



TECNOLOGIE SOSTENIBILI PER LE RISORSE ENERGETICHE

2. INTRODUZIONE AI PROCESSI DI INTERESSE CHE COINVOLGONO LE SEPARAZIONI DI COMPONENTI IN MISCELA

PROF. ERNESTO SALZANO
ernesto.salzano@unibo.it

- ❑ Il significato di «**inquinamento**» («**pollution**») equivale a quello di «**contaminazione**»
- ❑ L'inquinamento atmosferico («**air pollution**») indica quindi la contaminazione dell'atmosfera (*outdoor*) con materiali gassosi, liquidi e solidi, in qualsiasi forma fisica o chimica
- ❑ L'inquinamento atmosferico di cui ci occupiamo in questo corso è quello di **origine antropica**
- ❑ Esso è in gran parte correlato all'utilizzo di **combustibili** per la produzione industriale, per il trasporto, e per la produzione energetica

Per la legge italiana (europea):

Inquinamento atmosferico

Ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità o con caratteristiche tali da:

- alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria
- costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo
- compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente
- alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni materiali pubblici e privati

DPR 203/88

Classificazione degli inquinanti di origine antropica

- Inquinanti Primari:** inquinanti emessi direttamente in atmosfera da qualsiasi attività antropica
- Inquinanti Secondari:** inquinanti generati nell'atmosfera in seguito a reazione chimica

Inquinanti Primari derivanti da attività energetiche

Biossido di zolfo: SO_2

Ossidi di azoto: NO_x

Monossido di carbonio: CO

Particolato: $\text{PM}_{2.5}$ (fine, sottili), PM_{10} (coarse, grossolane)

Volatile Organic Compound (VOC): il metano CH_4 ne rappresenta la gran parte

NonMethane Organic Compound (NMVOC): per la gran parte alcani, alcheni

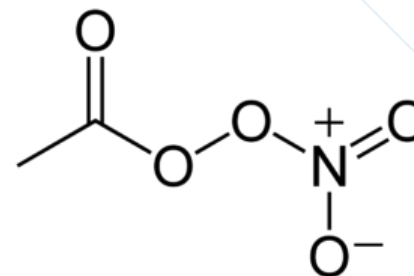
Ammoniaca: NH_3

..

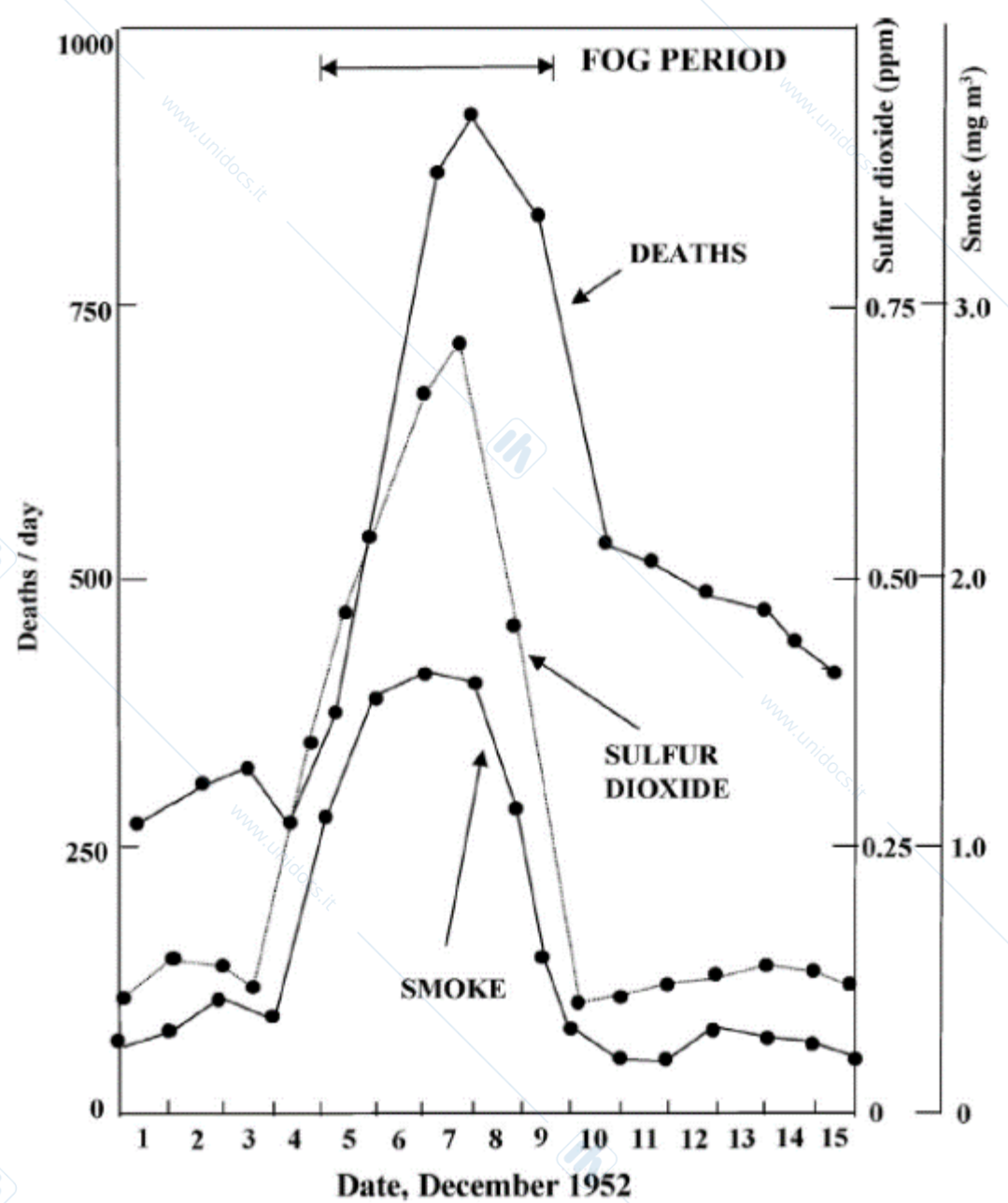
Inquinanti Secondari

Ozono: O_3

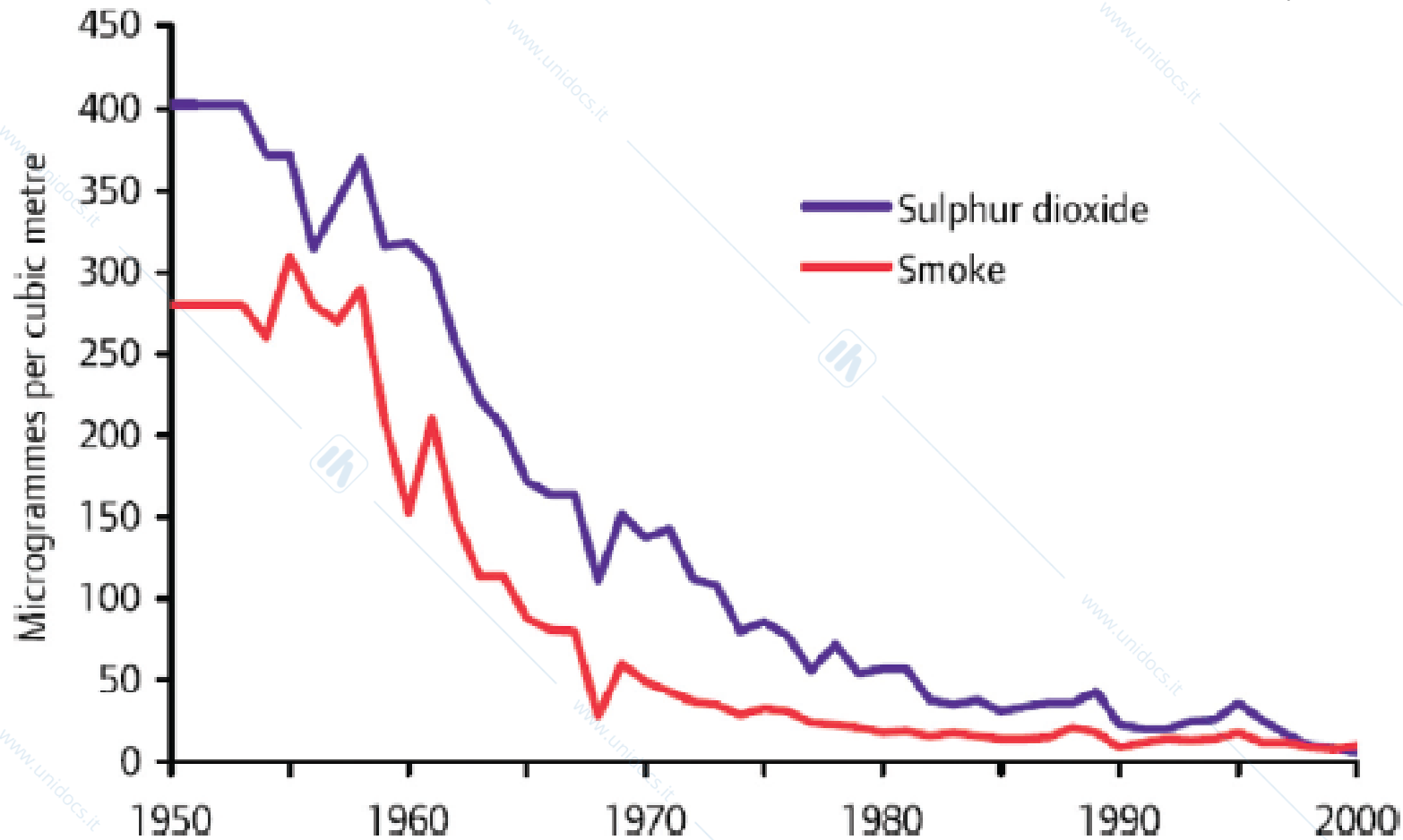
Peroxyacetylnitrate (PAN): $\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{OONO}_2$



Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela

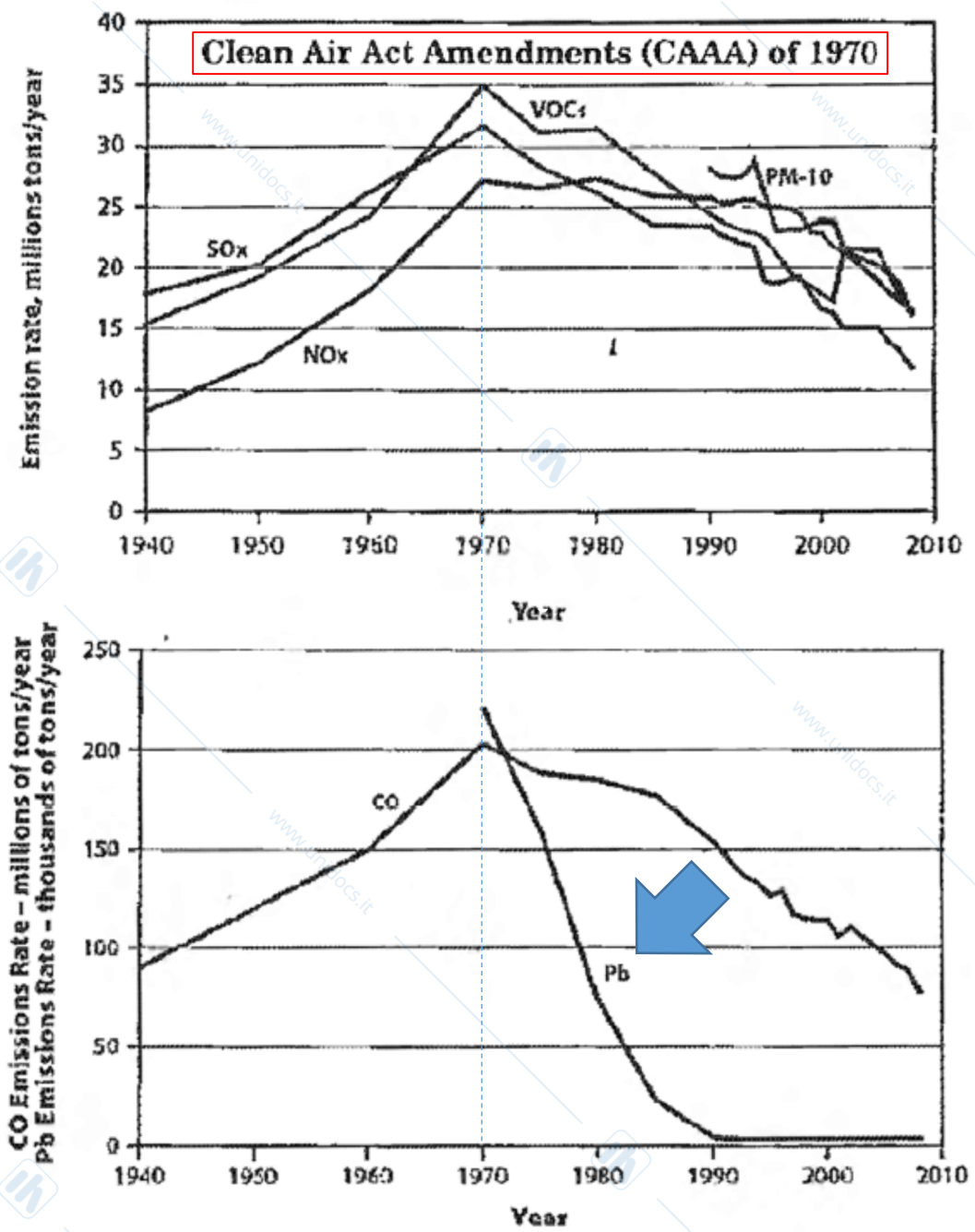


Londra, 1956: [Clean Air Act](#)



Annual average smoke and sulphur dioxide concentrations in London 1950 to 2000

Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela



La Direttiva 2001/81/CE del Parlamento europeo e del Consiglio ha svolto un ruolo determinante con riferimento a tali progressi fissando, a partire dal 2010, limiti massimi per le emissioni annue degli Stati membri di **biossido di zolfo (SO₂), ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili non metanici (COVNM) e ammoniaca (NH₃)**.

Limiti nazionali stabiliti per l'Italia

Inquinante	SO ₂ /SO ₃	NO _x	COV	NH ₃
Tetto (kton/anno)	475	990	1159	419

Tra il 1990 e il 2010, nell'Unione, le emissioni di SO₂ sono diminuite dell'82 %, le emissioni di NO_x del 47 %, le emissioni dei composti organici volatili non metanici del 56 % e le emissioni di NH₃ del 28%.

La **Direttiva n. 2284 del 14 dicembre 2016** stabilisce nuovi impegni nazionali di riduzione delle emissioni di SO₂, NO_x, Composti Organici Volatili Non Metanici (COVNM), NH₃ e particolato fine (PM2.5)

Annual mean NO₂ concentrations in 2013

µg/m³

- ≤ 20
- 20-30
- 30-40
- 40-50
- > 50



Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela

<i>Site</i>	<i>Pollutant</i>	<i>Measurement</i>	<i>Concentration</i>
Los Angeles, USA	Carbon monoxide	2 nd Max 1-h	4.8 ppm
		2 nd Max 8-h	3.9 ppm
	Nitrogen dioxide	98 th percentile 1-h	77 ppb
	Sulfur dioxide	99 th percentile 1-h	21 ppb
		2 nd Max 24-h	3 ppb
	Ozone	2 nd Max 8-h	102 ppb
	PM ₁₀	2 nd max 24-h	74 $\mu\text{g m}^{-3}$
PM _{2.5}	Annual mean	30 $\mu\text{g m}^{-3}$	
	98 th percentile 24-h	44 $\mu\text{g m}^{-3}$	
	Annual weighted mean	20 $\mu\text{g m}^{-3}$	
	Mean 24-h	0.1 $\mu\text{g m}^{-3}$	
London Marylebone Road, UK	Carbon monoxide	Highest 24-h	1 ppm
		Annual mean	0.5 ppm
	Nitrogen dioxide	Highest 24-h	90 ppb
		Annual mean	49 ppb
	Sulfur dioxide	Highest 24-h	8 ppb
		Annual mean	3 ppb
	Ozone	Highest 24-h	29 ppb
		Annual mean	8 ppb
	PM ₁₀	Highest 24-h	91 $\mu\text{g m}^{-3}$
		Annual mean	30 $\mu\text{g m}^{-3}$
	PM _{2.5}	Highest 24-h	80 $\mu\text{g m}^{-3}$
		Annual mean	22 $\mu\text{g m}^{-3}$

Anno 2012. Valori di inquinanti registrati in varie città del mondo

Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela

Site	Pollutant	Measurement	Concentration
Los Angeles, USA	Carbon monoxide	2 nd Max 1-h	4.8 ppm
		2 nd Max 8-h	3.9 ppm
	Nitrogen dioxide	98 th percentile 1-h	77 ppb
	Sulfur dioxide	99 th percentile 1-h	21 ppb
		2 nd Max 24-h	3 ppb
	Ozone	2 nd Max 8-h	102 ppb
	PM ₁₀	2 nd max 24-h	74 $\mu\text{g m}^{-3}$
	PM _{2.5}	Annual mean	30 $\mu\text{g m}^{-3}$
	98 th percentile 24-h	44 $\mu\text{g m}^{-3}$	
	Annual weighted mean	20 $\mu\text{g m}^{-3}$	
	Lead	Mean 24-h	0.1 $\mu\text{g m}^{-3}$
Delhi, India	Carbon monoxide	Highest 24-h	2.1 ppm
		Annual mean	1.0 ppm
	Nitrogen dioxide	Highest 24-h	79 ppb
		Annual mean	32 ppb
	Ozone	Highest 24-h	94 ppb
		Annual mean	41 ppb
	PM ₁₀	Highest 24-h	895 $\mu\text{g m}^{-3}$
		Annual mean	297 $\mu\text{g m}^{-3}$
PM _{2.5}	Annual mean	227 $\mu\text{g m}^{-3}$	
Beijing, China	Carbon monoxide	Annual mean	1.2 ppm
	Nitrogen dioxide	Annual mean	27 ppb
	Sulfur dioxide	Annual mean	11 ppb
	PM ₁₀	Annual mean	109 $\mu\text{g m}^{-3}$

