

Energie rinnovabili

Tecnologia e impiantistica per l'utilizzo delle colture



**Corso di laurea magistrale in Scienze e tecnologie agrarie
a.a. 2012-13 – 3 CFU**

dott. Daniele Dell'Antonia



Le emissioni nella combustione di biomasse

Emissioni nella combustione

- Le emissioni di inquinanti da impianti di combustione possono essere classificati come dipendenti da:
 - ❖ combustibile: se questo contiene una sostanza inquinante che rimane inalterata o se contiene una sostanza che a seguito della combustione si trasforma producendo composti inquinanti quali ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x), acido cloridrico (HCl)
 - ❖ combustione anomala: quando la combustione è incompleta e si generano sostanze non completamente ossidate (ad es. CO , idrocarburi incombusti) o la combustione non è ben controllata e si può avere formazione di ossidi di azoto di origine termica (alta temperatura delle fiamme)
 - ❖ combustione normale: anche se la combustione risulta essere normale si ha emissione di acqua (H_2O), anidride carbonica (CO_2) e particolato (PM)

Monossido di Carbonio (CO)

- Caratteristiche fisico chimiche
 - ❖ è un gas incolore, inodore, insapore, infiammabile e molto tossico che si forma dalla combustione incompleta degli idrocarburi presenti in carburanti e combustibili. Esso è uno dei più comuni inquinanti dell'aria
- Effetti sull'uomo e sull'ambiente
 - ❖ l'elevata pericolosità e tossicità di questo gas è dovuta alla sua affinità con l'emoglobina, che risulta essere circa 200-300 volte maggiore di quella dell'ossigeno. Questa caratteristica gli consente di legarsi facilmente con l'emoglobina del sangue e di ostacolare così l'ossigenazione dei tessuti

Biossido di Zolfo (SO₂)

- **Caratteristiche fisico chimiche**
 - ❖ **il biossido di zolfo o anidride solforosa (SO₂) è un gas incolore che deriva dall'ossidazione dello zolfo presente nei combustibili fossili, carbone e petrolio**
- **Effetti sull'uomo e sull'ambiente**
 - ❖ **a basse concentrazioni è un gas irritante, mentre a concentrazioni più elevate può provocare patologie respiratorie come asma e bronchiti. In atmosfera l'SO₂ si ossida ad anidride solforica e, in presenza di umidità, si trasforma in acido solforico, responsabile del fenomeno delle piogge acide, con conseguenti danni sugli ecosistemi acquatici e sulla vegetazione**

Ossido di Azoto (NO_x)

- **Caratteristiche fisico chimiche**
 - ❖ **in atmosfera sono presenti diverse specie chimiche di ossidi di azoto (NO_x), ma solamente due sono di interesse dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico: l'ossido di azoto (NO) ed il biossido di azoto (NO₂)**
- **Effetti sull'uomo e sull'ambiente**
 - ❖ **l'NO₂ è circa 4 volte più tossico dell'NO. L'inalazione del biossido di azoto determina una forte irritazione delle vie aeree. L'NO₂ contribuisce alla formazione dello smog fotochimico, in quanto precursore dell'ozono troposferico, e concorre al fenomeno delle piogge acide, reagendo con l'acqua e originando acido nitrico**

Formazione degli NOx durante la combustione

- **Thermal NOx**
 - ❖ con una reazione fra l'azoto atmosferico e i radicali dell'ossigeno a temperature superiori ai 1.300°C. La quantità prodotta aumenta all'aumentare della temperatura
- **Prompt NOx (NOx pronto)**
 - ❖ che si forma con l'azoto atmosferico sopra i 1.300°C con basso ossigeno e in presenza di idrocarburi
- **NOx che si forma per ossidazione dell'azoto contenuto nel combustibile**
 - ❖ che aumenta all'aumentare dell'azoto contenuto nella biomassa. E' il principale meccanismo di formazione degli NOx nei biocombustibili, visto che la temperatura di combustione è compresa fra 800-1200°C e quindi gli NOx formati con i due casi precedenti sono di minore importanza

Polveri totali

- Le polveri fini PM₁₀ e PM_{2,5} sono una sospensione di particelle solide e liquide in aria ambientale, il cui diametro aerodinamico è inferiore a 10 e 2,5 µm (micrometri)
- Dal punto di vista sanitario:
 - ❖ I PM₁₀ possono raggiungere la parte superiore dei polmoni (polveri inalabili)
 - ❖ I PM_{2,5} e PM₁ penetrano più in profondità e possono raggiungere la regione alveolare (polveri respirabili)
- Dimensioni e composizioni del PM dipendono non solo dai processi emissivi, ma anche dai processi di trasformazione ai quali le particelle vanno incontro dopo la loro emissione in atmosfera
- Le particelle comprese tra 0,1 e pochi micrometri permangono più a lungo in atmosfera (da alcuni giorni fino a una settimana) e possono essere trasportate per lunghe distanze (1000 km)

Origine delle particelle durante la combustione

- Le particelle più fine ($< 1 \mu\text{m}$) si originano generalmente da processi che avvengono ad elevate temperature e/o processi di formazione “secondaria” gas-particelle
 - ❖ Queste particelle trasportano composti inorganici, (come solfati, nitrati, e carbonio elementare) organici e semivolatili
- Le particelle più grossolane ($> 1 \mu\text{m}$) si generano da processi meccanici come l'erosione, la corrosione e l'abrasione di materiali
- Le particelle ultrafine ($< 0,1 \mu\text{m}$) sono abbondanti in numero, ma costituiscono solo una piccola parte della massa del PM

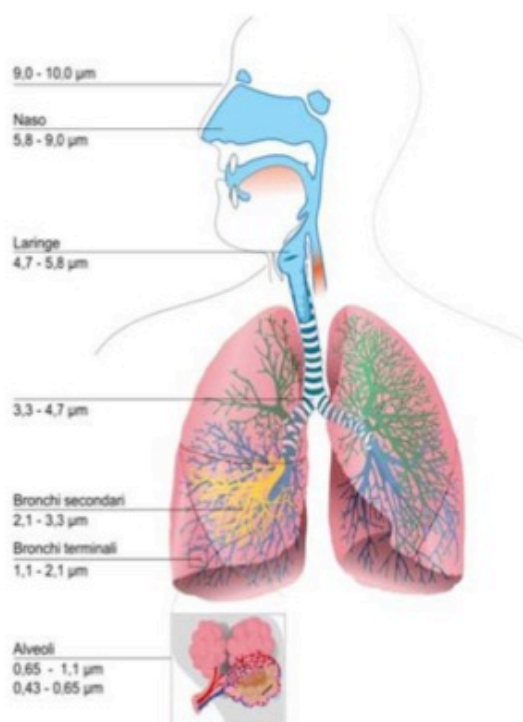
Caratterizzazione del particolato

- **Modalità di formazione**
 - ❖ **Primario:** direttamente dalla combustione
 - ❖ **Condensabile:** dalla condensazione dei gas sul primario
 - ❖ **Secondario:** dalla reazione con l'atmosfera di gas precursori
 - ✓ reazioni chimiche
 - ✓ reazioni fotochimiche
 - ✓ particolato ultrafine
- **Composizione chimica**
 - ❖ organico
 - ❖ inorganico
- **Granulometria**
 - ❖ Particolato totale
 - ❖ PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$, PM_1
 - ❖ Particolato ultrafine/nanoparticolato

Aspetti sanitari

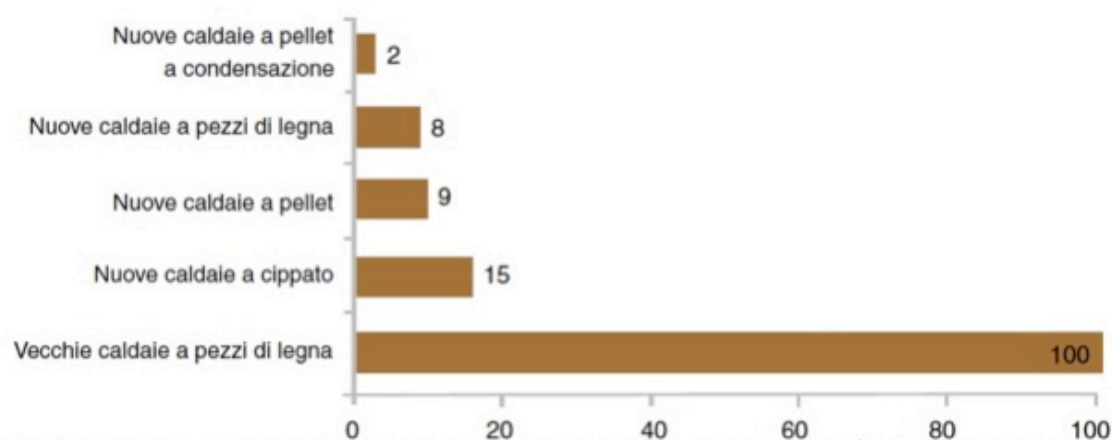
- **Particolato Totale > 10 μm**
 - ❖ **PM10 $d < 10 \mu\text{m}$**
 - ❖ **PM2.5 $d < 2.5 \mu\text{m}$**

- **Particolato Ultrafine/Nanoparticolato**
 - ❖ **Agglomerati solidi o liquidi**
 - ❖ **$d < 0.1 \mu\text{m}$ / $d < 0.05 \mu\text{m}$**



Fonte: Hugonyo 2010

Emissioni degli apparecchi a biomassa

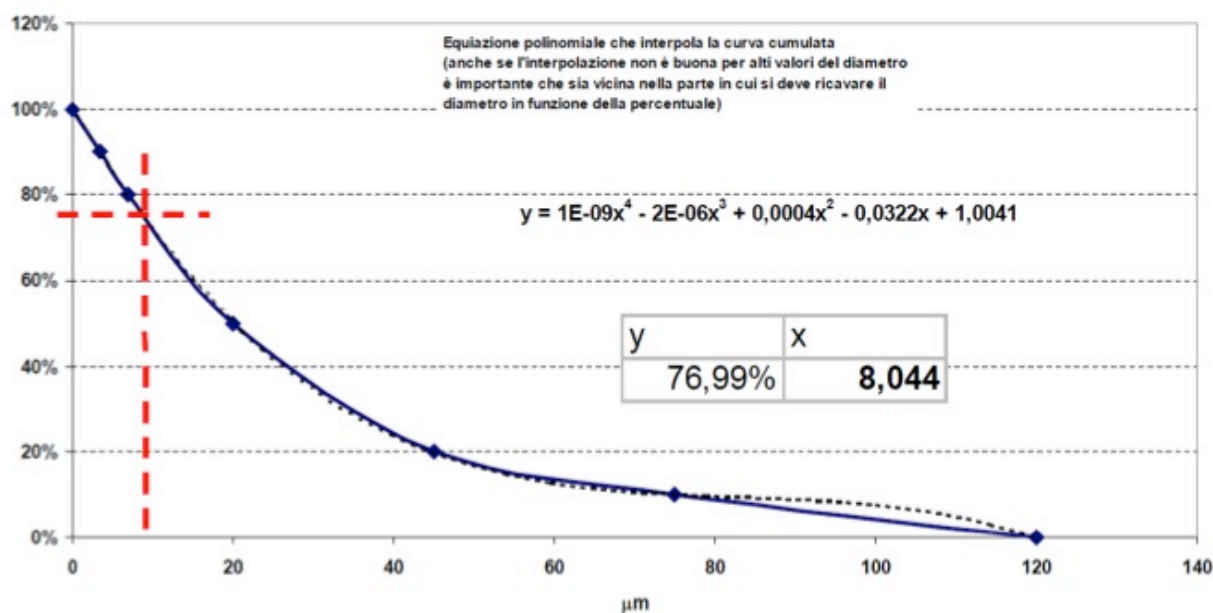


Performance di emissione degli apparecchi a biomassa (valore percentuale, ponendo 100 il fattore di emissione delle polveri dei vecchi apparecchi)

