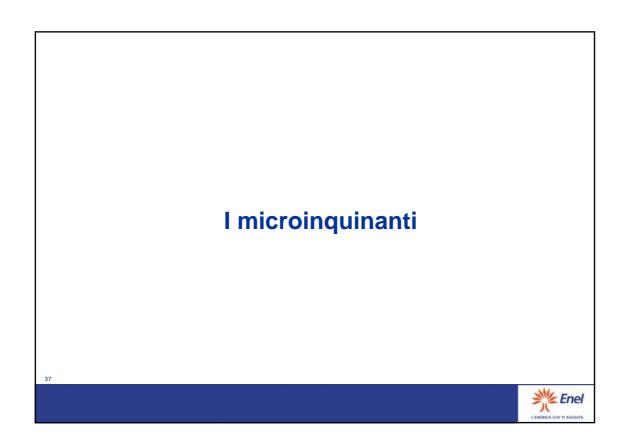


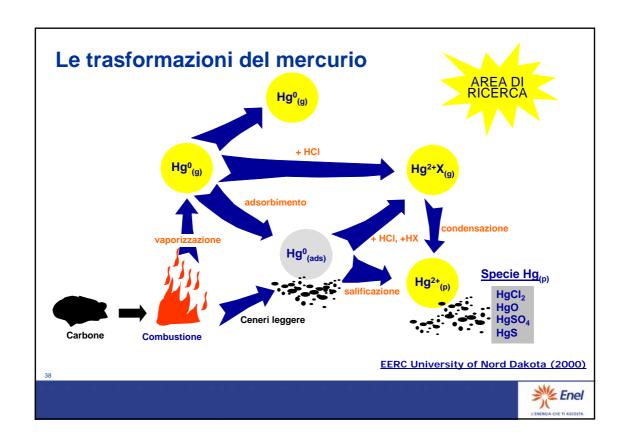


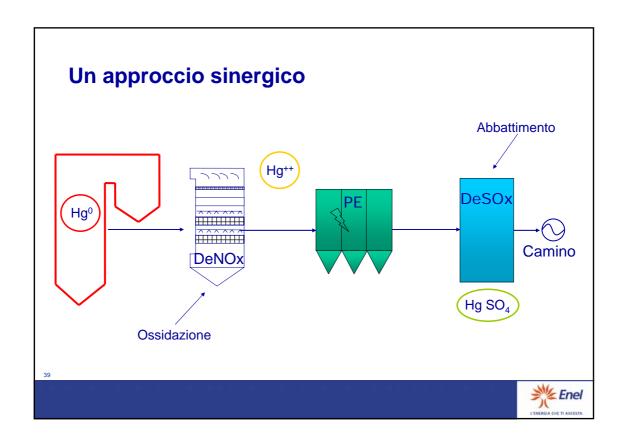


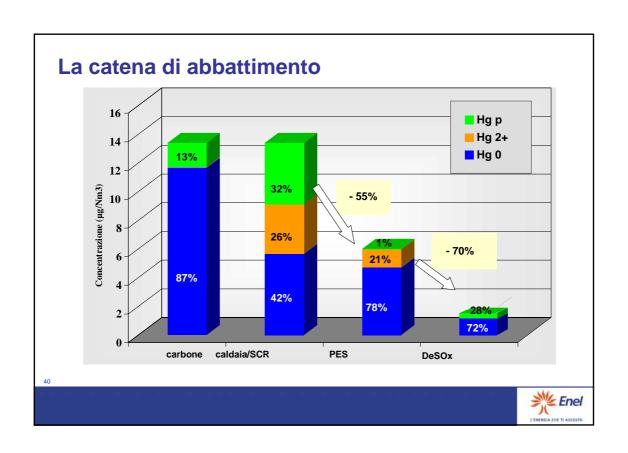




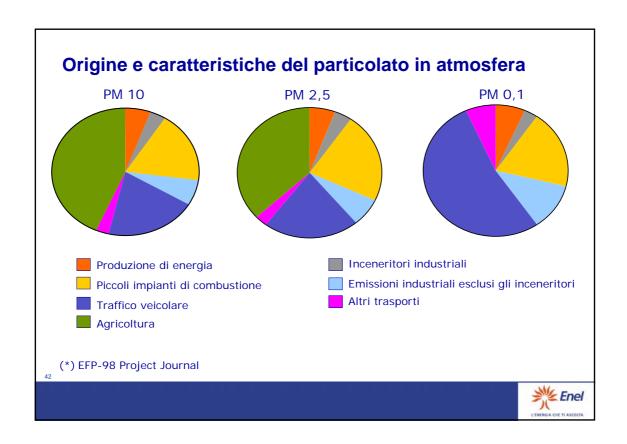












## Sorgenti tipiche dell'aerosol

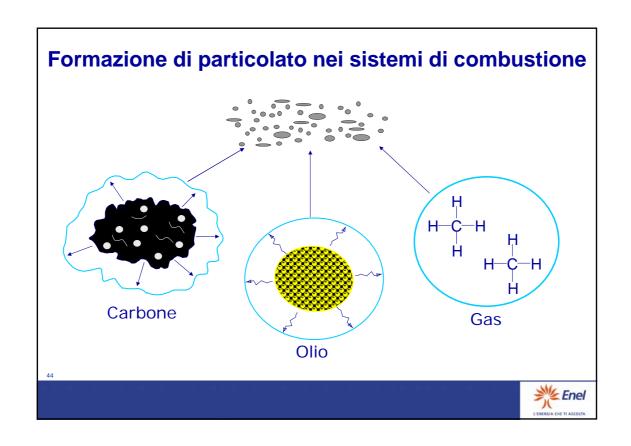
#### Sorgenti Naturali:

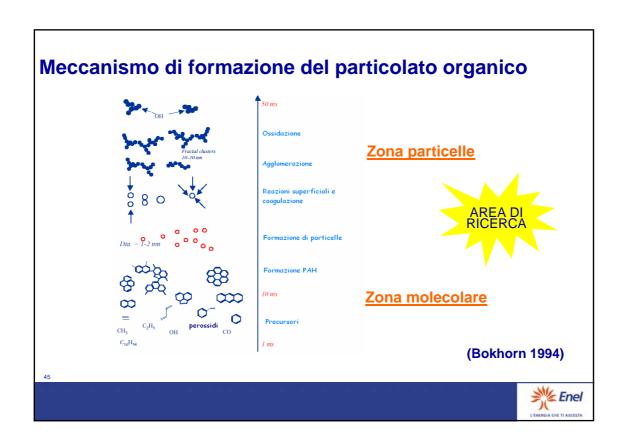
incendi forestali, eruzioni vulcaniche, corrosione del suolo, spray marino, decomposizione materiale biologico;

