



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

NUMERO: 1510A -

ANNO: 2015

# **A P P U N T I**

STUDENTE: Nappo

MATERIA: Energetica e Fonti Rinnovabili + Eserc. Prof.Barbero-Fracastoro

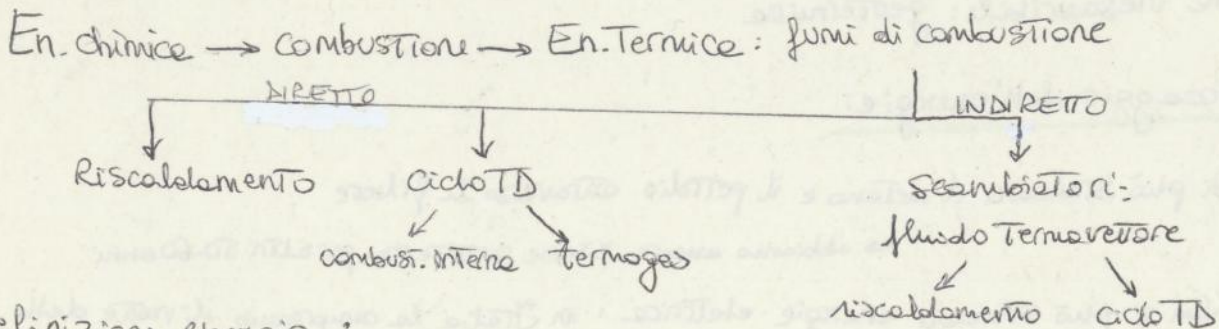
Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

# ENERGETICA : COMBUSTIBILI FOSSILI E BIOMASSE

Processo di conversione dell'energia:



## Definizione energia:

Def. meccanica: è la capacità di un corpo a compiere lavoro meccanico

Def. "filosofica"/termodinamica: è tutto quello che evolvendo alla fine si trasforma in energia termica e basse temperature

Per il I° della TD l'energia totale si conserva, ma per il II° decade in energia termica non utilizzabile.

## Tipi di energia:

- |                                    |             |
|------------------------------------|-------------|
| * CHIMICA                          | * ELETTRICA |
| * ELETTROMAGNETICA                 | * TERMICA   |
| * MECCANICA (cinetica, potenziali) | * ATOMICA   |

URANIO 235

- Fusione: problema di smaltimento degli impianti
- Fissione: problema di smaltimento delle scorie usando solo il 3% dell'uranio

• Energie PRIMARIA: Tipo termico e atomico, esiste naturalmente sul pianeta sotto forma di combustibili o a causa di fenomeni atmosferici. ↳ in serbatoi

• Energie SECONDARIA: Tipo elettrico, per trasmettere e distribuire in modo capillare l'energia. Non esistono giacimenti sul pianeta.

## Qualità dell'energia:

al 100%

L'energia è di alta qualità quando si trasforma completamente in un altro tipo di energia (es.  $E_g \rightarrow E_k$ ) e la riconversione è reversibile.

Tutti i tipi tranne quelle termica (irreversibile) sono di alta qualità

Le biomasse non producono CO<sub>2</sub> factor perché se si brucia della legna la CO<sub>2</sub> prodotta viene riassorbita da un nuovo albero.

BIOMASSE: basso impatto ambientale sulla CO<sub>2</sub>, ma costose lavorazioni

- ↳ lignose: residui forestali, pellet (tritato e ricompattato), cippato (pezzi da 5-6 cm)
- ↳ colture dedicate: sorgo, pioppo, canna comune (per il cippato)
- ↳ oli vegetali: soia, girasole → Spesso la lavorazione degli oli e del bioetandolo è costosa
- ↳ bioetandolo: da barbabietola o canna da zucchero } dispendioso che produce molto CO<sub>2</sub>

EFFETTO SERRA: aumento delle emissioni di CO<sub>2</sub>

### "La nuova Strategia Energetica Nazionale"

- ↳ crescita sostenibile economicamente
- ↳ riduzione del gap del costo del petrolio
- ↳ "20 20 20"
- ↳ migliorare la sicurezza di approvvigionamento

Shale gas: impregnato nelle argille impermeabili  
 Breaking oil: si rompe l'argilla o si prende il gas con altre sostanze chimiche nocive  
 ↳ sistema argilloso

---

Filiere: percorso da estrazione a consumazione (del combustibili)

## FILIERA DEL METANO

1. Bisogna fare in modo che il metano esca fuori per pressioni naturali (alte).
  2. Eliminare le sostanze solide presenti nel metano
  3. Problema del Trasporto:
    - ↳ gasdotti: trasportato allo stato di gas (9% energia), problema di costruzione
    - ↳ navi metaniere: si deve prima liquefare altrimenti occupa troppo spazio a 200 atm
- $T_{liq} = -160^{\circ}C$ ,  $n_2 \ll n_{O_2}$  (22% energia), problema di costi elevati più ulteriori trasporti via Terra per la distribuzione
- Pressione di distribuzione  $2000 Pe = p_{atm} + 2000$ , nelle aziende arriva a 50000 Pe

NO PROBLEMI DI COMBUSTIONE allo stato <sup>non brucia e non evapora</sup> liquido: avviene solo allo stato solido o gassoso (più facile perché le molecole si mescolano nell'aria)  
in parte evapora e brucia, il resto brucia da solido

Gas di città contengono più CO che si lega all'emoglobina → carbossiemoglobina che blocca la circolazione dell'ossigeno dai polmoni al sangue

5. Cherosene:  $T_{liq} = 150 \div 250^\circ C$ ,  $\#C = 12 \div 15C$

↳ combustibili liquido facile da trasportare

↳ USO: in motori e reazioni, in aeronautica con ciclo Joule

6. Nafta:  $T_{liq} = 70 \div 160^\circ C$ ,  $\#C = 8-10$

↳ materie prime per produrre materie plastiche

7. Benzine auto:  $T_{liq} = 20-70^\circ C$ ,  $\#C = 5-10$

↳ USO: combustibili liquido per piccoli aerei con motore alternativo e combustione interna, come smacchiatore

8. Gas raffinato:  $T_{usate} = 25^\circ C$ ,  $p = p_{amb}$

↳ USO: GPL; gas non sfruttabili scaricati dalle Torri e bruciato dalle Torce

GPL @  $p = 4-5 \text{ atm}$  liquido

### Qualità del petrolio:

Dipende dalle quantità di zolfo contenuto ( $SO_2, SO_3$  inquinanti)

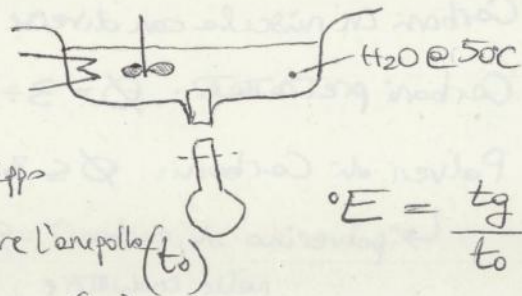
### Unità di misura della VISCOSITÀ

$^\circ E = \text{grado Engler}$

Quando  $H_2O$  raggiunge  $50^\circ C$  si apre il tappo

e si misura il tempo che impiega per riempire l'ampolla ( $t_0$ )

Si fa le stesse cose con il gasolio @  $50^\circ C$  ( $t_g$ )



Nafta si trova a  $3-5^\circ E$ ; se sta a  $120^\circ E$  si scaldi fino a raggiungere  $3^\circ E$

GPL:  $C_3H_8$  propano e  $C_4H_{10}$  butano non contengono zolfo → si deve odorificare per l'uso

$$\rho_{GPL} \cong 2-3 \text{ pair}$$

Trasporto GPL: Tubi in acciaio

NOTA - In caso di fughe di gas staccare il frigorifero e congelatore

# FILIERA DEL CARBONE (litrantraci)

Trasporto: Treni o navi carboniere (mezzi fisici)

- ↳ miniera → Treni/nave → Terminali di trasp. → treno
- ↳ Scarico: molto lungo e costoso con gru e benne, viene ammucchiato in pezzature grosse
- ↳ nastri trasportatori, a volte ricoperti da tubi per le polveri
- ↳ portato nei mulini dove viene bruciato o tutto insieme o in parte

Costi: basso per il carbone ma alto per il trasporto

Uso: industria chimica, generazione elettrica, metallurgia

## COMBUSTIONE

Fase 1) Pirolisi: sostanze contenute nelle parte solide passano alla fase aeriforme a 500°C (brucia in 5-7 secondi) → fiamme corte

Fase 2) Le parte solide si ossida (a strati con moto centripeto) → fiamme lunghe

Se il combustibile è LIQUIDO ha problemi a evaporare

La soluzione: i polverini si mischiano con l'aria e galleggiano, si scaldano subito e bruciano più velocemente liberando parte volatile

Problema: macinazione ha un costo energetico troppo alto;

le pezzature grosse ha bisogno di un sostegno in ghise per bruciare e molto tempo (circa 30min)

Soluzioni: pezzature di 1cm galleggiano nell'aria su uno strato di sabbie

↳ COMBUSTIONE A LETTO FLUIDO in meno del tempo

L'aria del ventilatore fa galleggiare la sabbie fredde;

accendendolo un bruciatore a metano letto di sabbie raggiunge gli 800°C;

↳ il carbone cade sul letto di sabbie e galleggia ad alte T,

↳ si mischia con O<sub>2</sub> generando la combustione COMPLETA (ottima)

## DISTILLAZIONE IN COKERIA

Carboncoke = carboni distillato solido (carbon fossile  $\xrightarrow{\text{distillat.}}$  coke)

Forni: costituiti di celle rivestite di mattoni refrattari silicei (all'interno)

↳ celle riscaldate da gas che bruciano negli intercapedini @ 1200-1400°C

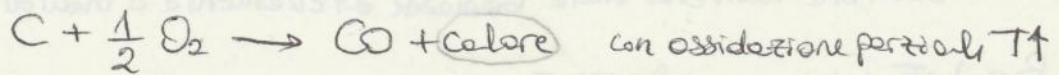
- Il carboni perde lo zolfo e le materie volatili → coke (30% C, 8% cenere, 1% S)
- Viene trasportato sotto una Torre di spegnimento che crea piogge d'acqua
- Una volta raffreddato viene frantumato in pezzature di 20-40mm

La distillazione è un processo anaerobico: non c'è O<sub>2</sub>

## GASSIFICAZIONE

\* **Secco**: produrre gas utilizzabili a scopi energetici o come materie prime per sintesi chimica → si fa reagire carbone con aria (o aria + vapore) per ottenere gas d'aria (o gas d'acqua)

Processo: calore necessario fornito da reazioni esotermiche:



Tutte ⇒ processi pirolitici: con separazione delle molecole di idrocarburi @ 300-500°C;

cracking con molecole più leggere; T1:  $C_n + H_2O \rightarrow H_2 + CO - \text{calore @ 1000°C}$

REAZIONE ENDOTERMICA

Gas prodotti + acqua:  $CO + H_2O \rightarrow H_2 + CO_2 + \text{calore}$

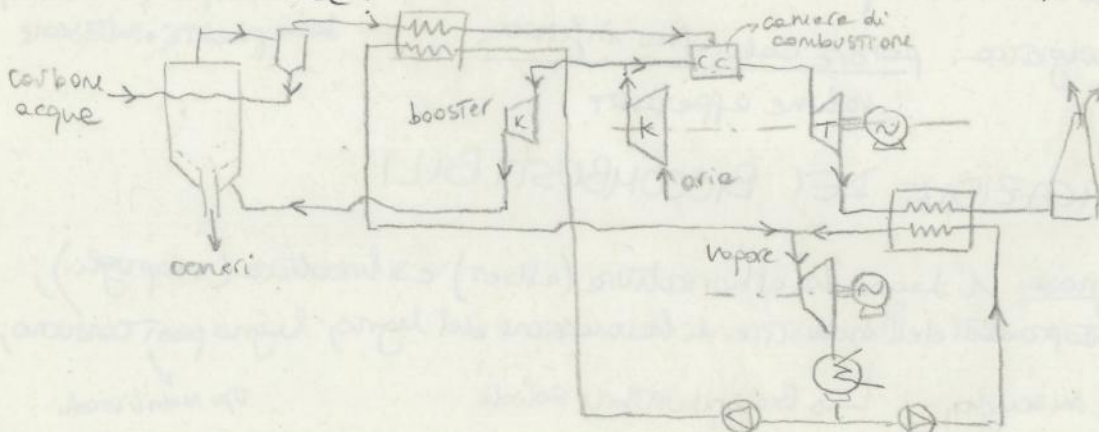
REAZIONE ESOTERMICA

Fine processo si ottengono syngas con molti inquinanti (combustione parziale)

Componenti attivi  
↳ Gas d'aria  
8% H<sub>2</sub>, 25% CO  
oppure usato in IGCC

Gas d'acqua  
50% H<sub>2</sub>, 30% CO

se viene depurato può essere bruciato in altri impianti o altre trasformaz.



Biomasse erbacee: 1 Da agricoltura e orticoltura; 2 Residui e sottoprodotti delle trasformazioni industriali di biomasse erbacee; 3 Miscela e miscugli  
 Lo muciono alla fine della stagione vegetativa

Biomasse da frutti e semi: 1 Frutti da frutticoltura e orticoltura; 2 Residui e sottoprodotti dell'industria di lavorazione dei frutti; 3 Miscela e miscugli

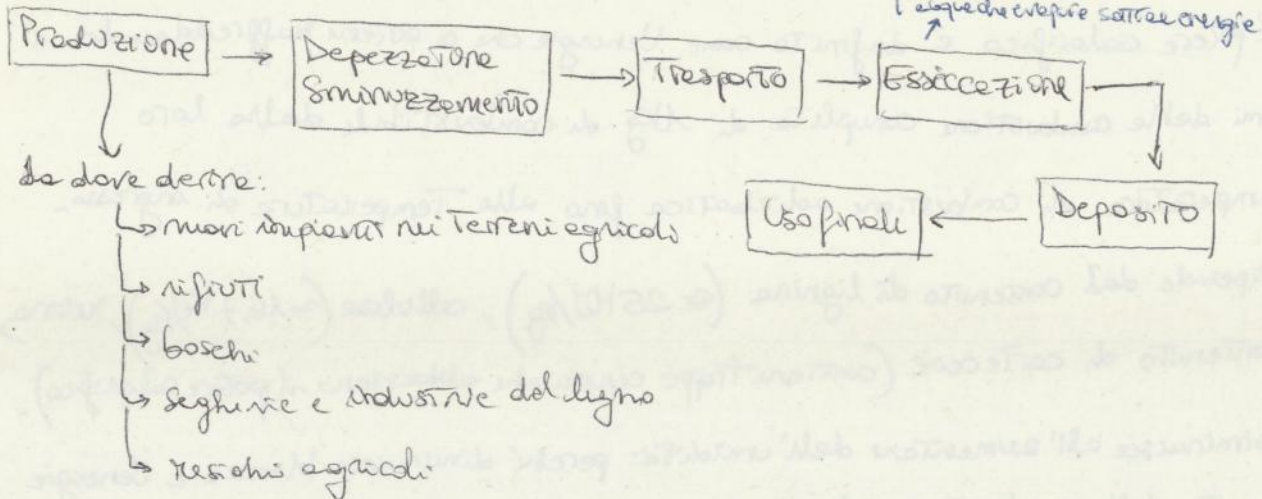
Oli vegetali: da semi/frutti di piante oleaginose, da residui mediante trattamenti meccanici e fisici con solventi chimici → **biocombustibili LIQUIDI**

Metano: biocombustibili gassosi

### VANTAGGI

- Sono una sorgente energetica che può sostituire parte dei combustibili fossili
- Sorgente rinnovabili con emissioni di CO<sub>2</sub> nulla (non considerando le lavorazioni)
- Utilizza i rifiuti solidi urbani e riduce l'impatto ambientale
- Minimo contenuto di S e bilancio compensato di O<sub>2</sub>
- Miglioramento delle condizioni microclimatiche e idrologiche, nel contesto socio-economico

### CICLO DI UTILIZZAZIONE



### Processo di COMBUSTIONE:

1. Essiccazione: si scalda la biomassa per far evaporare l'acqua (ENDOTERMICO)
2. Gassificazione: una parte del combustibile diventa aeriforme (PIROLISI) per via del cracking (ENDOTERMICHE)   
 scomposizione di gas infiammabili e vapori

↳ Ligna disidratata: 85% gas volatili; 14% carbon coke



# BIOETANOLO

- È alcol etilico prodotto dalla fermentazione delle biomasse (zuccheri, amidi) attraverso lavorazioni termicochimiche. Può derivare anche dalle cellulose.
- Spesso si fanno delle correzioni sul #ottani come per l'ETBE - Etil Terbutil Etere per ridurre l'emissione di gas combusto (etano).

NOTA: Il numero di ottano è un indice della resistenza alla detonazione.

Esempio. Quando brucia un fiammifero l'esplosione è meno forte che per delle dinamiti perché ha un numero di ottano maggiore.