Fonte: Francescato 2007

Curva cumulata della distribuzione delle dimensioni delle particelle solide

13

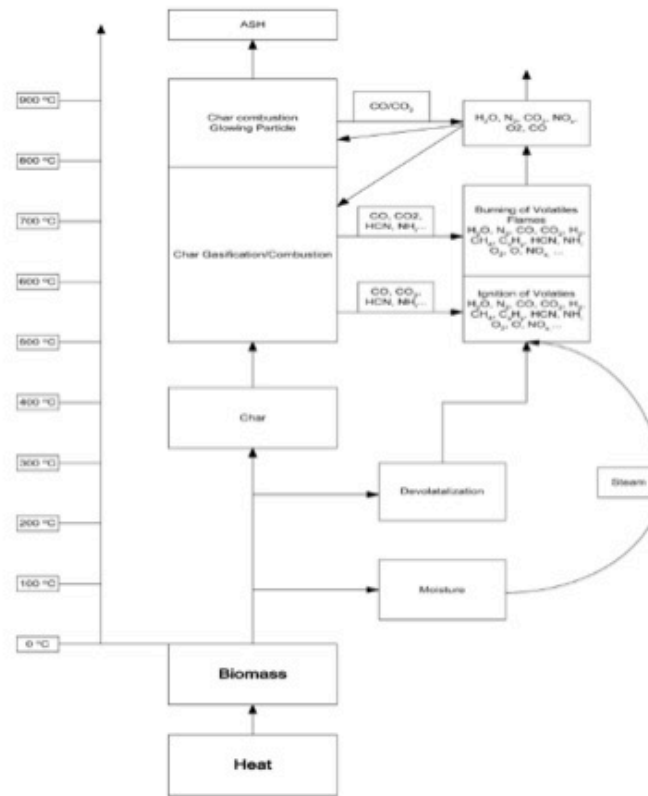


Riassunto delle emissioni

14

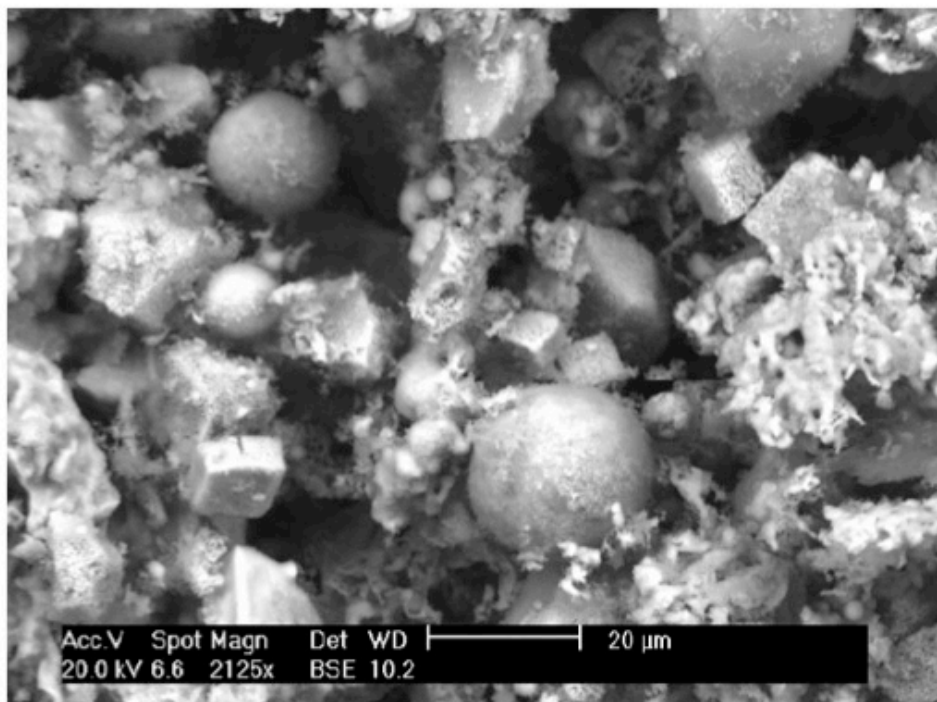
- **Emissioni gassose**
 - ❖ **Combustione completa**
 - ✓ CO₂, O₂, H₂O
 - ❖ **Combustione incompleta**
 - ✓ CO, H₂, Idrocarburi incombusti (CH₄)
 - ❖ **Influenza del combustibile**
 - ✓ NO_x, SO₂
- **Particolato**
 - ❖ **primario**
 - ❖ **secondario**
 - ❖ **condensabile**