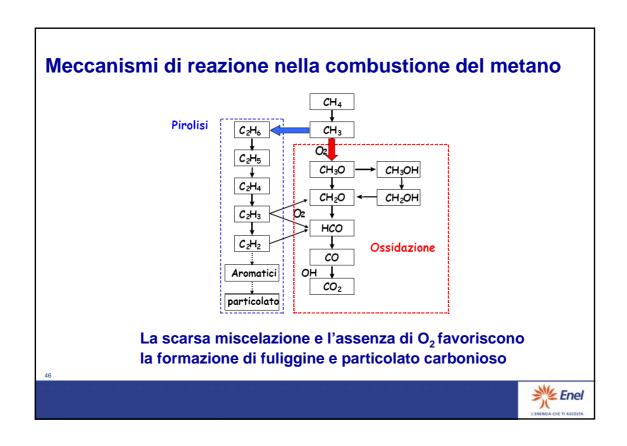
#### **Sorgenti Antropiche:**

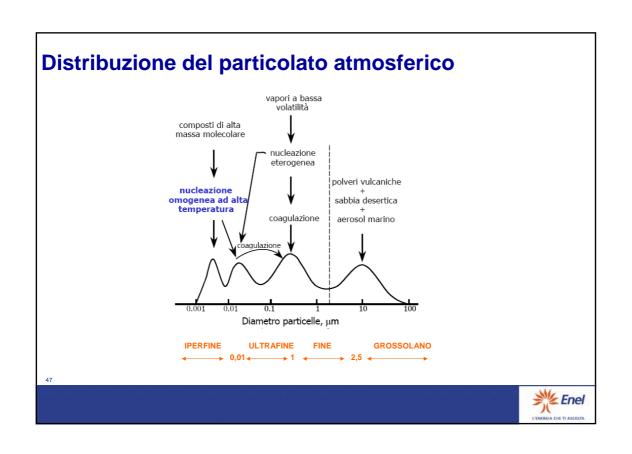
emissioni industriali, generatori di energia e calore, autoveicoli, impianti di trattamento rifiuti;

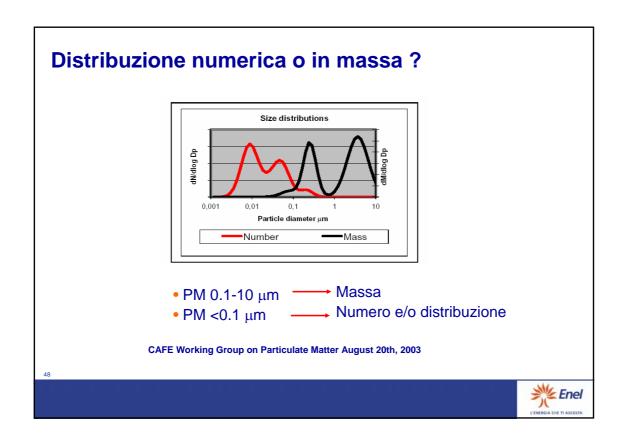


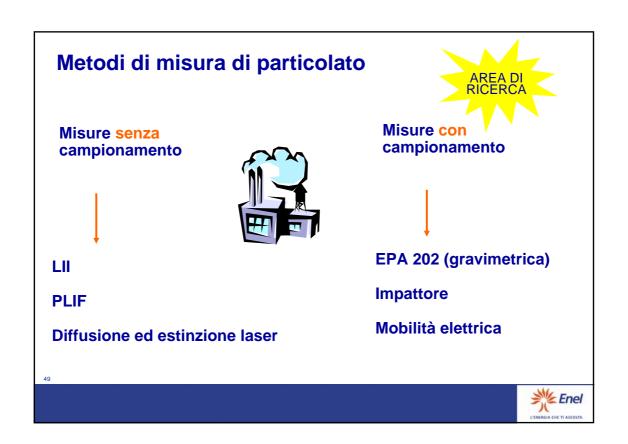








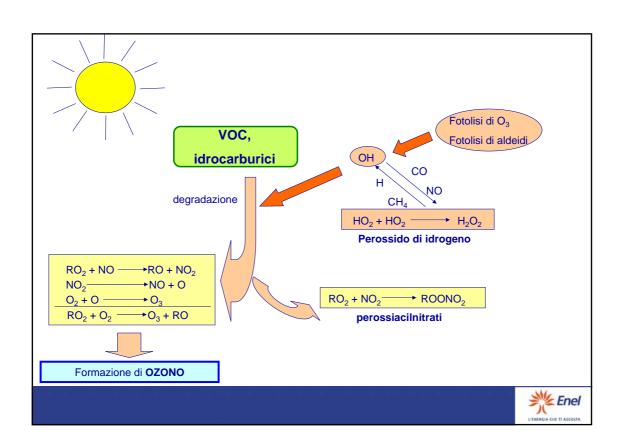




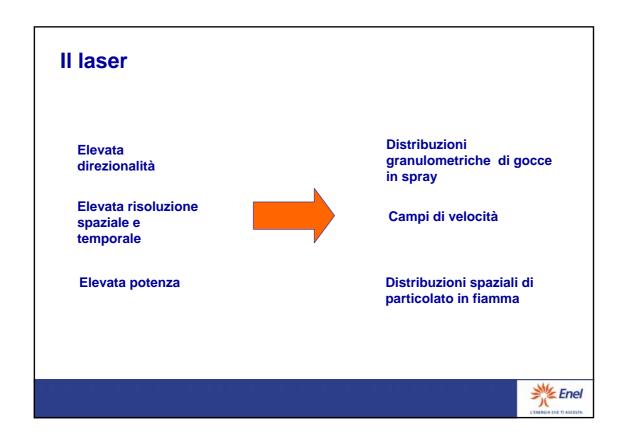
#### **Environmental Fate**

- Qual è il destino ambientale degli inquinanti emessi?
- Quali sono i meccanismi di dispersione nell'atmosfera?
- A che tipo di trasformazioni sono soggetti nell'atmosfera e nell'ambiente?
- Che proprietà hanno gli intermedi di queste trasformazioni? Qual è il loro potenziale di rischio rispetto ai precursori? (inquinamento secondario)