Anno 2012. Valori di inquinanti registrati in varie città del mondo

I materiali particolati o particolati sono composti da solidi e/o liquidi finemente suddivisi (gocce, brume, nebbie, aerosol, polveri, esalazioni, fumi)

$PM_{2.5}$ = sottile o “fine” (diametro particella $\leq 2.5 \mu$)

PM_{10} = $PM_{2.5}$ + “coarse” (diametro particella $> 2.5 \mu$)

- Particolato primario (primary particles):** emesse direttamente dai processi di combustione, $D < 2.5 \mu$
- Particolato primario non derivante dai processi di combustione:** polveri dovute al terreno, al vento, a incendi naturali o di origine antropica, da pneumatici (per attrito), attività minerarie, e altri processi di formazione per attrito meccanico. $D > 2.5 \mu$
- Particolato secondario (secondary particles):** Polveri derivate da processi gas-to-particle in atmosfera: sono composti da solfati e nitrati, carbone (elementare, organico) e metalli. Il diametro D è generalmente inferiore a 2.5μ , ma può variare con l'umidità

Long-lived o persistent pollutants (inquinanti persistenti)

Piombo, Mercurio, Cromo

Halocarbons (CFC)

Benzene, 1,3-butadiene

Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)

Diossine: Polichlorinated dibenzo-pdioxins (PCDD), Polychlorinated dibenzofurans (PCDF)

Polycyclic Biphenyls (PCBs)

	Units	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Selected PAHs											
Benz[a]anthracene	t	83	81	77	69	65	53	30	24	22	21
Naphthalene	t	2074	2003	1827	1310	1162	949	745	677	616	645
Phenanthrene	t	1368	1316	1258	1178	1123	894	350	242	225	185
Pyrene	t	387	374	358	335	318	253	103	72	66	56
PCBs	kg	6976	6397	5901	5407	4846	4292	3750	3248	2747	2071
Dioxins	g	1142	1123	1098	1049	953	819	589	384	361	346

UK

Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela

Pollutant	Concentration	Averaging period	Legal nature	Permitted exceedences each year
Fine particles (PM _{2.5})	25 µg m ^{-3a}	1 year	Target value entered into force 1.1.2010 Limit value enters into force 1.1.2015	n/a
Sulphur dioxide (SO ₂)	350 µg m ⁻³	1 h	Limit value entered into force 1.1.2005	24
	125 µg m ⁻³	24 h	Limit value entered into force 1.1.2005	3
Nitrogen dioxide (NO ₂)	200 µg m ⁻³	1 h	Limit value entered into force 1.1.2010	18
	40 µg m ⁻³	1 year	Limit value entered into force 1.1.2010 ^b	n/a
PM ₁₀	50 µg m ⁻³	24 h	Limit value entered into force 1.1.2005 ^c	35
	40 µg m ⁻³	1 year	Limit value entered into force 1.1.2005 ^c	n/a
Lead (Pb)	0.5 µg m ⁻³	1 year	Limit value entered into force 1.1.2005 (or 1.1.2010 in the immediate vicinity of specific, notified industrial sources; and a 1.0 µg m ⁻³ limit value applied from 1.1.2005 to 31.12.2009)	n/a
Carbon monoxide (CO)	10 mg m ⁻³	Maximum daily 8 h mean	Limit value entered into force 1.1.2005	n/a
Benzene	5 µg m ⁻³	1 year	Limit value entered into force 1.1.2010 ^c	n/a
Ozone	120 µg m ⁻³	Maximum daily 8 h mean	Target value entered into force 1.1.2010	25 days averaged over 3 years
Arsenic (As)	6 ng m ⁻³	1 year	Target value enters into force 31.12.2012	n/a
Cadmium (Cd)	5 ng m ⁻³	1 year	Target value enters into force 31.12.2012	n/a
Nickel (Ni)	20 ng m ⁻³	1 year	Target value enters into force 31.12.2012	n/a
Polycyclic aromatic hydrocarbons (expressed as concentration of Benzo(a)pyrene)	1 ng m ⁻³	1 year	Target value enters into force 31.12.2012	n/a

Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155 in attuazione della Direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita

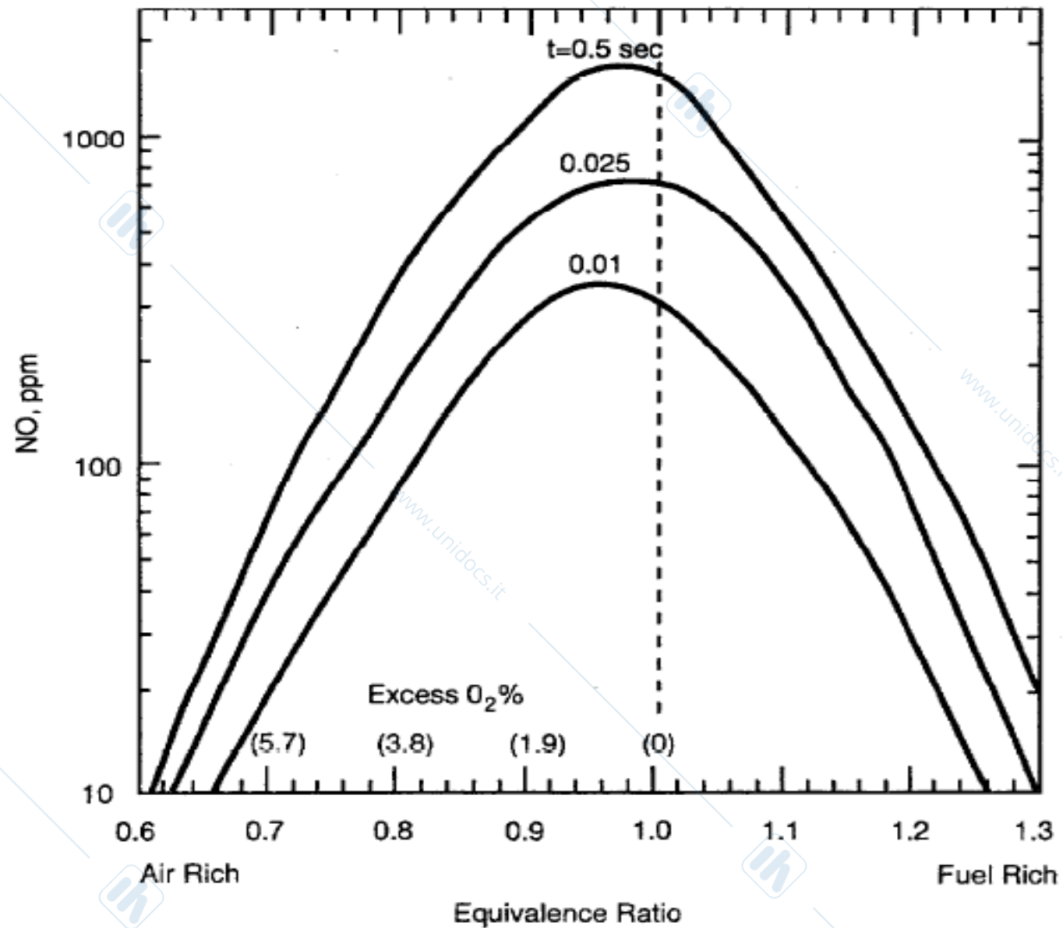
Strategie di controllo delle emissioni all'atmosfera di processi industriali

Il controllo delle emissioni atmosferiche generate da un qualsiasi **processo industriale** può essere realizzato attraverso:

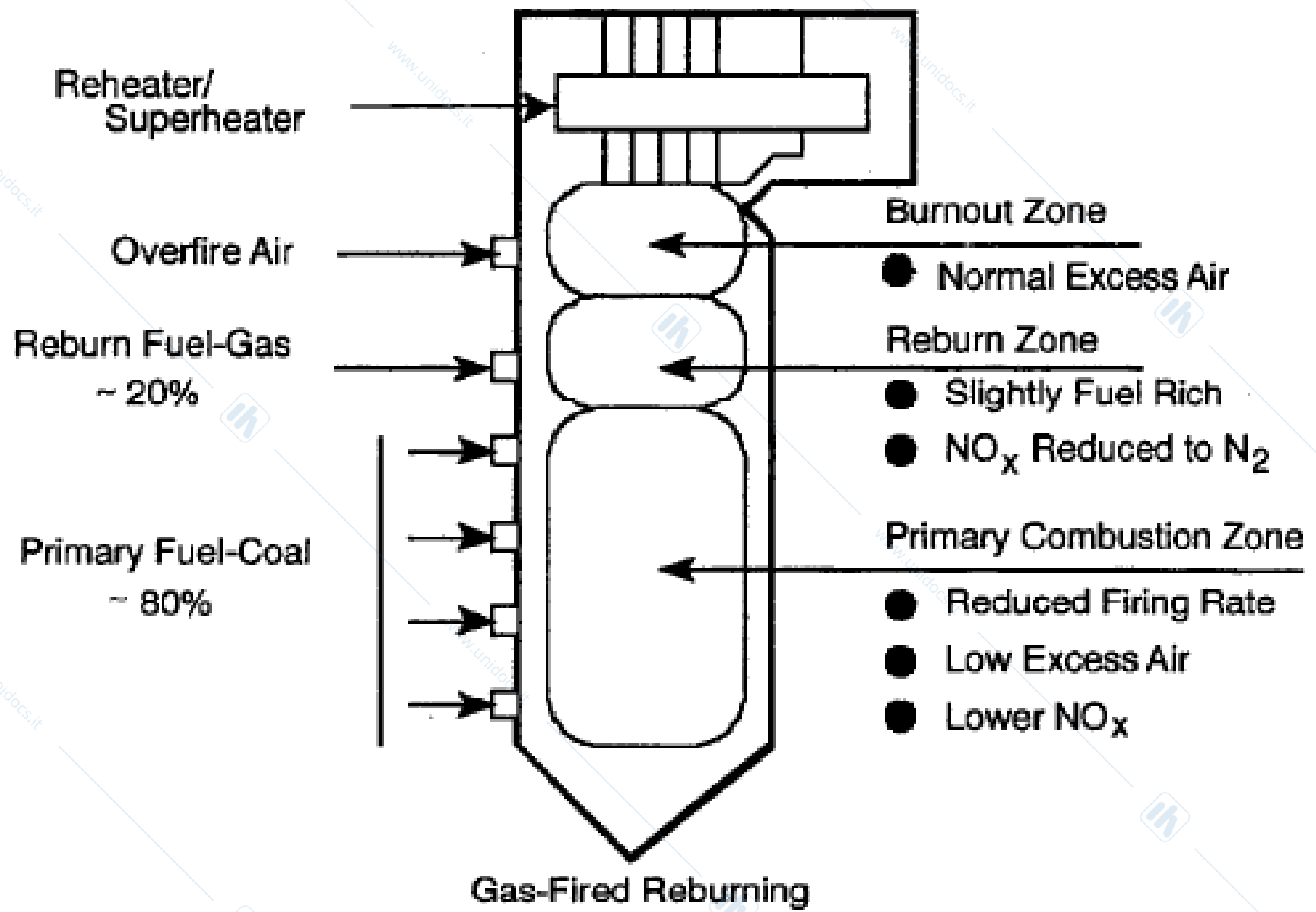
- 1) **Modifica** del processo produttivo con passaggio ad un **processo** meno "inquinante".
Es.: Tecniche di riduzione di NO_x mediante "fuel reburning"
- 2) **Utilizzo** di un nuovo *fuel (comburente, reagenti, additivi)* in grado di rispettare i limiti di emissione. Es.: Tecniche di desolforazione di fuels; Passaggio da heavy fuel oil a metano nella produzione energetica e nel trasporto, MBTE come antidetonante in sostituzione del Piombo tetraetile
- 3) **Installazione** di impianti e tecnologie di rimozione e abbattimento inquinanti

Modifica del processo produttivo

Ridurre anche parzialmente la temperatura e dei prodotti di combustione o la concentrazione del combustibile significa minimizzare la formazione di NOx

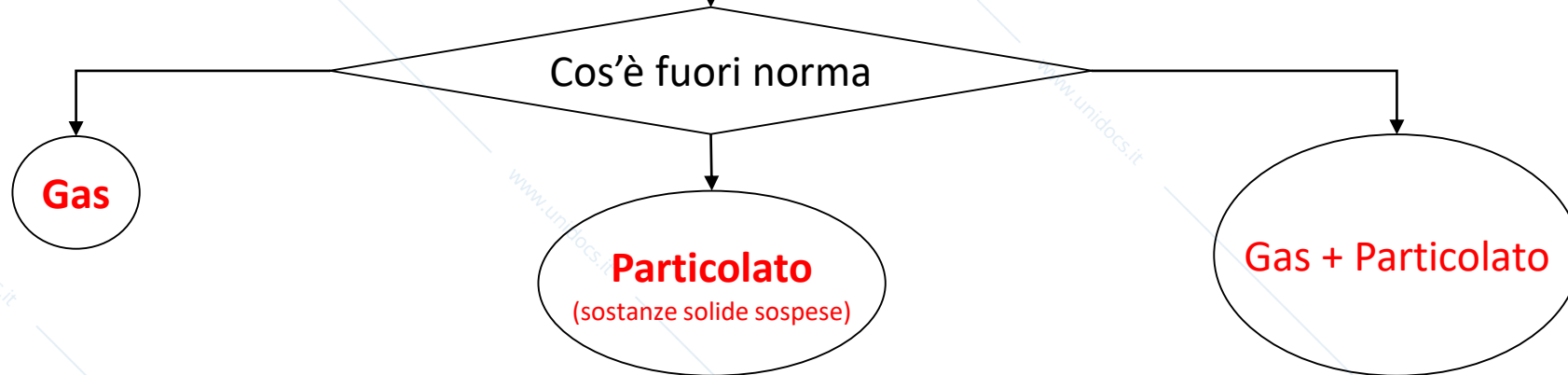


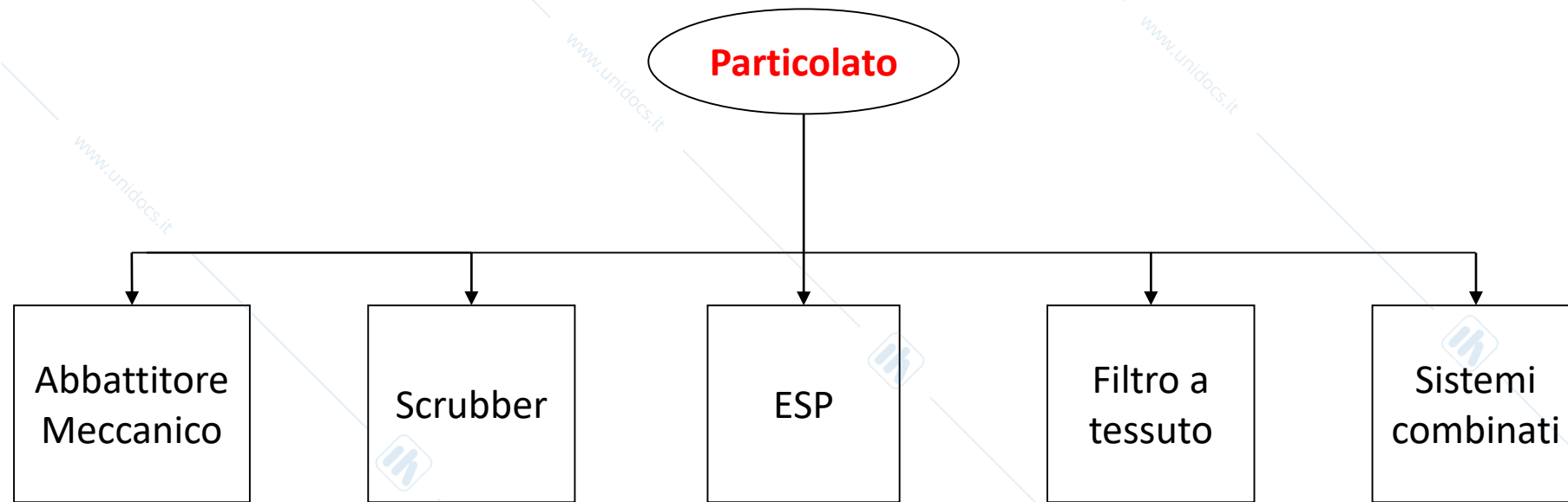
Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela



PARAMETRI OPERATIVI DEL PROCESSO ENERGETICO
portata, temperatura, tipo inquinanti: particolato o gassosi, concentrazioni, ecc.

le norme non sono rispettate: le emissioni sono a valori più alti di quelle consentite