Schematic description of the wood chip combustion



Fonte: Khan 2009

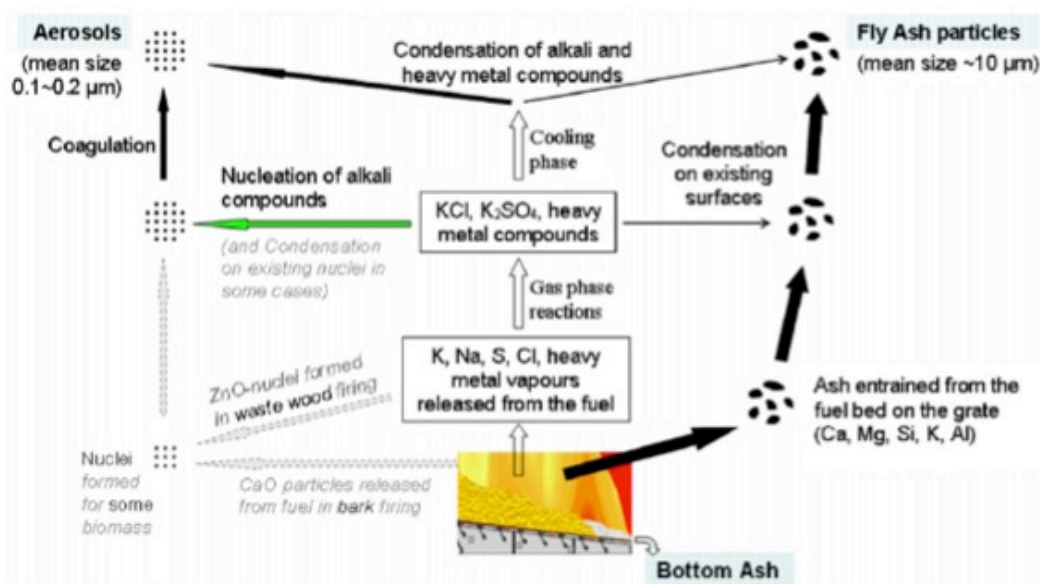
Dimensioni del particolato



Fonte: Wiinikka 2010

Schematic illustration of ash formation routines during grate-firing of biomass

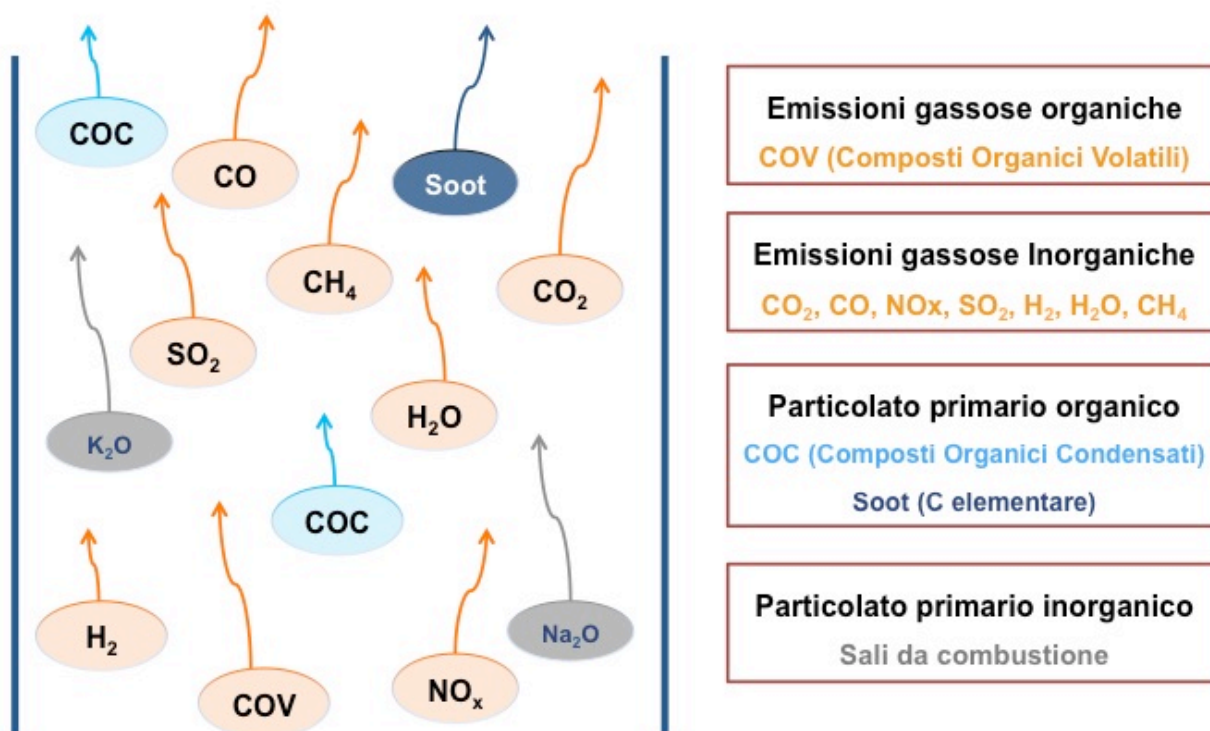
17



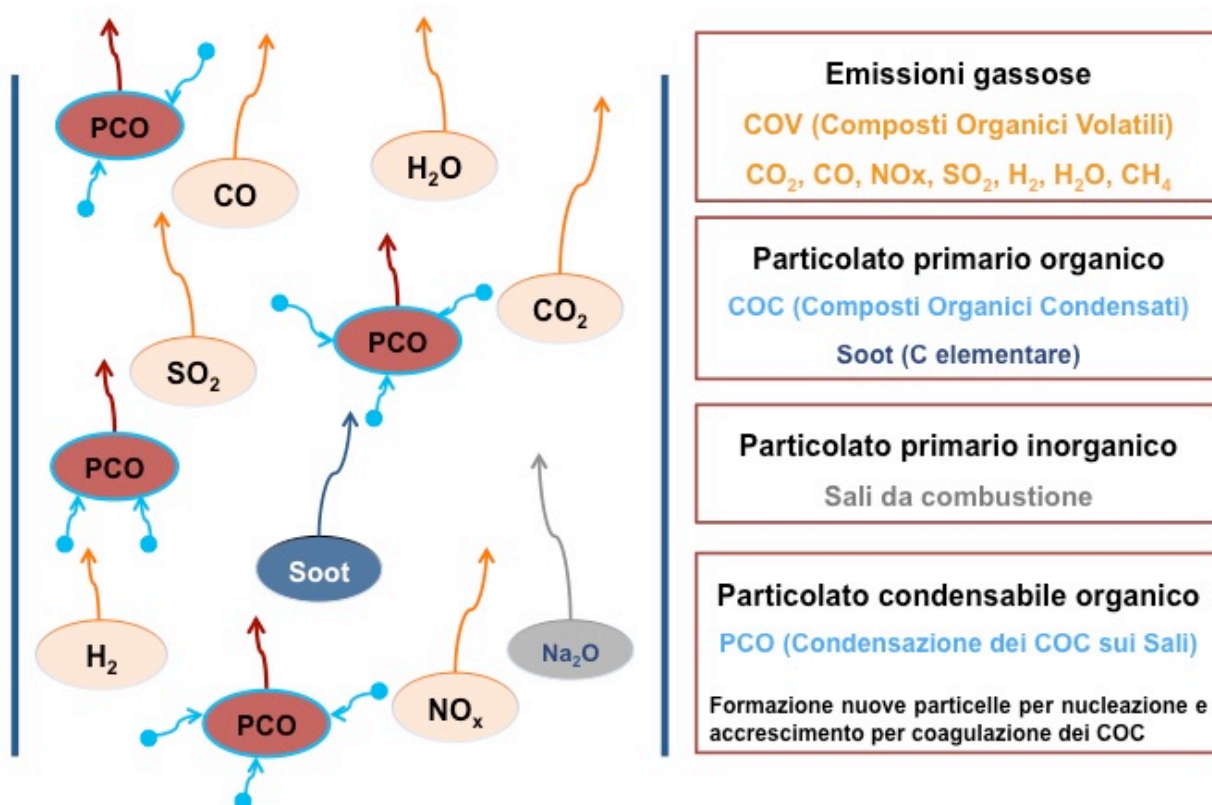
Fonte: Chungen 2008

Emissioni gassose e particolato (180-250°C)

18



Emissioni particolato condensato (60°C)



Emissioni e condizioni di riferimento

- Gli inquinanti gassosi sono spesso misurati mediante analizzatori che forniscono la concentrazione in volume, mentre la legge fornisce limiti alla concentrazione in massa. La concentrazione in massa di un inquinante nei fumi si esprime generalmente come massa di inquinante (m_i) per unità di volume dei fumi (V_f) in condizioni di riferimento
- Questo per evitare che si possano artificialmente “diluire” gli inquinanti aggiungendo aria di combustione in eccesso
- Le “condizioni di riferimento” secondo il D.L. n. 152 del 20/04/2006 fissano un limite al tenore residuo di ossigeno nei fumi:
 - ❖ 3 % per i combustibili liquidi e gassosi
 - ❖ 6 % per il carbone
 - ❖ 11 % per gli altri combustibili solidi

Condizioni di riferimento

- Per passare dalla concentrazione in volume (V_i/V_f) alla concentrazione in massa (m_i/V_f) si può scrivere:

$$\frac{m_i}{V_f} = \frac{m_i}{V_i \cdot V_f} = \rho_i \frac{V_i}{V_f}$$

- ❖ dove ρ_i è la densità dell'inquinante, ed è calcolabile con buona approssimazione con la legge di Avogadro se l'inquinante è gassoso
 - ✓ tale legge afferma che una kg-mole di sostanza (la cui massa in kg è numericamente pari al valore del peso molecolare) occupa in condizioni normali (1 atm e 25 °C) il volume di 22.4 m³

Condizioni di riferimento

- La concentrazione da confrontare con i limiti di legge non è quella misurata, ma è quella riportata nelle condizioni di riferimento

$$\frac{m_i}{V_f} = \frac{m_i}{V_{fr}} \cdot \frac{V_{fr}}{V_f} = \frac{m_i}{V_{fr}} \cdot \frac{V_{fr}(1+n_r \cdot a_t)}{V_f(1+n \cdot a_t)}$$

- ❖ V_{fr} = volume dei fumi con indice d'aria di riferimento; frV
 - ❖ m_i/V_{fr} = concentrazione in condizione di riferimento; friVm/
 - ❖ n = indice effettivo di aria;
 - ❖ n_r = indice d'aria in condizioni di riferimento
- Assumendo $v_f = V_{fr}$ e trascurando la massa di combustibile rispetto a quella dei fumi per cui $1+n a_t = n a_t$ si ottiene:

$$\frac{m_i}{V_f} = \frac{m_i}{V_{fr}} \frac{n_r}{n}$$

Condizioni di riferimento

- Essendo valida la reazione:

$$n = \frac{0,21}{0,21 - y_{O_2}}$$

- Alla fine si ottiene la seguente formula:

$$\frac{m_i}{V_{fr}} = \frac{0,21 - y_{O_2r}}{0,21 - y_{O_2}} \frac{m_i}{V_f}$$

- ❖ y_{O_2} = concentrazione effettiva di O_2 nei fumi (misurata al camino);
- ❖ y_{O_2r} = concentrazione di O_2 nelle condizione di riferimento.

Esempio 1

- I fumi di un impianto di combustione alimentato a biomassa da 30 kW(t) contengono una concentrazione in volume di CO pari allo 0,0163% (163 ppm) ed una concentrazione di ossigeno del 17,3 %
- Determinare:
- 1) la concentrazione di CO in massa
 - 2) la concentrazione di CO riportata nelle condizioni di riferimento

- ✓ Sfruttando la legge di Avogadro (essendo il peso molecolare del CO pari a $12+16 = 28$) si ottiene:

$$\frac{m_{CO}}{V_f} = \rho_{CO} \frac{V_{CO}}{V_f} = \frac{28}{22,4} 0,0163 \cdot 10^{-2} = 0,000204 \frac{kg}{m^3} = 204 \frac{mg}{m^3}$$

Esempio 1

✓ **semplificando:**

$$\frac{m_{CO}}{V_f} = ppm \cdot \frac{PM}{22,4} = 163 \cdot \frac{28}{22,4} = 204 \frac{mg}{m^3}$$

- ppm = parti per milione
- PM = Peso Molecolare

✓ **la concentrazione di CO nelle condizioni di riferimento vale:**

$$\frac{m_{CO}}{V_{fr}} = \frac{m_{CO}}{V_f} = \frac{0,21 - y_{O_{2r}}}{0,21 - y_{O_2}} = 204 \frac{0,21 - 0,11}{0,21 - 0,173} = 551 \frac{mg}{m^3}$$

Esempio 2

➤ **I fumi di due impianti di combustione alimentati a biomassa hanno i seguenti valori:**

- ❖ NO pari a 56 ppm con una concentrazione di O₂ del 18,6%
- ❖ NO pari a 187 ppm con una concentrazione di O₂ del 13%

➤ **Come sono le due emissioni in condizioni di riferimento?**

❖ **Primo impianto**

$$\frac{m_{CO}}{V_f} = ppm \cdot \frac{PM}{22,4} = 56 \cdot \frac{30}{22,4} = 75 \frac{mg}{m^3}$$

$$\frac{m_{CO}}{V_{fr}} = \frac{m_{CO}}{V_f} = \frac{0,21 - y_{O_{2r}}}{0,21 - y_{O_2}} = 75 \frac{0,21 - 0,11}{0,21 - 0,186} = 312 \frac{mg}{m^3}$$

Esempio 2

➤ **Secondo impianto**

$$\frac{m_{CO}}{V_f} = ppm \cdot \frac{PM}{22,4} = 187 \cdot \frac{30}{22,4} = 250 \frac{mg}{m^3}$$

$$\frac{m_{CO}}{V_{fr}} = \frac{m_{CO}}{V_f} = \frac{0,21 - y_{O_{2r}}}{0,21 - y_{O_2}} = 250 \frac{0,21 - 0,11}{0,21 - 0,13} = 312 \frac{mg}{m^3}$$

➤ **Confronto:**

❖ **Primo impianto Secondo impianto**

$$❖ \quad 312 \frac{mg}{m^3} = 312 \frac{mg}{m^3}$$

Norme in materia ambientale D.Lgs 152/06

➤ **Limiti di emissioni :**

❖ **in base al tipo di sostanza inquinante (sezione II, allegato 1 della parte quinta)**

❖ **in base al tipo di impianto (sezione III, allegato 1 della parte quinta)**

➤ **Per le sostanze per cui non sono stabiliti limiti di emissione nella parte III, si applicano i valori di emissione stabili nella parte II**

Valori di emissione

- **Sostanze ritenute cancerogene e/o tossiche per la riproduzione e/o mutagene.**

	Soglia di rilevanza (espressa come flusso di massa)	Valore di emissione (espresso come concentrazione)
Classe I	0,5 g/h	0,1 mg/Nm ³
Classe II	5 g/h	1 mg/Nm ³
Classe III	25 g/h	5 mg/Nm ³

CLASSE I

- | | |
|--|--|
| - Asbesto (crisotilo, crocidolite, amosite, antofillite, actinolite e tremolite) | - Dibenzo(a,c)pirene |
| - Benzo(a)pirene | - Dibenzo(a,h)pirene |
| - Berillio e i suoi composti espressi come Be | - Dibenzo(a,i)pirene |
| - Dibenzo(a,h)antracene | - Dibenzo(a,l)pirene |
| - 2-naftilammina e suoi sali | - Cadmio e suoi composti, espressi come Cd (1) |
| - Benzo(a)antracene | - Dimetilnitrosamina |
| - Benzo(b)fluorantene | - Indeno (1,2,3-cd) pirene (1) |
| - Benzo(j)fluorantene | - 5-Nitroacenaftene |
| - Benzo(k)fluorantene | - 2-Nitronaftalene |
| - Dibenzo(a,h)acridina | - 1-Metil-3-Nitro-1-Nitrosoguanidina |
| - Dibenzo(a,j)acridina | |