- A volte si usa in forme pure "colato" o "alcolato" miscela di bioetanolo che riduce le emissioni di gas serra del 20-100%

+ Materie prime per la produzione:

- Canne da zucchero e granturco (US/Brazil), barbabietole da zucchero, frumento, orzo (UE); biomasse cellulosiche (legna, colture erbacee)

Accise sulle benzine: imposte sulle fabbricazioni e vendite di prodotti di consumo.

+ Utilizzo nei veicoli a motore:

- Motori ad accensione a candele ICE  $< E10$ ; miscele  $< E5$  "standard" benzine (ossigenate); miscele ad alte %  $\Rightarrow$  modifiche nei veicoli; E85 etanolo idratato, E10 miscele benzine-alcol; E25; E85; miscele comuni; veicoli flex-fuel (FFV)<sub>S</sub>.

## PRO

- migliore efficienza, #ottani
- carburante rinnovabile
- minor emissione di GHG su ciclo di vita
- FFVs offrono flessibilità
- opzione E-diesel per dual fuel

## CONTRO

- 50% minor contenuto energetico
- modifiche sul motore
- problemi di partenze a freddo
- corrosione elastomeri/gomma/metalli
- garanzie dei veicoli

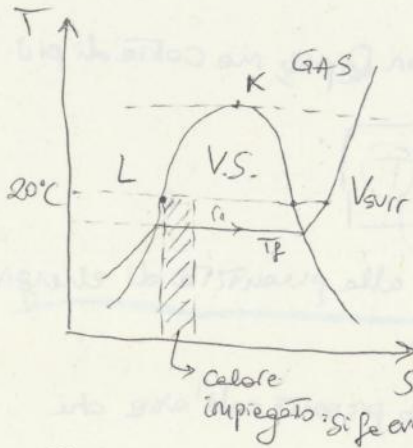
+ Aspetti economici

- Costi di produzione bioetanolo da frumento/barbabietole da zucchero (con accise)  
0,60€/litro  $\rightarrow$  0,50€/litro benzina equivalente (senza accise); 0,90€/litro benzina
- Costi di modifica dei veicoli: 500€ minimo
- Costi dei veicoli flex-fuel: largamente equivalenti

# PASSAGGIO DA ENERGIA CHIMICA A ENERGIA TERMICA

## Sostanze coinvolte nella combustione

**ACQUA** : usata quasi sempre come fluido termovettore



Si trascurano le parti solide che danneggiano gli impianti

$V_{surr}$  se si trova a  $T > T_{SAT}$  alle corrispondente  $P$  PARZIALE

$P_v = 0,01 \text{ PaTM} \Rightarrow T_{SAT}$  molto più basse

L'acqua ha una densità di  $1000 \text{ kg/m}^3$

(anche se dipende da  $T$ : tra  $0$  e  $80^\circ\text{C}$  l'acqua cambia del  $2\%$  di volume)

Quando l'acqua passa allo stato solido diminuisce la densità: in inverno si rischia di rompere i tubi se l'acqua gela.

NOTA - Tra tutte le sostanze che esistono sulla terra è quella che ha

Capacità Termica maggiore:  $1 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}} = 4,2 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$  mentre i prodotti

gassosi hanno  $c_p = 0,25 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}}$  e i combustibili liquidi  $c_p = 0,5 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}}$

$\rho$  alta  $\Rightarrow$   $N$  basse  $\Rightarrow$  lavoro di pompaggio  $L_f = \int_{V_1}^{V_2} N \frac{dp}{\rho}$  è molto minore

rispetto al pompaggio del gas/vapore.

Nella zona di transizione L-V non ha senso parlare di capacità termica,

si parla di calore di vaporizzazione ( $r_0 \approx 600$ ) variato lungo la curva.

Gli impianti che producono acqua liquida a più di  $100^\circ\text{C}$  si chiamano

IMPIANTI AD ACQUA SURRISCALDATA

a volte si chiama vapore anche il gas.



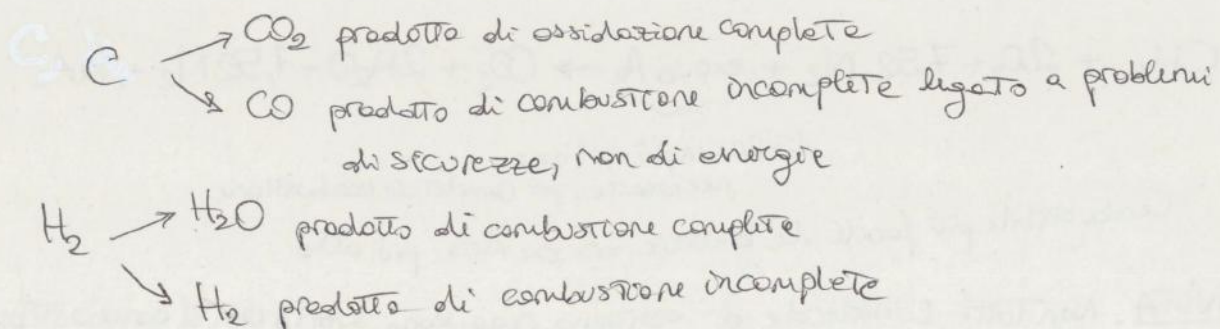
Un'esplosione di GPL è circa 3 volte maggiore rispetto a quella del metano.

## CHIMICA DELLA COMBUSTIONE

Comburente: aria, ma si considera l'O<sub>2</sub> perché N<sub>2</sub> non interviene.

Si ha la massima ossidazione delle molecole del combustibile e un rilascio di energie che va nei prodotti della combustione.

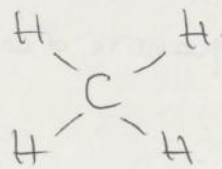
Molecole in ingresso: combustibili + comburente; ogni molecola che non è prodotta dalla combustione completa è un inquinante.



C<sub>n</sub>, C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>: idrocarburi che potrebbero bruciare ma non si ossidano

NOTA - non esistono composti liquidi!

METANO (CH<sub>4</sub>)

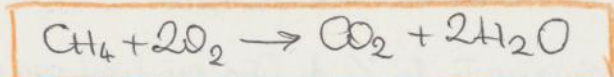


la molecola viene "smontata" e poi reagiscono gli atomi non legati =

le quantità di massa a SX deve essere uguale

alle quantità di massa a dx

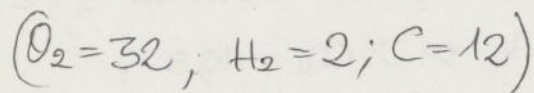
per la CONSERVAZIONE DELLA MASSA -



sic C che H<sub>2</sub> si sono ossidati: comb. completa

La reazione passa attraverso una serie di prodotti intermedi

Unità di misura delle masse molecolari: 1 Dalton =  $\frac{1}{12}$  massa molecolare del C



NOTA - Volumi uguali di masse diverse alle stesse condizioni di T, p contengono lo stesso numero di molecole - (1 m<sup>3</sup> di CH<sub>4</sub> ha lo stesso # di molecole di O<sub>2</sub>)

- 1 Kg molecola è una quantità di materia il cui peso espresso in Kili è numericamente uguale al peso molecolare: 1 Kg molecola di O<sub>2</sub> = 32 Kg  
1 Kg molecola di CO<sub>2</sub> = 44 Kg

L'energie perse dal camino:  $W_{cam} = m_f c_{pf} (T_f - T_a)$

$$W_{cam} = \dot{V}_{CH_4} \cdot \dot{V}_f \cdot \bar{c}_{p,f \text{ volumica}} (T_f - T_a)$$

volume fumi  $\rightarrow$  m<sup>3</sup> di fumi generati dalle combustione completa di 1 m<sup>3</sup> di CH<sub>4</sub>

NOTA - i fumi sono in volume e non in masse, volume dei fumi generati dell'unità di combust.

$$c_{p,f,m} = 0,26 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}}$$

$$c_{p,f,v} = 0,31 \frac{\text{Kcal}}{\text{m}^3^\circ\text{C}}$$

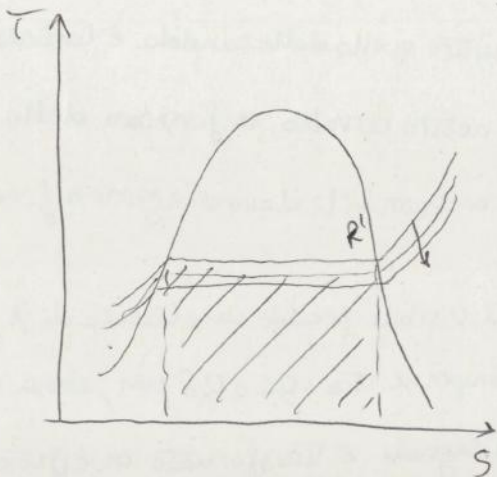
PERDITA:  $P_{cam} = \frac{W_{cam}}{\dot{V}_{CH_4} \cdot H_{CH_4}} = \frac{\dot{V}_{CH_4} \cdot v \cdot c_{p,f,v} (T_f - T_a)}{\dot{V}_{CH_4} \cdot H_C}$

si deve scendere a T minore possibile

energie inizialmente generate  $\leftarrow \dot{V}_{CH_4} \cdot H_{CH_4}$

Potenze da raggiungere = aria + metano + perdite

### CALDAIA A CONDENSAZIONE



I fumi sono a pamb, mentre il vapore d'acqua è a fcd del 20%.

Con la condensazione delle goccioline successive la prod diminuisce.

Con il metano il recupero di energie avviene gradualmente, ma non si recupera tutto il calore di condensazione  $\rightarrow$  dipende dalle Temperature di uscite dei fumi:

Le Temperature dipende dalla pressione parziale.

L'eccesso d'aria fa variare la % di acqua dei fumi:

minore è la %, più basse è la  $p_{SAT}$  e quindi anche la  $T_{sat}$

$\Rightarrow$  più basse è la  $T$  inizio condensazione e minore è il recupero

di energie.  $\Rightarrow$  si cerca di aumentare  $p$  per un maggior recupero.

NOTA - Quando si dice che l'energia Termica è emessa nell'IR in realtà si intende che è l'energia EM ad essere emessa in IR, poi assorbita e convertita in energia Termica -

La fiamma delle candele invece emette anche nel visibile in base alla T (rosso, giallo, bianco) ed ha corpi solidi all'interno (che si depositano quando lo si attraversa con un oggetto) - I gas invece emettono nel visibile solo se sono molecole Triatomiche come  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  -  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  non emettono.

### • Scambio Termico :

La fiamma luminosa ha un notevole scambio Termico per via delle capillarità intrinseche di emissione EM. Infatti lo scambio Termico avviene per irraggiamento,

o meglio per radiazioni EM assorbita e convertita - Quella non luminosa no -

Una fiamma senza particelle emette  $\epsilon = 0,005$  (rispetto a un corpo nero) mentre con delle particelle solide (l'emissione aumenta ad  $\epsilon = 0,015$  - Infatti nei forni conviene sempre una fiamma luminosa - Per rendere visibile il gasolio che entra nei forni lo si fa evaporare molto velocemente

## 2) LAMINARI O TURBOLENTE

Le fiamme piccole come quelle da cucina o dello scaldabagno sono laminari, mentre quelle industriali sono turbolente -

Differenze - Una fiamma turbolenta brucia 3 volte più velocemente di una laminare, ossia c'è un rapporto 1:3

## 3) PREMISCELATE, PARZIALMENTE PREMISCELATE, DI DIFFUSIONE

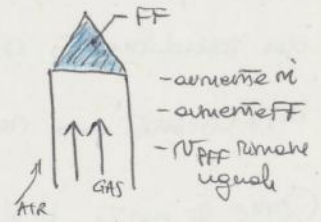
• Referito a quando il comburente e il combustibile entrano in contatto :

- Premiscelati se sono mischiati prima della fiamma
- Parzialmente premiscelate se una parte d'aria è mischiata prima e un'altra dopo
- Di diffusione se sono mischiati dopo

## REGIME LAMINARE

Si raggiunge il punto di equilibrio quando  $N_{PFF} = N_{flusso}$

Supponiamo di aumentare  $n_{gas}$ : la fiamma si allunga aumentando la superficie del fronte di fiamma, ossia il tempo in cui brucia le masse è più veloce MA c'è un punto in cui la fiamma arriva al limite → INSTABILITÀ



1) La fiamma non riesce a bruciare: il FF si apre e poi si spegne: avviene uno strappamento laterale che fa staccare la fiamma quando la portata è troppa rispetto alla  $N_{PFF}$   
 ↳ soluzione: limitare  $n_{comb}$  (in cucina si gira la manopola)



Può succedere però che si abbasse troppa la portata  $n_{gas}$ , tanto da avere la velocità minore di quella di PFF:  $N_{gas} < N_{PFF}$ . La fiamma ridee più velocemente dell'aria e si ha il FENOMENO DEL RITORNO DI FIAMMA, cioè quando l'aria si mescola prima con il combustibile.

Un'altra soluzione è quella dell'EFFETTO QUENCHING: la fiamma non possono passare da fori troppo piccoli perché le portate si raffredderebbe sotto la  $T_{accens}$ , quando è a contatto con il bordo del bruciatore freddo.

Le fiamme si eroga attraverso piccoli fori da cui non può passare.

Più diminuiscono  $n_{gas}$  e prima si stabilizza il FF, ma c'è un punto in cui la fiamma non riesce più a tornare indietro e si spegne continuando però a far uscire gas.

### DISTANZA DI QUENCHING

Si diminuisce il diametro del tubo finché la fiamma non riesce più a propagarsi in giù.

Il diametro massimo per cui non si ha il ritorno di fiamma si chiama DISTANZA DI SPERIMENTAZIONE.



# SISTEMA DI CONTROLLO DI FIAMMA

- \* Con FOTORESISTENZE sensibili alle radiazioni emesse nel visibile (rosso)
  - ↳ si usano per fiamme luminose industriali; piuttosto economiche
- \* Con FOTOCELLE sensibili alle  $\lambda = 0,2 \mu\text{m}$  (UV)
  - ↳ si usano anche per fiamme non luminose; molto care e si esauriscono subito
  - ↳ problema: se la fiamma non c'è, non ci sono radiazioni né UV né ROSSO
- \* Con ELETTRODI A IONIZZAZIONE

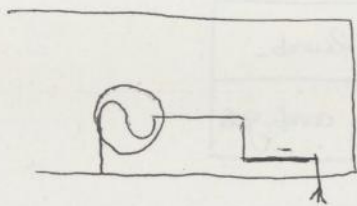
↳ funzionano sempre se la fiamma è accesa o spenta; sentono i gas ionizzati

Ad esempio in cucina ci sono due cilindretti: uno è il sistema di accensione e l'altro è una termocoppie che si scalda quando c'è la fiamma; infatti per accendere i fornelli bisogna tenere premuto per qualche secondo -

Per qualsiasi sistema si ha la fiamma solo se il segnale è  $\oplus$ , altrimenti non c'è fiamma con segnale  $\ominus$  o assente -

## Elettrodo a ionizzazione -

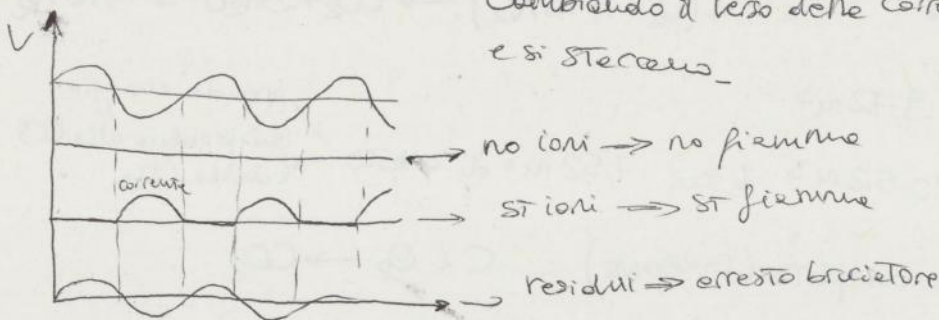
↳ sono usati nei bruciatori a combustibili gassosi (bruciatore = lamiera con ampia superficie)



Il sistema è alimentato a corrente alternata -

Gli elettroni sono attratti dagli ioni positivi sulle lamiere dove sbattono e conducono corrente -

Cambiando il verso della corrente gli ioni si attraggono e si staccano -



Se si depositano delle particelle in grado di condurre corrente si crea circuito -



SISTEMI DI COMBUSTIONE CONTINUA, sistemi in cui le fiamme e sempre accese.

Alcuni impianti hanno i fumi di scarico Troppo caldi - Per non sprecare l'energia termica si può mettere uno scambiatore all'uscita di fumi - L'aria e il combustibile sono gestiti dall'utenze in modo proporzionale.

- Preparazione del combustibile prima di immetterlo nelle camere di combustione: si deve nebulizzare e preriscaldare per diminuire la viscosità a 3°C.

Non si devono far uscire gli incombusti in numero eccessivo (limite previsto dalla legge) e si devono scaricare all'esterno tramite camini nudo altri.

- Preriscaldamento dell'aria in uno scambiatore di calore  
↳ raffredda i fumi e migliora la combustione aumentando  $T_{air}$ .