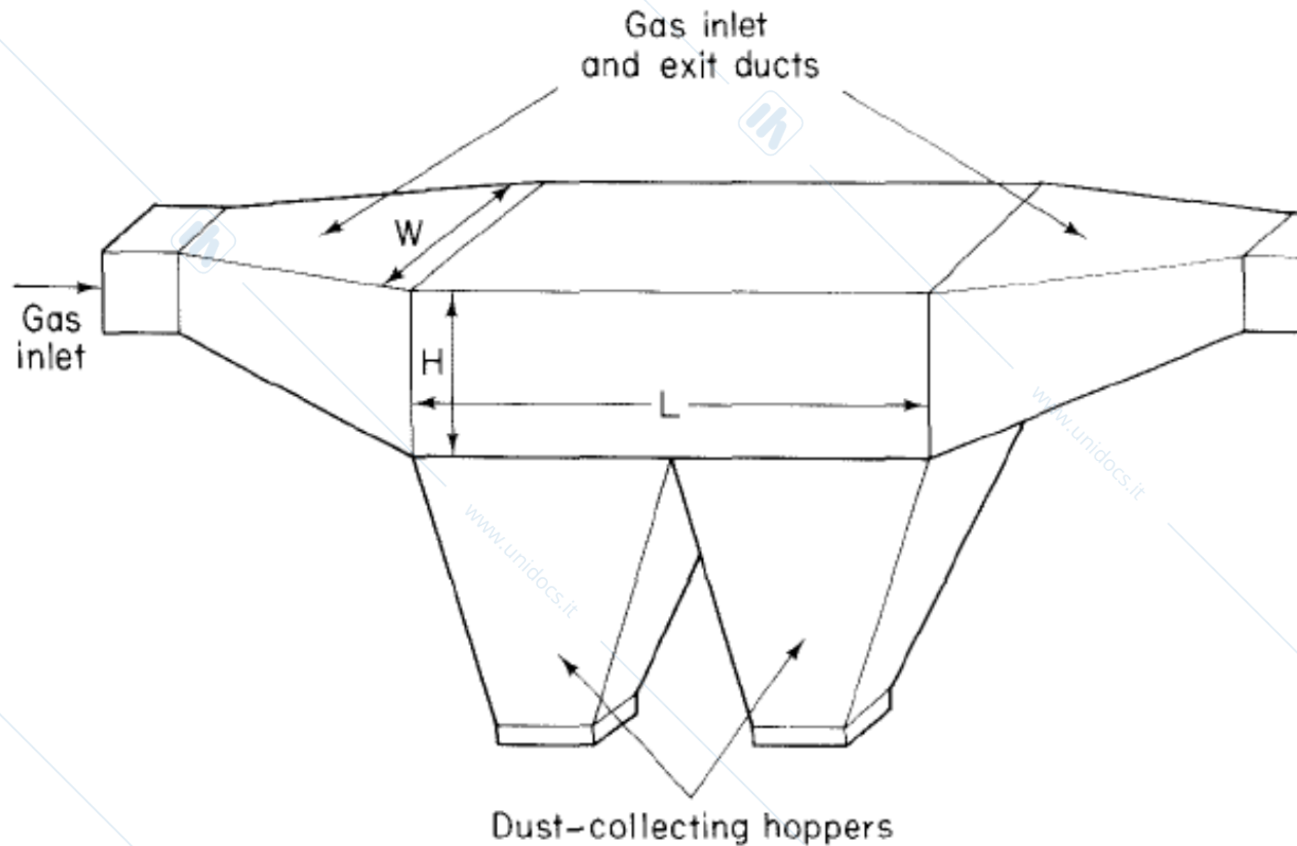




Rimozione selettiva di uno o più componenti solide da una corrente gassosa mediante trattamento meccanico: i cicloni

Camere di calma (gravity settler)

La separazione del particolato avviene per gravità in camera di decantazione



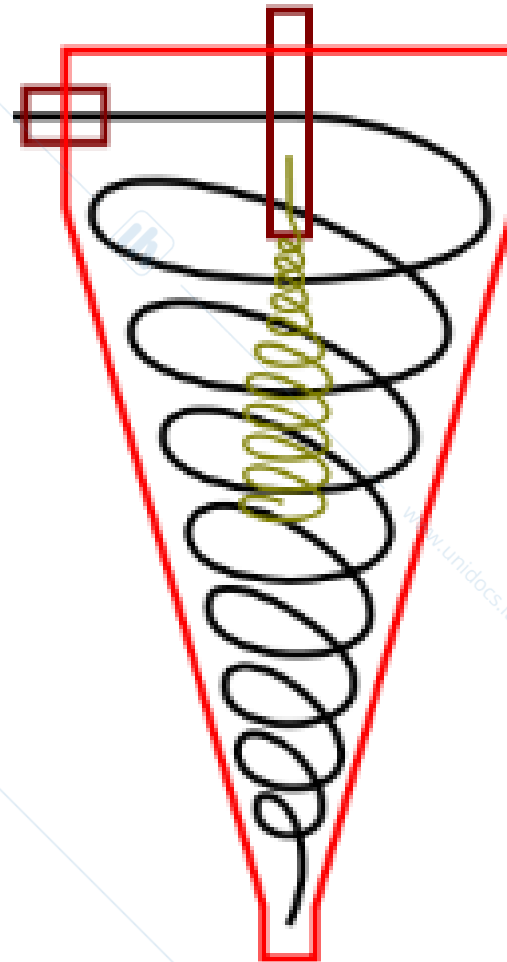
Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela

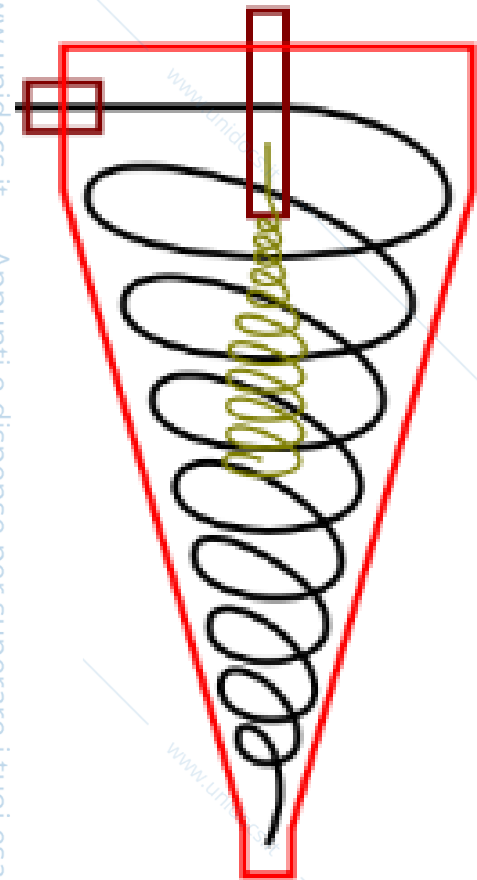
Sono il mezzo più semplice di separazione di particelle da correnti di gas.

Le camere di calma separano particelle con diametri maggiori di **50 μm**

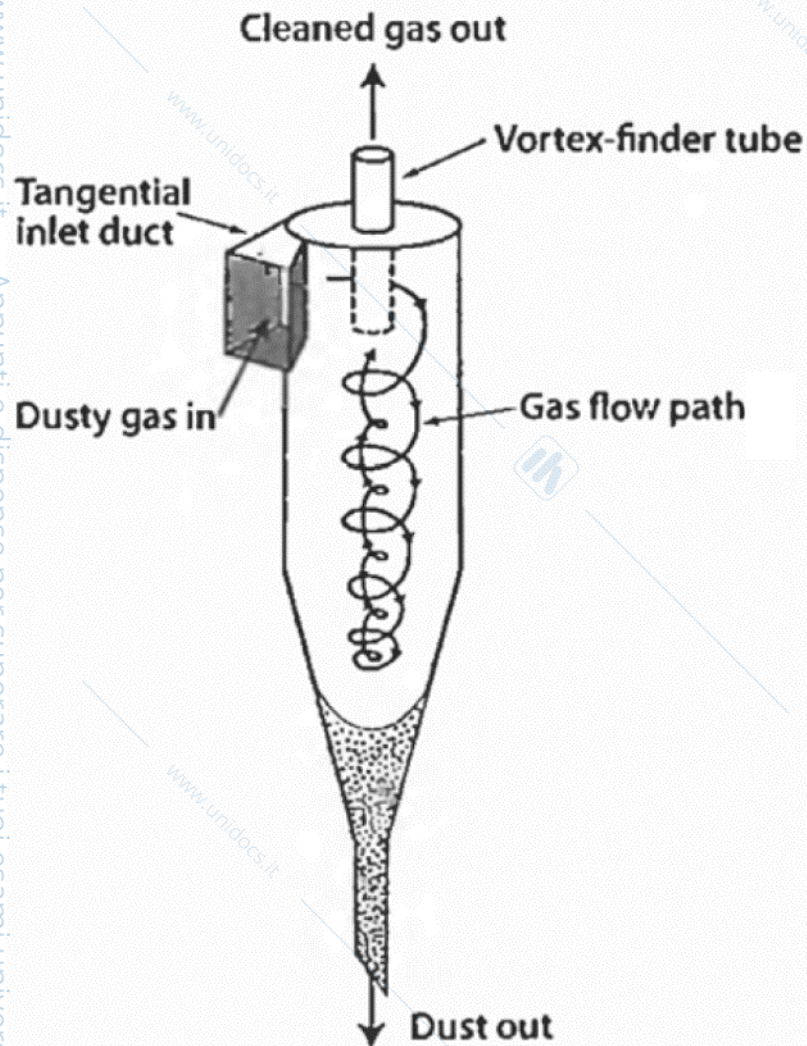
Sono quindi utilizzate come “**pre-cleaners**” con il grande vantaggio di essere semplici, a basso costo, con basse perdite di carica, e funzionanti a secco, anche se occupano grandi volume

Cycloni

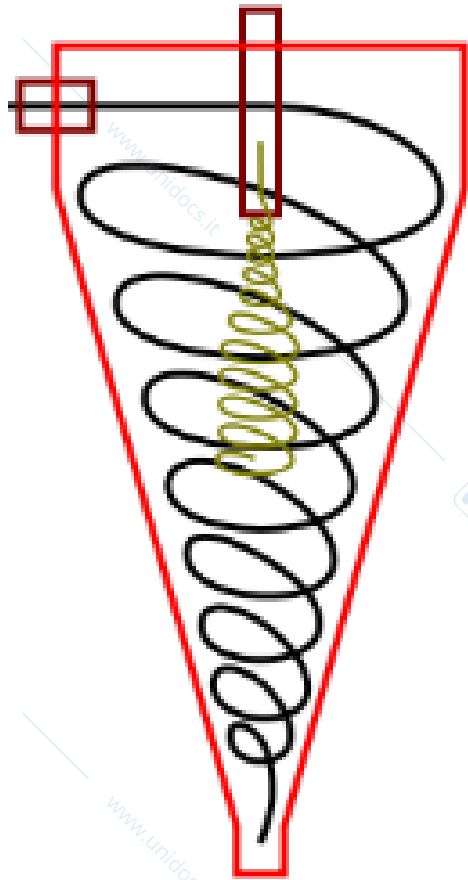




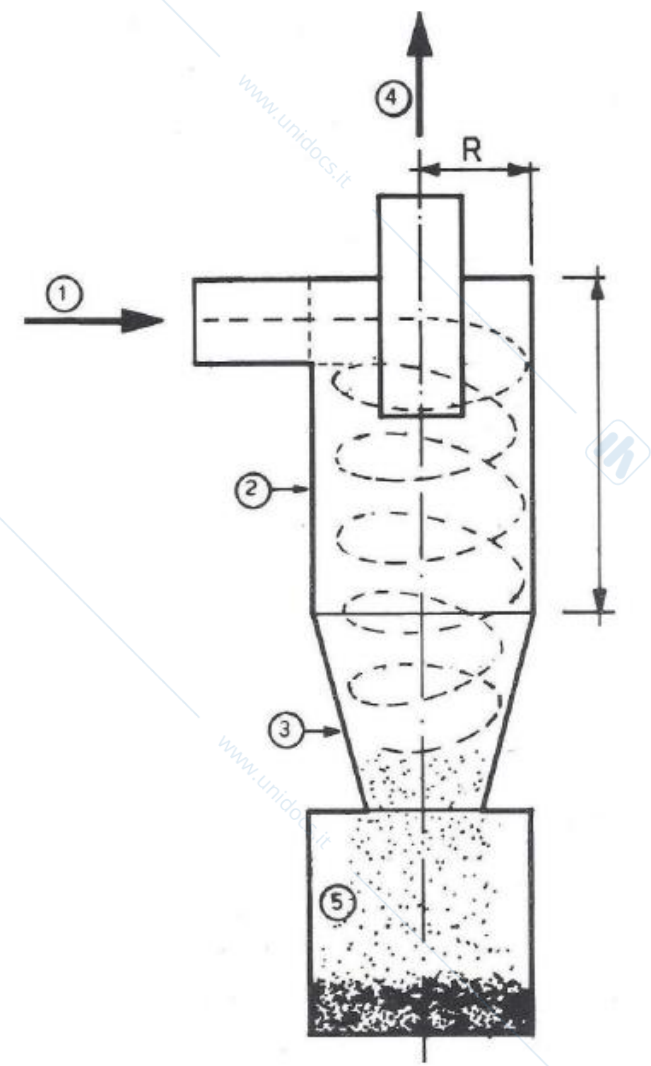
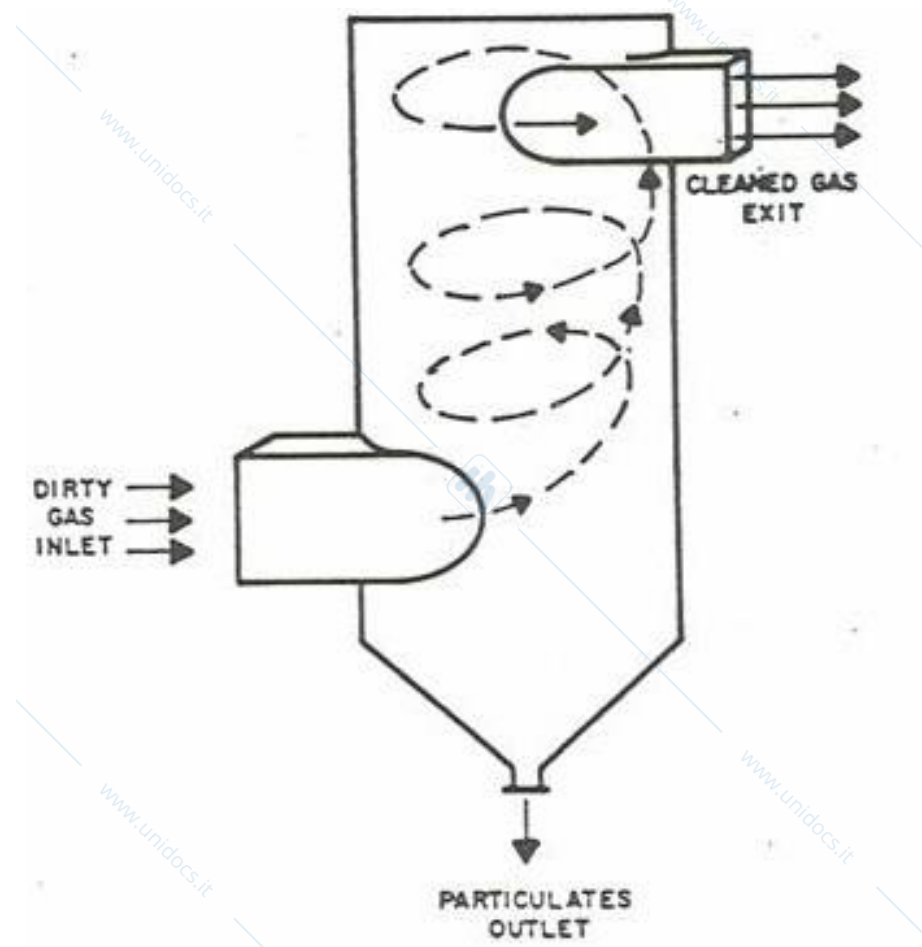
- ❑ Il ciclone è essenzialmente un tipo particolare di camera di calma, in cui l'accelerazione di gravità è sostituita dall'accelerazione centrifuga
- ❑ il moto della corrente gassosa da trattare viene trasformato da rettilineo ad elicoidale
- ❑ le particelle solide, in virtù della propria inerzia (forza centrifuga), tendono ad allontanarsi dalla traiettoria del fluido in cui sono immerse e a proseguire lungo la tangente
- ❑ Quando incontrano la parete del ciclone, per effetto dell'urto, cedono energia cinetica e si fermano, cadendo lungo la parete stessa nella tramoggia di raccolta sottostante



- ❑ Nella più comune configurazione, l'ingresso del gas è tangenziale, attraverso condotti sagomati
- ❑ La corrente gassosa che entra nel ciclone assume un moto elicoidale discendente lungo la parete esterna (flusso primario)
- ❑ A circa metà della zona tronco-conica situata nella parte inferiore del ciclone, il moto si inverte
- ❑ Si forma un vortice ascendente con minore raggio di curvatura (flusso secondario) che convoglia l'aria depurata nel tubo di scarico.
- ❑ Il gas depurato esce quindi da una tubazione in asse con il ciclone



- ❑ La forza centrifuga (inerzia) che agisce sulla particella solida ne determina la separazione del particolato dal gas (centrifugazione)
- ❑ Una particella è da considerare separata quando tocca la parete del ciclone. Qui perde energia cinetica e cade verso il basso per gravità
- ❑ Più elevata è la velocità tangenziale, quindi, maggiore è la forza centrifuga che agisce sulle particelle separandola dalla corrente fluida.