Valori di emissione

CLASSE II

- | | |
|--|---|
| - Arsenico e suoi composti, espressi come As | - Benzidina e suoi sali |
| - Cromo (VI) e suoi composti, espressi come Cr | - 4,4'-Metilen bis (2-Cloroanilina) e suoi sali |
| - Cobalto e suoi composti, espressi come Co | - Dietilsolfato |
| - 3,3'-Diclorobenzidina e suoi sali | - 3,3'-Dimetilbenzidina e suoi sali |
| - Dimetilsolfato | - Esametilfosfortriamide |
| - Etilenimmina | - 2-Metilaziridina |
| - Nichel e suoi composti espressi come Ni (2) | - Metil ONN Azossimetile Acetato |
| - 4-aminobifenile e suoi sali | - Sulfallate |
| | - Dimetilcarbammoilcloruro |
| | - 3,3'-Dimetossibenzidina e suoi sali |

Valori di emissione

CLASSE III

- Acrilonitrile
- Benzene
- 1,3-butadiene
- 1-cloro-2,3-epossipropano (epicloridrina)
- 1,2-dibromoetano
- 1,2-epossipropano
- 1,2-dicloroetano
- vinile cloruro
- 1,3-Dicloro-2-propanolo
- Clorometil (Metil) Etere
- N,N-Dimetilidrazina
- Idrazina
- Ossido di etilene
- Etilentiourea
- 2-Nitropropano
- Bis-Clorometiltere
- 3-Propanolide
- 1,3-Propansultone
- Stirene Ossido

Valori di emissioni per specifiche tipologie di impianti (ossigeno di riferimento 11%)

	Potenza termica nominale installata (MW) I valori sono espressi in mg/Nm ³			
	[1] >0,15 - ≤3	>3 - ≤6	>6 - ≤20	≥20
Polveri totali	100	30	30	30
Carbonio organico totale (COT)	-	-	30	20
				10 [2]
Monossido di carbonio (CO)	350	300	250	200
			150 [2]	100 [2]
Ossidi di azoto (espressi come NO₂)	500	500	400	400
			300 [2]	200 [2]
Ossidi di zolfo (espressi come SO₂)	200	200	200	200

[1] Agli impianti di potenza termica nominale pari o superiore a 0,035 MW e non superiore a 0,15 MW si applica un valore di emissioni per le polveri totali di 200 mg/Nm³

[2] Valori medi giornalieri

Requisiti tecnici per gli impianti (articolo 294 e allegato IX alla parte quinta)

33

Parametri	Potenza termica nominale per singolo focolare (MW)		
	<1,16	<1,5	<2,3
Misura in continuo della temperatura dei fumi [1]	OBBLIGATORIO		
Misura della pressione in camera di combustione ed alla base del camino	OBBLIGATORIO		
Misura in continuo in camera di combustione (T, CO, O ₂)		OBBLIGATORIO	
Misura in continuo delle emissioni di: CO, CO ₂ , (CO+H ₂) [2]			OBBLIGATORIO
[1] L'apparecchiatura deve essere comunque installata in tutti gli impianti			
[2] Le apparecchiature devono comunque essere installate su tutti gli impianti di potenza superiore a 1,16 MW. In alternativa alla concentrazione di CO ed H ₂ può essere adottato un misuratore dell'ossigeno in eccesso o anche un misuratore dell'opacità dai fumi			

34

D.M. 11 marzo 2008

➤ Articolo 1

- Fermo restando quanto disposto al comma 1, qualora l'intervento realizzato ai fini dell'applicazione del comma 344 dell'articolo 1 della legge finanziaria 2007, includa la sostituzione di impianti di climatizzazione invernale con impianti dotati di generatori di calore alimentati da biomasse combustibili, i medesimi generatori di calore alimentati da biomasse combustibili devono contestualmente rispettare le seguenti ulteriori condizioni
 - ✓ avere un rendimento utile nominale minimo conforme alla classe 3 di cui alla norma Europea UNI-EN 303-5
 - ✓ rispettare i limiti di emissione di cui all'allegato IX alla parte quinta del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, e successive modifiche e integrazioni, ovvero i più restrittivi limiti fissati da norme regionali, ove presenti
 - ✓ utilizzare biomasse combustibili ricadenti fra quelle ammissibili ai sensi dell'allegato X alla parte quinta del medesimo decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152, e successive modifiche e integrazioni

Accordo tra le regioni per la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento atmosferico

35

- Tavolo tecnico interregionale coinvolge:
 - ❖ Friuli Venezia Giulia, Emilia Romagna, Veneto, Lombardia, Piemonte, Valle d'Aosta, province di Trento e Bolzano e Repubblica del Cantone Ticino.
- Definizione congiunta di limiti di emissione più restrittivi di quelli previsti dalla normativa nazionale per la combustione della legna e delle biomasse
- Introduzione progressiva sul territorio di competenza dell'obbligatorietà della certificazione dei nuovi impianti a legna e biomasse con potenza termica <35 kW, nonché delle stufe e dei caminetti alimentati a legna e biomasse.
- Campagna informativa su vantaggi e problematiche relativi alla combustione della legna e delle biomasse indirizzandone, ove opportuno, l'uso in impianti di media taglia (1-20 MWt) a servizio di reti di teleriscaldamento

36

Limiti di emissioni norma UNI-EN 303-5

Feeding method	Fuel	Nom. Output kW	Emission limit								
			CO mg/m ³ as 10 % O ₂			OGC mg/m ³ as 10 % O ₂			Particles mg/m ³ as 10 % O ₂		
			class 1	class 2	class 3	class 1	class 2	class 3	class 1	class 2	class 3
Manual feed	Biofuel	< 50	25 000	8 000	5 000	2 000	300	150	200	180	150
		50 -150	12 500	5 000	2 500	1 500	200	100	200	180	150
		150 - 300	12 500	2 000	1 200	1 500	200	100	200	180	150
	Fossil fuel	< 50	25 000	8 000	5 000	2 000	300	150	180	150	125
		50 -150	12 500	5 000	2 500	1 500	200	100	180	150	125
		150 - 300	12 500	2 000	1 200	1 500	200	100	180	150	125
Automatic feed	Biofuel	< 50	15 000	5 000	3 000	1 750	200	100	200	180	150
		50 -150	12 500	4 500	2 500	1 250	150	80	200	180	150
		150 - 300	12 500	2 000	1 200	1 250	150	80	200	180	150
	Fossil fuel	< 50	15 000	5 000	3 000	1 750	200	100	180	150	125
		50 -150	12 500	4 500	2 500	1 250	150	80	180	150	125
		150 - 300	12 500	2 000	1 200	1 250	150	80	180	150	125

Il caso della Germania DIN 4702 limiti di emissione per caldaie a legna

Output (kW)	Basis	Emission calculated for oxygen content	Emission limit			
			CO	Particles	OGC	NO _x
		%	mg/m ³	mg/ m ³	mg/ m ³	mg/ m ³
15 - 50	1.BImSc hV	13	4 000	150	-	-
50 - 150	1.BImSc hV	13	2 000	150	-	-
150 - 500	1.BImSc hV	13	1 000	150	-	-
500 - 1 000	1.BImSc hV	13	500	150	-	-
1 000 - 5 000	TA Luft	11	250	150	50	500
5 000 - 50 000	TA Luft	11	250	50	50	500

Risultati centro ENEA Sallugia

Inquinante		Pellet Faggio	Pellet potatura vite	Pellet paglia mais	Mais intero	Mais spezzato	Mais guasto	Decreto n °152 >0,15 <3 (MW)
PM Totale	mg/Nm ³	74	510	479	148	86	431	100
CO	mg/Nm ³	591	940	641	14	19	33	350
NOx	mg/Nm ³	263	646	565	829	867	899	500
SO ₂	mg/Nm ³	20	2	35	1	47	35	200

Analisi dei fumi di emissione

- **Analisi componenti dei gas di emissione**
- **Analisi Polveri**



Particolato
CO₂ CO H₂
O₂ SO₂ NO₂
NO CH₄

Campionamento dei gas di emissione

- **Analisi componenti dei gas di emissione**
 - ❖ **misurazione elettrochimica**
 - ✓ O₂, NO, NO_x, SO₂, H₂
 - ❖ **misurazione infrarossi**
 - ✓ CO₂, CO, CH₄

Campionamento dei gas di emissione



Combustione di biomassa in una caldaia familiare



Sonda di prelievo nella canna fumaria



Registrazione dei dati



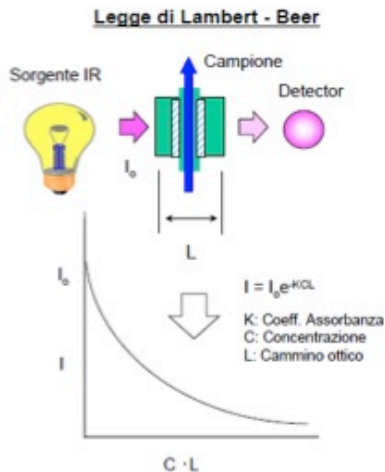
Dispositivo professionale di analisi in semicontinuo

Campionamento delle polveri

- **Analisi Polveri**
 - ❖ **campionamento con sistemi elettronici in continuo**
 - ✓ polverimetri elettrodinamici
 - ✓ polverimetri a diffrazione laser
 - ✓ polverimetri triboelettrici
 - ❖ **campionamento delle polveri con il metodo manuale gravimetrico**
 - ✓ prelievo dei fumi in isocinetismo
 - campionatore delle polveri
 - tubo di Pitot

Polverimetro a diffrazione laser

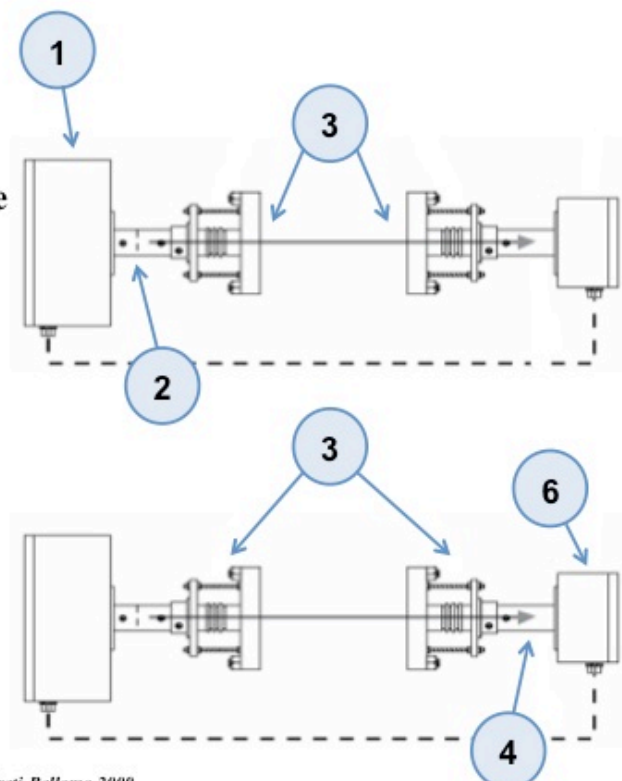
- E' lo strumento ottico più performante, è adatto a misure anche in piccoli camini indipendentemente dalla velocità di transito dei fumi,
- Particolare attenzione deve essere fatta qualora le concentrazioni di polveri siano consistenti soprattutto se il camino è in pressione (minori sono i problemi su camini in depressione)