# Misure nei sistemi di combustione



# Preparazione e dispersione

TECNICHE TRADIZIONALI	TECNICHE INNOVATIVE	NECESSITA` E NUOVI SVILUPPI
-CAMPIONAMENTO DELLE GOCCE E ANALISI AL MICROSCOPIO	-SHIFT DI FASE DOPPLER	-ANALISI DI SPRAYS DENSI E/O DI ELEVATA POTENZIALITA`
-VISUALIZZAZIONE OTTICA (FOTOGRAFICA, TELECAMERA)	·.	-ANALISI DI SPRAYS OTTENUTI CON FLUIDI REALI (OLIO/VAPORE)  -ANALISI DI SPRAYS IN CORSO DI COMBUSTIONE
-TECNICHE OTTICHE LASER (DIFFRAZIONE LASER, LDA, SCATTERING ANGOLARE)		-ELEVATA RISOLUZIONE SPAZIALE/TEMPORALE



# Aerodinamica di fiamma

TECNICHE	TECNICHE	NECESSITA` E
TRADIZIONALI	INNOVATIVE	NUOVI SVILUPPI
-SONDE DI PRESSIONE  -ANEMOMETRIA A FILO CALDO  -VISUALIZZAZIONE  SMOKE WIRE  BOLLE DI ELIO  TERMOGRAFIA  SPECKLE	-ANEMOMETRIA LASER -P.I.V. -INTERFEROMETRIA	-ANALISI NON INTRUSIVA DI FIAMME INDUSTRIALI DI POTENZA. (Emissioni UV)  -MISURE DI CORRELAZIONE SPAZIALI/TEMPORALI IN FLUSSI TURBOLENTI (MISCELAZIONE-TURBOLENZA)  -ELEVATA RISOLUZIONE SPAZIALE E TEMPORALE  - MISURE DI VELOCITA' SENZA INSEMINANTE PER SEGUIRE RAPIDE EVOLUZIONI  - MISURE 3D DI VELOCITA'

Enel
L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.

# **Scambio termico**

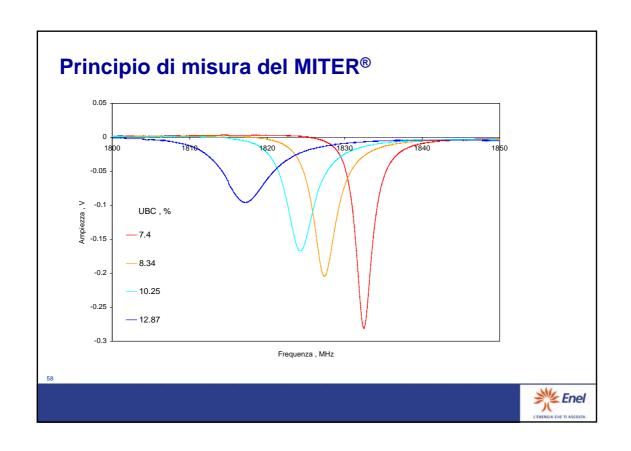
TECNICHE	TECNICHE	NECESSITA` E
TRADIZIONALI	INNOVATIVE	NUOVI SVILUPPI
-PIROMETRO AD ASPIRAZIONE -RADIOMETRO ELLISSOIDALE -FLUSSIMETRI A CONDUCIBILITA -RADIOMETRO A PICCOLO ANGOLO -RADIOMETRO A FILO SCOMPARENTE -SONDE A DEPOSIZIONE	-CARS -PIROMETRO ETERODINA -PIROMETRO SONICO	-APPLICAZIONI A SISTEMI INDUSTRIALI DI GRANDI DIMENSIONI -MAPPATURA IN LINEA DI TEMPERATURE IN AMBIENTI FORTEMENTE OSTILI -MAPPATURA IN LINEA DELLO SPORCAMENTO DELLE PARETI E DEI BANCHI -ELEVATA RISOLUZIONE SPAZIALE

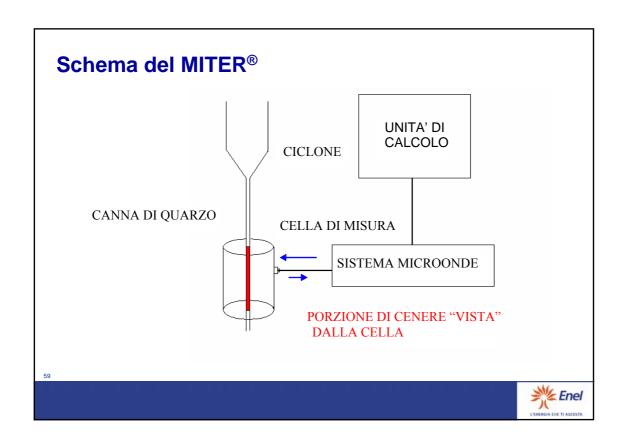
L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.

### Cinetica di combustione & emissioni

TECNICHE	TECNICHE	NECESSITA` E
TRADIZIONALI	INNOVATIVE	NUOVI SVILUPPI
-CAMPIONAMENTO ISOCINETICO E ANALISI CHIMICA	-CARS -LIF -ANALISI FOTOACUSTICHE -DIFFRATTOMETRIA LASER -LASER SCATTERING ANGOLARE	-MISURA DI PARTICOLATO SUB-MICRONICO  -MISURA DI RADICALI E SPECIE PARTICOLARMENTE INSTABILI  -MISURE DI IDROCARBURI POLICICLICI-AROMATICI  -MISURE DI INCOMBUSTI IN LINEA  -ELEVATA RISOLUZIONE SPAZIALE E TEMPORALE

Enel
L'ENERGIA CHE TI ASCOLTA.