Altre configurazioni di ciclone

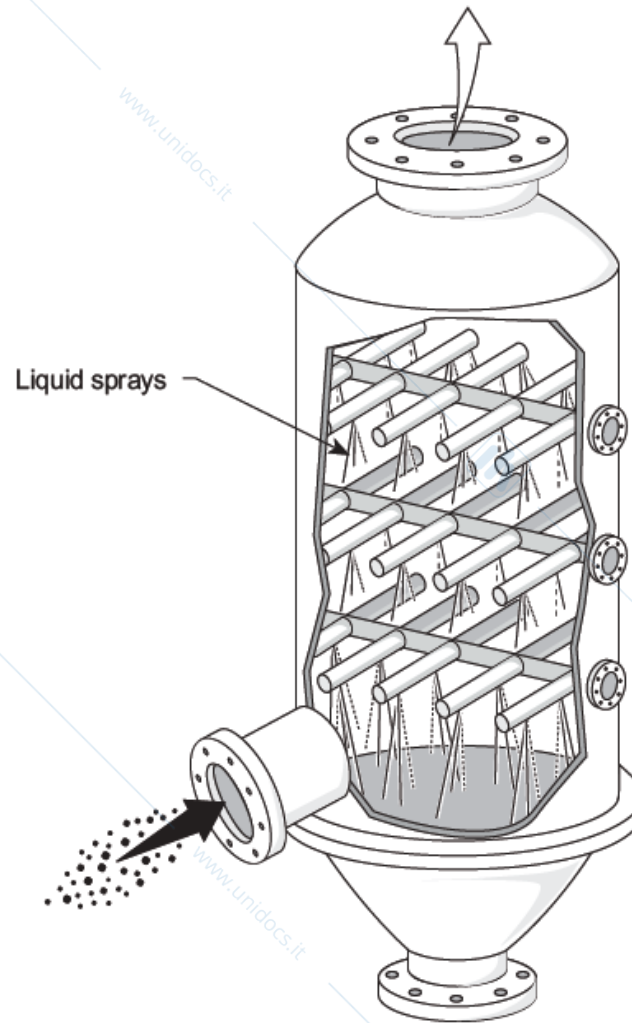
- I cicloni possono essere usati fino a temperature di 700-800°C (usando opportuni materiali) e pressioni fino a centinaia di bar (<500 bar), anche in presenza di liquidi (aerosol)
- In generale consentono di conseguire elevati abbattimenti su diametri di particelle medio-alti (compresi tra 3 e 50 μm).
- Per questo i cicloni sono spesso utilizzati come ulteriore stadio di pre-abbattimento, al fine di ridurre il carico di particolato in ingresso al successivo stadio di abbattimento (filtrazione, scrubber), più efficace per particelle più piccole.
- Cicloni convenzionali possono catturare fino al 90% del particolato, dei PM10 e fino al 40% dei PM2.5 (EPA, 2003)
- I costi di installazione e manutenzione sono molto bassi



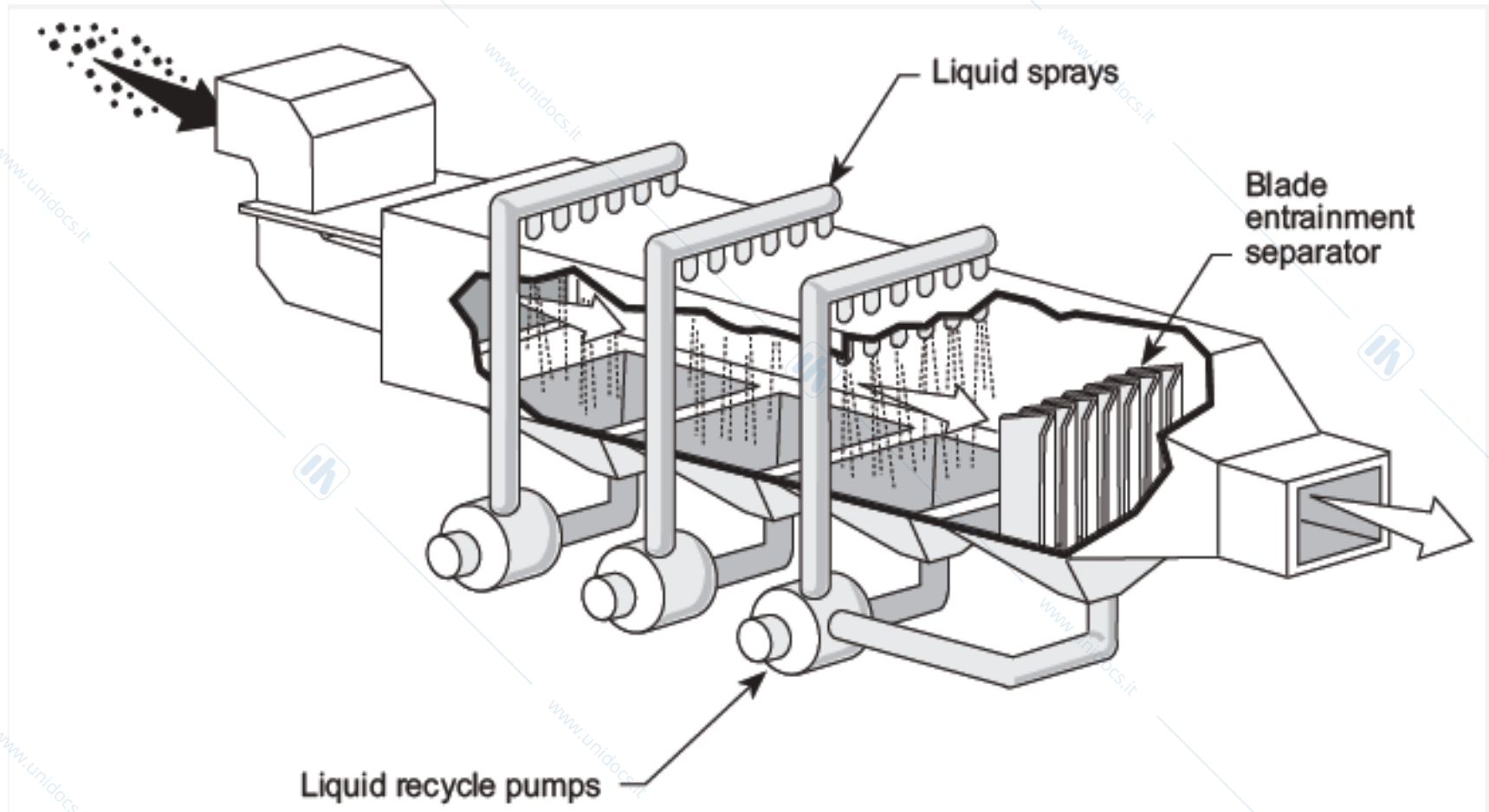
I cicloni sono spesso utilizzati in combinazione (in serie o in parallelo)



Rimozione selettiva di uno o più componenti solide da una corrente gassosa mediante assorbimento e/o effetto Venturi



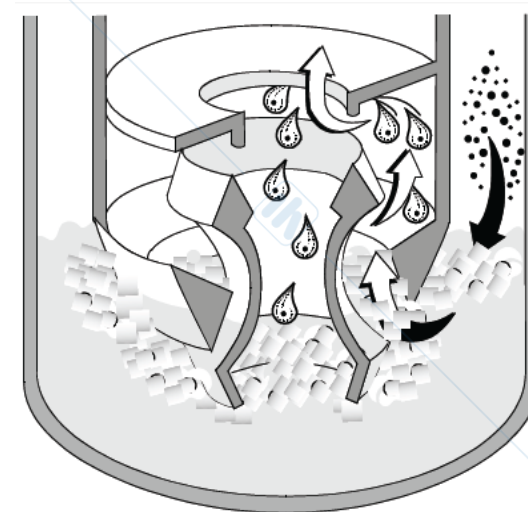
Spray tower



Spray tower orizzontali

Scrubber inerziali

- ❑ Il flusso gassoso è forzato a passare in una vasca contenente il liquido
- ❑ Successivamente il flusso è fatto passare in condotti sagomati od orifizi al fine di separare la fase liquida dalla corrente gassosa
- ❑ La gran parte della rimozione di particolato avviene durante il passaggio della corrente gassosa nel liquido
- ❑ Le particelle più grandi sono rimosse nell'impatto con la superficie del liquido mentre le particelle più piccole sono catturate successivamente per impatto sulle goccioline di liquido



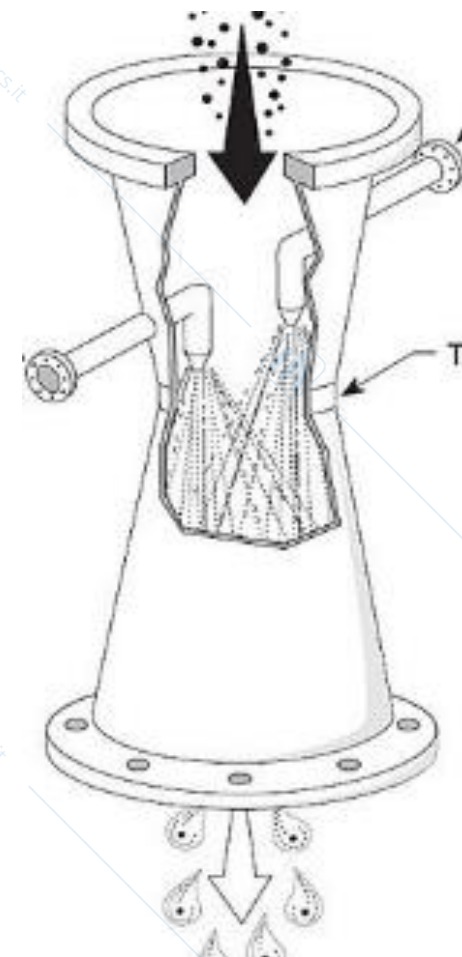
Venturi Scrubber

Gli eiettori Venturi sono efficaci nella rimozione di particolati con dimensioni maggiori di $1\ \mu\text{m}$ e non sono usati per particolati sub-micronici.

L'uso di alte pressioni di iniezioni determina la formazione di spray con gocce molto piccole.

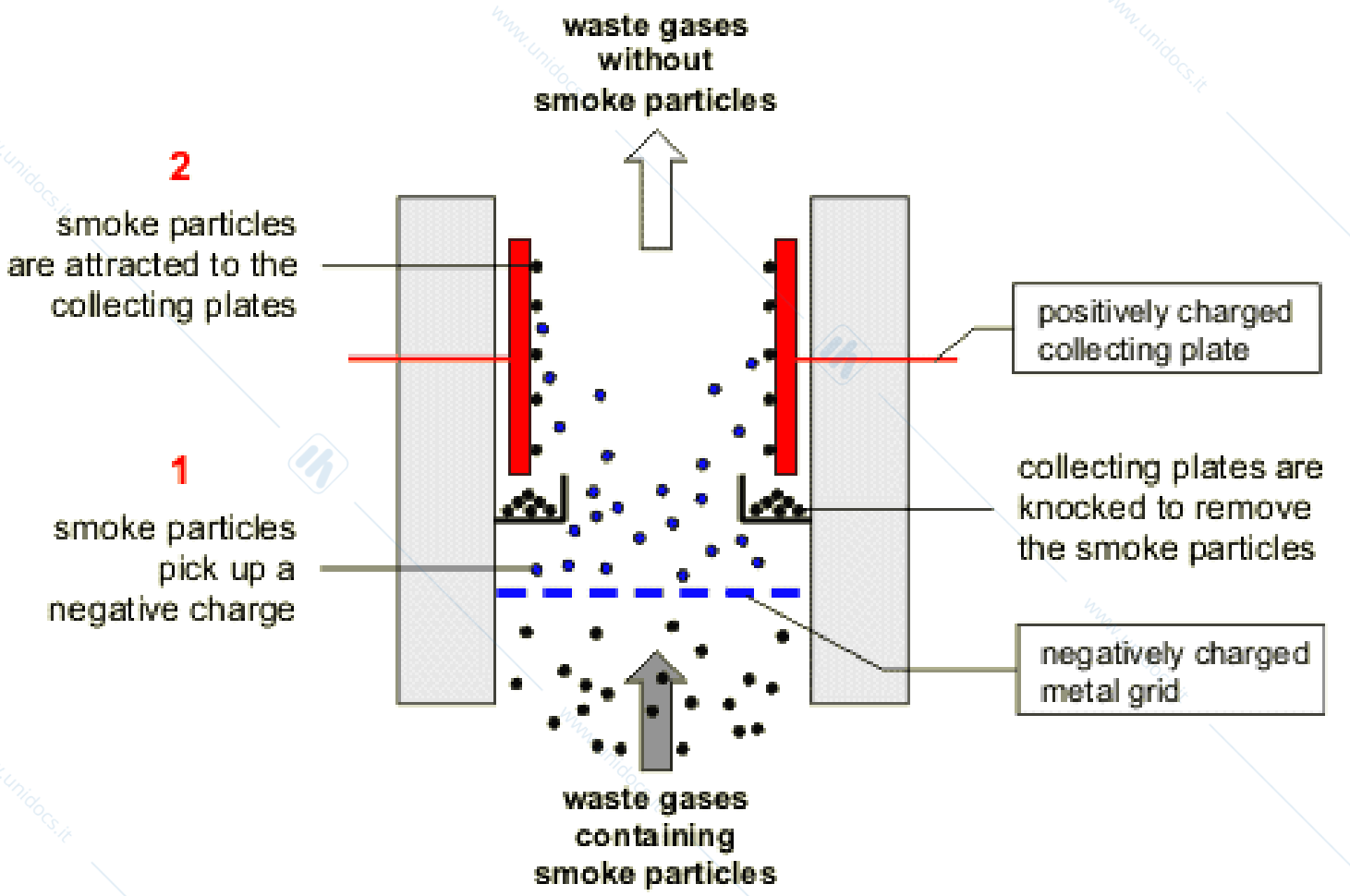
Il passaggio delle gocce nella gola, in cui sono presenti alte velocità del gas ed elevata turbolenza, da luogo ad ulteriori fenomeni di atomizzazione secondaria.

Ciò da luogo a dispersioni liquide molto fini ed elevate efficienze di scambio



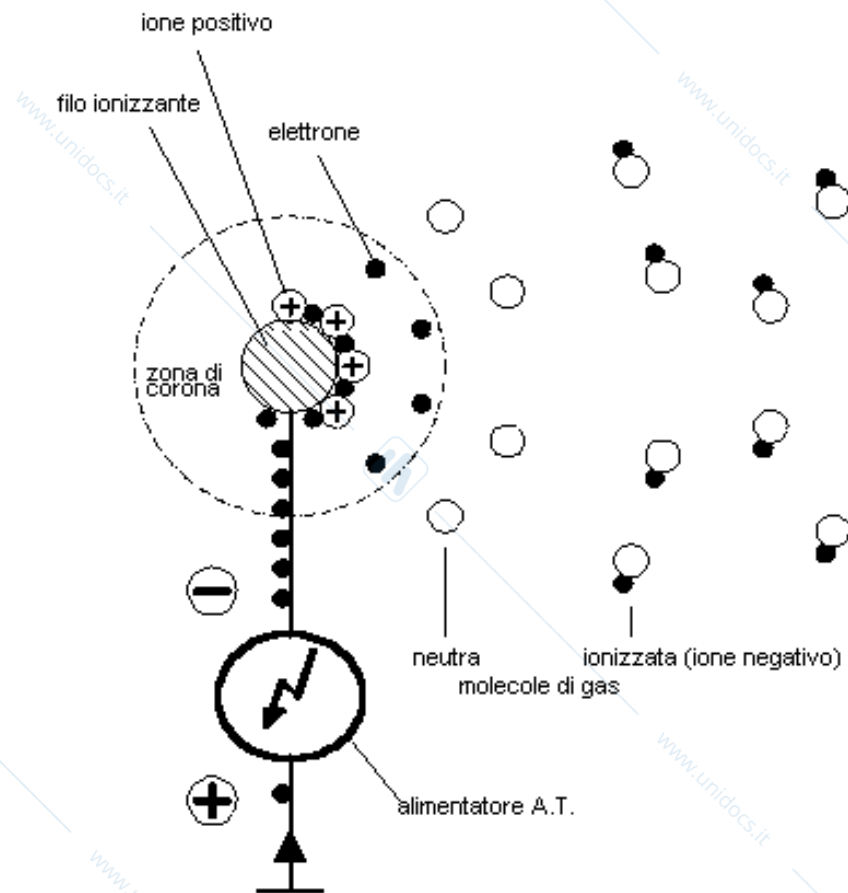


Electro-Static Precipitator: Rimozione selettiva di uno o più componenti solide da una corrente gassosa mediante applicazione di un campo elettrico