Fonte: Preti-Bellomo 2009

Polverimetro a diffrazione laser

- 1) Sezione elettronica
 - ❖ CPU e software
 - ❖ acquisizione dati
 - ❖ controllo temperatura e corrente del laser
- 2) Laser che comprende:
 - ❖ sorgente laser
 - ❖ ottica
 - ❖ parti meccaniche
 - ❖ camera di validazione
- 3) Connessioni al processo
- 4) Modulo detector
- 5) Dispositivo allineamento
- 6) Elettronica del detector



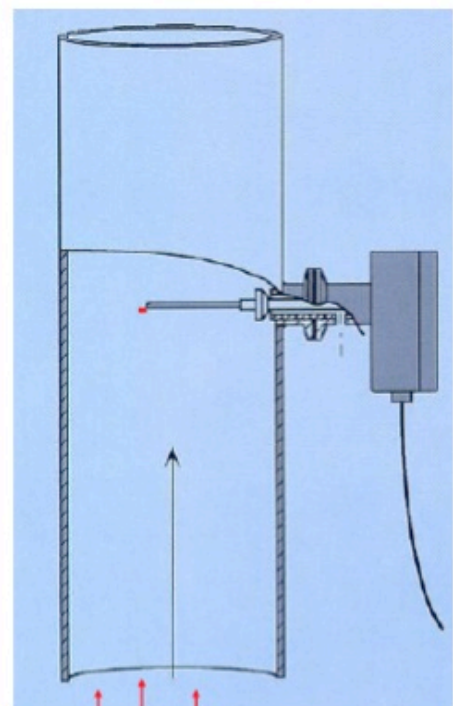
Fonte: Preti-Bellomo 2009

Polverimetro elettrodinamico

- Il particolato che transita in prossimità della sonda di misura elettrifica la sonda stessa grazie alla carica elettrostatica naturale del particolato stesso
- Lo strumento elettrodinamico è molto sensibile ed affidabile, e permette misure di concentrazioni molto variabili, a partire da $0,01 \text{ mg/m}^3$ fino anche a 1.000 mg/m^3
- La sua risposta è pressochè lineare per variazioni di velocità dei fumi oltre i 7-8 m/sec
- Per velocità inferiori la calibrazione deve essere eseguita alla velocità effettiva

Opacimetro triboelettrico

- Quando una particella solida impatta o sfiora un' asta metallica isolata, trasferisce la sua carica elettrostatica
- Questa carica viene amplificata e convertita in un segnale proporzionale alla concentrazione delle polveri
- Una delle condizioni più severe per l'analisi delle polveri è la presenza di umidità



campionamento delle polveri con il metodo gravimetrico



Combustione di biomassa



Sonda di prelievo



Filtri con il particolato

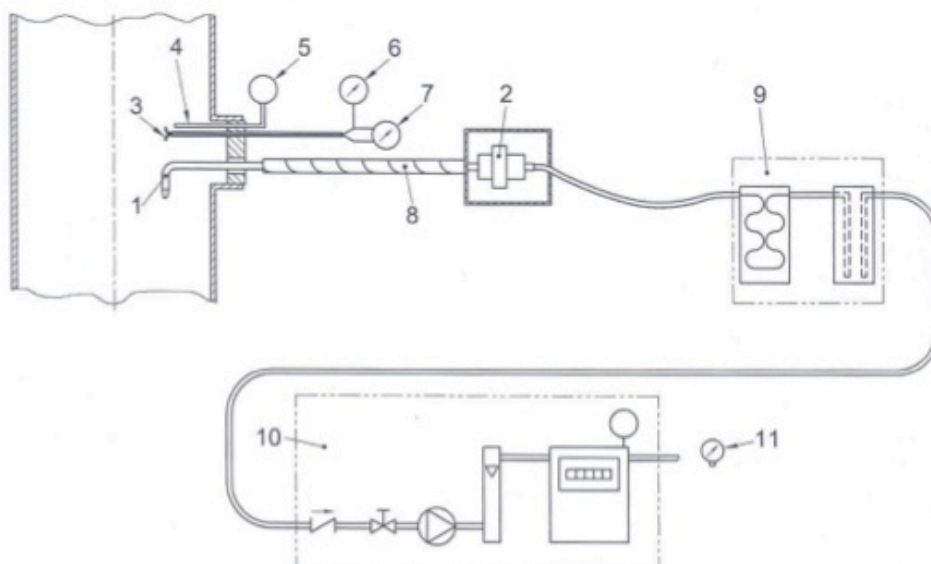


Campionatore polveri

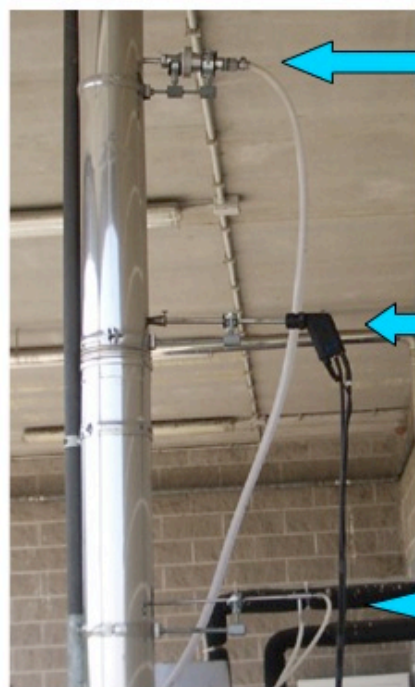
Schema di campionamento isocinetico

Campionamento con filtro esterno al condotto

1) Ugello d'ingresso; 2) Portafiltro; 3) Tubo di pitot; 4) Sensore di temperatura; 5) Indicatore di temperatura; 6) Misurazione statica della pressione; 7) Misurazione dinamica della pressione; 8) Tubo di aspirazione (dispositivo all'esterno del condotto); 9) Sistema di raffreddamento ed essiccazione; 10) Unità di aspirazione e dispositivo di misurazione del gas 11) Manometro



Sonde per il prelievo dei fumi



**Sonda per il particolato
(metodo gravimetrico)**

**Sonda per i gas
(O_2 , CO_2 , CO , NO_x , SO_2 , H_2)**

**Tubo di Pitot
(velocità gas e portata)**

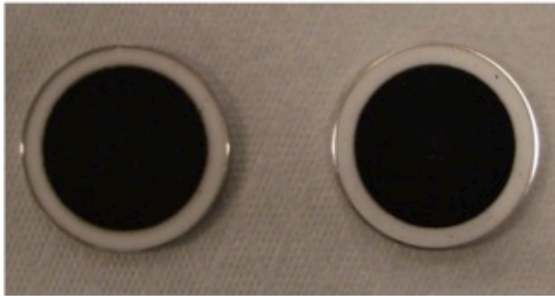
Sonda del particolato e di temperatura

**Sonda per il particolato
(metodo gravimetrico)**

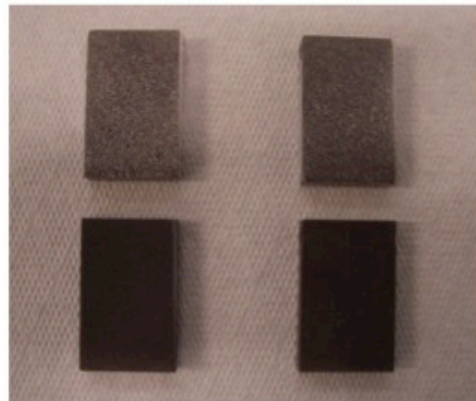


**Sonda temperatura
in camera di
combustione
(20 kWt)**

Particolato nella combustione di biomassa

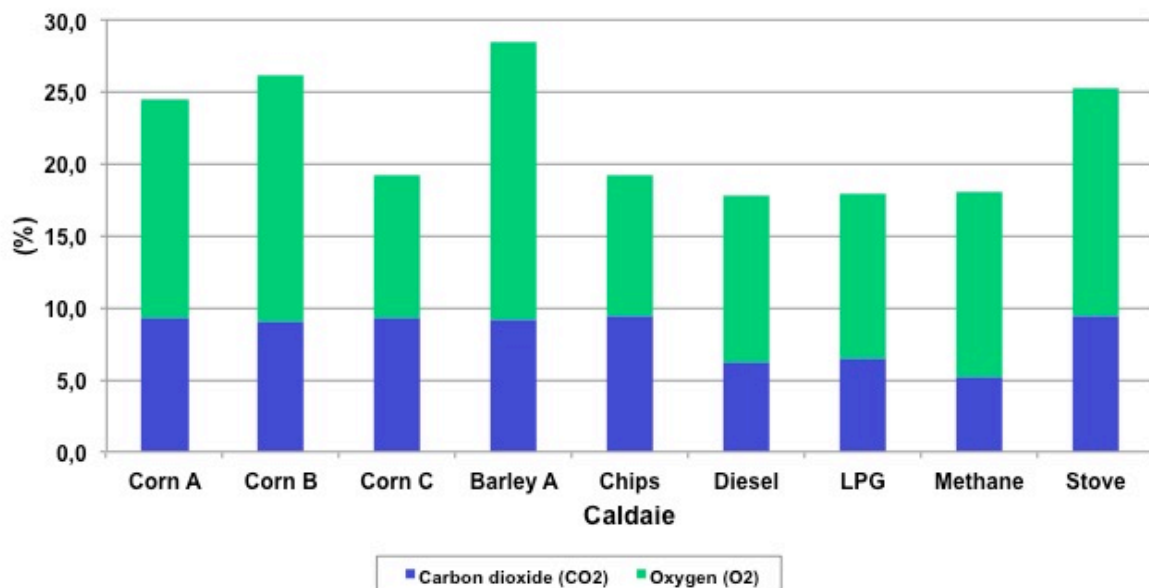


Particolato sui filtri di prelievo

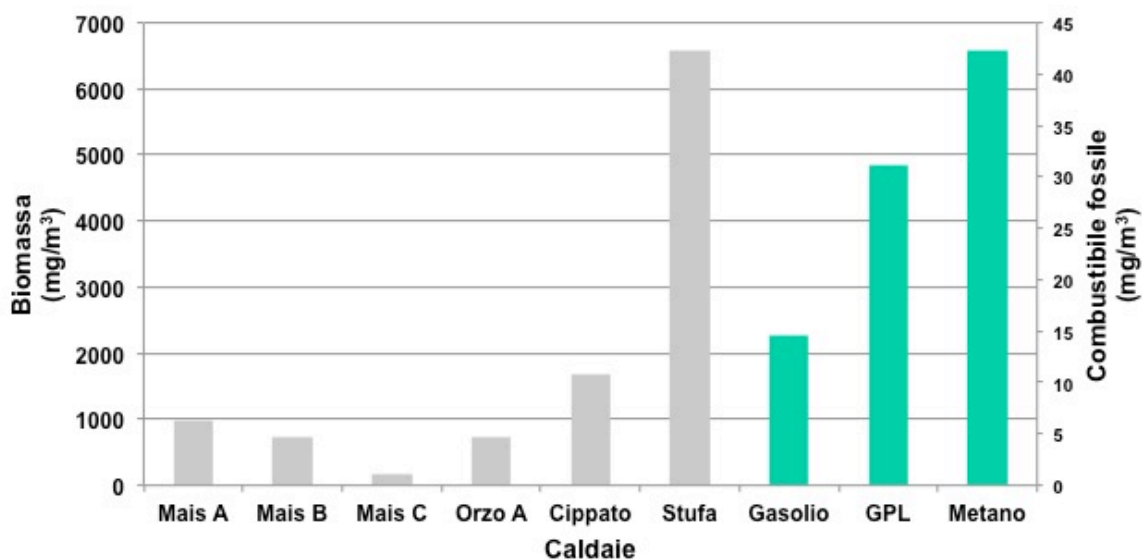


Deposito di particolato in camera di combustione

Emissioni anidride carbonica (CO₂) e ossigeno (O₂)