#### Le nuove sfide

#### Mezzi otticamente densi

- Studio della fenomenologia e definizione dei parametri di caratterizzazione
- Uso/Modifica di tecniche ottiche esistenti per utilizzo in mezzi densi
- Sviluppo di nuove tecniche
- Interdisciplinare: tessuti biologici (mammografie ottiche), ambiente marino

#### Sistemi altamente turbolenti

- Studio della fenomenologia e definizione dei parametri di caratterizzazione e indagine su interazione cinetica chimica e turbolenza
- Analisi e misure multiparametriche
- Misure e Correlazioni spazio-temporali
- · Interdisciplinare: plasmi, atmosfera, acustica biomedica

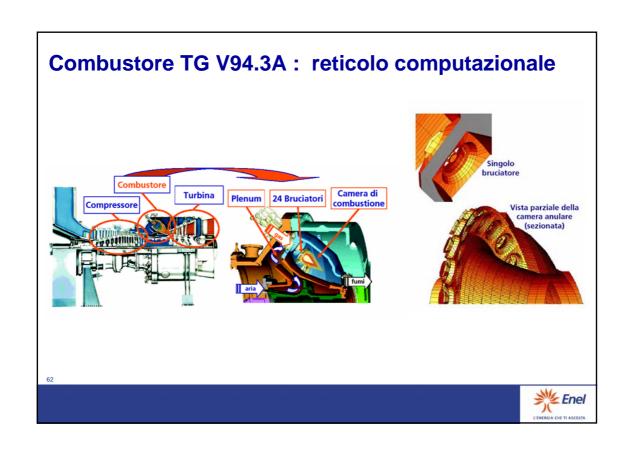
#### Elementi in traccia

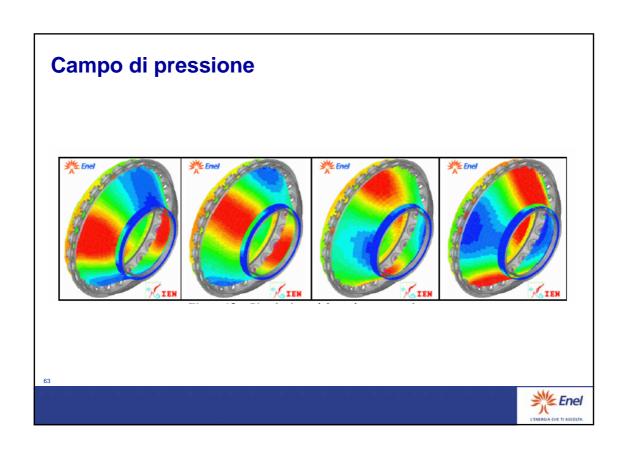
- Sviluppo di sorgenti a stato solido e studi di materiali (quantum cascade, ) Infrarosso, tunabili, compatte
- Nuove tecniche
   Alta sensibilità, elevata versatilità

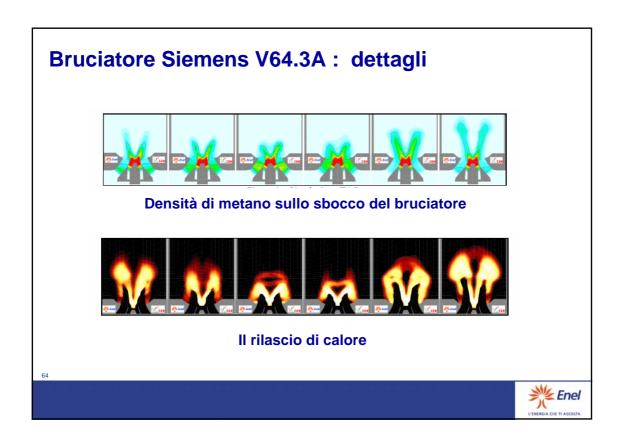


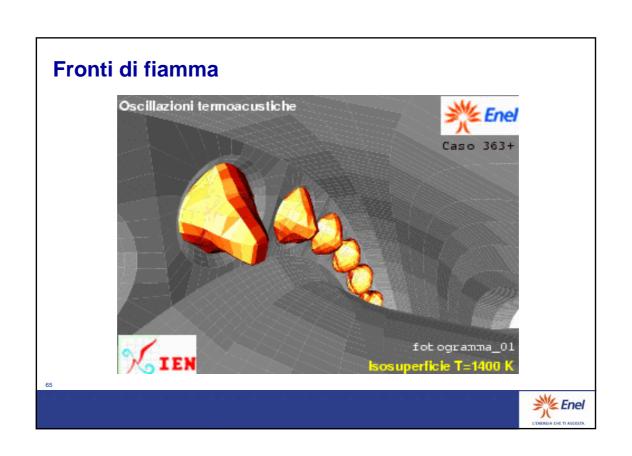
#### **Modellistica matematica**











### Aree di ulteriore sviluppo

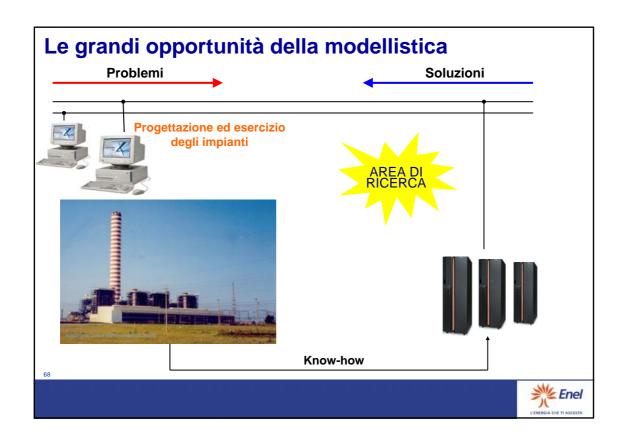
- Migliore comprensione e modellazione dei problemi di instabilità turbolenta durante la combustione di combustibili gassosi, liquidi e solidi.
- Maggiore sviluppo nella modellazione di combustibili residuali e biomasse.
- Maggiore ricerca nella modellazione di processi innovativi quali la combustione in ossigeno e flameless.