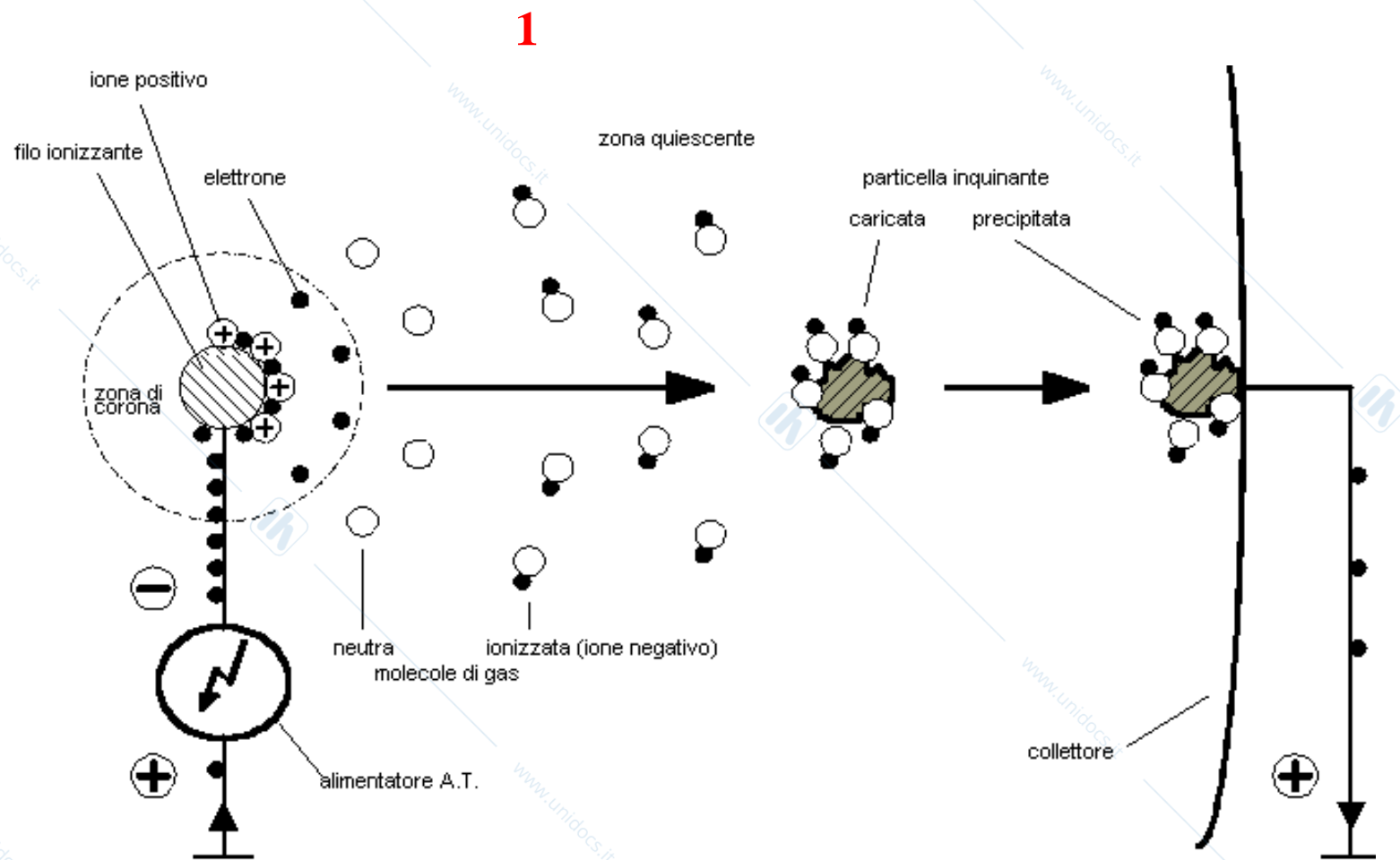


www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

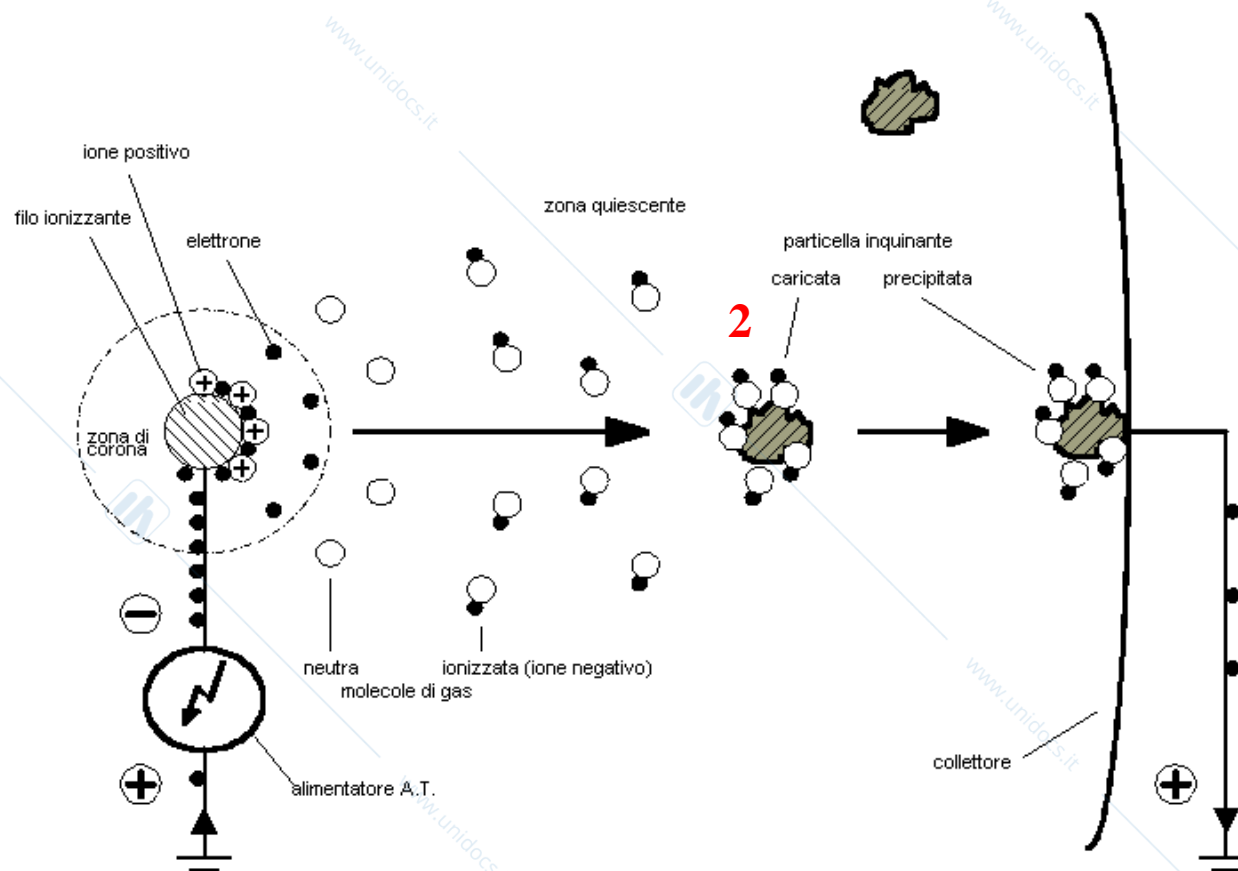
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



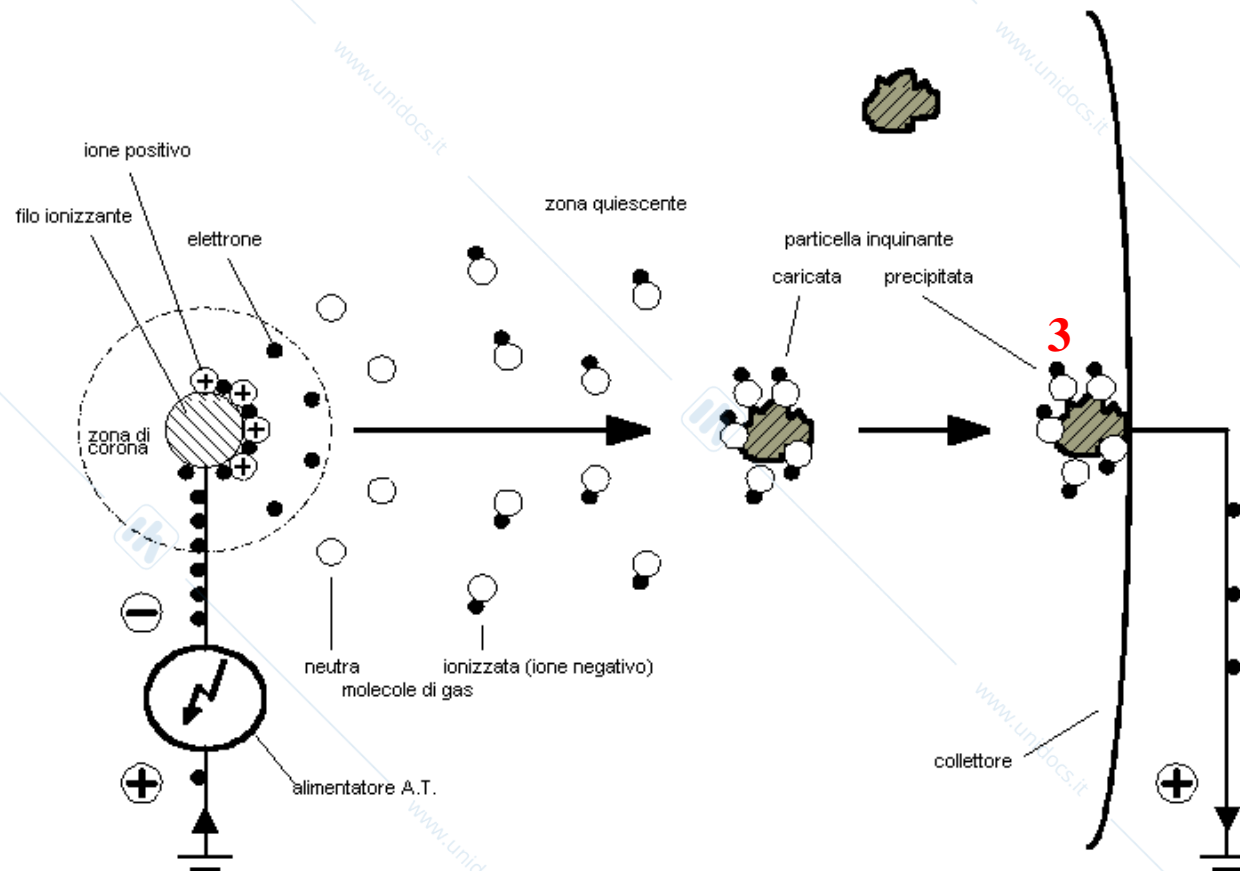
Quando si applica una differenza di potenziale molto elevata (10-100 kV), il valore del campo elettrico è sufficientemente alto affinché gli elettroni inneschino un **processo di ionizzazione** del dielettrico per **effetto corona**



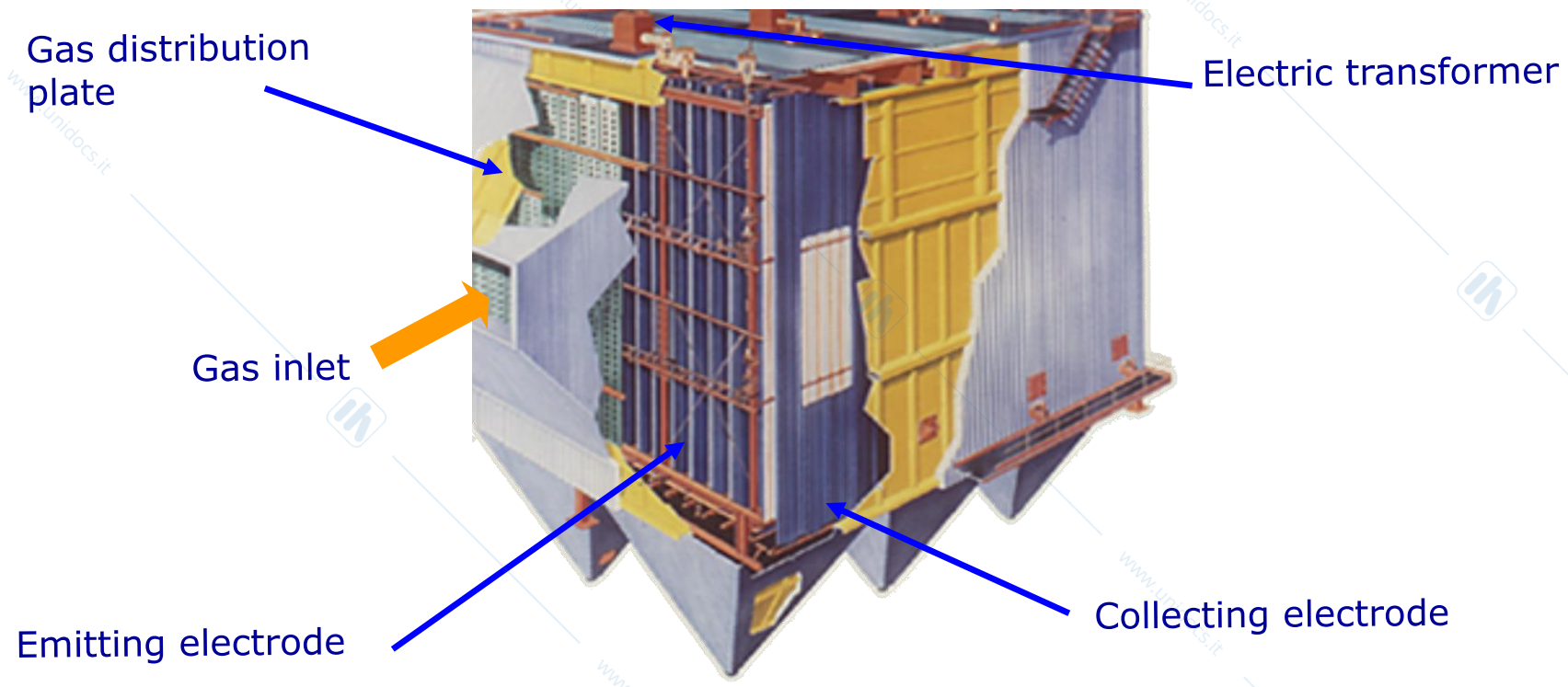
1 – Ionizzazione di molecole gassose: elettroni liberi presenti nella corrente gassosa, messi in moto dal campo elettrico, urtano molecole gassose come O_2 e CO_2 (elettronegative) caricandole negativamente (ionizzandole)



2 – Ionizzazione del particolato: le molecole gassose ionizzate a loro volta urtano le particelle e si legano elettricamente a queste; il particolato risulta quindi carico negativamente



3 – Migrazione del particolato: il particolato carico negativamente, sotto l'azione del campo elettrico, si sposta verso l'elettrodo positivo, che rappresenta la piastra di raccolta, da dove viene periodicamente rimosso.



Tipica configurazione di un ESP

Il trattamento dei fumi di combustione (centrali termoelettriche, inceneritori) resta la principale applicazione degli ESP.

Gli elettrofiltri hanno dimensioni elevate: ed es., un ESP di una centrale elettrica da 400 MW può avere piastre di raccolta alte 15 m, e una lunghezza complessiva di 40 m



CLASSIFICAZIONE DEGLI ESP SULLA BASE DELLA PORTATA

$Q < 5000 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Dispositivi modulari pre-assemblati, studiati per applicazioni standardizzate: abbattimento di fumi di saldatura; nebbie d'olio; particolato ambientale; effluenti da lavorazioni di metalli; effluenti da lavorazione di materie plastiche.

$Q = 5000 \text{ Nm}^3/\text{h} - 10^6 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Realizzazioni industriali su commessa. Campi di applicazione: centrali elettriche; cementifici; acciaierie; fonderie; cartiere; industrie chimiche; industrie farmaceutiche; industria petrolifera; impianti estrattivi e di trattamento di minerali; impianti di demolizione e riciclaggio.

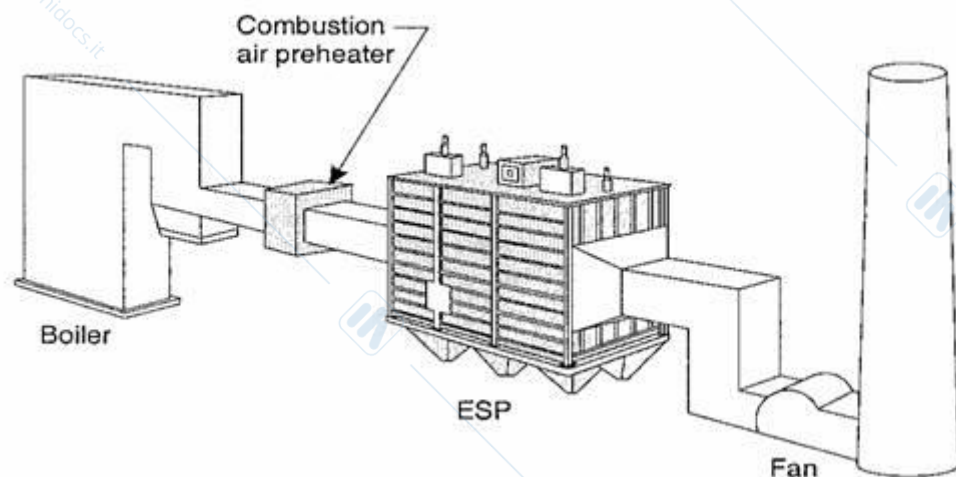
VANTAGGI

- **Elevate efficienze (sino al 99% e oltre)**
- Abbattimento di particelle anche molto fini
- **Basse perdite di carico** (raramente superiori a 15 mmH₂O)
- Necessità di limitata manutenzione
- **Possibilità di operare ad alta temperatura** (sino a 700° C) e pressione (sino ca 10 bar)
- **Possibilità di trattare sostanze altamente corrosive**
- Bassi consumi di energia

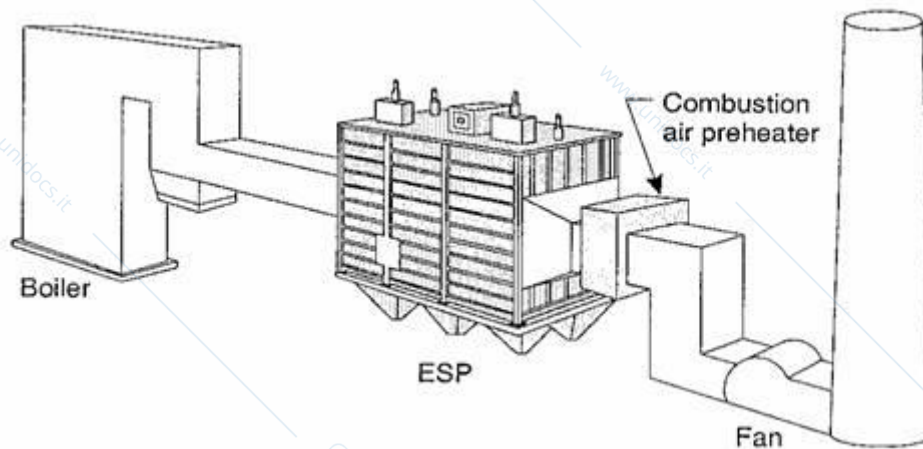
SVANTAGGI

- **Costo iniziale molto elevato**
- **Rigidità di funzionamento**
- **Notevole occupazione di spazio** (più grande dei filtri a manica)
- Pericolo di incendi e di esplosioni

In una centrale termoelettrica, la T dei fumi in ingresso ad un ESP dipende, oltre che dalle caratteristiche della combustione, dal punto in cui viene collocato l'ESP, sulla linea fumi, rispetto agli scambiatori di calore.



ESP dopo il pre-riscaldatore dell'aria in ingresso: T più bassa



ESP prima del pre-riscaldatore dell'aria in ingresso: T più alta



Filtrazione: rimozione di particelle solide da un fluido (liquido o gassoso) grazie al passaggio attraverso un mezzo filtrante sul quale il solido si deposita.

Il fluido passa attraverso il mezzo filtrante grazie alla differenza di pressione tra monte e valle del filtro. Tale differenza può essere stabilita sfruttando la forza di gravità, ovvero attraverso una pompa o ancora per azione di forze centrifughe.

I filtri si possono classificare in:

- filtri a torta (cake filter):** impiegati per rimuovere quantità piuttosto massicce di solido da liquidi.
- filtri per chiarificazione:** impiegati per rimuovere polveri da correnti gassose o da liquidi già “chiari”: i filtri a maniche si collocano in questa categoria.