- Bruciatori: unica apparecchiature o sparse, con griglie o letto fluido

↳ regolano la portata del combustibile

↳ preriscaldamento, nebulizzazione e premiscelazione

↳ verifica la stabilità, la sicurezza delle fiamme (se fa le punte gialle emette particelle solide)

Ogni bruciatore è correlato alla camera di combustione <sup>C.C.</sup> corrispondente, importante dal punto di vista dello scambio termico e delle forme.

Il combustibile dopo la C.C. va nei giri di forno dove avviene lo scambio termico, poi vengono trattati i fumi per diminuire la quantità di particelle solide e incombusti con dei depuratori (prima dei camini).

## BRUCIATORI

La parte finale (Teste) serve a far entrare combustibile e comburente con le giuste quantità e situazione fluidodinamica (si può mettere un ugello prima). Differiscono per tipo di combustibile e sistema di alimentazione dell'aria con un ventilatore.

Prima dell'ugello si mette un filtro per depurare la miscela -

Si forma una nebbia di combustibile con l'aria  
gire in un senso -



L'apertura del getto è a 45° abbinato alle  
camere di combustione -

Se il funzionamento è stazionario gli UGELLI sono a portata costante  
[con regolazione di portata ON/OFF per piccoli impianti (più semplice, ma meno  
efficiente) mentre nei grossi impianti ci sono dispositivi più complessi -]

BRUCIATORI per combustibili liquidi e gassosi -

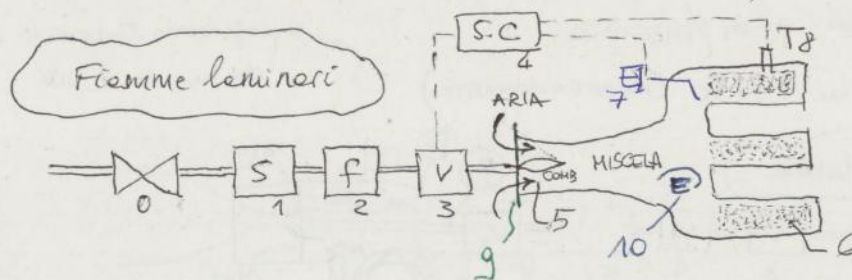
Caratteristiche principali:

- \* Alimentazione: combustibile/aria
- \* Regolazione: combustibile/aria
- \* Preparazione: combustibile (se necessario)
- \* Accensione fiamme
- \* Sicurezza
- \* Ottimizzazione combustibile
- \* Gestione avviamento combustione

BRUCIATORI AD ARIA PREMISCELATA

Combustibile gassoso: ARIA ASPIRATA

- Potenze: dai 100W ai 50KW (usati nelle cucine)



0: valvola di apertura

- 1: Valvola ON/OFF fuori dal locale in modo che non si coinvolge l'interno in caso di incendio
- 2,3: Filtro e Stabilizzatore di pressione obbligatori per legge
- 4: Valvola di chiusura/apertura (ON/OFF) automatica
- 5: nei sistemi grandi si usa un sistema di controllo (facoltativo) per controllare la pressione quando le valvole sono spente → pressostato
- 6: 2a valvola di regolazione automatica, obbligatoria per legge, fa passare la quantità che serve
- 7: Elettrodi collegati a un trasformatore che innescano la accensione
- 8: Motore elettrico fa girare il ventilatore e la gabbia di scorie e ce ne sono 2 per motivi di sicurezza: sono valvole del gas ad aperture a sistema pieno: se c'è un pezzo di ruggine la valvola non tiene chiuso.
- 10: Serranda di ingresso dell'aria con regolazione manuale o automatica
- 11: Elettrodi a ionizzazione
- 12: Disco deflettore; 13: carcasse

NOTA - Il bruciatore non fa variare la pressione del gas; la pressione è quella di rete.

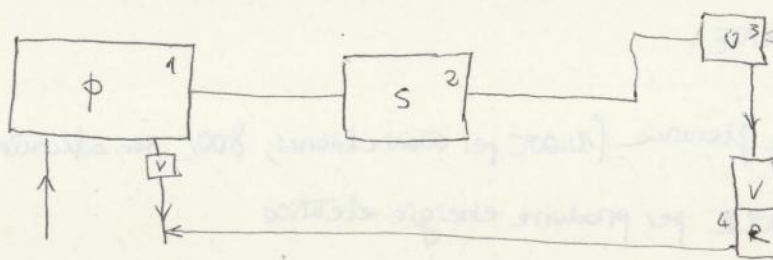
- \* Alimentazione combustibili: pressione di rete → non si può aumentare Pgas
  - \* Alimentazione aria: motore e ventilazione
  - \* Regolazione combustibili:  $V_1, V_2$  + segnali di pressione o temperatura dettate dall'utente
  - \* Accensione di fiamma: elettrodi di accensione legati al trasformatore
  - \* Stabilizzatore: disco deflettore manda indietro i fumi a 500-600°C
  - \* Sicurezza: EI - elettrodi a ionizzazione messi dove c'è già la fiamma (per capire se c'è);
  - \* Se la pressione scende il bruciatore non funziona bene e il pressostato lo fa arrestare per non lavorare a basse efficienze: **STAND BY** - Quando  $p$  ritorna alla giusta pressione il bruciatore riprende a funzionare.
- Può succedere che nell'ambiente del ventilatore entrino dei pezzi di carta/stoffe che possono inceppare il motore. Il pressostato dell'aria trova p basse e spegne il bruciatore: **ARRESTO** - la regolazione della serranda è o manuale o automatica.
- \* **CICLO DI AVVIAMENTO**: quando parte il ventilatore viene immessa aria pulita per 20-60 secondi (in base alle dimensioni del bruciatore) per togliere i residui di  $H_2$  e  $CO$  del bruciatore che possono innescare la combustione.

# BRUCIATORE PER OLI COMBUSTIBILI Combustibile liquido

Per il gasolio c'è una pompa che lo preleva per nebulizzarlo nell'ugello, gli oli combustibili hanno invece una viscosità molto più elevata = gasolio  $\approx 1^\circ E$ , oli  $\approx 3E - 100^\circ E$ .

Per questo motivo bisogna prima scaldarlo per diminuire la viscosità fino a  $3^\circ E$ .

Per aumentare la temperatura si usa un preriscaldatore oppure dei dispositivi termici a ultrasuoni per rendere gli oli pompabili. Si deve riscaldare in proporzione al grado Engler del combustibile, senza però correre il rischio che evaporino generando combustione instabile data dal liq + vap. Il preriscaldatore può essere fatto con uno scambiatore come il boiler - resistenze elettriche - e del vapore.



1. Pompe a pressioni più elevate per fare arrivare il fluido all'ugello  
 $P = 20 - 30 \text{ bar}$

2. Scambiatore di calore per il preriscaldamento

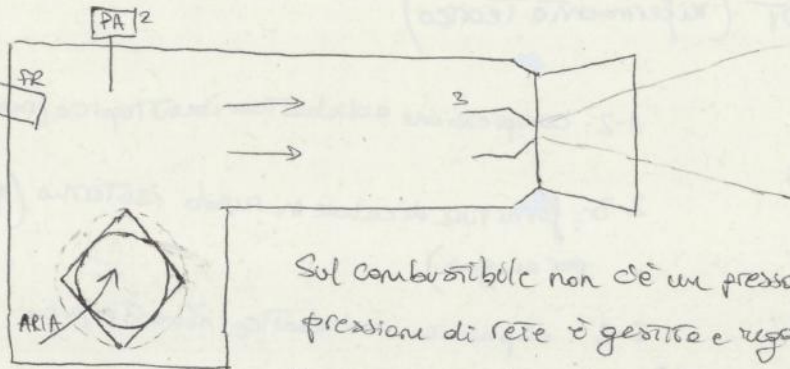
4 Valvole di regolazione delle portate. Nei grossi impianti non si usa reg. ON/OFF altrimenti si hanno troppe perdite dovute alla portata in

variabile degli ugelli (si mettono dei condotti che arrivano fino alle valvole).

Se la valvola è chiusa si ha il 100% di portata, mentre se è aperta fa il 40%;

mentre negli impianti più grandi la pompa  $P$  diventa a portata variabile.

Non c'è E.I. si usa FR 1 per non mandare in avaria il sistema



1 Fotoresistenze  
 2 Pressostato aria  
 3 Termocoppie

Sul combustibile non c'è un pressostato perché le pressioni di rete è gestite e regolate dalle pompe. Si deve controllare la pressione dell'aria per regolare in

↳ altrimenti il sistema si blocca

1° principio:  $L = Q_1 - Q_2$     2° principio:  $ds = \frac{dq}{T}$

$\int dq = \int T ds \Rightarrow Q = T \Delta S$  area compreso tra le rette

Lavoro = area del rettangolo

$\eta = \frac{L}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$

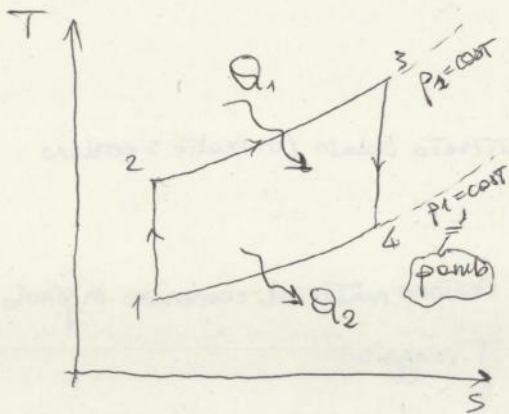
Per avere  $\eta$  più grande possibile  $T_1 \rightarrow 0K$  non si riesce a realizzarsi soprattutto perché si usano aria e acqua per raffreddare e non si riescono a portare a 0K; oppure

$T_2 \rightarrow \infty$  ma non si può aumentare troppo  $T$  altrimenti le pale delle turbine;

Esistono: motori tecnologici di compatibilità empiristica (resistenze ad alte temperature dei materiali).  $\Rightarrow \eta_{MAX} \approx 30-40\%$  (alzando  $T_1$ )

Pur non essendo eseguibile, il ciclo di Carnot è un buon riferimento.

### CICLO JOULE IDEALE



$\eta = 1 - \frac{T_2^*}{T_1^*} \approx 38\%$

$T^*$ :  $T$  medie delle temperature alla quale viene fornito (ceduto) calore

Per aumentare  $\eta$  bisognerebbe andare il più su possibile e scendere il più possibile, ma

non si può superare una  $T$  incompatibile con i materiali che formano le pale delle turbine; né si può scendere oltre perché lo scarico di  $Q_2$  avviene a  $p_{amb}$ .  $T_4$  con cui esce il fluido è circa di  $400^\circ C \Rightarrow$  bisogna recuperare il calore senza buttare energia: scaldando aria o nelATERISCALDAMENTO o per riscaldare un impianto. Le pale delle turbine sono estremamente delicate e non si possono usare dei gas sporchi (se no vanno a rovinare)

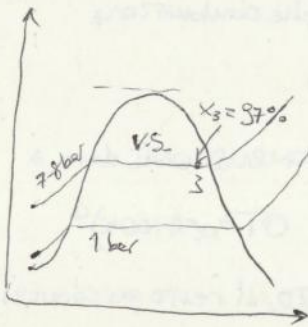
$\rightarrow$  si deve usare gas naturale o cherosene per dupianto di aerei dove

NOTA: Sulle pale delle turbine, vicino l'attacco, si fanno sempre dei forellini da dove esce aria fredda o  $N_2$  per raffreddarle. L'unico gas utilizzabile con le turbine è il gas naturale perché nella combustione non ci sono incombusti solidi ma è pulito.

Se le turbine girano con un fluido sporco si rompono.

L'utenze detta le regole in termini di potenze e di pressione secondo i LIMITI legati ai materiali.

- Descrizione degli IMPIANTI che trasferiscono energie termica dei fumi al fluido termovettore fornito all'utenze sottoforma di liquido grazie alle CALDAIE



Definizione di CALDAIA:

Acque liquide a  $T < 100^\circ C$  e  $1 < p_{ass} < \dots$

$p_2$  dovuta a motivi idrostatici; prova che  $H_2O$  cambia fase

@  $p = 1 \text{ atm}$

### IMPIANTI

- \* Caldaie a  $H_2O$  liq.  $T < 100^\circ C$ ,  $p = 1 \div (\dots)$

Utenze: civile, poco industriali

- \* Caldaie a  $H_2O$  surriscaldato  $T > 100^\circ C$  (di solito  $T < 180^\circ C$ ),  $p = 12 \div 7.8 \text{ atm}$

per motivi costruttivi dell'impianto

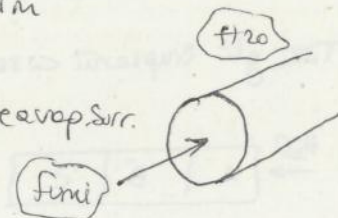
Utenze: industriali, poco civile (per mandare acqua e riscaldamento in città)

- \* Generatori di vapore e vapor saturo  $p = 1, 1 \div 7.8 \text{ atm}$

detti GEN. DI VAPORE A TUBI DI FUMO

dal punto di vista costruttivo sono uguali alle caldaie evap. sarr.

Utenze: impianti termoelettrici (ciclo Rankine)



- \* Generatori di vapore <sup>a vapore</sup> surriscaldato  $p = 30-250 \text{ bar}$   $T < 560^\circ C$

con  $T_1^*$  maggiore  $\Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1^*}$  maggiore

Impianti molto delicati  $\rightarrow$  molto costosi

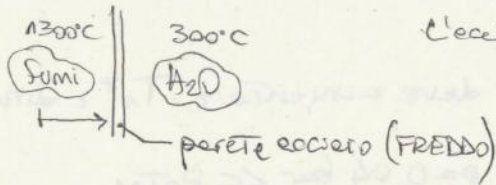
Utenze: cicli termodinamici

detti GEN. DI VAPORE A TUBI D'ACQUA



- A) L'acqua liquida  $\Rightarrow$  brutto scambio termico  $(h_{AD}) = 2000 \text{ W/m}^2\text{K}$
- B) Nelle transizioni di fase  $h_B$  migliore notevolmente  $= h_B = 10 \text{ kW/m}^2\text{K}$   
 $\hookrightarrow$  EBOLLIZIONE A NUCLEI  $\hookrightarrow$  grazie al calore latente
- C) La fase aeriforme ha un bassissimo scambio termico  $h_C = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$

Esempio



L'eccesso non può superare una certa  $T$  altrimenti fonde e fa esplodere il tubo  $\Rightarrow$  si usano acciai INOX e superleghe

$$\Phi_1 = h_1 S \cdot \Delta T_1 \left| \begin{array}{l} \text{parete} \\ \text{forni} \end{array} \right.$$

$$\Phi_2 = h_2 S \cdot \Delta T_2 \left| \begin{array}{l} \text{acqua} \\ \text{parete} \end{array} \right.$$

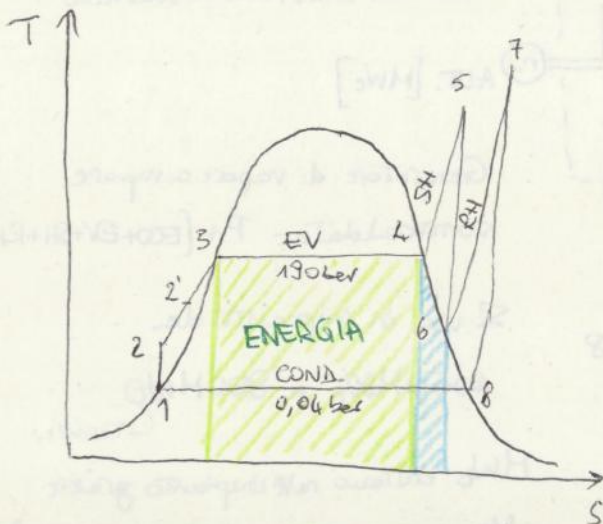
$$\Phi_1 = \Phi_2$$

$$h_1 \Delta T_1 = h_2 \Delta T_2$$

es.  $100 \cdot 100 = 10000 \times 1$

Bisogna tenere conto delle temperature e cui si trova la parete altrimenti i tubi esplodono!

GENERATORE DI VAPORE A VAPORE SURRISCALDATO O A TUBI D'ACQUA



CICLO RANKINE-HIRN

- 1-2: pompa fino a 190 bar (\*)
- 2-3:  $\text{H}_2\text{O}$  liq scaldate (A)
- 3-4: cambia fase (B)
- 4-5: surriscaldamento del vapore per passare dalle  $T$  di cambio fase a  $T$  maggiore
- 5-6: adiabatica isentrope in Turbine di AP, il fluido si espande

6-7: risurriscaldamento a  $p$  più alte per fornire energia termica al vapore e alzare la  $T_1^*$  del rendimento.