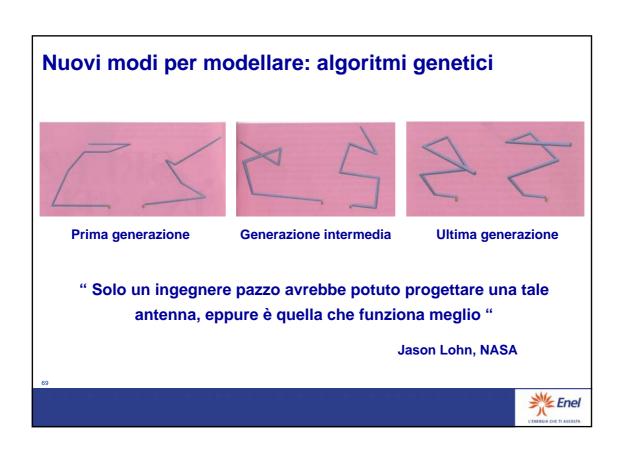


#### Le richieste dell'industria

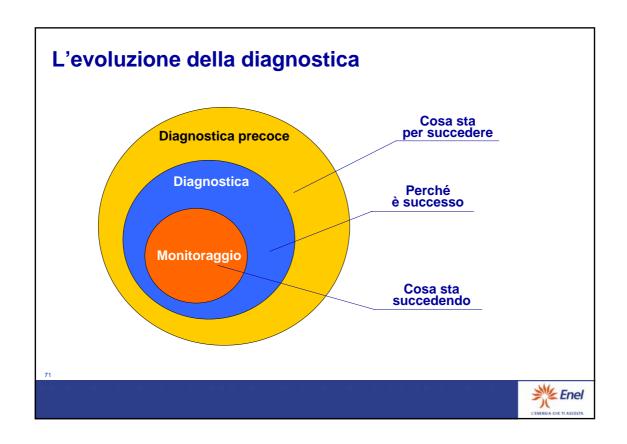
- Robustezza dei risolutori numerici e stabilità delle soluzioni
- Efficacia dei mesciatori
- Migliore interfaccia utente
- Facile interfacciamento con altri strumenti e/o codici di comune impiego
- Rapidità di risposta
- Flessibilità
- Accessibilità dei sorgenti











### Processi lenti: simulatori

Riproducono con una dinamica 10-100 volte più veloce i comportamenti delle principali variabili di processo.



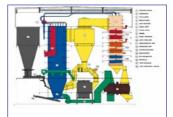
**IGCC Puertollano** 

- Modello gassificatore
- 606.000 variabili



**Desolforatori** 

- Modello desolforatore
- 111.000 variabili



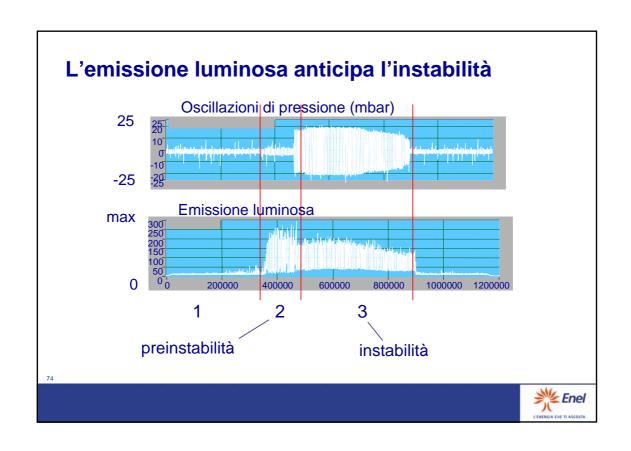
**Letto fluido Sulcis** 

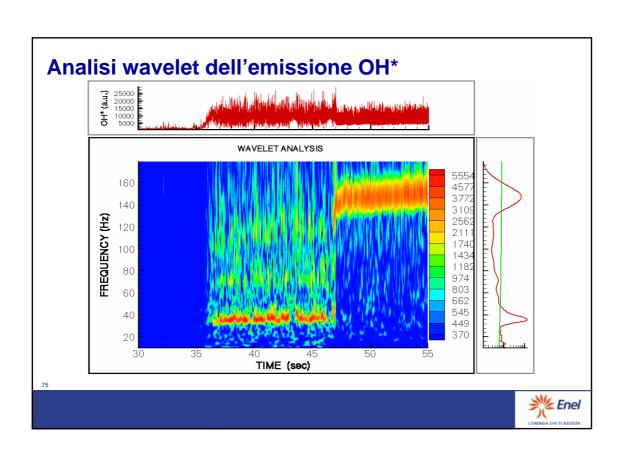
- Modello letto fluido
- 350.000 variabili

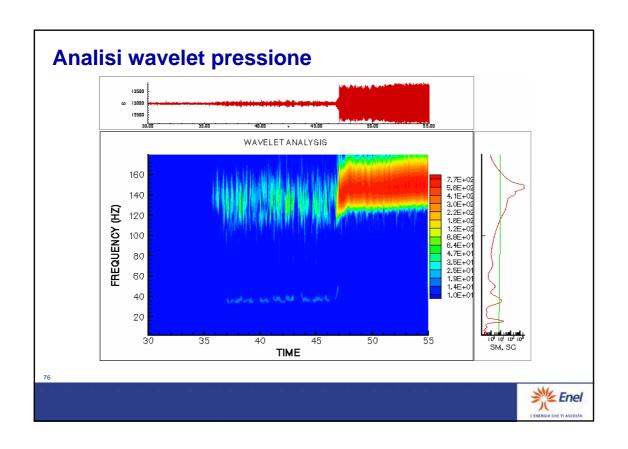
72



# Processi veloci ed imprevedibili Mentre il sistema lavora in condizioni stazionarie, improvvisamente diviene instabile. Pressione Pressione Aria