Filtri a tessuto (bag-house o filtri a manica, fabric filter)



www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



Il materiale usato come mezzo filtrante può essere costituito da: **cotone, lana, nylon, polipropilene, teflon, lana di vetro, fibre di carbonio, di metallo, ceramiche.**

Le principali proprietà di un mezzo filtrante sono:

- permeabilità
- resistenza meccanica
- ritenzione del particolato
- resistenza ad attacco chimico
- resistenza alle elevate temperature
- stabilità dimensionale
- possibilità di pulizia rapida

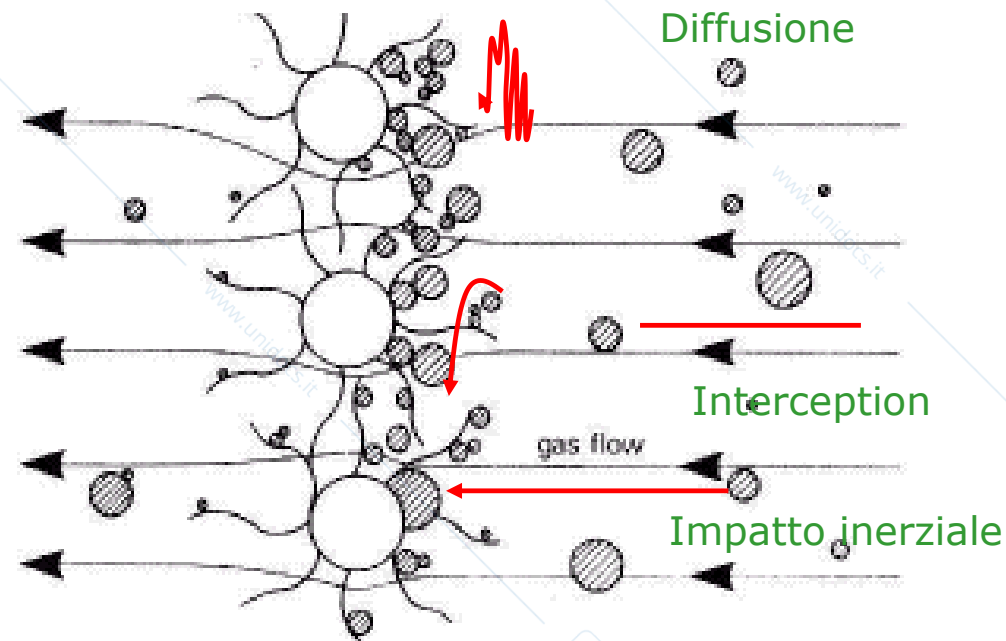
Le fibre dei materiali sopra elencati possono essere strutturate nella forma di **tessuto** (trama/ordito) o **feltro** (fibre orientate casualmente, ed opportunamente compresse; non può essere realizzato con lana di vetro o cotone).

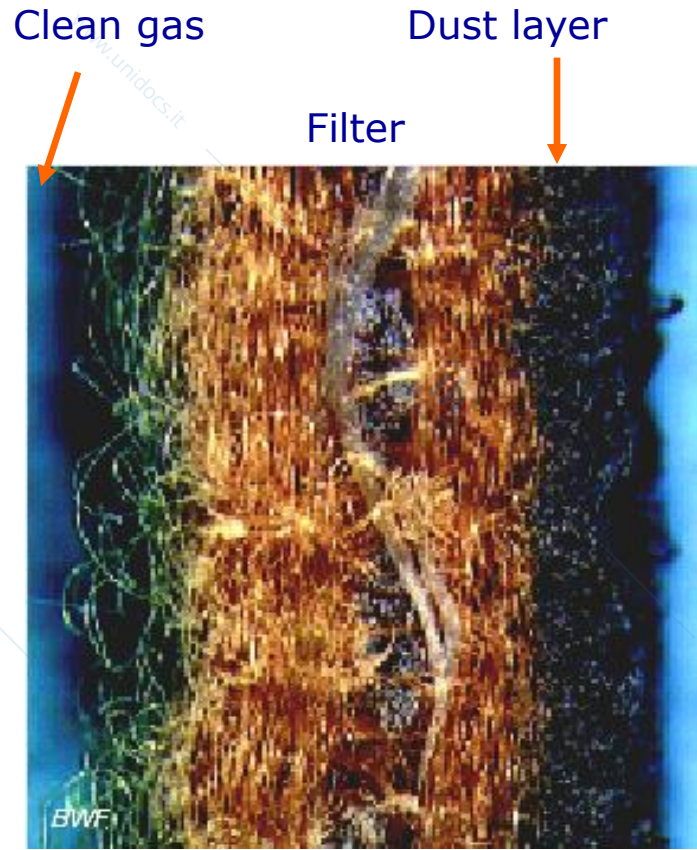
Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela

Nome chimico	Nome marca
Fibre poliamide	Nylon Perlon Frilon
Poliacrilonitile	Orlon :tipo 42 Tipo 81 PAN Dralon T Relon
Fibre poliestere(polietilene tetraftalato)	Terilene Dacron Diolene Trevira
Fibre polietilene	Politene Alcatene
Fibre politetrafluoretilene	Teflon PTFE Ostaflone
Cloruro di Polivinile	Vinion Fibrorovi
Cloruro vinilidene(90%) Cloruro di vinile (10%) Fibre copolimeri	Saran
Cloruro di Vinile (60%) Acrilnitrile (40%) Fibre copolimer	Dinel

Il particolato inizia ad aderire alle fibre di tessuto in seguito a fenomeni quali:

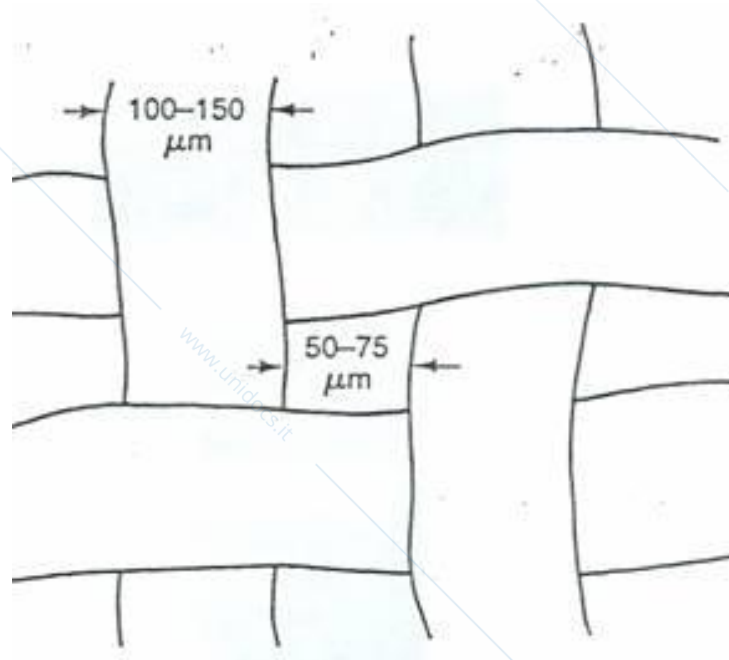
- ❑ **intercettazione diretta**: quando la linea di flusso di una particella la porta a “collidere” con il tessuto; in seguito alla collisione, la particella viene trattenuta per l’azione di forze di Van der Waals fra particelle e tessuto
- ❑ **diffusione** delle particelle dal cuore della corrente gassosa al tessuto (significativa solo per particelle $< 0.1 \mu\text{m}$)
- ❑ **forze elettrostatiche**





Nei filtri a tessuto, le dimensioni degli spazi liberi fra le fibre del tessuto ($50-75 \mu\text{m}$) sono molto maggiori delle dimensioni delle particelle catturate (pari anche a $0.01 \mu\text{m}$): la cattura del particolato avviene quindi in seguito a fenomeni molto più complessi del semplice “non passare” a causa della dimensione.

In effetti, nella condizione iniziale in cui il filtro è pulito, l'efficienza di rimozione del particolato nei filtri a tessuto è bassa.



Le dimensioni tipiche delle maniche sono:

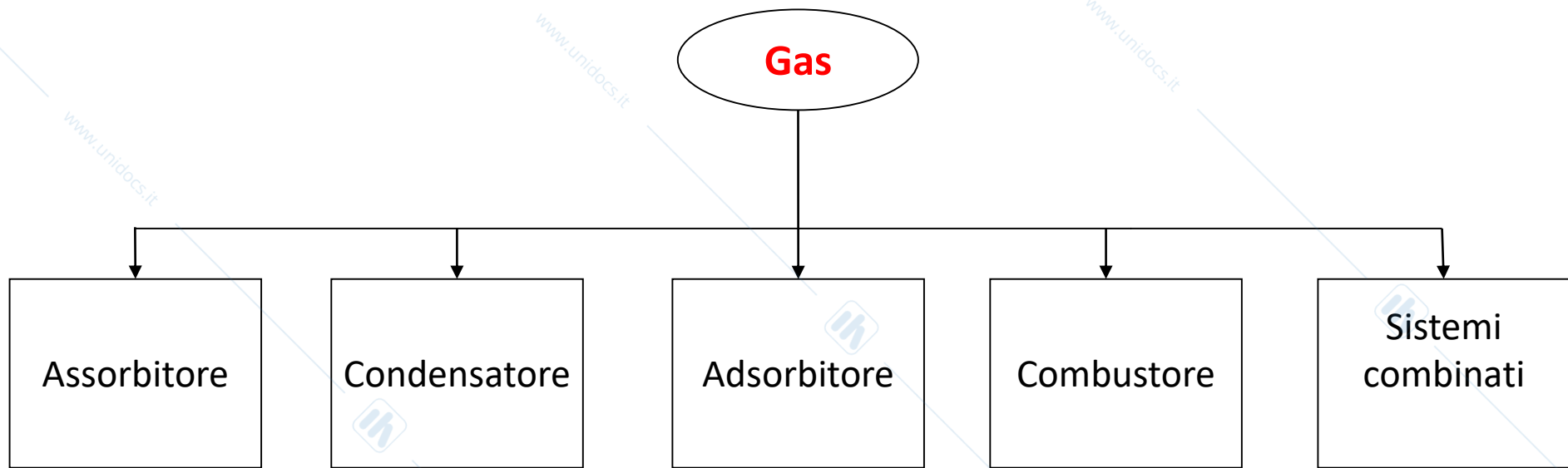
diametro = 10 - 20 cm

lunghezza = 1.5 - 3 m

I filtri a maniche hanno avuto a partire dagli anni '80 una grande diffusione, sia nelle centrali termoelettriche, sia in svariati processi industriali, sia nel trattamento dei fumi di incenerimento

- ❑ Le emissioni standard per il particolato sono dell'ordine dei $10\div 20 \text{ mg/Nm}^3$
- ❑ Gli standard future prevedono abbassamenti fino a 5 mg/Nm^3
- ❑ Le ESP sono diffuse in unità di produzione energetica a olio combustibile ma sono competitive anche per i processi di combustione del carbone
- ❑ I filtri a manica in tessuto (fabric filter) sono particolarmente resistenti e sono preferiti in condizioni estreme, anche in relazione allo sviluppo di nuovi tessuti a basso costo, lunga durata, e sistemi di pulizia a bassa pressione

Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela



Assorbitore

Condensatore

Adsorbitore

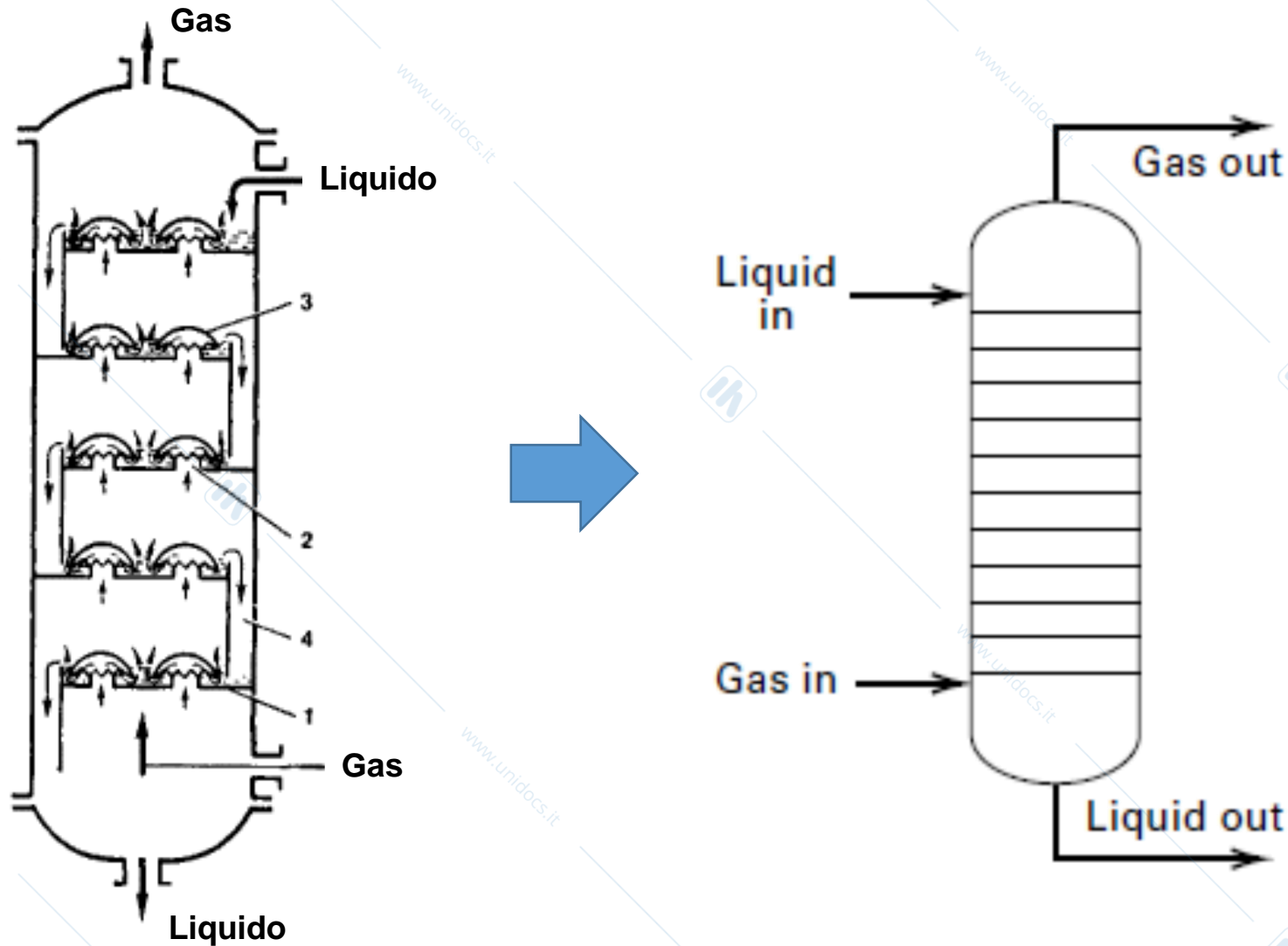
Combustore

Sistemi
combinati

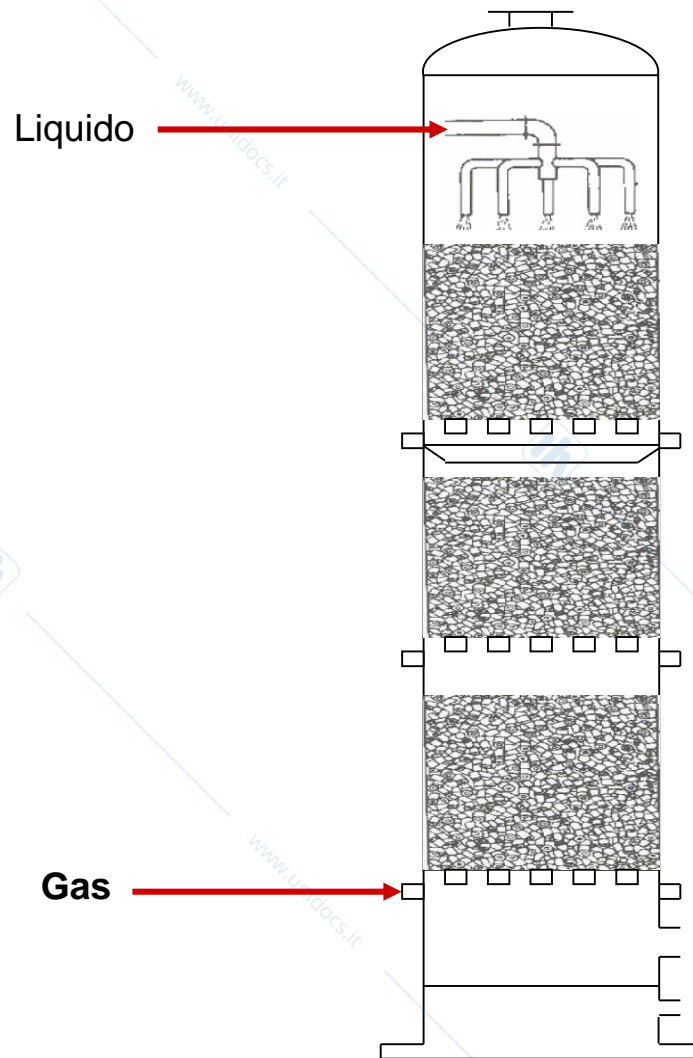
Rimozione selettiva di uno o più componenti inquinanti:

- da una corrente **gassosa** utilizzando un solvente liquido (*assorbimento*)
- da una corrente **liquida** utilizzando una corrente gassosa (*stripping*)

Sono metodi molto utilizzati in campo industriale e civile e saranno oggetto di studio in questo corso