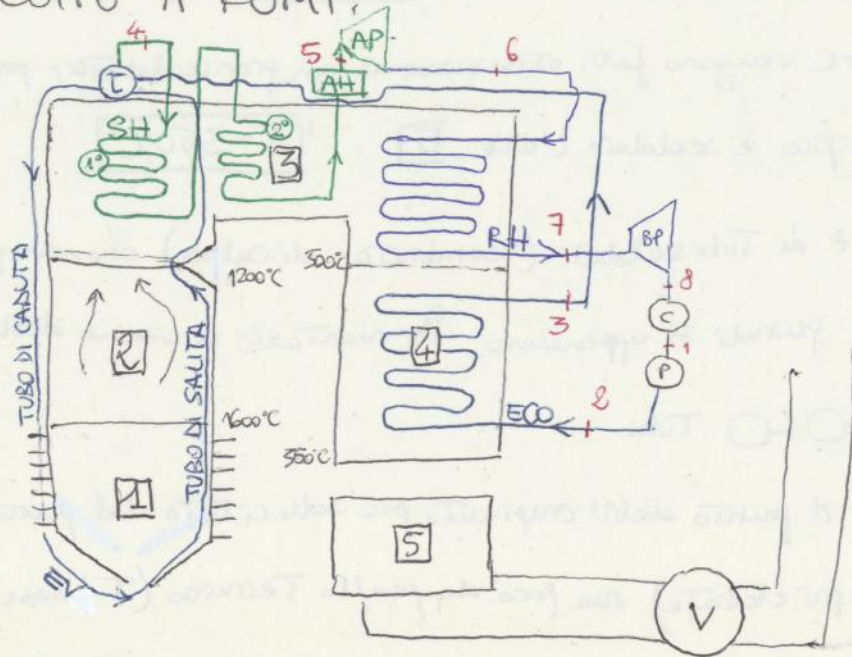
7-8: espansione nelle Turbine di BP fino alla curva limite inferiore

8-1: condensazione isobara-isterna, sottraendo energia termica al cond. per raffreddarlo con acque di fiume o mare ( $T_{\text{cond}} \text{ basse legate a } T_{\text{amb}} = 25^\circ\text{C} \text{ o } T_{\text{H}_2\text{O}} = 35^\circ\text{C}$ )

$\Rightarrow p$  bassa in FORTE DEPRESSIONE  $p = 0,04 \text{ atm}$ .

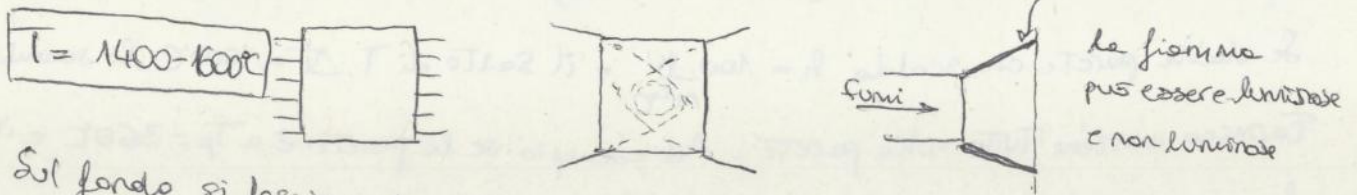
(\*) Se c'è la RIGENERAZIONE TERMICA invece di entrare a  $T$  ambiente entra a  $T$  maggiore ( $T_{21}$ ) e viene e scaldate da 2' e 3.

# CIRCUITO A FUMI:



L'impianto si appende su una struttura metallica in Travi di eccelleo per essere lasciato libero di allungersi e accorcersi (quasi di 1,5m) quando si riscalda o si raffredda. L'eccelleo ha una buona resistenza a trazione e non a compressione come il cemento armato. Alto circa 50-80m.

**1** 10-15 bruciatori disposti lateralmente o sugli spigoli e 4 per aumentare la turbolenza. Sulle parte finale c'è un cono di materiale refrattario



Sul fondo si lascia un'apertura per scaricare le ceneri nel caso non sia gas naturale. **1+2** = CAMERA DI COMBUSTIONE

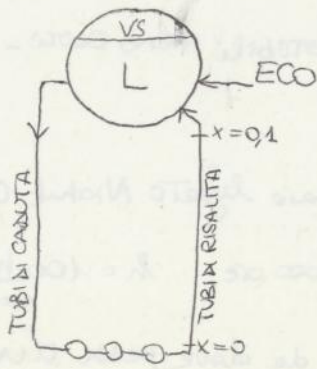
**2** Lo scambio termico avviene per il 90% irraggiamento, il resto per convezione perché  $T_1$  è molto alta  $\propto T^4 = 1800^4$ . Bisogna mantenere la  $T$  di parete a  $600^\circ\text{C}$  perché a  $800^\circ\text{C}$  fonde ma non fa differenze sullo scambio termico in quanto  $(600)^4 \approx (800)^4 \ll 1800^4$ .  **$T_2 = 1200^\circ\text{C}$**

**3** Tra 2 e 3 si fa un NASO per convogliare i fumi nel generatore di vapore si appendono dei tubi in Cadute e salite (esterno e interno alla cc.) per



\* CORPO CILINDRICO SUPERIORE + TUBI

Nella parte alta dell'impianto si costituisce un grosso cilindro con  $d=2m$ ,  $l=6m$  e  $s=10cm$ , ad alte pressioni diviso da un SEPARATORE DI VAPORE



TUBI DI CADUTA: posti fuori dalle C.C., arrivano fino alla base dell'impianto.

All'interno circola acqua liquida  $\rightarrow$  non c'è scambio termico. Solitamente sono pochi e hanno un  $d$  maggiore.

TUBI DI RISALITA: posti dentro la C.C., perché avviene scambio termico in pieno

all'interno circola acqua liquida + vapore  $\rightarrow$  dentro l'impianto.

Come fa a risalire l'acqua senza l'aiuto di pompe?

Sola per CIRCOLAZIONE NATURALE grazie al  $\nabla\rho$  ( $T=costante$ )

si crea un  $\nabla\rho := \rho_{liq} > \rho_{L+V}$  che genera una SPINTA DI CIRCOLAZIONE

$$S \approx K(\rho_{liq} - \rho_{L+V}) \text{ con le quali l'acqua risale e ribollire.}$$

Per sapere quanti giri deve fare l'acqua per evaporare tutte si calcola

il RAPPORTO DI CIRCOLAZIONE  $\mathcal{R} = \frac{1}{x} = 10 \text{ giri con } x=0.1$

(Per 1 kg di vapore devono circolare 10 kg di  $H_2O_{liq}$ )



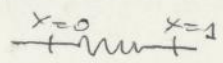
Più si sale con l'isoterme e isobare più  $\rho_L \approx \rho_{L+V}$  e la spinta si esaurisce.

Esistono degli IMPIANTI A CIRCOLAZIONE ASSISTITA dove si può raggiungere

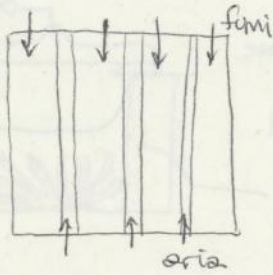
$x=0.2$  grazie a delle POMPE  $\rightarrow \mathcal{R} = \frac{1}{x} = 5 \text{ giri} \rightarrow$  minori dimensioni dell'impianto

Questo sistema va bene fino a  $p=190 \text{ atm}$  perché potrebbe trasformarsi in una IPERCITICA per pochi secondi  $\rightarrow$  si deve cambiare pompe ed evaporatore altrimenti

si rischia l'ebollizione a film con  $p > 190 \text{ atm}$ .



**PRERISCALDATORE A TUBI** : è uno scambiatore di calore con fumi caldi e

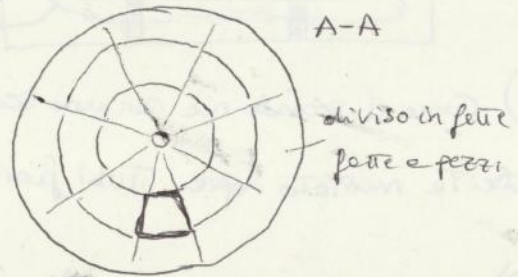
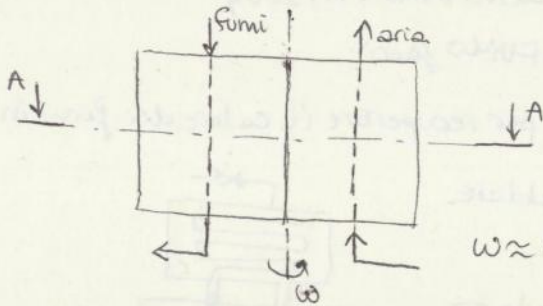


aria fredda, ma l'aria non si deve scaldare troppo né i fumi possono raffreddarsi molto.

↳ Non si possono evitare le condensazioni acide.

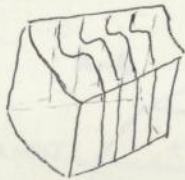
Soluzione: bisogna cambiare le sezioni più fredde (le sezioni sono divise in due parti) ogni Tot anni, non si possono usare altri materiali per evitare le condensazioni perché sono o troppo costosi o a basso scambio termico.

**PRERISCALDATORE ROTATIVO** : i fumi caldi scaldano il metallo che viene raffreddato dall'aria in continuazione.



All'interno del cilindro ci sono tanti lamierini a S in modo tale che si

possono smontare e pulire o sostituire se si bucano.

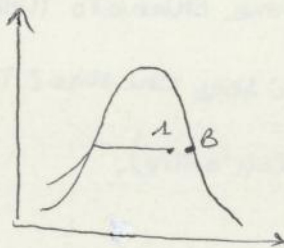


Il preriscaldatore gira molto lentamente (a piccola) perché quando gira i lamierini portano un po' di fumo

nell'aria e viceversa creando una miscela sporca.

## GENERATORE DI VAPORE A VAPORE SATURO

UtENZE: Termica o industriale (no turbine)

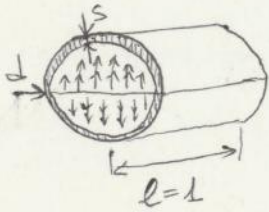


GENERATORI DI VAPORE A TUBI DI FUMO

$P = 5 MW$  (prima si usavano nei motori con diesel o a cilindro-pistone)

Seppur l'acqua liquida crea problemi all'impiego, non si riesce ad arrivare in B con  $\eta = 1$

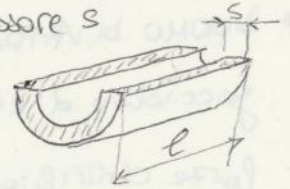
## LIMITI TECNOLOGICI (=meccanici)



L'acqua in pressione a 7-8 atm esercita una forza che cerca di aprire l'involucro del cilindro (con l unitario):

$$F = p \cdot d \cdot l = p \cdot d \cdot 1$$

A queste forze si oppongono le pareti (2 lamiere) con spessore  $s$  e lunghezze unitarie  $l$  in acciaio con proprietà  $\sigma$ .



- Equilibrio:  $p \cdot d \cdot 1 = 2(1 \cdot s \cdot \sigma)$

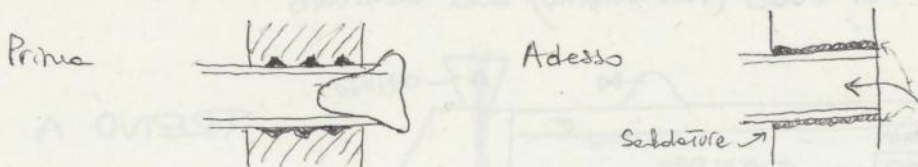
per far sì che le pareti reggano alla pressione o si aumenti lo spessore  $s$  o si scelgano acciai con una  $\sigma$  più elevata.

Poiché le pressioni sono piuttosto basse si possono scegliere  $s$  e  $\sigma$  non troppo eccessivi.

- Limite massimo della lunghezza  $l_{MAX} = 2d + \text{qualcosa}$

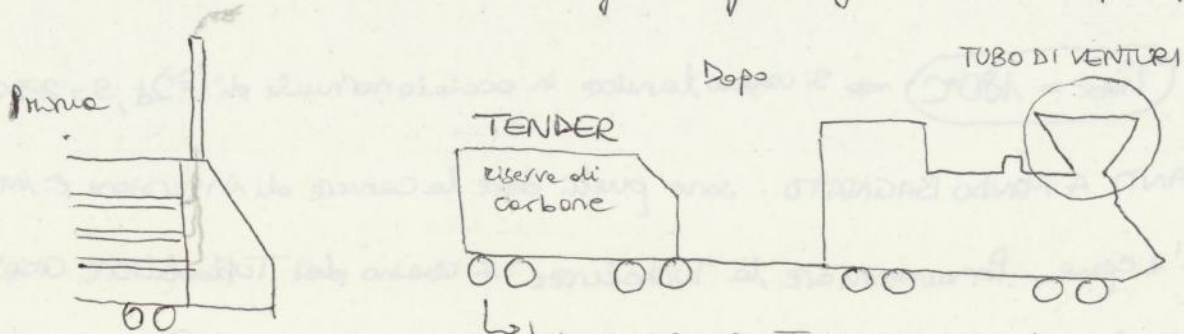
Se si fanno troppo lunghi le  $\Delta T = T_{out} - T_{in}$  è eccessive  $\Rightarrow$  scambio termico non accettabile e non si riescono a pulire.

- Saldature: le lamiere vengono saldate per non disperdere il fluido (un tempo venivano chiodate); anche i tubi sono saldati con l'esterno in modo da non far passare l'acqua in mezzo (prima degli anni '50 venivano incastate a compressione: schiacciati e deformati alle punte).



- Dilatazioni: i tubi quando subiscono gli sbalzi termici si allungano anche di 1m, ma queste dilatazioni vengono bloccate dall'acqua all'interno (fluido incompressibile) e dall'ambiente all'esterno. Affinché le tensioni interne non facciano saltare le saldature si costruiscono i tubi forno con delle

Prima si dovevano fare i camini molto alti in modo che il fumo salisse lungo le cappe e uscisse da sopra, altrimenti rimaneva bloccato nel treno. Il problema dei camini alti era che bisognava smontarli ogni volta che si attraversava una galleria per poi rimontarli all'uscita. Successivamente si è pensato di usare un TUBO DI VENTURI che butte fuori il fumo sfruttando la  $\Delta p$  comprim.



↳ bisognava sempre attaccare un Tender per portare sul treno il carbone da bruciare nel cilindro.

**TAPPI:**

Se succede qualcosa i Tappi si aprono e spengono il fuoco - il treno si ferma.

Se il cilindro ha una crepe, l'acqua inizia ad entrare e in poco tempo esplose perché passa da 6-7 atm interne a 1 atm ad alte T, quindi evapora, si espande ed esplose.

↳ CAUTELE: si mettono dei sensori = 2 sistemi di pressione in modo tale che se la P sale oltre la p di collaudo spegna il bruciatore. Se c'è un aumento di pressione non controllato (ad esempio se si chiude la valvole dell'utente) la pressione si alza e l'involucro cede. (se i sensori non funzionano)

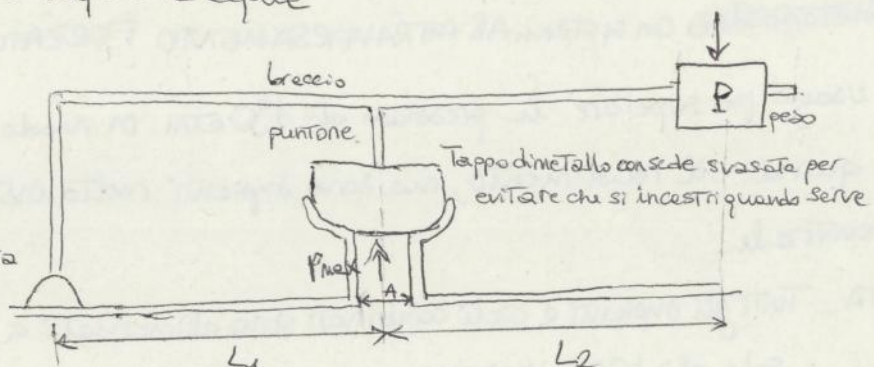
↳ SOLUZIONE: si fanno due buchi OBBLIGATORI PER LEGGE da  $d = 10$  cm sul cilindro grande e si chiudono con dei Tappi. Se succede qualcosa si aprono e fanno uscire vapore d'acqua.

**FUNZIONAMENTO**

Eq. di momento:

$$A \cdot p_{max} \cdot L_1 = P(L_1 + L_2)$$

Se  $p > p_{max}$  il Tappo si apre

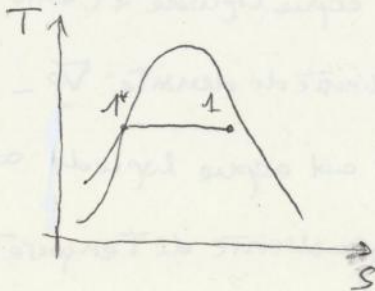


## CALDAIE AD ACQUA SURRISCALDATA

$$T > 100^{\circ}\text{C}$$

$$T = 110 - 120^{\circ}\text{C}$$

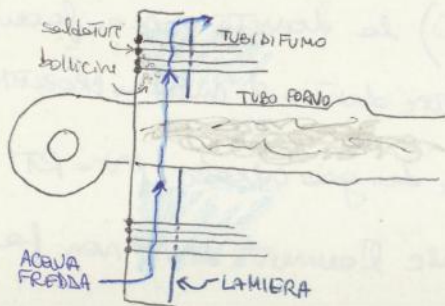
La struttura è molto simile ai generatori di vapore a V.S., con le differenze che anche nelle parti alte del cilindro c'è acqua liquida.