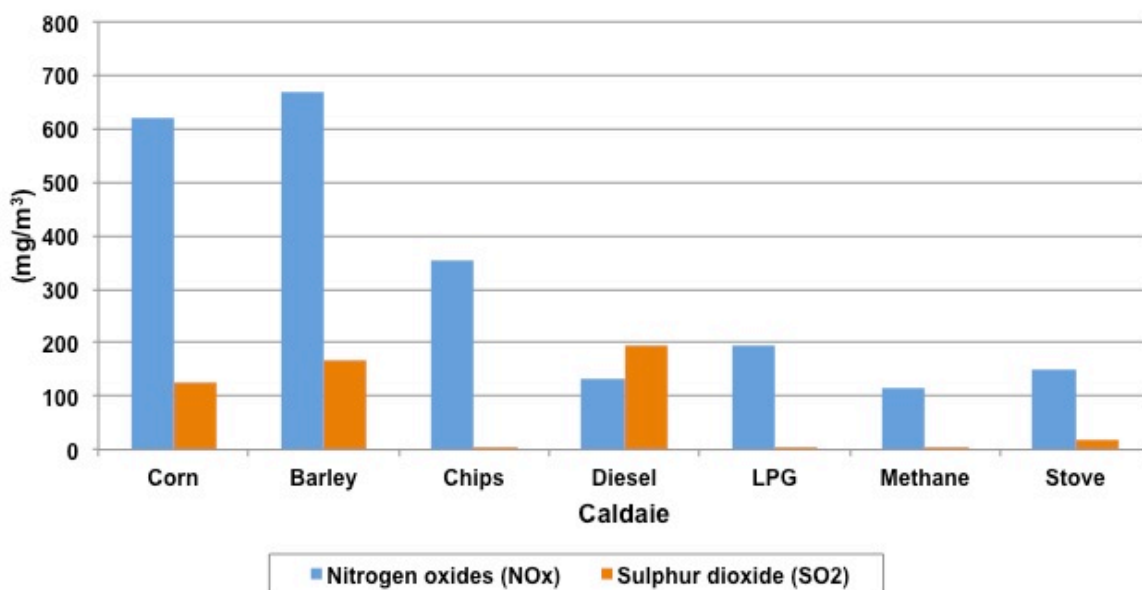


Carbon monoxide (CO)



Fonte: Dell'Antonia 2010

Emissioni di ossidi di azoto (NOx) e biossido di zolfo (SO₂)



Fonte: Dell'Antonia 2010

Considerazioni

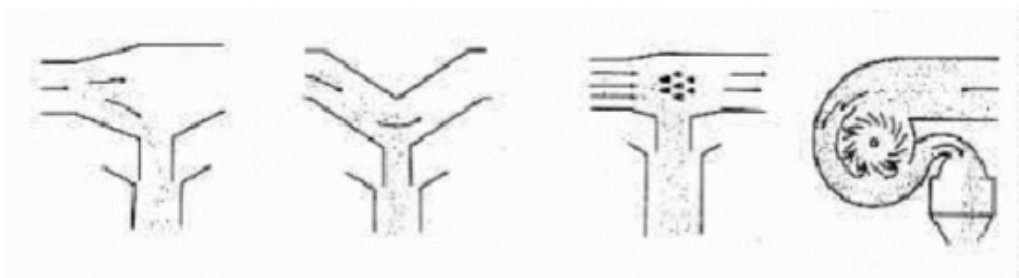
- **I dati raccolti hanno evidenziato una minore concentrazione di sostanze inquinanti nei fumi emessi dalle caldaie a combustibile fossile rispetto agli impianti alimentati a biomassa**
- **Carbonio, azoto e zolfo emessi dalla combustione di biomassa a livello locale sono a ciclo chiuso**
- **Forte influenza della tecnologia impiantistica per le caldaie a biomassa in relazione efficienza di combustione e quindi alla riduzione delle emissioni gassose in atmosfera**

Metodi di abbattimento delle emissioni

- **Particolato**
 - ❖ **metodi meccanici**
 - ❖ **multiciclone**
 - ❖ **filtri elettrostatici**
 - ❖ **filtri a manica**
- **Anidride solforosa**
 - ❖ **rimozione a umido**
 - ❖ **rimozione a semisecco**
 - ❖ **sistemi a ciclo chiuso**
- **Ossidi di azoto**
 - ❖ **riduzione selettiva catalitica (SCR)**
 - ❖ **riduzione selettiva non catalitica (SNR)**

Rimozione particolato con metodi meccanici

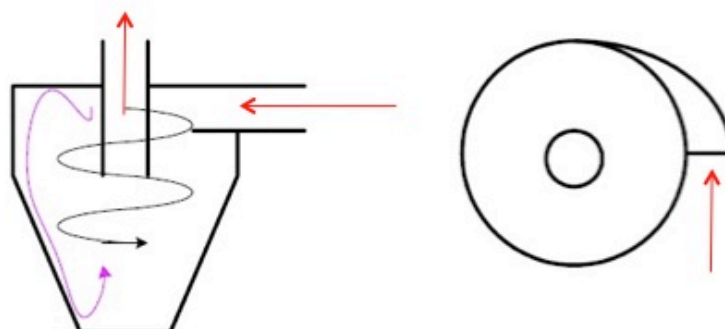
- Effetti nella rimozione meccanica del particolato
 - ❖ rallentamento brusco
 - ❖ brusco cambio di direzione
 - ❖ urto su piatti o lamelle
 - ❖ forza centrifuga
- Efficienza ridotta (50-70%) adatte per particelle grandi



Fonte: Lombardi 2007

Ciclone per le polveri

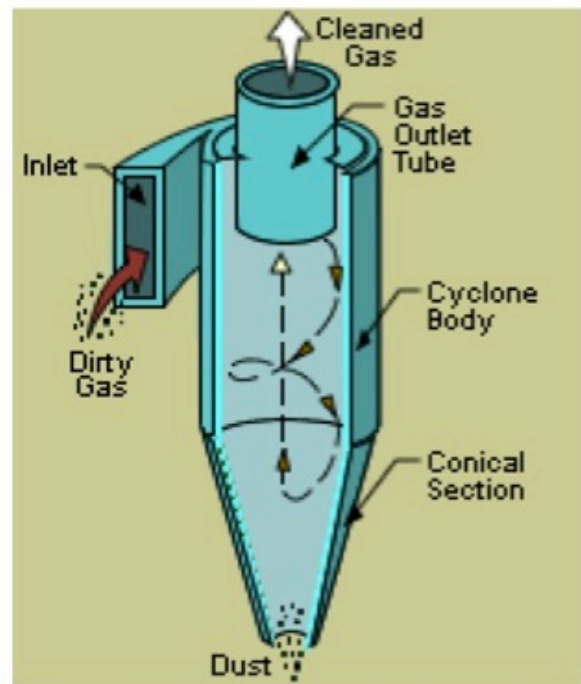
- Sono costituiti da un corpo cilindrico con fondo tronco conico (tramoggia)
- Un cilindro di diametro minore esce dalla parte superiore del ciclone con lo scopo di far uscire il gas depolverizzato
- Il gas viene alimentato tangenzialmente nella parte superiore del ciclone ad una velocità superiore ai 15 m/s
- Le particelle sono spinte radialmente sulla parte del cilindro dalla forza centrifuga, perdono la loro energia cinetica e precipitano



Fonte: Lombardi 2007

Ciclone per le polveri

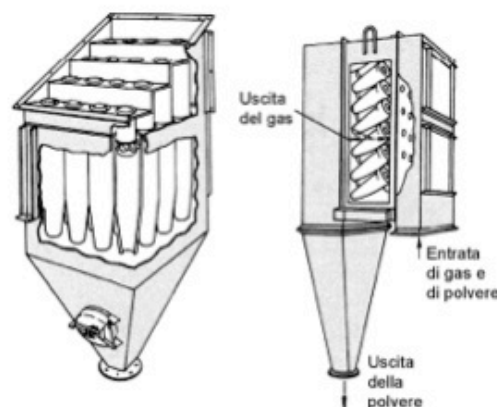
- L'efficienza di separazione dipende da diversi parametri e aumenta quando:
 - ❖ aumenta la dimensione delle particelle
 - ❖ aumenta la velocità dei gas
 - ❖ aumenta la densità delle particelle
 - ❖ aumenta la portata di solido
 - ❖ diminuisce la viscosità dell'aria
 - ❖ diminuisce la superficie specifica delle particelle



Fonte: Lombardi 2007

Rimozione particolato con mult ciclone

- **Multiciclone**
 - ❖ Multiciclone - Efficienza 80-90%,
 - ❖ adatto per particelle fino a 5 μm circa.
 - ❖ rispetto al ciclone singolo consente di trattare portate elevate ed operare su particelle abbastanza fini.