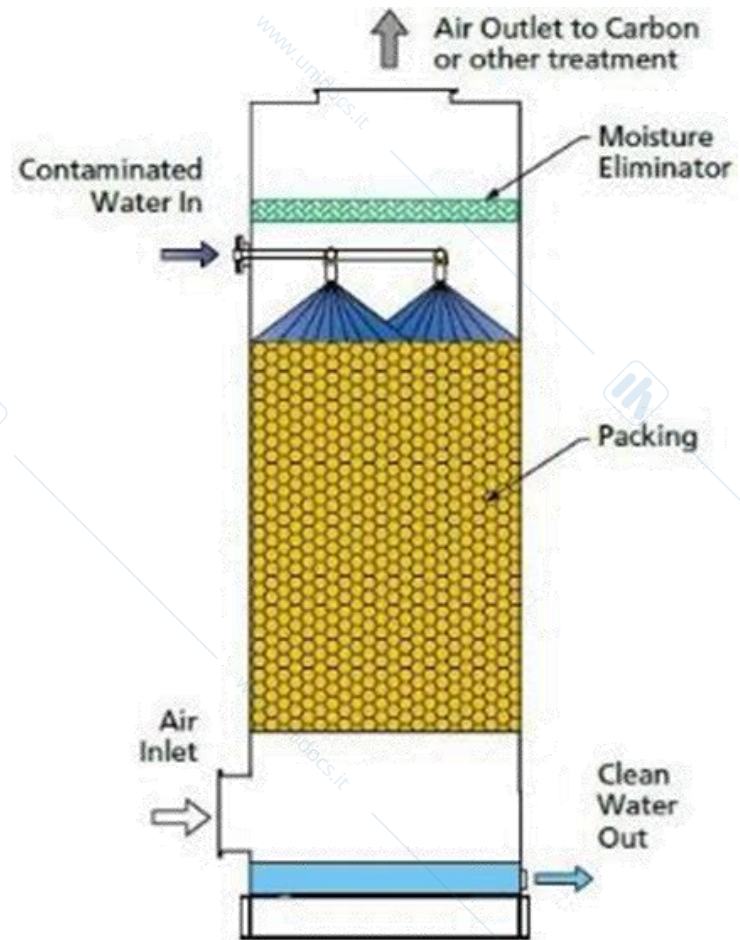
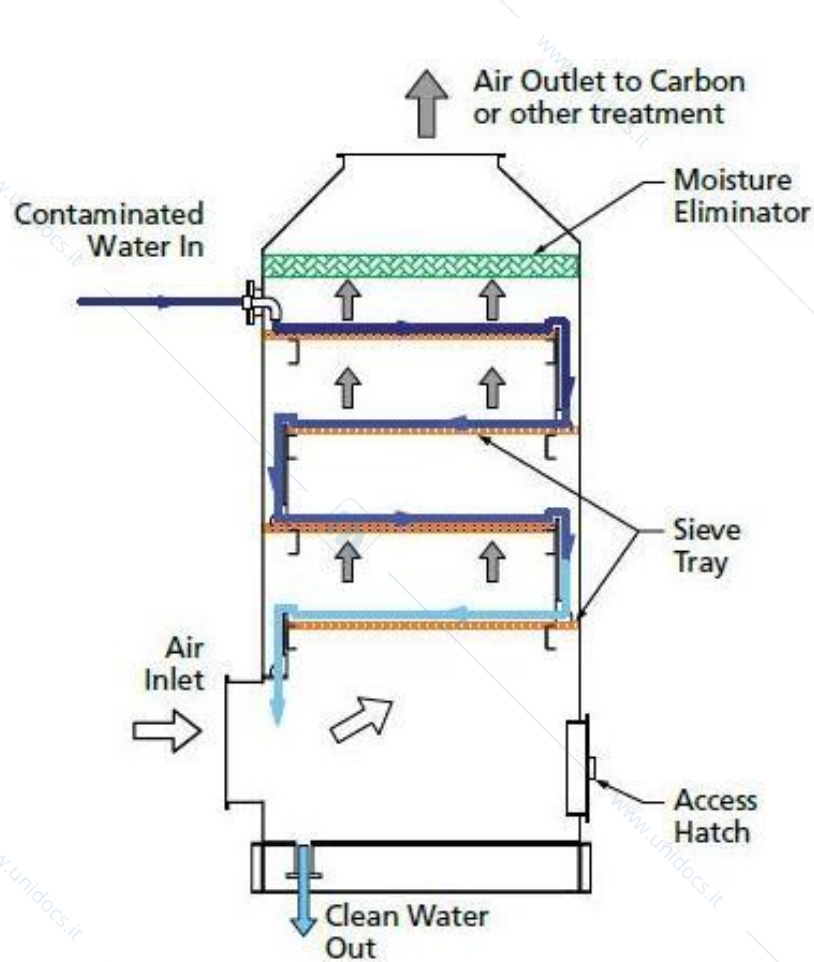
Assorbitori a piatti (tray column)



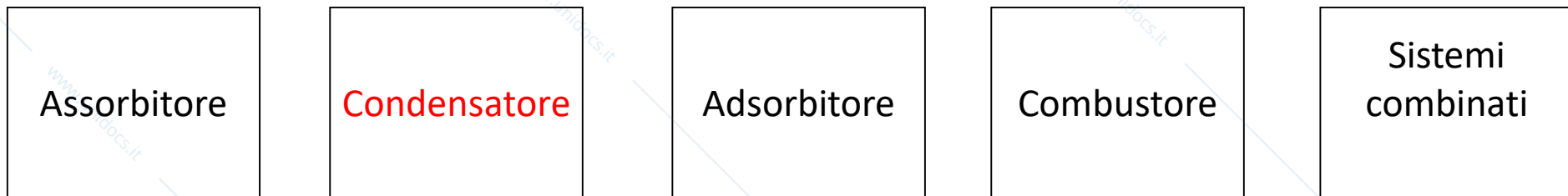
Assorbitori a colonna impaccata (packed column)

Le **spray towers** hanno efficienze di rimozione accettabili solo se i gas da rimuovere sono altamente solubili nel liquido (e.g. *acqua o acqua additivata*).

- ❑ In tale caso esse presentano una buona efficienza con un ragionevole consumo energetico e sono largamente usate.
- ❑ Poiché tali sistemi possono trattare grandi quantità di aria con bassa velocità sono usate in processi di *deodorizzazione* di aria proveniente da impianti industriali o per la prima desolforazione di scarichi.
- ❑ Migliori efficienze si possono ottenere generando spray più fini e maggiori quantità di liquido ma in tal caso il bilancio energetico è sfavorevole rispetto ad altri sistemi più compatti



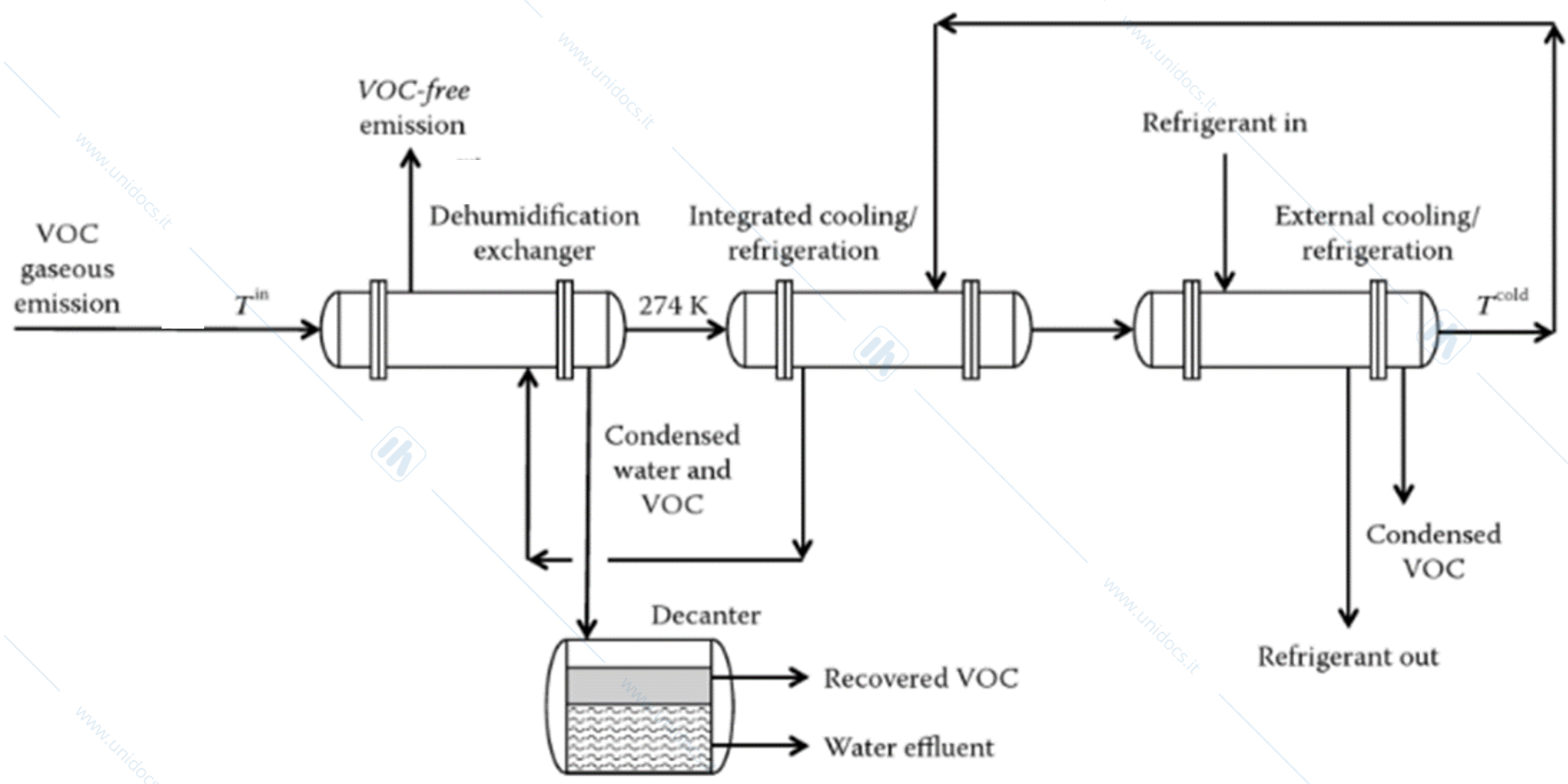
Stripping: è l'operazione inversa a quella dell'assorbimento



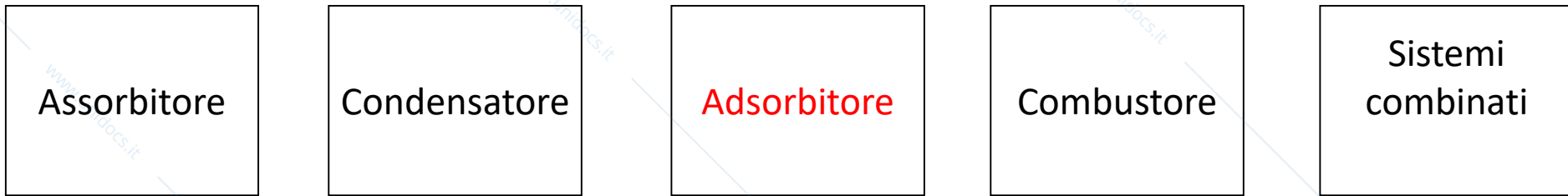
Rimozione selettiva di uno o più componenti da una corrente gassosa mediante **aumento della pressione o riduzione di temperatura** o la combinazione dei due processi

La condensazione come metodologia di purificazione riveste un ruolo molto importante nella rimozione dei composti organici volatici (VOCs) dai gas combustibili.

Tale processo consiste nel **semplice raffreddamento** del flusso di gas fino ad una temperatura tale che i composti organici raggiungono una **tensione di vapore** sufficientemente bassa e sua possibile raccogliarli sotto forma di condensato

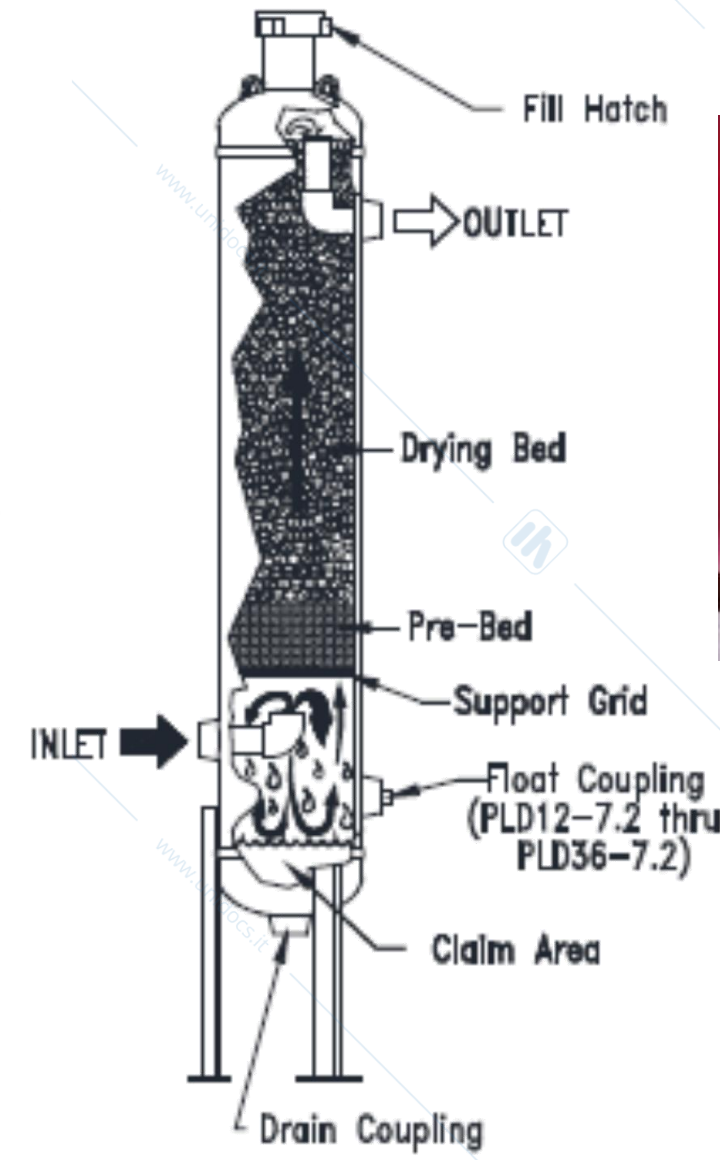


Condensazione



Rimozione selettiva di uno o più componenti da una corrente gassosa mediante contatto (adsorbimento) con una superficie solida

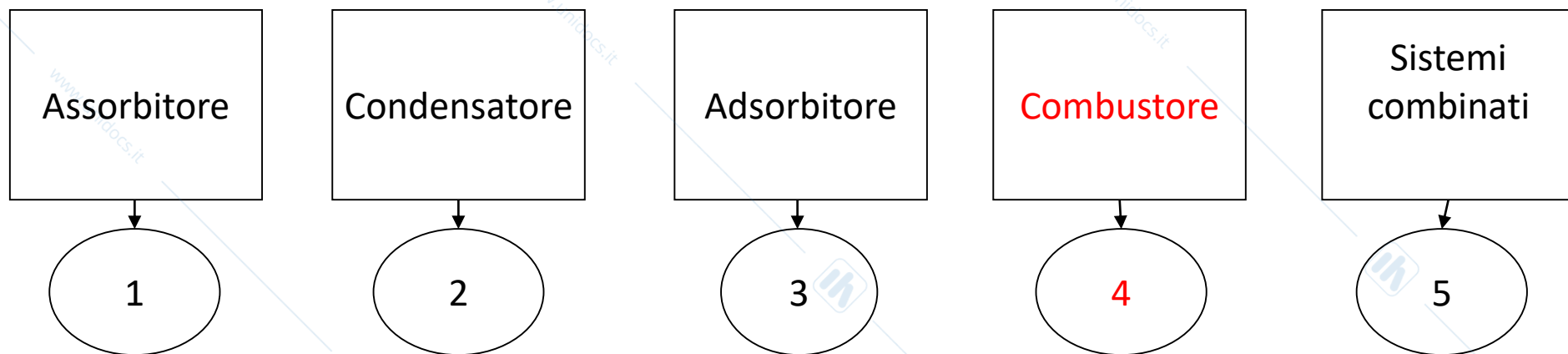
Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela



Natural gas dehydration plant - Silica Verfahrenstechnik GmbH

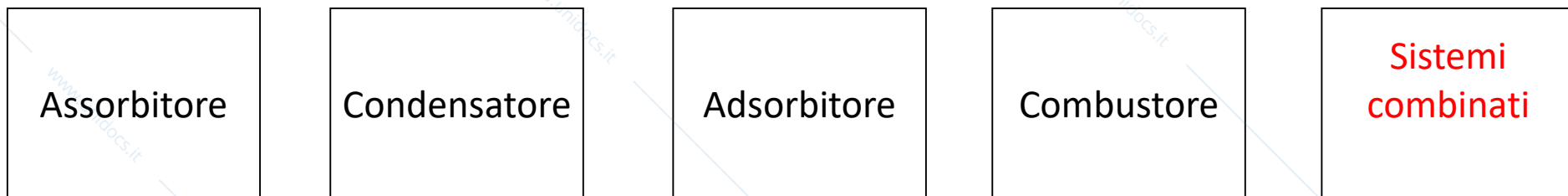
www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari

www.unidocs.it - Appunti e dispense per superare i tuoi esami universitari



Rimozione non selettiva di uno o più componenti da una corrente gassosa mediante ossidazione