Invece di arrivare in 1 a si ferma in 1\* sempre a 6-7 atm e con  $T_{\text{MAX}} = 170 - 180^{\circ}\text{C}$

Se si aumenta p l'impianto diventa troppo costoso

Nel funzionamento del generatore di vapore la circolazione dovuta alle turbolenze dell'ebollizione rende l'acqua uniforme; per avere acqua liquida le bollicine di vapore che si formano si staccano sulle saldature e si forma una specie di ebollizione a film dovuta alle bolle. Queste fa alzare la temperatura sulle saldature fino a rompere. → SOLUZIONE:



Si inserisce una lamiera buca per far passare i tubi che funge da contro parete. Tra la lamiera e il muro si fa passare dell'acqua più fredda che raffredda le saldature evitando il fenomeno della CAVITAZIONE

## CALDAIE AD ACQUA CALDA

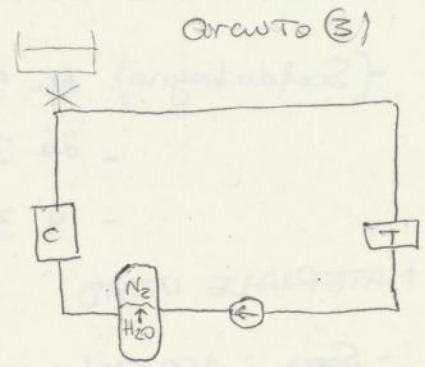
$T < 100^{\circ}\text{C}$  sotto la T di Transizione di fase

Producono acqua liquida senza andare mai in ebollizione, né correre il rischio che aumenti la pressione e cause del vapore. → Vengono progettate per resistere a pressioni idrostatiche maggiori in modo da arrivare ai piani più alti degli edifici.

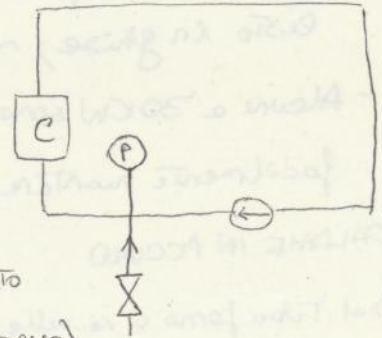
Uso: civile di riscaldamento

## 2° SOLUZIONE: CONTENITORE CON MEMBRANA

Si mette un contenitore in lamiera con all'interno una membrana che separa l'acqua in espansione da un gas (in genere azoto) in modo tale che quando  $H_2O$  espande aumentando  $V$  occupa parte del volume di  $N_2$  che deve aumentare la pressione parziale per compensare la diminuzione di volume.  $\uparrow P_{N_2}$  non interferisca con il sistema che invece non va più in pressione.



Circuito (4)

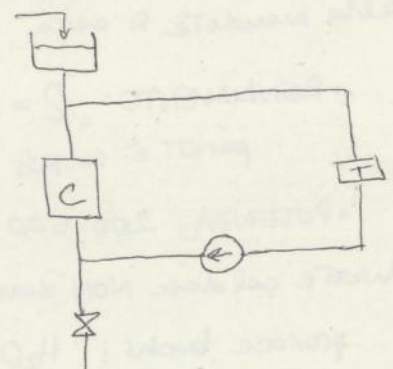


## 3° SOLUZIONE: VALVOLA DI NON RITORNO

Si fa un condotto che permette di sgorgare l'acqua con in cima un pressostato. Se il pressostato vede che  $p < 0,6 \text{ atm}$  ferma le caldaie. La valvola consente all'acqua dell'acquedotto di entrare a  $2 \text{ atm}$  nell'impianto, ma non viceversa (di non ritorno).

↳ Ci deve essere anche un'altra valvola di sicurezza che permette di far uscire acqua, liquido o vapore per non far avvenire l'esplosione in caso il bruciatore non si fermi.

- Negli impianti a combustibile solido (pellet, carbone, ligna) si usa una soluzione del primo tipo perché anche quando lo spegniamo il combustibile continua a bruciare rischiando l'ebollizione. Le caldaie a combustibile solido sono diverse dalle stufe (che bruciano combustibili per riscaldare); si usano come termocoppie con funzione di cotture scaldando anche dell'acqua. Se succede qualcosa si attiva il vaso di espansione, ma la caldaia si mette ugualmente a bollire (non c'è rischio esplosione). Per evitarlo si mette una VALVOLA DI SCARICO TERMICO che si apre quando  $T_{H_2O} > 90^\circ C$  e scarica l'acqua nelle fognature. Nel caso la valvola sia rotta interviene la sicurezza.



## CALDAIA CON BRUCIATORE AD ARIA SOFFIATA

Questi impianti hanno le camere di inversione bagnate con all'interno dei tubi i turbolatori. I fumi fanno 1 unico giro. ~ Analoghe ai gen. rep. bagnati.

## CALDAIA IN ACCIAIO PRESSURIZZATA A COMBUSTIONE

Il Tubo forno coincide con le camere di combustione che è chiusa al fondo. I fumi fanno 2 giri: simultaneamente ai gen. e Tubi di fuma Henon. Termostato di regolazione a  $80^{\circ}\text{C}$  e uno di sicurezza a  $90^{\circ}\text{C}$ . Se vanno in evenia si attivano i valvi di espansione o le valvole di sicurezza.

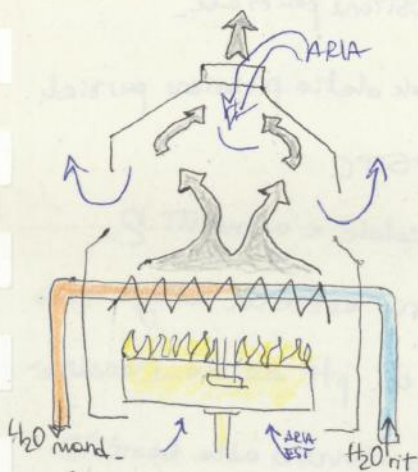
## CALDAIE A CONDENSAZIONE QUANDO SERVE

I fumi entrano in condensazione quando vanno sotto i  $50^{\circ}\text{C}$ , quando l'acqua deve entrare a  $T > 50^{\circ}\text{C}$  per non condensare.

Le caldaie a condensazione si usano ad esempio per riscaldare le piscine o i perimetri a  $28-30^{\circ}\text{C}$  o per riscaldare le serre a  $20^{\circ}\text{C}$  senza cuocere le frutta.

Una caldaia che riceve acqua a  $60^{\circ}\text{C}$  non va in condensazione perché l'acqua di ritorno è a  $45-50^{\circ}\text{C}$ , ma se arriva a  $30^{\circ}\text{C}$  si usa altre acque per evitare che condensi oppure si usano acciai che non corrodono - CALDAIA A CONDENSAZIONE

## CALDAIE DI TIPO B - A C.C. APERTA



L'aria entra dai Tubi di venturi attraverso l'apertura di sotto. Problema: è possibile che dai camini entri dell'aria a cause di raffiche di vento che fanno spegnere il bruciatore.

↳ Soluzione (sistema obbligatorio): si fanno delle aperture laterali che fanno passare dei getti d'aria sopra l'altre del bruciatore per far rimanere l'aria sopra (DISPOSITIVO ANTIVENTO)

Problema: se per caso il camino ha un'oclusione che oclude lo scarico dei fumi, questi escono dalle ferite laterali vicino il bruciatore e i fumi entrano in cucina che si riempie di CO perché manca  $\text{O}_2$  → Tutti morti.

↳ Soluzioni: si mette una Termocoppie per sentire il caldo dei fumi e spegnere la caldaia. Sono assolutamente vietate in bagno e adesso sono fuori installazione.

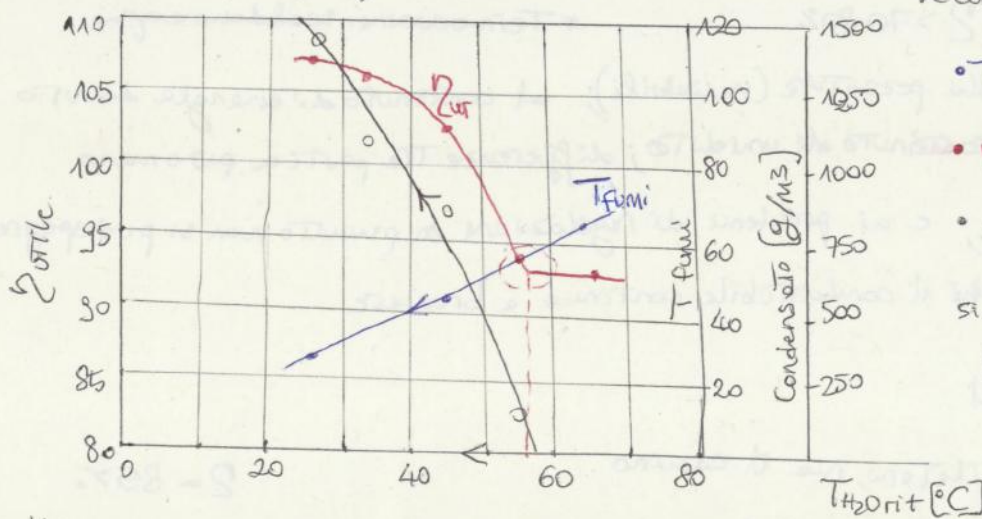
NOTA - Non c'è nessun ventilatore per i fumi, ma si sfrutta le circolazione naturali

• Perdite per calore sensibile: si hanno perché si scaricano fumi caldi nell'aria sprecaendo potenze termiche. Se l'eccesso d'aria (o garanzia delle buone combustioni) è minore, la  $T_{fumi}$  è minore  $\Rightarrow$  ci sono meno perdite.

• Vantaggi della condensazione:

Le condense del vapore d'acqua nei fumi  $\Rightarrow$  si può scaricare i fumi a  $T$  minore e quindi avere un RECUPERO DEL CALORE SENSIBILE

• RENDIMENTO,  $T_{fumi}$ , condensato



Le curve sono sperimentali

- $T_{fumi}$  ( $T_{H_2O}$ )
- $\eta$  ( $T_{H_2O}$ )
- Condensato ( $T_{H_2O}$ )

$\downarrow$   
Si deve mettere una vasca per raccogliarlo

Man mano che la  $T_{ritorno}$  in caldaie diminuisce,  $T_{fumi}$  diminuisce. Negli impianti Tradizionali la  $T_{man}$  si fa variare in base all'esigenza di energie. Le caldaie e Condensazione si usano quando serve una  $T$  bassa o anche per il riscaldamento anche se serve  $T_{in} = 80^\circ C$  per guadagnare calore sensibile.

Le quantità di condensato dipende dalla  $T_{fumi}$ : Tanto più si scende sotto la  $T_c$ , più sarà il condensato. Quindi:  $T_{rit} \downarrow \rightarrow T_{fumi} \downarrow \Rightarrow$  condensato  $\uparrow$

Quando  $T_{fumi}$  è molto basse  $\eta$  aumenta notevolmente perché aumenta la quantità di calore sensibile recuperata. A  $T_c \approx 55^\circ C$  inizia aumento di  $\eta$ .

Questi impianti DEVONO AVERE necessariamente un VENTILATORE, sia che siano di TIPO C che B o altro, perché i fumi sono a  $T$  più fredde e non riescono a uscire (normalmente l'effetto camino tira su i fumi per convezione:  $T_{aria} \ll T_{fumi}$ ).

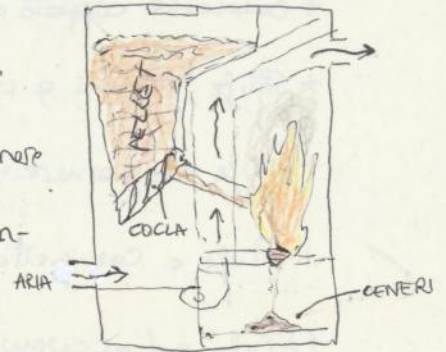
I generatori di vapore e le caldaie usano combustibili liquidi o aeriformi, gli impianti a combustibile solido hanno un altro funzionamento.



## \* SISTEMI a PELLETT

Potenze = 5-10 KW (funzionano sia da stufe che da caldaie)

Il deposito di pellet ha un sistema termoregolato con un'elica che lo preleva e lo porta al bruciatore. Le quantità di calore è gestite dalla quantità di combustibile che si fornisce. Per spegnerlo basta non fornire più combustibili e aspettare che bruci il poco che c'è ancora nelle C.C. NON si devono spegnere completamente altrimenti bisogna intervenire per riaccenderle manualmente.



Accumulo di calore: c'è un accumulo di acqua che permette di interrompere le combustioni senza spegnerla del tutto. Limite il numero di cariche delle caldaie; consente di usare la funzione antigelo e di produrre acqua calda nei mesi estivi. La caldaia manda acqua all'utente e al serbatoio di accumulo che si riempie di acqua calda spingendo giù quella fredda (per convezione naturale). In questo modo si accumula l'acqua calda sanitaria. In alcuni casi gli impianti sono integrati con dei pannelli solari. In inverno si attiva l'impianto, mentre in estate bastano i pannelli.

CENERI formate da ramaglie, cortecce e scarti di imballaggio.

↳ legno senza cortecce produce 0,2% di ceneri, mentre il pice 7%.

DEPOSITO (stoccaggio) - problema del dimensionamento: se si vuole sistemare il pellet lo spazio necessario è minore, mentre il costo si posizione e caso.

↳ si deve fare un deposito sufficientemente grande senza però esagerare.

CAMINO fa sì che avvenga il tiraggio dei fumi in modo naturale: i fumi caldi salgono per convezione. L'aria secca e crea una depressione della C.C., ma devono essere molto grossi. Il tiraggio è in funzione delle potenze del focolare: alla base del camino si deve avere una depressione massima.

Potenze: 100-3000 kW  $\eta = 85-90\%$   
 UR = 10-37%  $\rightarrow$  se è troppo secco si incestra e crea dei ponti vuoti  
 Contenuto ceneri: basso, legno già lavorato senza cortecce

} combustibile secco

Combustibile Umido {  
 Potenze = 100-3000 kW  $\eta = 70-80\%$   
 UR: 20-55%  
 Contenuto ceneri: alto, arrivare dai baschi pinnoli è più umido e con cortecce

Campo di regolazione potenza 20-100% per comba secco  
 25-100% per comba umido

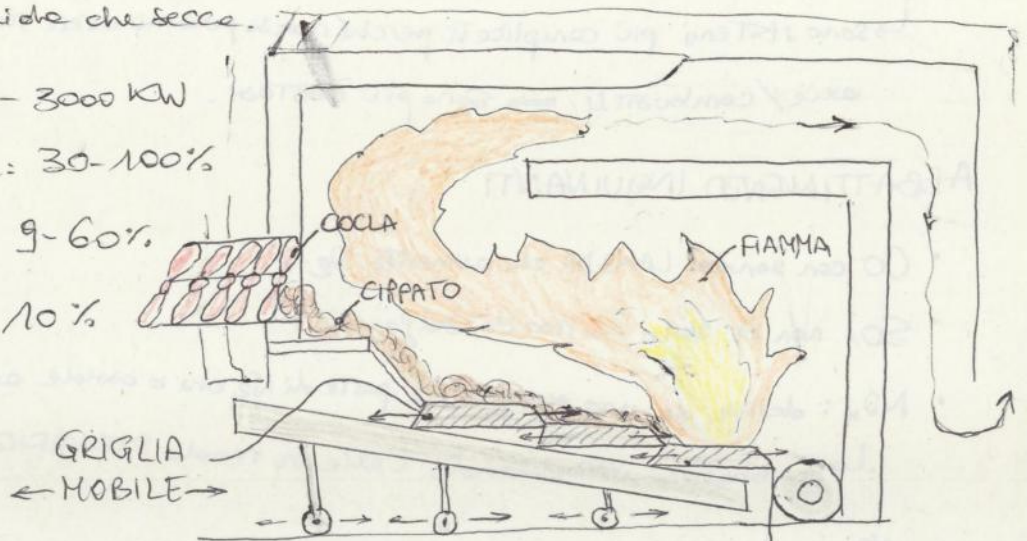
Questo tipo di impianto è difficile da dimensionare e nel funzionamento delle caldaie.

### IMPIANTO A GRIGLIA MOBILE

Permette una combustione migliore perché si può dosare la velocità con cui il combustibile brucia dopo essere entrato; ossia adatta la combustione al tipo di combustibile.

Usate sia e ligna umida che secca.

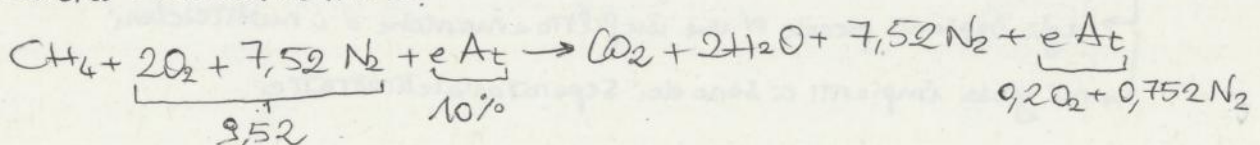
Potenze: 100kW - 3000 kW  
 Regolazione potenze: 30-100%  
 UR combustibile: 9-60%  
 Contenuto ceneri: 10%  
 $\eta_{utile, N} = 85\%$



### REGOLAZIONE DELLA COMBUSTIONE

Se si use il gasolio come combustibile, per variare le potenze non serve aumentare il gasolio. Per gli impianti a combustione solide le potenze è in funzione delle portate in messe.  $\Rightarrow$  bisogna regolare la portata d'aria.