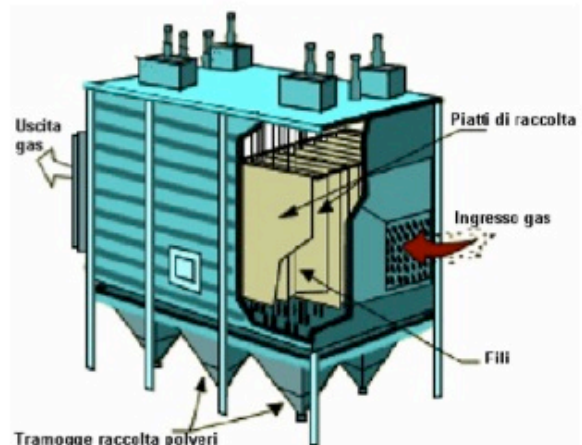
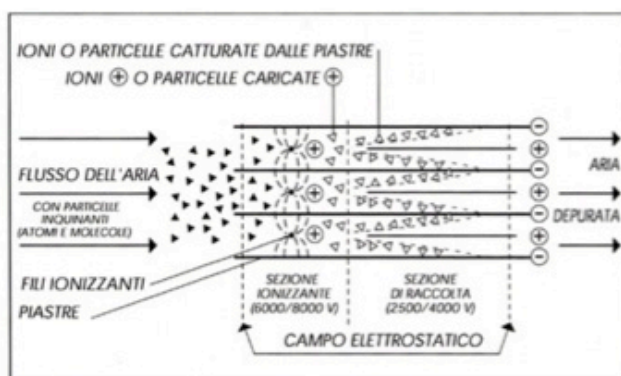


Fonte: Lombardi 2007

Rimozione particolato con filtri elettrostatici

- Tra i sistemi più diffusi, in particolare per generatori a combustibile solido, sono i precipitatori elettrostatici (ESP)
- In questi, fili ad alta tensione (30 ÷ 60 kV) sono sospesi nel canale di scarico dei gas, tra piatte metalliche parallele poste a massa, dove le particelle assumono carica positiva e vengono attratte dai piatte
- Un raschiatore provvede alla pulizia periodica dei piatte
- Vantaggi:
 - ❖ elevata efficienza (fino al 99%)
 - ❖ ridotta perdita di carico
 - ❖ anche particelle fini
- Svantaggi:
 - ❖ Scarsa efficienza per combustibili con basso tenore di zolfo
 - ✓ Ceneri con alta resistività elettrica
 - ✓ Per risolvere il problema si può iniettare SO_3 nei gas di scarico con recupero quasi totale dell' SO_3 nel ESP

Rimozione particolato con filtri elettrostatici



Rimozione particolato con filtri a manica

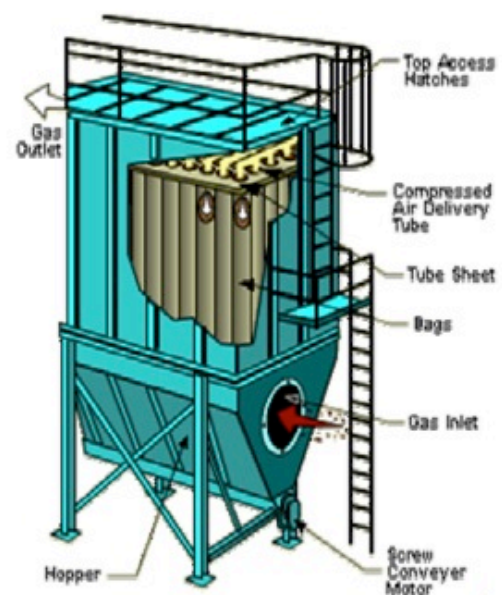
- I filtri possono essere delle seguenti tipologie:
 - ❖ feltro pressato (Teflon)
 - ✓ difficili da pulire
 - ✓ perdite di carico superiori
 - ✓ maggiore efficienza
 - ✓ trattiene le particelle all'interno del tessuto
 - ❖ tessuto di fibra di vetro o carbonio
 - ✓ Perdita parte della polvere aderente alla trama dopo la pulizia
 - ✓ Efficienza ridotta dopo la pulizia



Fonte: Lombardi 2007

Rimozione particolato con filtri a manica

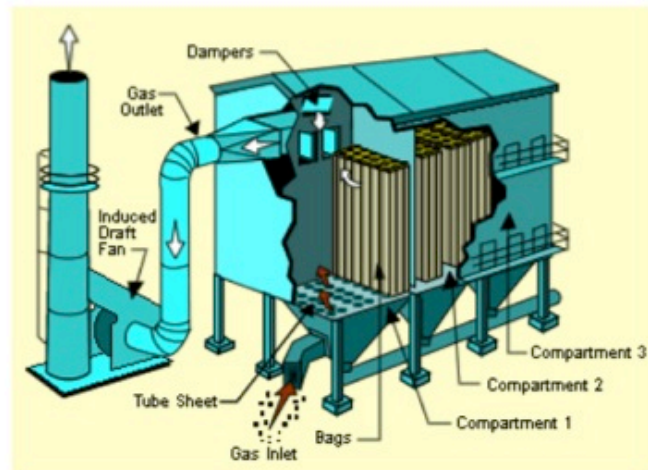
- I filtri a manica sono costituiti da camere parallelepipediche entro le quali sono disposte verticalmente numerose maniche cilindriche
- I filtri a manica sono costituiti da camere parallelepipediche entro le quali sono disposte verticalmente numerose maniche cilindriche
- Il numero delle maniche dipende dalla portata del gas
- Il gas ha una velocità di 1,5 m/s e viene aspirato dal ventilatore posto a valle del depolverizzatore
- La deposizione del materiale sul filtro aumenta l'efficienza di filtrazione:
 - ❖ Adsorbimento dei metalli pesanti
 - ❖ Adsorbimento di composti organoclorurati
 - ❖ Adsorbimento di gas acidi



Fonte: Lombardi 2007

Pulizia dei filtri a manica

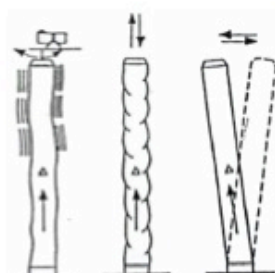
- La pulizia avviene con soffiaggio a flusso invertito
- Sono anche presenti agitatori continui per lo scuotimento delle polveri
- Le perdite di carico attraverso la superficie filtrante aumentano con il depositarsi del solido
- Per evitare di fermare il flusso di gas durante la fase di pulizia, il filtro è realizzato a settori, ognuno dei quali subisce la fase di pulizia a rotazione mentre gli altri sono in funzione



Fonte: Lombardi 2007

Pulizia dei filtri a manica

- La pulizia del filtro può avvenire per tre meccanismi:
 - ❖ Meccanico: per scuotimento o vibrazione
 - ✓ solo per filtri a captazione interna
 - ✓ forte sollecitazione delle fibre
 - ❖ Corrente inversa: si fa passare gas d'aria inverso a quello di marcia

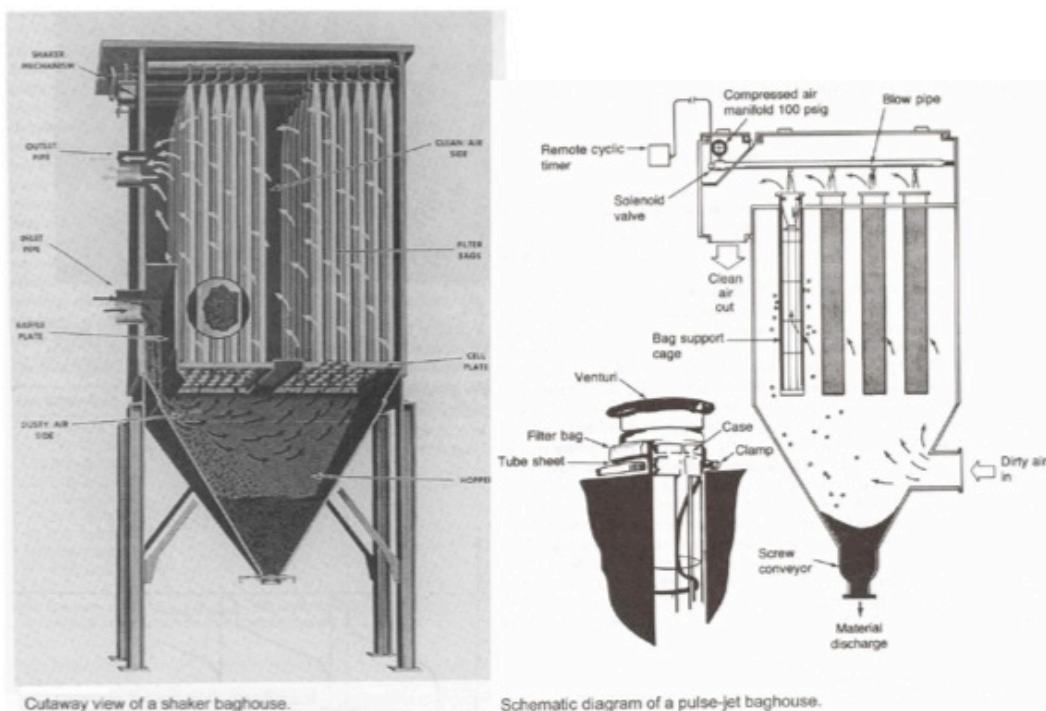


Fonte: Lombardi 2007

Pulizia dei filtri a manica

- ❖ **Pulse-Jet:** all'interno di ciascuna manica viene sparato periodicamente un getto di aria a 6-7 bar, che genera un'onda di pressione che la fa bruscamente espandere e causa il distacco del deposito
 - ✓ è utilizzato solo con maniche a captazione esterna
 - ✓ Non richiede l'esclusione della manica

Pulizia dei filtri a manica



Vantaggi e svantaggi dei filtri a manica

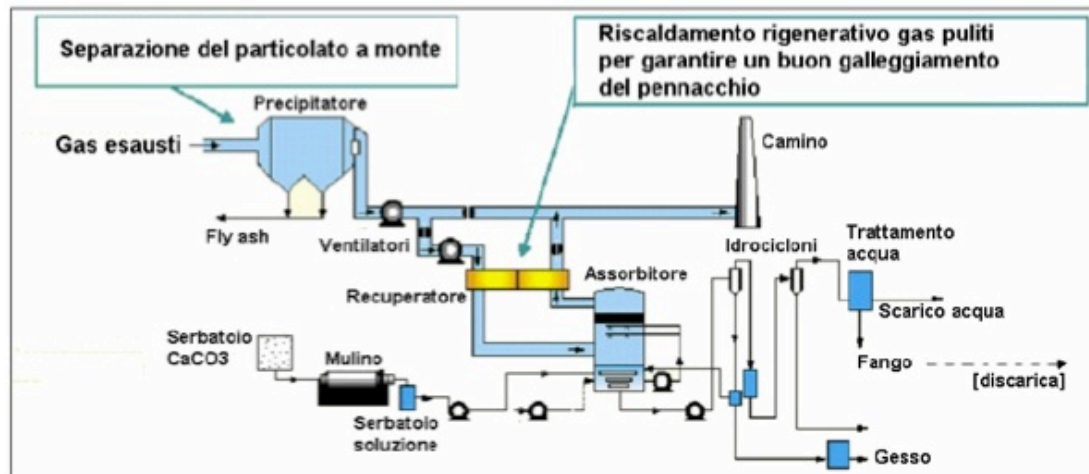
- **Vantaggi:**
 - ❖ efficienza fino a 99%
 - ❖ adatti per particelle fini
 - ❖ possibilità di trattamenti di adsorbimento sul “cake” (es. Carboni attivi)
- **Svantaggi:**
 - ❖ solo per temperature ridotte (fino a 150°C)
 - ❖ perdita di carico elevata
 - ❖ non adatti per gas umidi (impaccamento)
 - ❖ volumi elevati con bassa velocità dei fumi per contenere le perdite di carico
 - ❖ alti costi di manutenzione
 - ✓ costi elevati delle maniche filtranti
 - ✓ durata delle maniche da 18 a 36 mesi