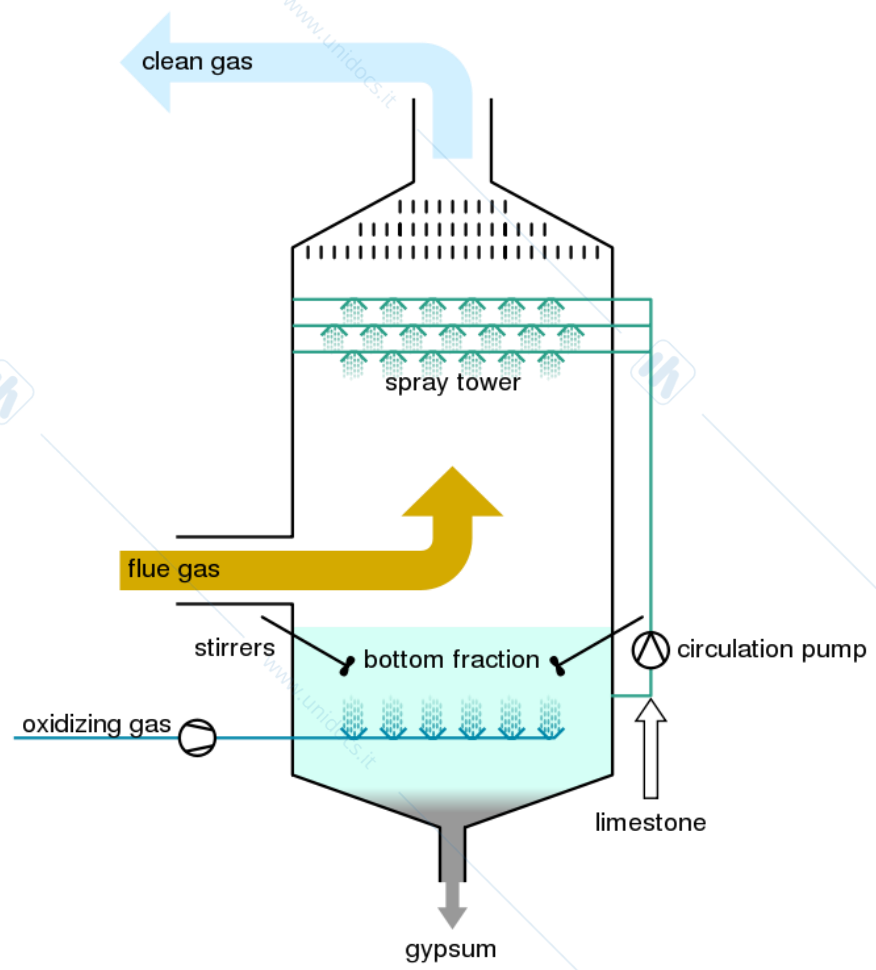
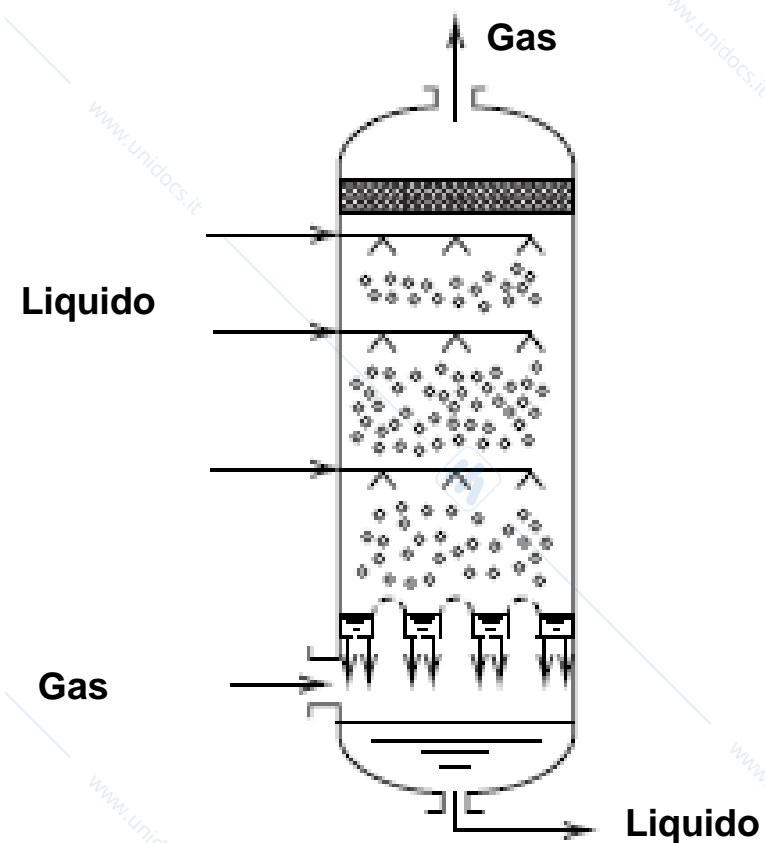
Post combustore: camera di combustione che contiene un bruciatore che pre-riscalda e mantiene la temperatura del flusso d'aria e di un catalizzatore che migliora efficienza e velocità di ossidazione



Es.: Spray dryer adsorber

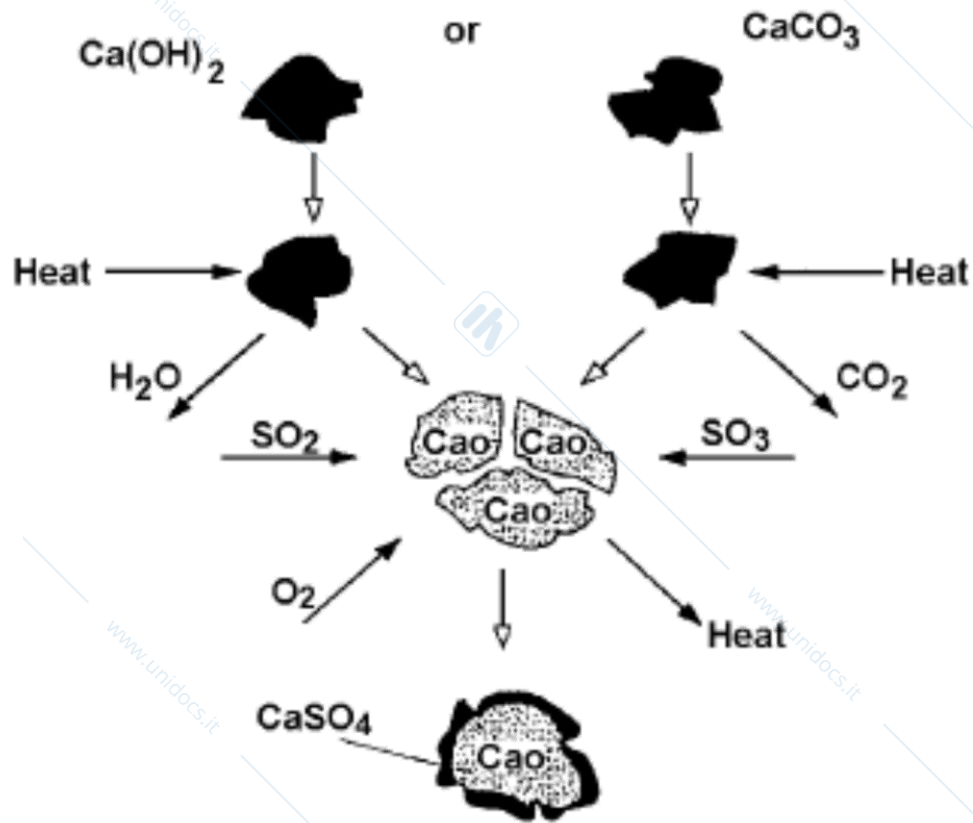
I gas da ripulire sono immessi in una colonna di adsorbimento/assorbimento dove vengono a contatto con una **sospensione finemente atomizzata** di miscele formate da **sorbenti solidi (alcalini o acidi) ed acqua (solvente)**, con elevate efficienze (80% di rimozione dei gas) .

Tali sistemi sono largamente utilizzati allo scarico di caldaie e inceneritori



Spray tower

Flue Gas Desulfurisation



Wet FGD

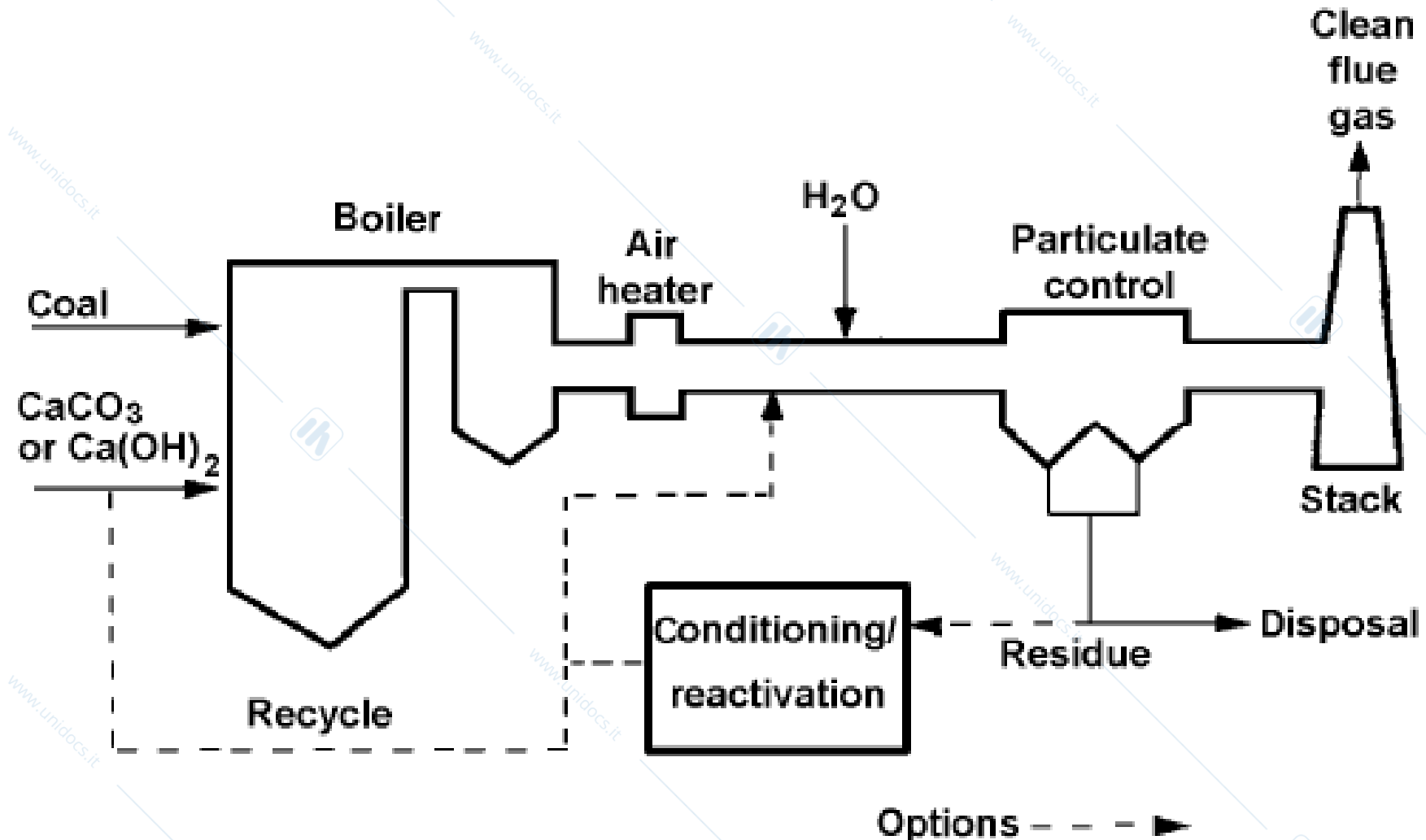
Limestone (CaCO_3), poco costoso, efficienze più basse

Dry FGD

Lime (CaO) facile da gestire, efficienze maggiori, costi elevate, generalmente usato per combustibili con bassi contenuti di zolfo

Wet FGD technologies (wet limestone) have become the state-of-the-art methods for achieving removal efficiencies in the 90 to 99% range
Dry FGD scrubbing (lime) is normally used for removal efficiencies ranging between 90 and 95%

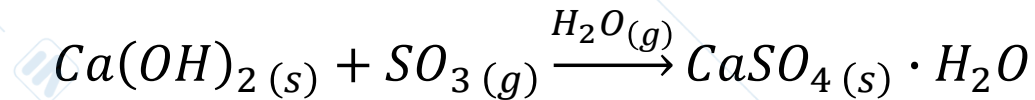
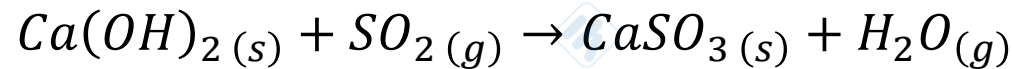
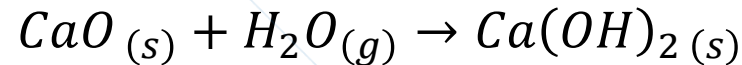
Processi di interesse che coinvolgono le separazioni di componenti in miscela



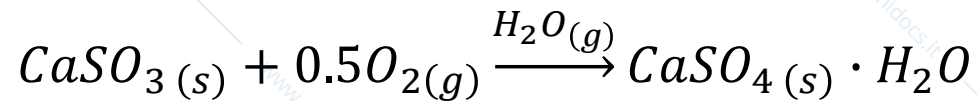
Il flue gas è inviato alla spray tower dove incontra uno slurry acquoso di limestone

Dry Flue Gas Desulfurisation basati su lime (calce) - LSD, Lime-Spray Drier

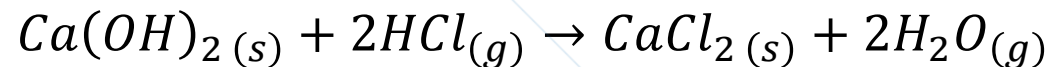
Formazione di idrossido di calcio da calce (lime, CaO)



Ossidazione e cristallizzazione (a gesso)



Reazione con acido cloridrico



Wet Flue Gas Desulfurisation basati su limestone (carbonato di calcio, CaCO_3)

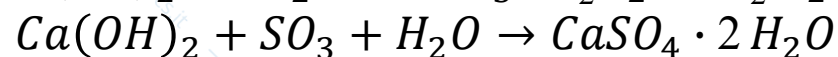
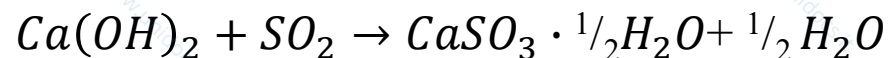
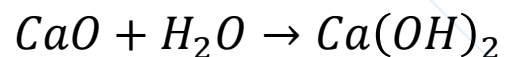
Formazione di ossido di calcio (calce) da

Limestone (CaCO_3)

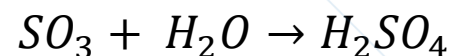
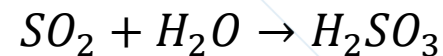


Segue come per LSD

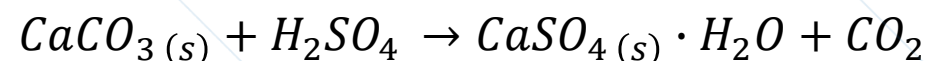
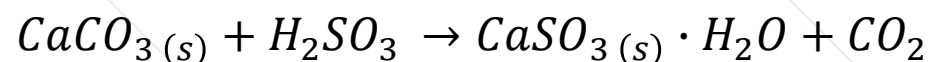
Formazione di idrossido di calcio



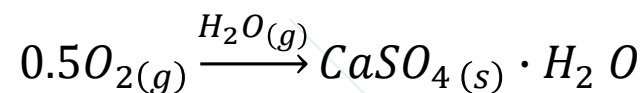
Assorbimento di anidride solforosa e solforica

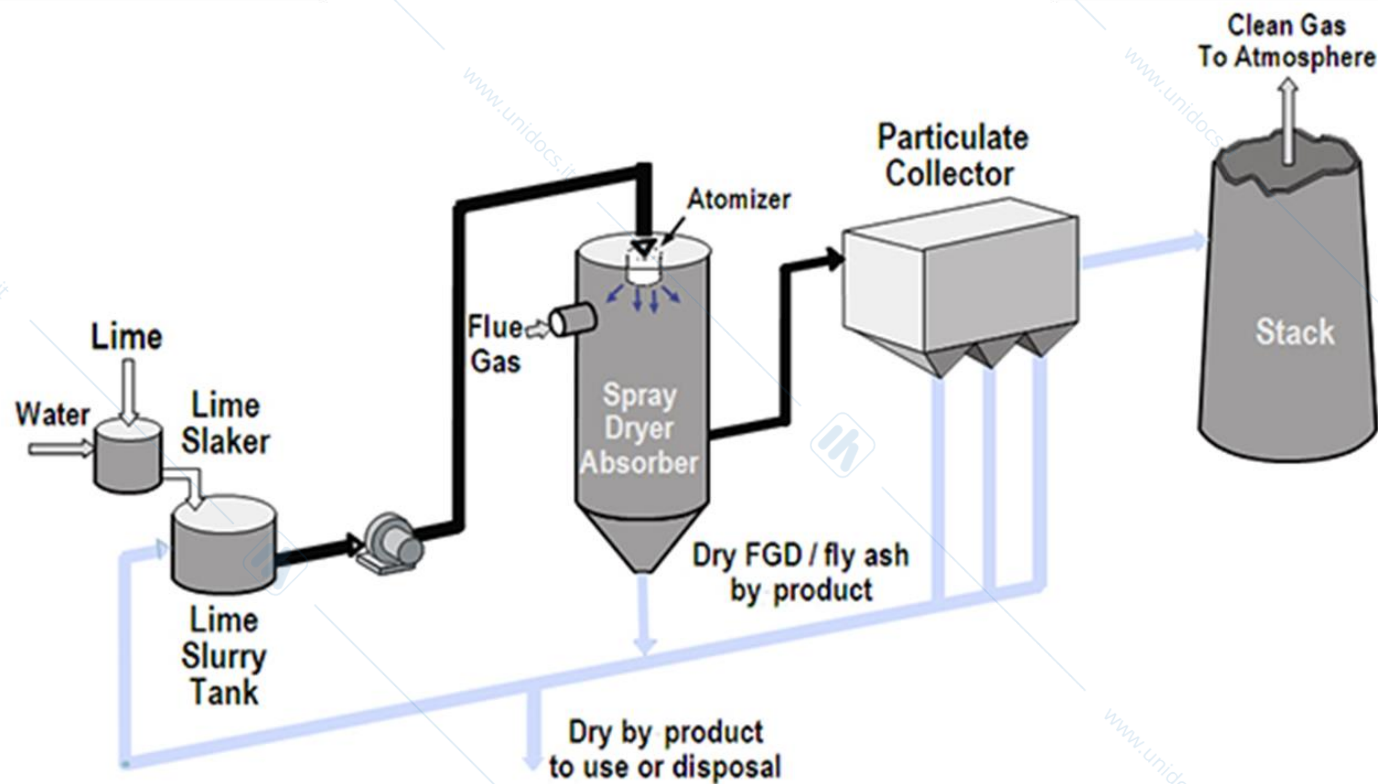


Neutralizzazione del carbonato di calcio



Ossidazione e cristallizzazione $\text{CaSO}_3 (s) +$





A valle dell'essiccatore un separatore, un **filtro**, o un **precipitatore elettrostatico** o un **ciclone** provvede ad eliminare dalla corrente i sali formati, eventuali ceneri contenute nella corrente gassosa inizialmente ed il sorbente che non ha reagito.