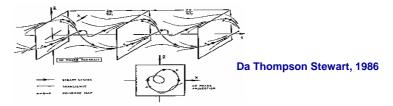




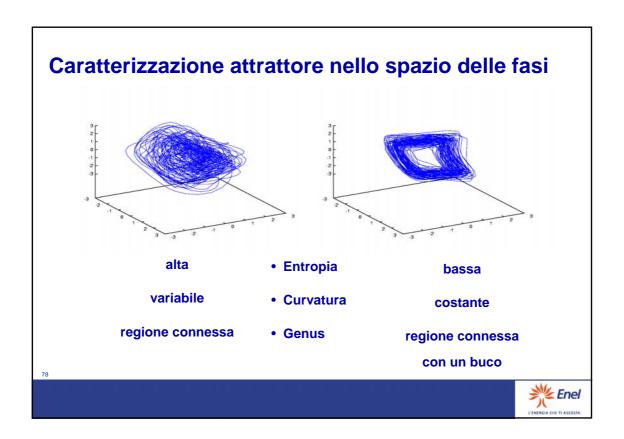


# Relazione tra dinamica e topologia

- Una variazione qualitativa della dinamica implica la perdita della stabilità strutturale del sistema
- Si perde l'esistenza di omeomorfismi (trasformazioni biunivoche e bicontinue) tra i flussi
- In termini di attrattori nello spazio delle fasi questo implica una evoluzione morfologica nel tempo con la perdita di invarianza topologica: non esistono omeomorfismi in grado di descrivere l'evoluzione degli attrattori



**Enel** 



# Ricadute in campo biomedico



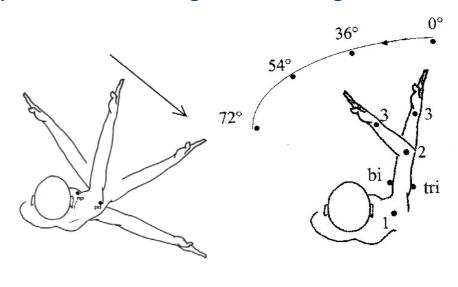
W.A.E.S.® (Wavelet Analysis for Electromyographic Signals). Analisi in tempo reale dello stato di soggetti parkinsoniani.

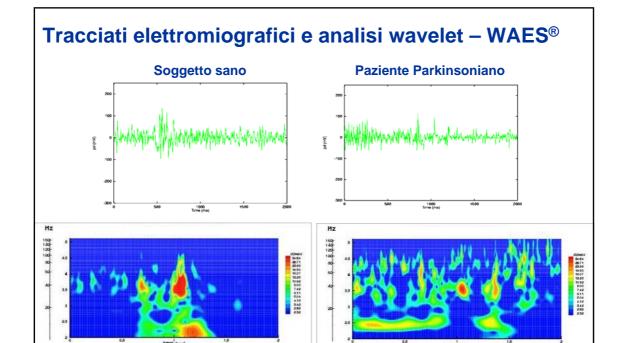


E.L.S.A. ® (Energy Lung Sound Analysis) Controllo della ventilazione di soggetti affetti da patologie respiratorie.



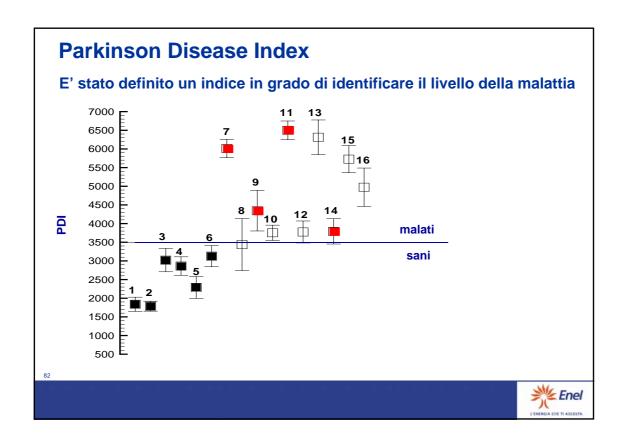
# L'applicazione della diagnostica turbogas al Parkinson

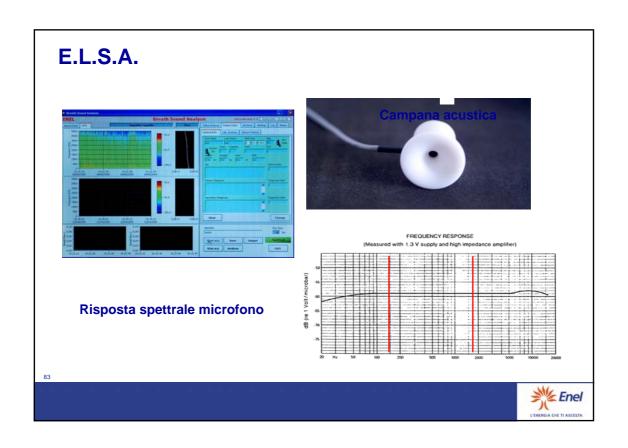


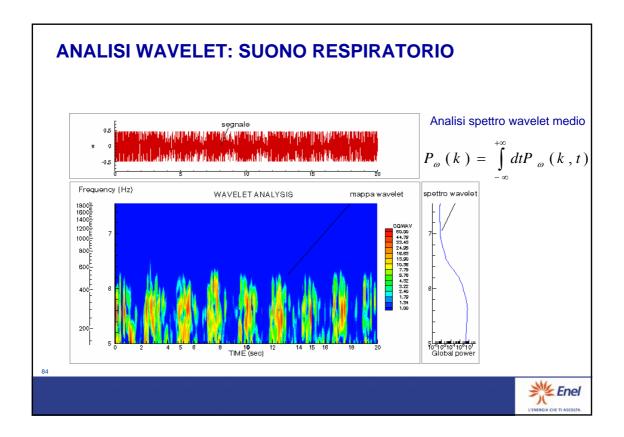


Enel

Enel







### **ANALISI STATISTICA**

Un modo particolarmente comodo ed utile per caratterizzare uno spettro in frequenza è suddividerlo in parti in modo tale che ognuna di esse contenga lo stesso quantitativo energetico.

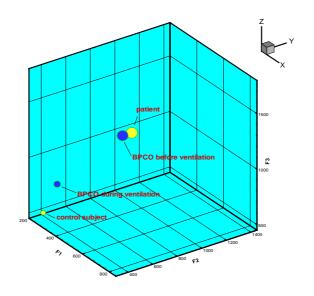
### **QUARTILI**

l quartili,  $f_{25\%}$ ,  $f_{50\%}$ ,  $f_{75\%}$ , che suddividono lo spettro in quattro parti uguali sono i parametri maggiormente utilizzati nelle analisi documentate in letteratura. Forniscono una valutazione del bilanciamento energetico tra alte e basse frequenze e quindi possono essere utilizzati per caratterizzare le variazioni globali delle diverse tipologie respiratorie (Charbonneau, 2000).