Rimozione Anidride solforosa a umido

- **Rimozione a umido con assorbimento alcalino (soluzione acquosa di CaCO₃, CaO)**
 - ❖ $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$
 - ❖ $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CaSO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2$
 - ❖ $\text{CaSO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}\text{O}_2 \longrightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (gesso)
- Il processo prevede che il gas attraversi un separatore ad umido in cui viene in contatto con una miscela acquosa di calce (CaO) o calcare (CaCO₃)
- L'SO₂ presente nei fumi reagisce e forma CaSO₃ e CaSO₄
- La miscela viene spruzzata nella torre di depurazione in controcorrente ai gas
- Nel processo i gas si raffreddano e può essere necessario un lieve riscaldamento per garantire il tiraggio

Rimozione Anidride solforosa a umido

- Un sistema di controllo del ph provvede alla rimozione di parte delle miscela e alla sua ricarica con i reagenti
- Vantaggi:
 - ❖ efficienza fino a 95%.
 - ❖ sistema commerciale molto diffuso



Fonte: Lombardi 2007

Rimozione Anidride solforosa a umido

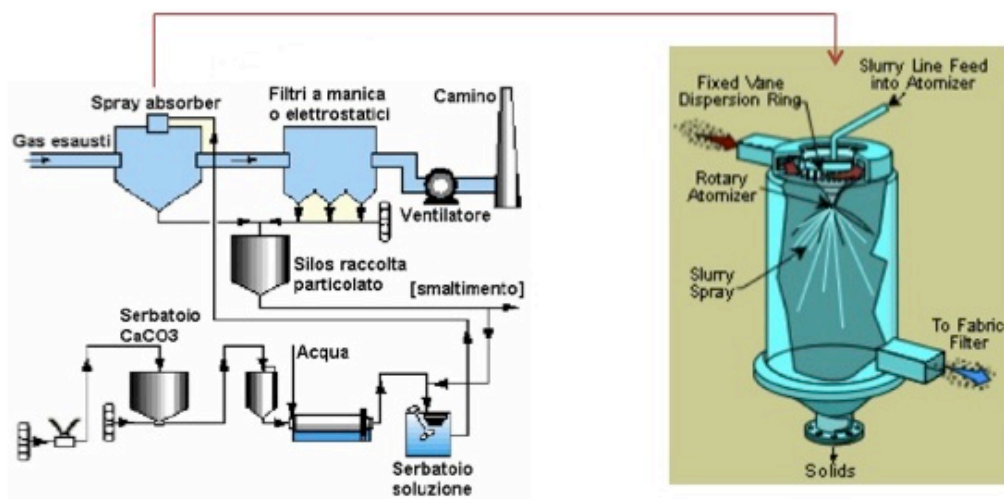
- Svantaggi:
 - ❖ formazione di incrostazioni e ostruzioni degli ugelli nella torre di reazione
 - ✓ la solubilità del CaSO_3 e CaSO_4 nell'acqua è limitata al 30%
 - ❖ la precipitazione della fase solida richiede un certo tempo
 - ✓ fanghi di acidi di zolfo densi da smaltire
 - da disidratare
 - ✓ recupero dell'acqua

Rimozione Anidride solforosa a semisecco

- **Rimozione a semisecco con assorbimento alcalino (soluzione acquosa di CaO)**
- **Soluzione di CaO viene spruzzata sui gas e si forma CaSO_3 e CaSO_4**
- **A differenza del metodo umido la nebulizzazione viene spinta fino alla produzione di particelle molto piccole**
 - ❖ **la quantità di liquido iniettato è limitata al di sotto del livello di saturazione**
 - ❖ **non si ha condensazione**
 - ❖ **le particelle di CaSO_3 e CaSO_4 sono eliminate con filtri per il particolato**
 - ❖ **le particelle raccolte dal filtro sono in parte riciclate**
 - ❖ **il materiale di scarto è secco e quindi più facile da smaltire**

Rimozione Anidride solforosa a semisecco

- **L'efficienza di desolforizzazione è inferiore al sistema ad umido**
- **Efficienza fino a 85%**
- **Sistema commerciale molto diffuso**
- **Produzione di polvere di gesso**

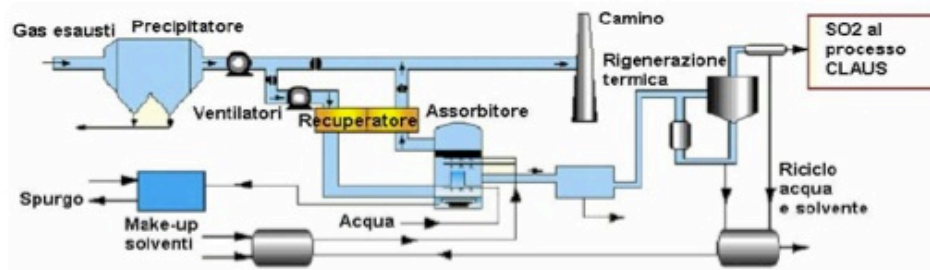


Rimozione Anidride solforosa con sistemi a ciclo chiuso

- **Rimozione a circuito chiuso ad assorbimento alcalino rigenerabile (Wellmann-Lord)**



- **Efficienza fino a 95%**
- **Circuito (quasi) chiuso**
- **Consumi termici elevati**
- **Reagenti costosi**



Fonte: Lombardi 2007

Rimozione degli ossidi di azoto

- **Una progettazione accurata dei sistemi di combustione può abbattere considerevolmente la produzione di ossidi di azoto**
 - ❖ **eliminazione punti caldi in camera di combustione**
 - ❖ **ridurre il rapporto aria/combustibile**
 - ❖ **ricircolazione dei fumi in caldaia**
 - ❖ **iniezione di acqua o vapore**
- **Per scendere a valori molto bassi (al di sotto di 80 ppm tipicamente) si rende necessaria la denitrificazione degli effluenti, possibile mediante due metodologie di base:**
 - ❖ **Riduzione Selettiva Catalitica (SCR)**
 - ✓ **consente la rimozione di un'alta percentuale degli ossidi di azoto dai gas (dal 70 al 90%)**
 - ✓ **posizionato in un generatore di vapore immediatamente a monte dello scambiatore rigenerativo gas/aria**

Rimozione degli ossidi di azoto

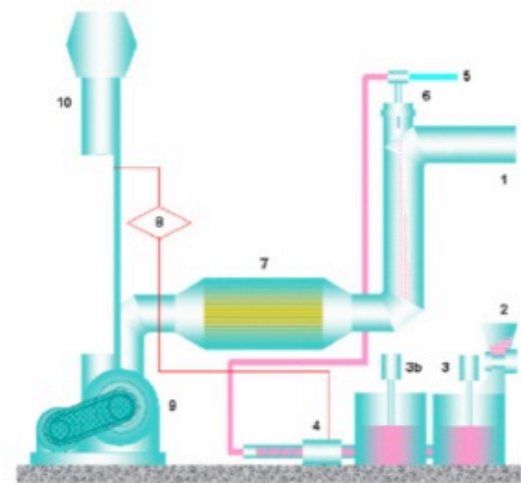
- ✓ prevede l'iniezione nei gas di un agente riducente (ammoniaca NH₃, urea od altri composti ad alto tenore di azoto) in presenza di un catalizzatore ed a temperature nella fascia 350 - 400 °C
- ✓ i costi del processo sono elevati a causa dei catalizzatori, che devono essere periodicamente rinnovati.
- ❖ **Riduzione Selettiva Non Catalitica (SNR)**
 - ✓ i reagenti sono gli stessi della SCR, ma è assente il catalizzatore e la temperatura deve essere compresa tra 870 e 1200 °C (mediante l'aggiunta di additivi chimici si può arrivare fino a 540 °C)
 - ✓ l'efficacia dipende largamente dall'ottimizzazione dell'iniezione e dalla soluzione di problemi di corrosione e/o formazione di pennacchi allo scarico.
 - ✓ la riduzione conseguibile negli ossidi di azoto è dell'ordine del 35 - 60 %

Rimozione degli NO_x - SCR

- Iniezione di NH₃ od Urea in zona a 300– 400°C, con catalizzatore (metallo nobile, ossidi metallici, zeoliti)
 - ❖ $4\text{NH}_3 + 4\text{NO} + \text{O}_2 \longrightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$
 - ❖ $8\text{NH}_3 + 6\text{NO}_2 \longrightarrow 7\text{N}_2 + 12\text{H}_2\text{O}$
- Tali reazioni di riduzione in questa fascia di temperatura prevalgono su quelle di ossidazione grazie al catalizzatore:
 - ❖ $4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 \longrightarrow 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$
 - ❖ $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \longrightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$

Rimozione degli NOx - SCR

- E' essenziale evitare che la polvere possa occludere i pori della matrice ceramica del catalizzatore (filtraggio ESP)
- Assicurare una miscelazione omogenea tra NH₃ e flusso da trattare (turbolenza elevata)



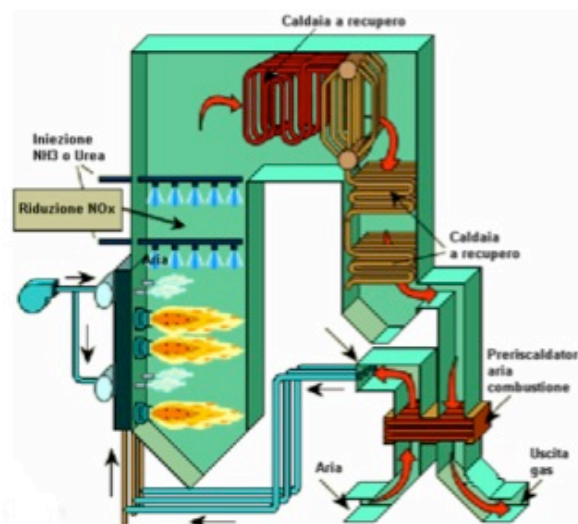
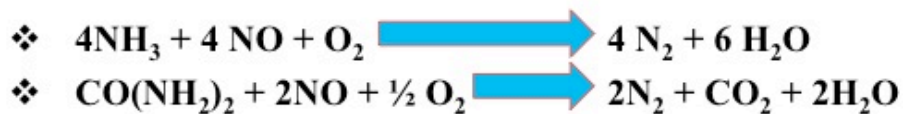
Schema di un impianto con reattore catalitico SCR per la riduzione degli NOx

4- pompa regolata elettronicamente
5- aria compressa
6- ugello nebulizzatore
7- reattore catalitico
1- ingresso fumi di scarico
2- tramoggia urea tecnica
8- analizzatore in continuo granulare
9- ventilatore
3, 3b- agitatori soluz. urea
10- camino espulsione

Fonte: Lombardi 2007

Rimozione degli NO_x - SNR

- Iniezione di NH₃ od Urea nella zona a 850-1000°C, senza alcun catalizzatore



Fonte: Lombardi 2007