Posizione stechiometrica:



Se  $e = 10\%$  di  $9,52$  si ottengono  $0,2 O_2 + 0,752 N_2$  in eccesso.

CONDENSAZIONE possibile: oltre a recuperare il calore latente dell'acqua contenute nei fumi si recupera anche quelle delle ligna.

### SISTEMI DI ESTRAZIONE CENERI

- Impianti piccoli: e meno
- Impianti grandi: le ceneri si accumulano sul fondo delle gruglie e si rinnovano con un sistema a cecle. Si usa uno pneumatico ad elice che gira e preleva le ceneri che viene usate per la produzione di cemento o come combustibile organico. In ogni caso bisogna sempre trattarle altrimenti fa danni se si sparge in paese.

### TRASPORTO DEL CIPPATO

Si usano dei silos con dei sistemi per tirarle fuori a cecle, a vite o a rastrelli interni. Se il combustibile è vite con passo molto lungo troppo umido si usano delle benne o degli spiratori per abbassarlo delle cecle o dei tubi occlusi.

### FABBISOGNO TERMICO

Per la caldaie il fabbisogno termico consiste nel tenere  $20^{\circ}\text{C}$  all'interno con  $T_{est} = T_{min}$  ( $= -8^{\circ}\text{C}$  e Torino). Gli impianti a biomasse sono molto più costosi di quelli a gas quindi si cerca di dividere il carico spezzando le potenze su due impianti: uno a biomassa e l'altro a metano, così quello a biomassa si può sottodimensionare. Si affiancano due impianti per coprire i picchi di carico nei periodi più freddi e risparmiare, ma anche per poter fare manutenzione quando quello a biomassa si ferma → caldaie tradizionali = impianto TAMPORE.

- La suddivisione del carico termico per ottimizzare il funzionamento si fa stimando il fabbisogno energetico:  $\Phi = a + b(T_i - T_e)$

dove  $T_i$  è la  $T$  interna che si vuole mantenere  $T_i = 20^{\circ}\text{C}$

e  $T_e$  è la  $T$  esterna di progetto considerando il carico massimo  $T_e = -8^{\circ}\text{C}$

$T_i = 15-20^{\circ}\text{C}$  potenze minime che dice che non si ha più bisogno di energia ( $\Phi = 0$ )

↳ si spegne l'impianto

- POTENZA PERSA ALLE PARETI:  $W_p$   
 $\hookrightarrow$  è nullo nel caso in cui la cellolare è in cucina e riscalda l'ambiente

- POTENZE PERSE DIVERSE:  $W_{div}$  (Trascurabili)  
 $\hookrightarrow$  dovute ad altri meccanismi usati per il funzionamento delle cellolare

### GRANDEZZE RELATIVE [adimensionate]

- PERDITA AL CAMMINO:  $P_{cam} = \frac{W_{cam}}{W_s}$

- PERDITA ALLE PARETI:  $P_p = \frac{W_p}{W_s}$

- RENDIMENTO UTILE:  $\eta_u = \frac{W_u}{W_s}$

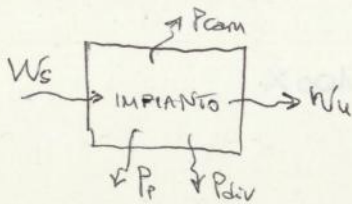
- RENDIMENTO DI COMBUSTIONE:  $\eta_c = 1 - P_{cam}$

- POTENZA PERSA AL CAMMINO (Energie perse per i fumi caldi)

$$W_{cam} = \dot{m}_{fumi} \cdot C_{p,f} (T_f - T_a)$$

Non si tiene conto di  $W_{cam}$  se le cellolare è in condensazione

### Principio di conservazione dell'energia



$$W_s = W_u + W_{cam} + W_p + W_{div} \approx 0$$

$$1 = \eta_u + P_{cam} + P_p + P_{div} \approx 0$$

Negli impianti moderni  $\eta_u = 95-96\%$

$\rightarrow$  perdite:  $P_p = 3-4\%$

$P_{cam} = 1,04-1,05\%$  ( $=0$  se  $T_{fumi} = T_{amb} \Rightarrow$  condensazione)

Nei forni perdite molto più grandi:  $\eta_u \approx 30\% \Rightarrow$  perdite:  $P_p = 20\%$   
 $P_{cam} = 50\%$

### REGOLAZIONE

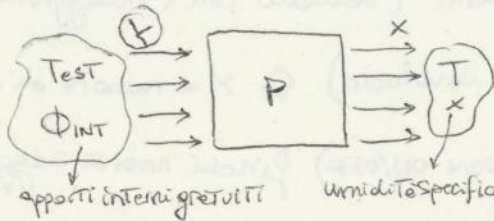
- \* ON/OFF negli impianti piccoli con bruciatori monostadio
- \* 2STADI negli impianti con bruciatori bistadio  $\rightarrow$  più cari ma più convenienti
- \* MODULANTE con bruciatori modulanti (da 35% in su, <35% reg. ON/OFF)

### OSSERVAZIONE

Quando si ha un impianto da potenze = 95 KW il valore è riferito al carico massimo, ma quando il carico scende anche le potenze scende.

## Funzionamento -

### SISTEMA di REGOLAZIONE



P = PROCESSO, ossia le stanze che si vuole tenere sotto controllo

Y = GRANDEZZA REGOLANTE, tra tutte le grandezze

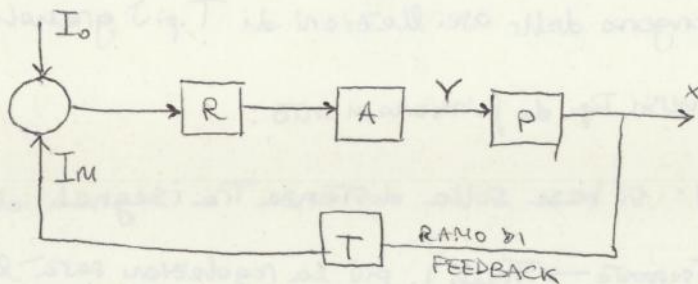
di INFLUENZA del processo si sceglie una che sia facilmente regolabile tale da avere in uscita il valore desiderato.

X = GRANDEZZA REGOLATA, tra tutte le grandezze di USCITA si sceglie una che si vuole controllare.

### REGOLAZIONE AD ANELLO CHIUSO O APERTO.

#### Sistemi ad anello chiuso:

Si imposta un valore  $I_0$  da confronto e si verifica con il segnale reale (= SEGNALE ELETTRICO). Il risultato dei due segnali si manda al REGOLATORE [R] che fa il confronto e manda il segnale alle valvole di miscela chiamate ATTUATORE [A] che regola la T di uscita del radiatore (T di mandate acque) e manda la variabile  $t$  in ingresso al PROCESSO [P] che a sua volta manda  $X$  al TRASDUTTORE [T] il quale lo trasforma in segnale elettrico e lo manda all'inizio per decidere come intervenire. ( $X = T$  delle stanze misurate)



Questa regolazione non si può usare in condominio perché non esiste una sola  $X$ , ma ogni casa ha una propria temperatura in funzione della posizione delle radiatori scarse.

#### Sistemi ad anello aperto:

Si usa nei casi in cui non è possibile usare il ramo di feedback. Si sceglie una grandezza di influenza più significativa, Test. Si manda un segnale elettrico che comanda le Termovalvole e seconde delle Test. Si misura la T acqua di mandate nelle celle e si confrontano i segnali elettrici di Termovalvole con le T reali per poi mandare il segnale risultante al REGOLATORE [R] che a sua volta lo manda all'ATTUATORE. Questo fa in modo che si modifichi la T acqua di mandate

Le regolazioni P, PI, PID sono le uniche modalità di regolazione possibili

Ⓟ: fa variare  $Y$  dando un nuovo valore Tale da incrementare le grandezze regolante in modo proporzionale, Tenendo conto delle possibilità delle caldole

$$y - y_0 = -m(x - x_0)$$

"-": le variazioni di  $T_{amb}$  si oppongono a quelle del radiatore

Ⓡ DIFFERENZA FUORI EQUILIBRIO

$$y - y_{io} = -p \int_0^{\tau} (x - x_0) d\tau$$

si cerca di azzerare  $x - x_0 = T_{volte} - T_{amb. reale}$

$$y - y_0 = -q \frac{dx}{d\tau}$$

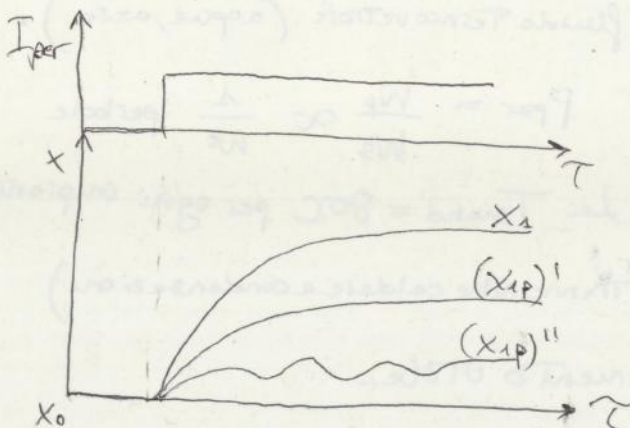
variazione prone alte, poi decresce

Reg. PI:  $y - y_{oi} = -m(x - x_0) - p \int_0^{\tau} (x - x_0) d\tau$

Reg. PID:  $y - y_{oi} = -m(x - x_0) - p \int_0^{\tau} (x - x_0) d\tau - q \frac{dx}{d\tau}$

Se i coefficienti  $m, p, q$  sono alti, la regolazione è molto rapida ma rende il processo instabile; se sono bassi il processo è stabile, ma è molto lento.

FUNZIONAMENTO REGOLATORE P:



Grandezze di influenza:  $I_{per}$ ,

# persone presenti in aula

Quando l'aula è vuota  $T_{amb} = 21^\circ C$ ;

quando il numero di persone aumenta, la potenza aumenta fino a regime:

$x_1$  se il sistema non è regolato

( $T_{amb}$  aumenta)

$(x_{1p})'$  se il sistema è regolato con P, ma  $m$  piccola

$(x_{1p})''$  se il sistema è regolato con P, ma  $m$  grande

Con regolatore P si diminuisce il fuori equilibrio permanente ma non si riesce ad annullarlo e a riportarsi in  $x_0$ .

NOTA - Poem non può mai essere nulle perché i fumi escono almeno alla T di parete = 80°C. Quando aumenta la potenza del bruciatore Poem ↑ ma anche Ws ↑. Se si scambia una quantità molto piccola, l'energia se ne va tutta in Poem.

⇒ ηc non può mai essere 100.

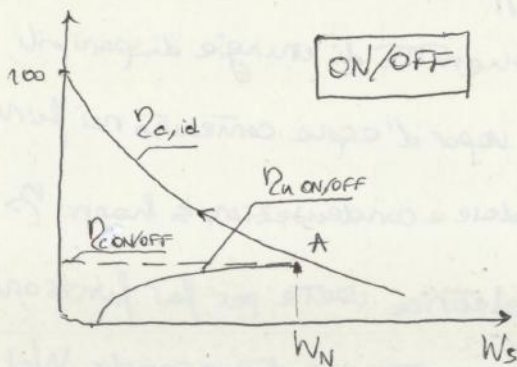
Con potenze molto grosse Pp ≈ 0 ⇒ ηu = ηc; non meno che Ws decrease ηc > Ppar finché Ppar → ∞, ηu inizia a decrease quando le Ppar (iperboliche) superano la ηc fino ad arrivare a 0. (grafico precedente)

La potenza è decisa dal costruttore a seconda del costo:

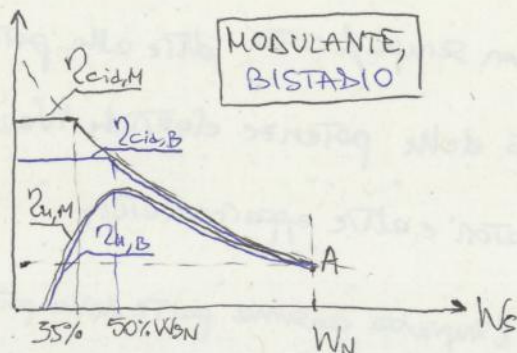
- a potenze maggiore si ha costo maggiore;
- a rendimento maggiore si ha costo maggiore.

Se su una caldaia si ha potenze nominali Wn ad esempio a 100 kW con ηu = 97%, in realtà le potenze effettive è minore.

### REGOLAZIONE ON/OFF, MODULANTE, BISTABIO



Nelle caldaie con reg. ON/OFF la Poem è costante sia se funziona al 80% che al 30% (70min OFF, 30min ON) ⇒ Poem = 5%. ηu max ⇒ Ws max perché non c'è la componente ηc ⇒ ηu = ηc - Ppar non può ↑.



ηu a carico massimo non è influenzato dalle regolazioni.

Se si deve lavorare con Ws < 50% con la reg. modulante si avrebbe sempre ηu basso. Wn = potenze spese massima e qui l'impianto può lavorare per legge.

- Fino a 100 kW conviene ON/OFF
  - Fino a 150 kW conviene BISTABIO
  - Wn > 150 kW conviene MODULANTE
- } Più care ma più efficienti a Ws > 50%

**RENDIMENTO SUL CAMPO:** quando viene espulso un generatore di calore, soprattutto nel caso delle potenze sotto qualche MW, viene fornito un  $\eta_{UTILE}$  in condizioni di funzionamento nominali = misurato con le potenze termiche di Terge in condizioni di riferimento di combustione, ossia a carico massimo. Perciò  $\eta_N$  risulta maggiore a  $\eta_{reale}$ :  $\eta_{reale}$  è un valore medio e dipende dalle reali condizioni di funzionamento; ci sono eccessi d'aria superiori; le fuliggini depositate diminuiscono lo scambio termico e quindi  $\eta$ . Bisogna quindi misurare  $\eta$  sul campo.

### INCREMENTO DEL $\eta$ CON RECUPERATORI DI CALORE

Cause principale di perdite: perdite al camino. Per ridurle si devono scegliere i forni a T minori possibili (limitare l'eccesso d'aria) ma ciò con limite intrinseco a parte le condense acide: i forni non possono ustire e T  $\neq$  T in fluido termovettore per i generatori di vapore, ossia T < T mandare = 80°C; mentre per i forni T < T esercizio in funzione delle tecnologie (forni)  $\Rightarrow$  T fu molto alte

Si può far ricorso all'uso di RECUPERATORI DI CALORE che sottraggono energia ai forni senza però cederle al fluido termovettore o alle ceneri del forno.

$\hookrightarrow$  poiché non si può immagazzinare l'energia termica la si usa per PRERISCALDARE

L'ARIA DI COMBUSTIONE  $\Rightarrow$  aumento  $\eta$  impianto

Esempio:  $W_s = 100 \text{ kW}$ ;  $W_u = 80 \text{ kW}$ ;  $W_{cam} = 18 \text{ kW}$ ;  $W_p = 2 \text{ kW}$

Senza recuperatore  $\eta_u = \frac{W_u}{W_s} = 0,8$

Con recuperatore:  $W_s = \overset{100-10}{90} \text{ kW}$ ;  $W_{rec} = 10 \text{ kW}$ ;  $W_u = 80 \text{ kW}$ ;  $W_{cam} = \overset{18-10}{8} \text{ kW}$ ;  $W_p = 2 \text{ kW}$

$W_e = 90 + 10 = 100 \text{ kW}$

$\eta_n = \frac{W_u}{W_s} = \frac{80}{90} = 0,89$

$\hookrightarrow$  solo se i forni non sono troppo sporchi (forni) recuperatori ad acque fredde

In realtà, grazie a  $T_{caric} \uparrow$   $\Rightarrow$  capacità di scambio camera CC.  $\uparrow$  (e perdite di W entrante)

$\Rightarrow$  aumento  $\eta_{comb}$   $\Rightarrow$  aumento  $\eta_{utile}$

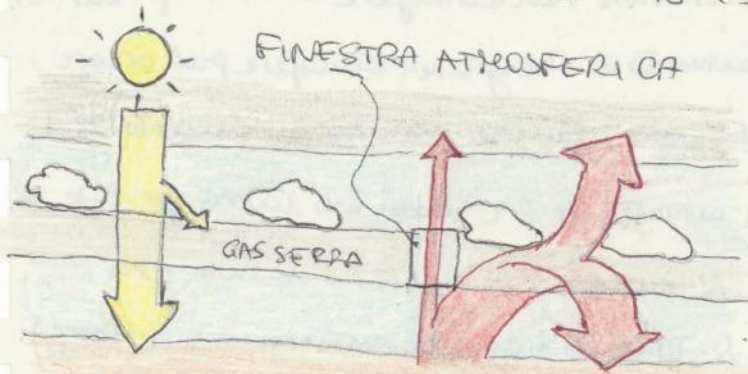


Equilibri: - Percentuali:  $20\% + 49\% + 9\% + 22\% = 100\%$

- Globale:  $342 - 107 - 235 = 0$   
Sole riflesso emesso

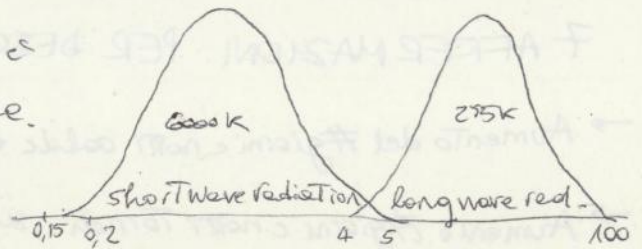
- Sup. Terrestre:  $168 - 24 - 78 - 350 - 40 + 324 = 0$   
Sole Termico evap. in atm in spazio da atm

- Atmosfera:  $67 + 24 + 78 + 350 - 18 - 324 = 0$



Le parte esterne del Sole emette come un corpo nero a  $6000\text{K}$ , condizioni in cui l'atmosfera è trasparente. La Terra emette a lunghezze d'onda tra  $4,0$  e  $60\mu\text{m}$ , cioè nell'IR, mentre il sole emette a  $\lambda < 4\mu\text{m}$

L'unica parte in cui l'atmosfera è trasparente è intorno ai  $10\mu\text{m}$ , ossia nelle finestre atmosferiche.