85

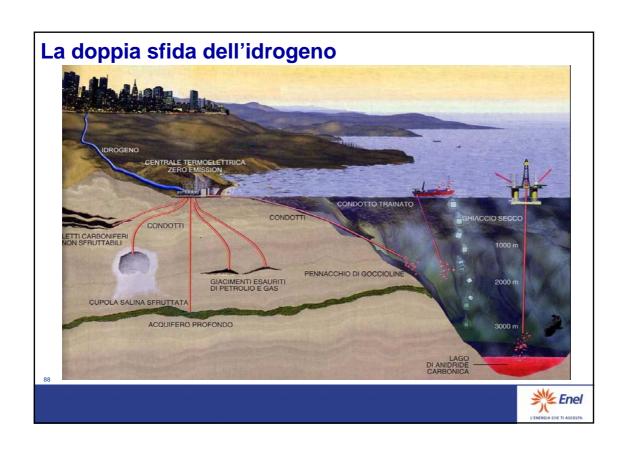


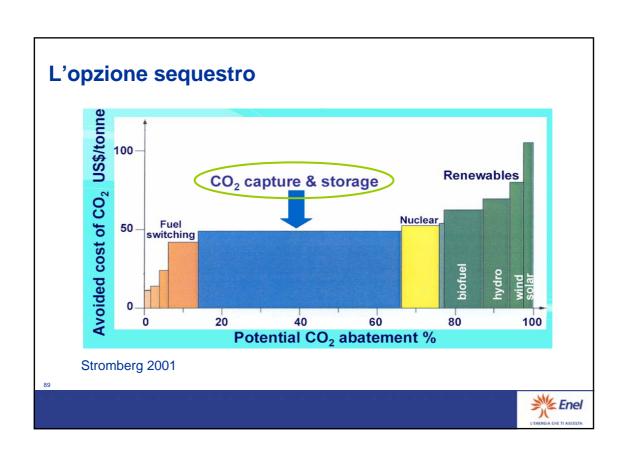
# **RAPPRESENTAZIONE 3-D QUARTILI**

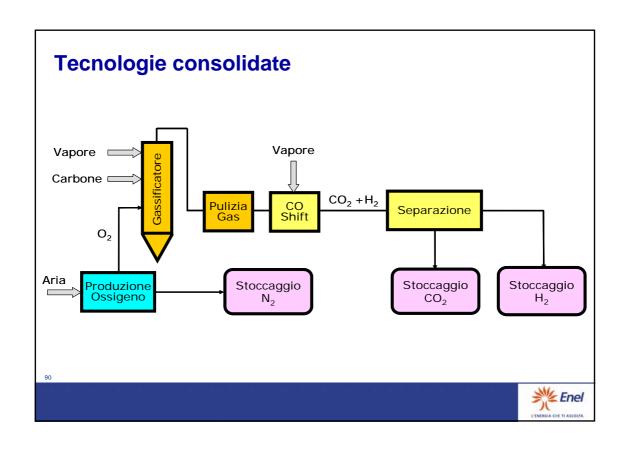


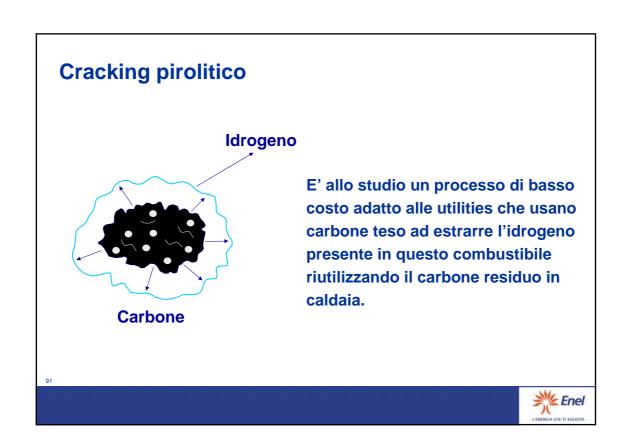
Enel

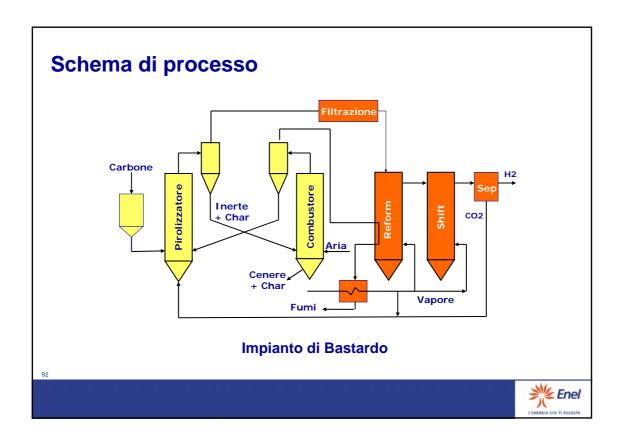
Idrogeno e CO<sub>2</sub>











## **Elettrolisi**

- Energia teorica necessaria (25°C): 3.54 kWh/Nm³ (η<sub>limite PCI</sub>= 85%)
- Elettrolita alcalino
  - -Attuale: p: 1÷15 bar, taglia < 1 MWe,

consumo ~4.8 kWh/Nm $^3_{H2}$ ,  $\eta_{PCI}$ = 62%

-Prospettato: p: 30 bar, taglia 2 MW

consumo ~4.1 kWh/Nm $^3_{H2}$ ,  $\eta_{PCI}$ = 73%

- Elettrolita solido polimerico a conduzione ionica
  - -Attuale: p < 30 bar, taglia ~ 100 kWe,

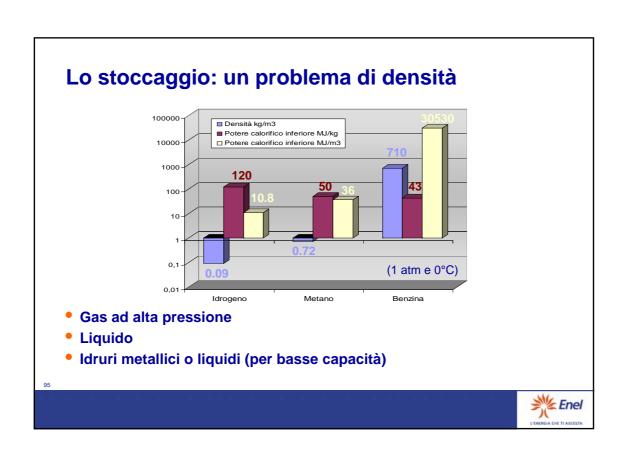
consumo ~6.2 kWh/Nm $^3_{H2}$ ,  $\eta_{PCI}$ = 48%