I gas assorbono in funzione della profondità e delle concentrazioni, quindi aumentando

la  $\text{CO}_2$  si assorbe di più. La banda di assorbimento delle  $\text{CO}_2$  è intorno ai  $3-8\mu\text{m}$ , dove assorbe anche il vapor d'acqua dominante in atmosfera e ai  $10-15\mu\text{m}$ , cioè nelle finestre atmosferiche. I gas che assorbono sono quelli triatomici, cioè  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_3$  e poco anche  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$

### LEGGE DI BEER

Si definisce il coeff. di trasmissione  $t = \frac{I}{I_0}$  con  $0 < t < 1$  e il coeff. di assorbimento  $a = 1 - r - t$  nei gas  $r = 0 \Rightarrow a = 1 - t = 1 - \frac{I}{I_0}$

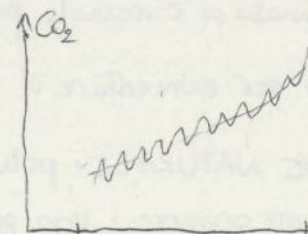
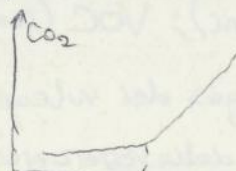
$I_1 = I_0 \cdot e^{-a \cdot c \cdot l} \Rightarrow t = e^{-a \cdot c \cdot l} \Rightarrow a = 1 - e^{-a \cdot c \cdot l}$

→ dipende dalle sostanze, da  $\lambda$  e del cammino ottico, e dalle concentrazioni, ma se c'è in soluzione

se  $a > 0$ ,  $c \uparrow$   $l \uparrow \Rightarrow e^{-\infty} = 0 \Rightarrow a = 1$  ASSORBIMENTO aumentando le concentrazioni

Viceversa, più lo strato è corto più  $a \rightarrow 0$

Concentrazioni di  $\text{CO}_2$  negli anni



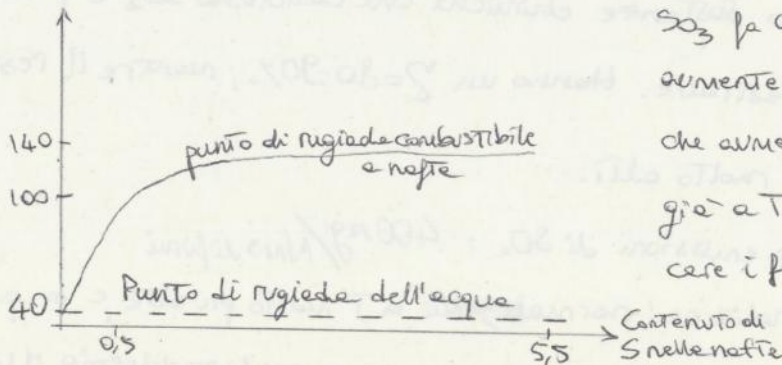
- **BLOSSIDO DI ZOLFO**: deriva dalla combustione di carbone, gessolio e olio combust. nelle centrali elettriche. Provoca piogge acide, irritante per occhi e mucose.
- **MONOSSIDO DI CARBONIO**: deriva dal traffico veicolare a basso scorrimento; impatto sul sistema nervoso e cardiovascolare.
- **BLOSSIDO DI AZOTO**: deriva dalle industrie e dagli impianti di riscaldamento ◦ del traffico a scorrimento veloce. È un irritante, contribuisce alla costituzione di smog fotochimico.
- **OZONO**: si forma con reazioni fotochimiche da ossidi di azoto e sostanze organiche volatili. Ha impatto nella Troposfera (<10km di quota) dove è un componente fotochimico; è irritante per occhi e mucose; crea danni alla vegetazione e alle funzioni respiratorie → le particelle 25µm riescono a passare negli alveoli polmonari.
- **POLVERI TOTALI (PM10, PM2,5)**: derivano dai processi di combustione (traffico, industrie, riscaldamento, ...). Provoca danni all'apparato respiratorio e cardiovascolare (inceneritori, riscaldamento, ...).
- **BENZENE**: deriva dal traffico veicolare e benzine e causa la leucemia.
- **PIOMBO**: deriva dal traffico veicolare, dalla combustione dei rifiuti e dei processi industriali. Incide sul sistema nervoso e cardiovascolare creando danni cerebrali, infertilità e abortività.

Nelle scelte del combustibile, il migliore è il metano, poi il gessolio desolfato. Ci sono dei limiti di legge sulle concentrazioni degli inquinanti atmosferici in base al tempo considerato (8 ore, medie giornaliere o annue), ma sono costi bassi che nessun capoluogo li rispetta. Per ridurre l'inquinamento bisognerebbe avere dei finanziamenti statali che incentivino gli utenti a inquinare meno e investire in nuove tecnologie piuttosto costose. Si danno dei "certificati verdi" per premiare gli utenti meritevoli, ma si deve anche intervenire penalmente per chi non rispetta le norme.

Torino: nonostante il <sup>→ poche polveri di combustione</sup> Tele-riscaldamento l'inversione termica che c'è sulle città fa sì che abbia un altissimo contenuto di polveri sottili prodotte dalle combustioni. Infatti, la stratificazione inversa dell'aria calda sopra e pulle fredde sotto non permette alla

## PROBLEMATI CHE PRODUZIONE SO<sub>x</sub>

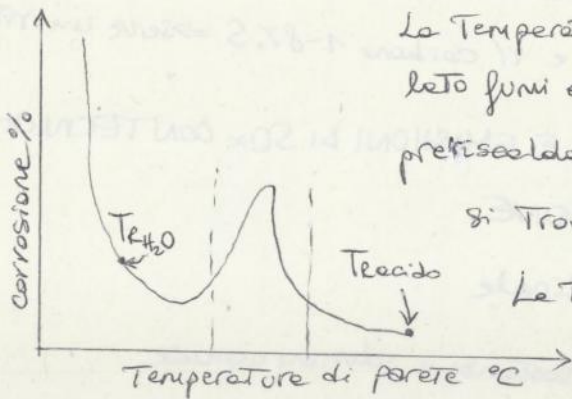
L'unico composto che crea danno all'impianto è SO<sub>3</sub> perché quando entra in contatto con l'acqua liquida forma acido solforico diluito:  $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$  che buca i tubi di qualsiasi impianto, a meno di acciai anticorrosivi.



SO<sub>3</sub> fa catalizzare la condensazione: aumenta la T<sub>p</sub> dell'acqua contenuta nei fumi che aumenta il rischio di condensazione acida già a T = 120-140°C. Troppo alte per deaerare i fumi all'esterno. Danni da condense provocano danni al preriscaldatore d'aria che infatti viene costruito con materiali anticorrosivi e sostituito ogni 2 anni.

L'acqua ha una T<sub>d</sub> ≈ 40°C nell'aria combustibile (nafta) mentre nel metano arriva a T<sub>d</sub> ≈ 55°C perché c'è più [H] e quindi la pressione parziale è maggiore → T<sub>d</sub> ↑

### - Capacità corrosiva dei fumi



La temperatura di parete è una via di mezzo tra lato fumi e lato fluido (acqua calda o aria del preriscaldatore). In condizioni peggiori, la parete si trova a 20°C in meno della T<sub>condensa</sub>.

La temperatura di parete consigliata per nafta che hanno un basso contenuto di cenere è ~80°C mentre per quelle con alto contenuto di cenere ~100°C. È più alta T<sub>par</sub> con molte cenere perché queste depositandosi sulle pareti creano zone appiccicate dove l'acqua condensa e stagna, rimane lì liquida, quindi si deve T<sub>par</sub> ↑

Le temperature di parete consigliate per nafta che hanno un basso contenuto di cenere è ~80°C mentre per quelle con alto contenuto di cenere ~100°C. È più alta T<sub>par</sub> con molte cenere perché queste depositandosi sulle pareti creano zone appiccicate dove l'acqua condensa e stagna, rimane lì liquida, quindi si deve T<sub>par</sub> ↑

Le temperature di parete consigliate per nafta che hanno un basso contenuto di cenere è ~80°C mentre per quelle con alto contenuto di cenere ~100°C. È più alta T<sub>par</sub> con molte cenere perché queste depositandosi sulle pareti creano zone appiccicate dove l'acqua condensa e stagna, rimane lì liquida, quindi si deve T<sub>par</sub> ↑

Le temperature di parete consigliate per nafta che hanno un basso contenuto di cenere è ~80°C mentre per quelle con alto contenuto di cenere ~100°C. È più alta T<sub>par</sub> con molte cenere perché queste depositandosi sulle pareti creano zone appiccicate dove l'acqua condensa e stagna, rimane lì liquida, quindi si deve T<sub>par</sub> ↑

## SISTEMI DI ABBATTIMENTO OSSIDI DI ZOLFO

Poiché i petroli con poco zolfo costano molto più di quelli con molto zolfo (si paga in base alla qualità) si devono trovare dei sistemi che limitino la formazione di SO<sub>2</sub>, anche se lo zolfo si ossida sempre. Per ridurre la concentrazione lo si diluisce molto con eccesso d'aria, oppure lo si deve eliminare dopo la formazione.

## DESOLFORAZIONE A UMIDO

Il gas attraversa un separatore ad umido con una miscela liquida di acqua e calcare + solfito di calcio ( $\text{CaSO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) e solfato di calcio o gesso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) idrate. La miscela viene spruzzata a spray e si ottiene del solfato di calcio  $\text{CaSO}_4$  che viene riciclato come masse fangose quasi solide (fluida ad alta viscosità) depositate sul fondo. Usando  $\text{CaCO}_3$  si ottiene  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ . Questi sistemi hanno il vantaggio che gli  $\text{SO}_x$  si depositano e si possono quindi aspirare <sup>tramite pompe</sup>. Lo svantaggio è che c'è il rischio di incrostazioni che ostruiscono gli ugelli delle torri di reazione. Occorre garantire una sufficiente diluizione in acqua e secondo del contenuto di  $\text{SO}_2$ . Il sistema comporta rischi di inquinamento del suolo e richiede ampie superfici di stoccaggio per grandi masse di calcare e di gesso. Questo però viene riciclato in edilizia per costruire dighe o strade. La desolfurazione a umido è il processo più efficiente: asporta oltre il 90% di  $\text{SO}_2$  degli esusti.

## DESOLFORAZIONE A SECCO

Si usano le stesse sostanze ma si producono particelle solide con sistemi polverizzati. La quantità di liquido iniettato è inferiore al volume che setore il gas di scarico. In questo modo non si ha mai condensazione. Le particelle iniettate che solidificano come  $\text{CaSO}_3$  e  $\text{CaSO}_4$  vengono rimosse tramite filtri a manica. Il materiale di scarto, essendo secco polverulento, è più facilmente smaltibile rispetto al residuo fangoso. L'efficienza è < 80% di  $\text{SO}_2$  asportato, infatti si usano solo su combustibili con poco S.

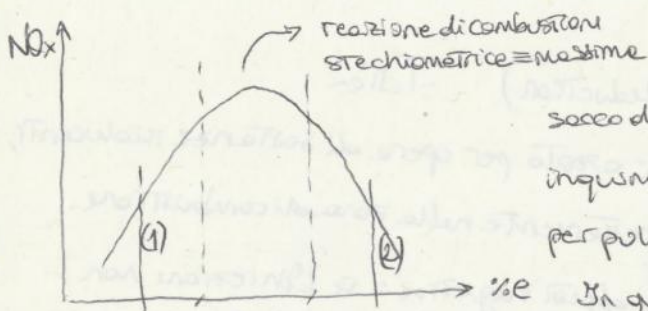
CONFRONTO: entrambe producono decine di tonnellate/anno di fanghi e polveri con problemi di gestione e stoccaggio. Per la desolf. a umido la gestione è più costosa. Per la desolf. a secco i materiali polverulenti possono spargersi sul suolo circostante, rischiando acidificazione del suolo e delle falde acquifere con il trapelamento delle piogge attraverso la discesa. Si può prevedere l'impermeabilizzazione del fondo delle discariche, ma è molto costosa.

Più si sementa il gas e più scende la  $T_{fiamma}$  mantenendo costante il potere calorifico e aumentando la portata senza però incrementare  $O_2\%$ . Questa tecnica si chiama a circolazione di fumi. nelle circolazione dei fumi si diluisce l'aria comburente con i gas in uscita alla caldaie in modo da abbassare  $P_{O_2}$ , riducendo le velocità di combustione ma aumentando la concentrazione di gas inerti  $\rightarrow T_{fiamma} \downarrow$ . Questa tecnica è molto efficiente per la combustione di gas naturali con solo  $NO_x$  thermal.

- **MILD COMBUSTION**: si prendono i gas caldi dalle C.C. e si miscolano dove c'è la fiamma. Si genera una fiamma non visibile perché il combustibile liquido evapora in combustibili gassosi. (Tecnica simile usata per i bruciatori con il disco deflettore) si può usare su tutti i tipi di bruciatore. In tal modo si ottengono reagenti fortemente preriscaldati, mentre le condizioni fortemente diluite sono tali da non consentire una fiamma visibile. Si fa in modo di eliminare i picchi di temperatura e quindi si riducono  $NO_x$ .

$\rightarrow$  vedere slide

### • COMBUSTIONE A STADI



Si fa prima avvenire la combustione con un basso eccesso d'aria (1) generando un sacco di porcate nelle reazioni e altri prodotti sporchi e inquinanti. Poi la si fa lavorare con un alto eccesso d'aria per pulire la combustione dei prodotti inquinanti (2). In questo modo si generano sempre pochi  $NO_x$  invece che con la reazione stechiometrica che ha il massimo di  $NO_x$  prodotte.

### • TECNICA DELL'OVER FIRE AIR (OFA)

Un quarto dell'aria di combustione viene aggiunta direttamente in C.C. da delle porte poste sopra l'ultimo piano dei bruciatori. In questo modo, nelle zone dei bruciatori si riduce sia l'ossigeno che la temperatura  $\rightarrow NO_x \downarrow$

### • TECNICA DELLA RICOMBUSTIONE - REBURNING TECHNOLOGY

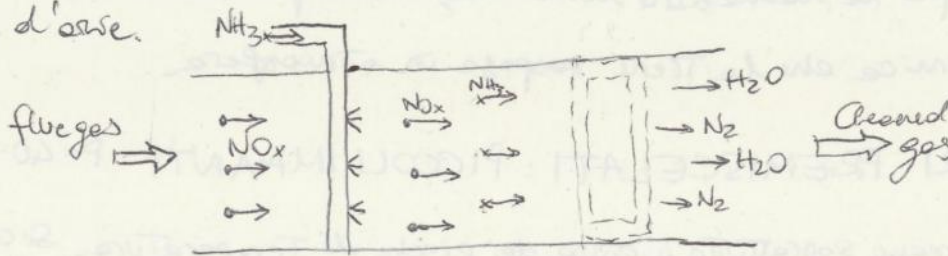
Usate solo su grossi impianti - generatori di vapore alimentati ad olio e carbone. Prevede la sostituzione del 20% di combustibili con gas e riduce la formazione di  $NO_x$  anche del 70%.