-Prospettato: p > 200 bar, reversibili

**Enel** 

47





# Stoccaggio commerciale con idruri e liquido

### Idruri metallici

Capacità: 80 Nm<sup>3</sup>

Pressione di carica: 10 bar a 40°C Pressione di scarica: 1 bar a 70°C

Rapporto ponderale: 1,35%

Calore di deidrogenazione: 8 -19% del PCI



### Idrogeno Liquido

Pressione di lavoro: da 0.5 a 8 bar Temperatura di lavoro: -253 °C

Capacità: 600 L

Energia per la liquefazione: ~ 30% del PCI



96



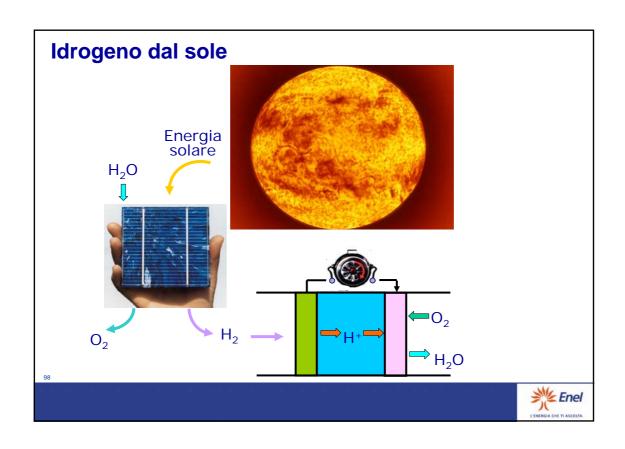
# Obiettivi di ricerca e sviluppo

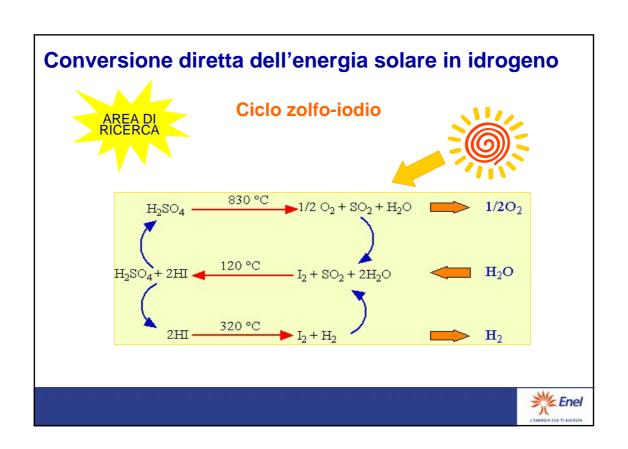
- Elettrolisi alcalina
  - Aumento taglie di produzione → diminuzione costi impianto
  - Diminuzione consumi
- Elettrolisi con membrana polimerica
  - Aumento pressioni operative
  - Diminuzione consumi
  - Sviluppo sistemi reversibili
- Nuovi sistemi di elettrolisi
  - Elettrolisi con membrana ad ossidi solidi
  - Elettrolisi in vapore
- Stoccaggio con idruri metallici
  - Sviluppo polveri con elevata densità ponderale e volumetrica di stoccaggio (>5% in peso), rilascio dell'idrogeno a temperature <100°C</li>
  - Diminuzione costi di produzione (da ~1800 €Nm³<sub>H2</sub> a ~50 €Nm³<sub>H2</sub>)
- Stoccaggio con idruri chimici
  - Sviluppo sistemi di rigenerazione dell'idruro esausto

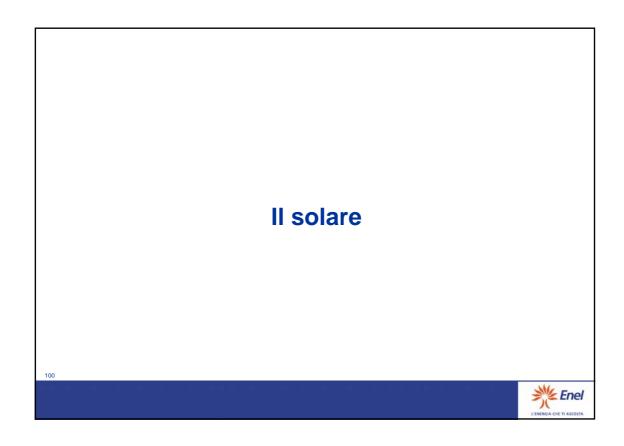


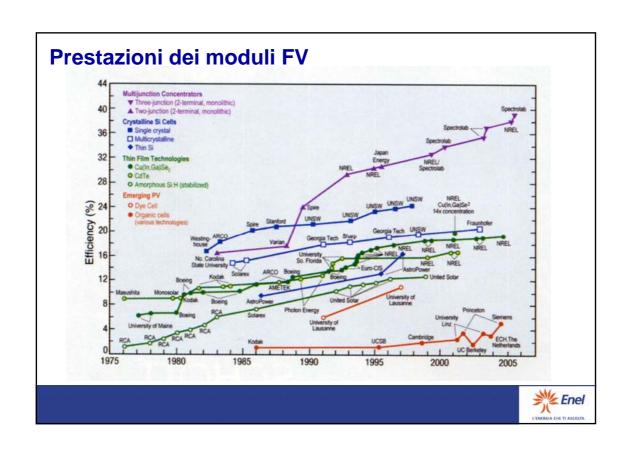


49









# I sistemi commerciali

### Rendimenti del solo modulo

Tipo di modulo	Rendimento di picco
Silicio monocristallino	0,130
Silicio policristallino	0,120
Film sottile - silicio amorfo	0,070
Film sottile – CIS, CIGS	0,100
Film sottile – CdTe	0,080