• **TECNICA SCR (Selective Catalytic Reduction)**

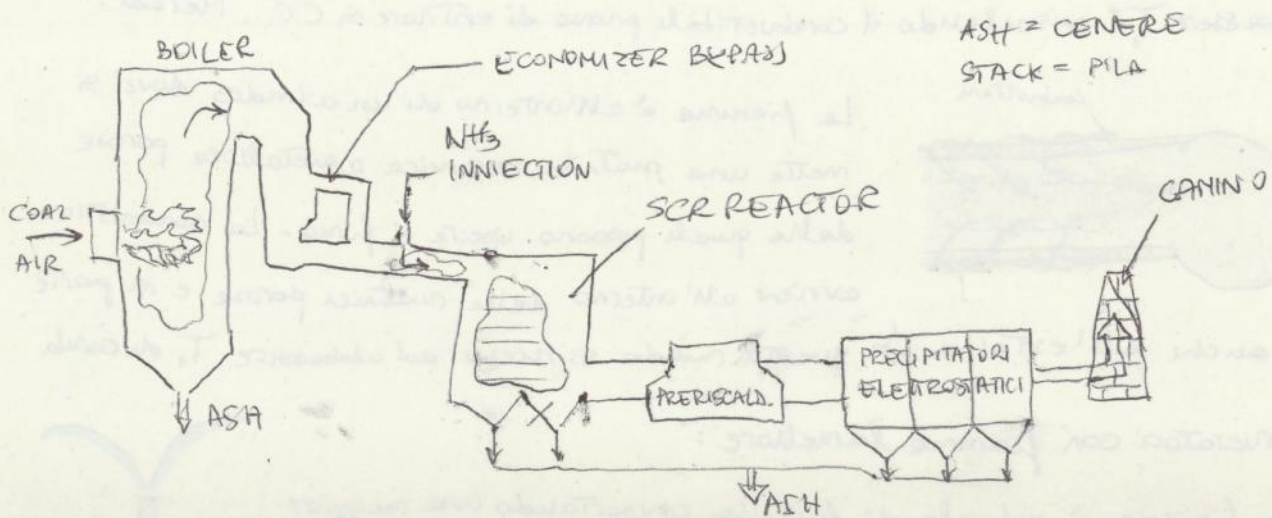
Poiché con le SNCR è necessario avere Temperature molto alte, si usano nella SCR delle sostanze chiamate CATALIZZATORI che permettono di innescare le reazioni anche a T minori. Il gas di combustione (fuel gas) si tengono a 250-450°C.

Funzionamento: si introduce  $NH_3$  dopo la CC. le quale spezza gli  $NO_x$ :  
 $2NH_3 + NO + NO_2 \rightarrow 2N_2 + 3H_2O$  dopo diverse reazioni. Il fume con  $NH_3$  entrano in un reattore dove avvengono le reazioni per poi finire (puliti) nel pre-

scaldatore d'aria.

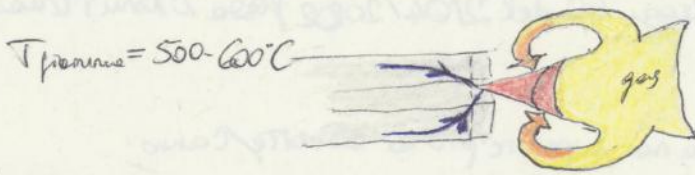


Schema:



**SMOG FOTOCHIMICO:** rappresenta le grosse quantità di  $NO$  e sostanze volatili organiche VOC e avviene in presenza di energie solare dove i fotoni spezzano la molecola di  $NO_2 \rightarrow NO + O$  formando un atomo monoatomico di ossigeno molto aggressivo chiamato ossigeno nascente.  $O$  reagisce molto violentemente con  $O_2$  dando ozono  $O_3$  il quale reagisce con le  $NO$  formando rigenerando  $NO_2 + O_2$ . Questo ciclo di reazioni non è gradevole in quanto spesso si formano dei radicali di  $(OH)^{\cdot}$  = radicali ossidrilici - Il ciclo è detto CICLO FOTOSTAZIONARIO DELL'AZOTO.  
 ↳ i radicali  $OH$  reagiscono con gli idrocarburi volatili e con  $NO_2$  presenti nelle emissioni di scarico degli autoveicoli formando aldeidi, nitrati organici

- bruciatore di gas ed aria soffiata: 28, 37, 0,5 ← CONVENZIONALE (delicatissimo)
- bruciatore di gas ed aria soffiata con RICIRCOLAZIONE DEI FUMI: 20, 6, 0,5



si fumi riveddono sempre  
- le fiamme e la raffreddano

- bruciatori gas FULLY PREMIXED: 11↓, 32, 20↑

Si riesce ad abbassare la formazione di  $\text{NO}_x$ , ma aumenta quelle di CO perché la

T è troppo bassa. → basse applicazioni

Tutte le applicazioni usate per i piccoli impianti non sono molto funzionali.

## FORMAZIONE DI POLVERI

Le polveri sono incombustibili solidi o materiali non combustibili come le ceneri. Possono essere inerti o pericolose ad esempio se contengono piombo, amianto, ... La forma

delle polveri fa variare la loro pericolosità: i granelli allungati sono più facilmente inglobabili dall'organismo a parità di diametro medio equivalente rispetto ai tondi.

Per definire le quantità massime di polveri che si possono produrre si devono far passare i gas di scarico attraverso un filtro assoluto al quale si pesa prima e dopo aver fatto passare  $20\text{ m}^3$  di gas. Se il bilancio si fa in breve tempo si ottengono molti errori.

Per le polveri sottili esistono dei contatori di particelle (molto più costosi) che rilevano il numero di particelle e morte e e valle del filtro e degli spettri fotometrici che ne rilevano il tipo.

PM10: si identificano le polveri, fumi e microgocce di sostanze liquide in sospensione nell'atmosfera sottoforma di microscopiche particelle con diametro  $\leq 10\mu\text{m}$

FONTI NATURALI: incendi, erosioni del suolo, eruzioni vulcaniche, polline, sali marini;

FONTI ANTROPICHE: combustione nei motori e scappio negli impianti di riscaldamento e nelle attività industriali.

MORTALITÀ: le PM2,5 e PM10 sono le più dannose per l'organismo perché oltrepassano le difese dell'apparato respiratorio: fino a  $1,1\mu\text{m}$  - alveoli polmonari; fino a  $2,1\mu\text{m}$  - bronchi terminali; fino a  $3,3\mu\text{m}$  - bronchi secondari; fino a  $4,7\mu\text{m}$  - trachee e bronchi primari; fino a  $7\mu\text{m}$  - laringe; fino a  $10\mu\text{m}$  - cavità orale e nasale.

## Funzionamento pompe:

Terminale aspirazioni fumi

filtro = carte assorbenti

si aspira il fumo  $\times 10$  volte per macchiare il filtro

Carte con 10 cerchi colorati Toralite da 0 a 9

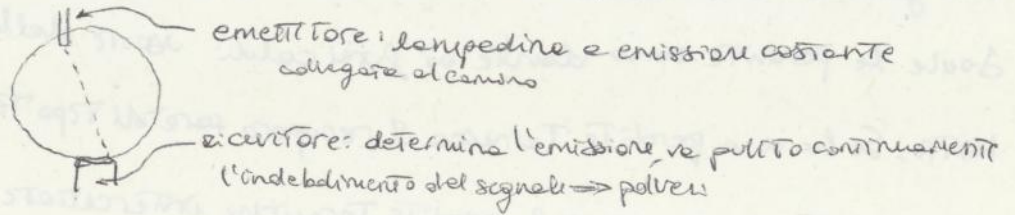
nel mezzo di un buco dove si eccoste il filtro e si valuta il colore

↳ non controlla però né la quantità né le dimensioni delle particelle: esistono dei range che li correbbano ma non sono esatti

Valori massimi per legge: Metano 0, gasolio 1

Questo meccanismo è utilizzato su tutti i tipi di impianto per tenere sotto controllo le emissioni di particelle carboniose. Nei grandi impianti sono automatici, oppure si usano:

Sistemi fotoacustico



## AUMENTO DEL RENDIMENTO

↳ negli impianti e nei cicli TD, non si riferisce all'effetto utile, iadementi termici. L'energia elettrica si usa tutta indistintamente quando la si produce, invece quella termica si sfrutta solo se la T è sufficientemente alta. Per aumentarla si deve recuperare l'energia termica persa nelle trasformazioni. Se si aumenta si consuma meno energia sia negli impianti e combustione che nei sistemi di tipo TD.

Equazioni di conservazione dell'energia:  $I = Q_u + P_{par} + P_{com}$   $\rightarrow$  idamento

nei motori e combustione interne

$$W_s = W_u + W_{par} + W_{com}$$

(Cicli Otto e Diesel)  $P_{com} = \frac{h_{com}}{W_s} = \frac{\dot{m}_b (T_c - T_e)}{\dot{m}_b \cdot H_i}$  la parte più grossa su cui intervenire

Limiti: 1) Tecnologie di scambio

minore è  $T_f$   
minore è le  
perdite

2) Tecnologie di corrosione

3) Termodinamica di Temperature (2° principio)

obiettivo: sfruttare energia termica non immagazzinabile

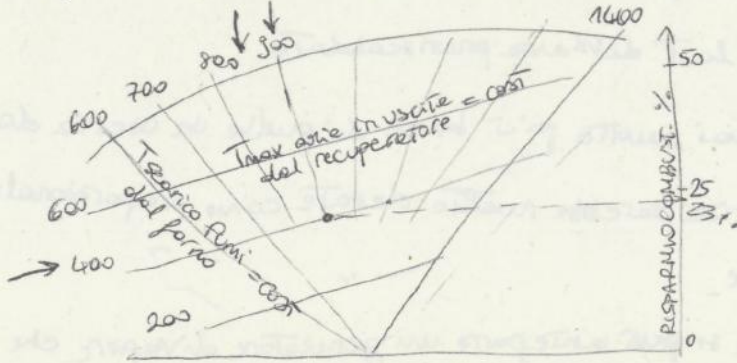
- 1) Si è aumentate le superficie di scambio (anche perché il costo del combustibile è meglio) per scambiare meglio e sfruttare il potere calorifico del combustibile
- 2) Aumentando la superficie di scambio si aumenta anche le possibilità di corrosione perché aumenta la condensazione  $\rightarrow$  soluz. con calcolare a condensazione
- 3) I fumi devono uscire per forza a  $T_f > T_{a, H_2O}$  perché scambiano calore su superficie

Si cerca di evitare le perdite, ma quando non è possibile si recupera all'indietro



con il controcorrente si avrebbero dei condotti molto più sollecitati termicamente e quindi si rischierebbe di romperli. Con gli eguocorrente invece si abbasserebbe l'efficienza dello scambio termico, ma si tutelano i materiali.

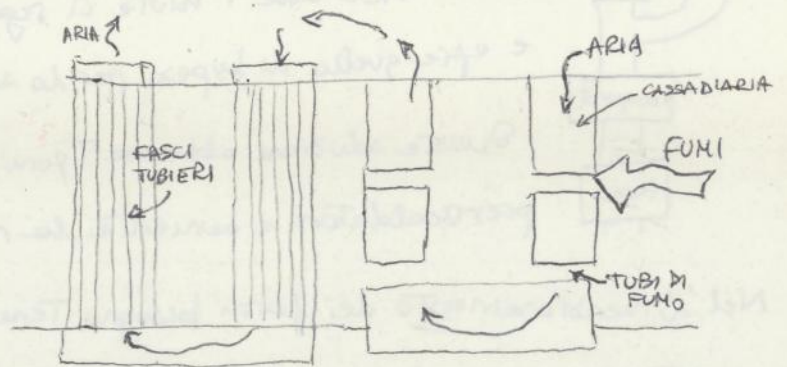
Diagramma per la combustione dell'olio combustibile.



Bisogna tener conto dei danni che si creano sul recuperatore correlati al tempo di vita rispetto al tempo di recupero/trasferimento delle spese con le perdite.

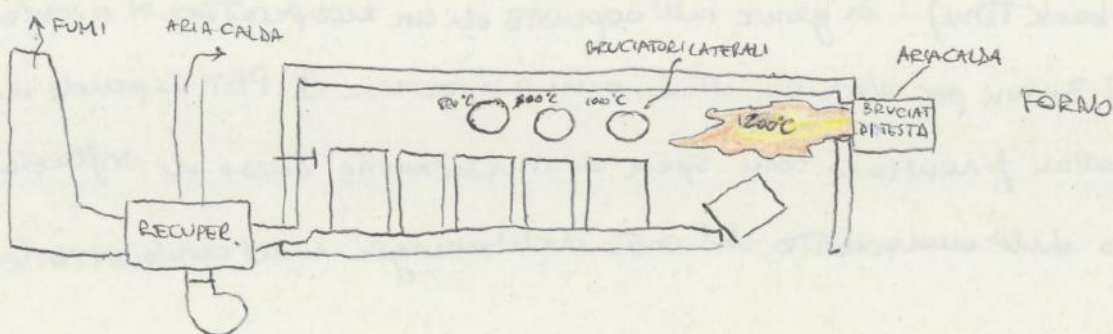
I tubi sono ondulati per potersi allungare e adattare alle dilatazioni termiche senza creare danni. Per aumentare le turbolenze si aumenta la velocità ma aumentano anche le perdite (non si alza  $N$  di troppo). I gradienti di temperatura e concentrazione modificano le composizioni degli acciai ma abbassando la  $T$  fusione e rischiando di farli cadere.

Soluzioni: per evitare che i <sup>TUBI</sup> fumi vengano investiti che fumi troppo caldi si mettono dei fasci tubieri e poi una cassa d'aria con all'interno i tubi di fumo che lo attraversano.



I condotti di acciaio sono sotterranei per evitare che le pareti a  $800^{\circ}\text{C}$  sono esposti in ambiente e ci si ustioni.

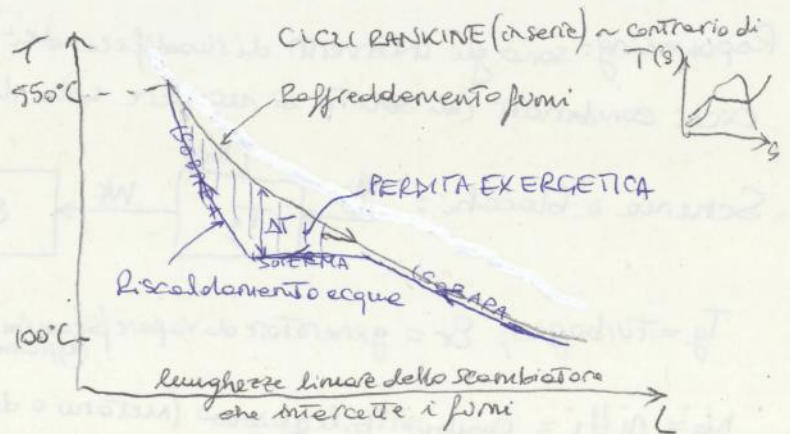
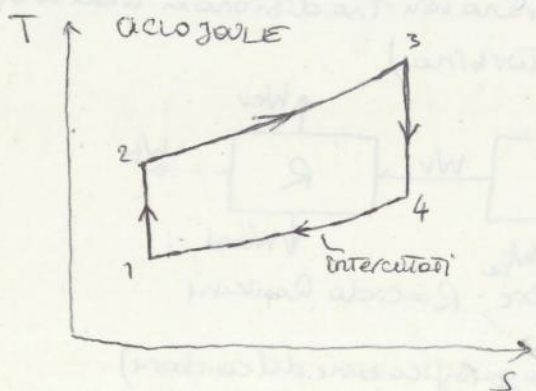
Lo scambiatore aumenta i costi e diminuisce i  $\text{FORNOSCAMB}$ , ma abbassa  $T$  e allunga la vita.



# CICLI COMBINATI

Solitamente sono composti da un ciclo Joule + 2-3 cicli Rankine in serie.

Funzionamento: L'energia Termica di scarico dei Turbogas ( $\eta_{th} = 39-40\%$ ) viene poi mandata nei generatori di vapore (senza bruciatori); il vapore in ingresso alle Turbine genera energia elettrica. Nei cicli Rankine ci sono condensatori alimentati da scambiatori che vengono collegati al Teleriscaldamento, garantendo un buon funzionamento nelle stagioni invernali.

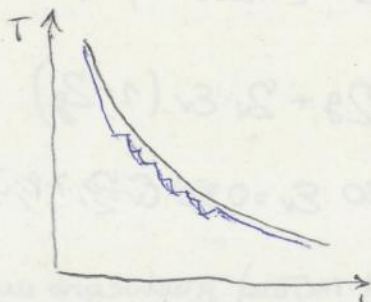


Tra 4 e 1 avviene il recupero fumi molto caldi e con  $O_2$ :

La fiamma si sviluppa nelle C.C. adiabate quindi ci vuole un maggior eccesso d'aria

Per il 1° Principio della TD, quando i fumi si raffreddano, tutta l'energia è ceduta all'acqua che si riscalda. Ma, a parità di energie fornite, si nota che la  $T_m^*$  dell'acqua è molto minore della  $T_{media}$  dei fumi, ossia si ha una perdita exergetica che causa un basso rendimento. La soluzione ideale sarebbe avere 40-50 cicli Rankine in serie in modo da approssimare meglio le  $T^*$  fumi e avere una  $T^*$  acqua migliore, ma non è possibile:

SOLUZIONI: 1° IMPIANTO 1996 - invece di 1 solo ciclo Rankine se ne mettono 2 IN SERIE



$\eta_{ideale} = 48\%$  ma  $\eta_{reale} = 45\%$  considerando le perdite  
 ↳ adesso l'impianto è stato chiuso

