3.1. Schema dei flussi (termici e massici) entranti ed uscenti in un generatore di vapore

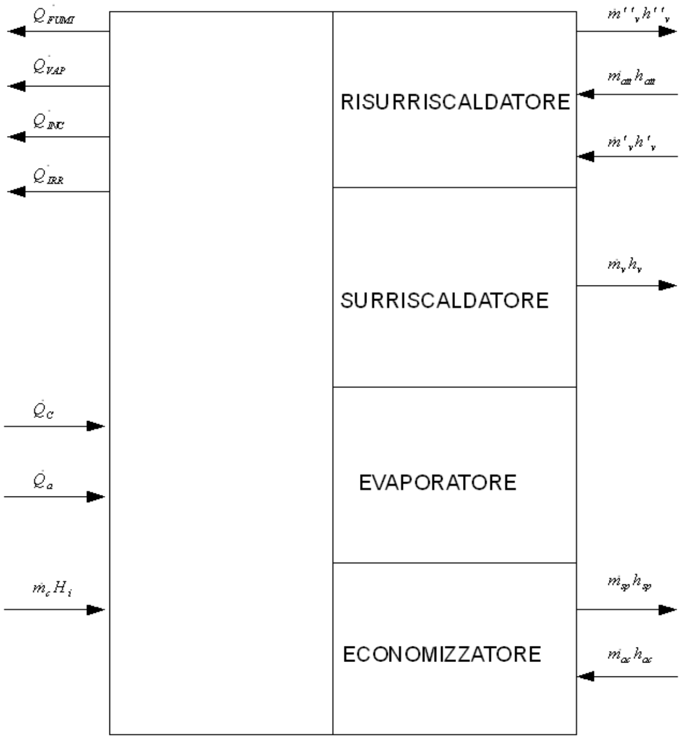

Fig.1

Per capire il significato dei termini che compaiono in Fig.1 , si faccia riferimento a Tab.1

$\dot{Q}_{INC}$	Perdite termiche per incombusti
$\dot{Q}_{FUMI}$	Potenza termica dispersa dai fumi di combustione
$\dot{Q}_{VAP}$	Potenza termica dispersa attraverso il vapore
$\dot{Q}_{IRR}$	Potenza termica dispersa attraverso le pareti esterne[1]
$\dot{Q}_a$	Potenza termica di preriscaldamento dell'aria
$\dot{Q}_C$	Potenza termica di preriscaldamento del combustibile
v	Vapore
att	Attemperamento
ac	Alimento caldaia
sp	spurghi

Tab.1

$\dot{Q}_a$ e $\dot{Q}_C$ possono essere espressi come segue:

1 Le pareti esterne cedono calore all'ambiente prevalentemente per convezione, pur essendo presente una certa aliquota di irraggiamento; è per questo motivo che il termine $\dot{Q}_{IRR}$, oltre a dipendere dal ΔT, dipende anche dal coefficiente di scambio convettivo parete-aria.

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a c_p (T_a - T_0) \quad (3.1)$$
$$\dot{Q}_C = \dot{m}_C c_p (T_C - T_0) \quad (3.2)$$

dove T_0 è la temperatura di stoccaggio.

3.2. Rendimento di un generatore di vapore

Il rendimento di un generatore di vapore è espresso formalmente come segue:

$$\eta = \frac{(potenza\ termica\ ricevuta\ dal\ vapore)}{(potenza\ termica\ ricevuta\ dall'\ intero\ sistema)} \quad (3.3)$$

Generalmente,tale quantità è dell'ordine del *90%.*
Facendo riferimento a Fig.1, nella quale sono riassunti tutti i flussi termici e massici relativi al generatore, il rendimento η può essere espresso sia in forma diretta che in forma indiretta:

$$\eta = \frac{(\dot{m}_v\ h_v + \dot{m}_v''\ h_v'' + \dot{m}_{sp}\ h_{sp} - \dot{m}_{ac}\ h_{ac} - \dot{m}_v'\ h_v' - \dot{m}_{att}\ h_{att})}{(\dot{m}_c\ H_i + \dot{Q}_a + \dot{Q}_C)} \quad \underline{forma\ diretta}\ (3.4)$$

$$\eta = 1 - \frac{(\Sigma \dot{Q}_{DISPERSO})}{(\dot{m}_C H_i + \dot{Q}_a + \dot{Q}_C)} \quad \underline{forma\ indiretta}\ (3.5)$$

Di queste due espressioni è molto più conveniente l'utilizzo della (3.5), infatti, essa comporta un errore minore rispetto all'altra. Si supponga ad esempio che gli strumenti di misura adoperati per il rilievo delle grandezze in gioco abbia un errore dell' *1%*; ricordando che la quantità di calore acquisita dal vapore è solitamente intorno al *90%* rispetto a quella effettivamente somministratagli, la (3.4) porterebbe a commettere un errore proprio su questa aliquota così consistente. Invece, la (3.5) è espressa in funzione della potenza termica dispersa, che per quanto detto è pari a circa il *10%* dell'intero calore somministrato[2]; in definitiva, applicando la (3.5), quell'errore dell' *1%* dello strumento di misura andrebbe ad inficiare un'aliquota molto più piccola, ottenendo così un risultato senz'altro più attendibile.

3.3. Potenze termiche disperse in un generatore di vapore

Come si intuisce da Fig.1, la somma delle potenze termiche disperse è data da:

$$\Sigma \dot{Q}_{DISPERSO} = \dot{Q}_{FUMI} + \dot{Q}_{VAP} + \dot{Q}_{INC} + \dot{Q}_{IRR} \quad (3.6)$$

Tra queste, $\dot{Q}_{VAP}$ [3]viene solitamente trascurata; delle altre tre rimanenti, l'aliquota più consistente è la $\dot{Q}_{FUMI}$, che viene espressa come segue:

$$\dot{Q}_{FUMI} = \dot{m}_f \bar{\bar{c}}_{p\ fumi} (T_{fumi} - T_{amb}) \quad (3.7)$$

$\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}$ è il risultato di una doppia media, fatta sia sulla composizione dei gas che sulla loro temperatura[4] .

2 Tale calore somministrato è rappresentato dal denominatore delle (3.4) e (3.5)
3 $\dot{Q}_{VAP} = \dot{m}_v \Delta h = \dot{m}_v (h_v - h_{ACQUA})$, dove h_{ACQUA} è relativo a condizioni atmosferiche
4 I gas combusti sono una miscela di diversi gas caratterizzati da proprietà termodinamiche diverse; pertanto si può

$\dot{m}_f$, ovvero la portata di fumi, per il principio di conservazione della massa è chiaramente pari alla somma delle portate di combustibile ed aria utilizzate in camera di combustione.
$\dot{m}_f = \dot{m}_a + \dot{m}_C$ (3.8)

Sostituendo la (3.8) nella (3.7) si ottiene:

$\dot{Q}_{FUMI} = (\dot{m}_a + \dot{m}_C)\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}(T_{fumi} - T_{amb})$ (3.9)

Ricordando l'espressione del rapporto reale aria-combustibile $\alpha_R = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_C}$, la (3.9) può anche essere espressa come:

$\dot{Q}_{FUMI} = (\alpha_R \dot{m}_C + \dot{m}_C)\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}(T_{fumi} - T_{amb}) = \dot{m}_C(1+\alpha_R)\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}(T_{fumi} - T_{amb})$ (3.10)

Richiamando l'espressione dell'indice d'aria λ e dell'indice d'aria *e*[5]*,* la (3.10) diventa:

$\dot{Q}_{FUMI} = \dot{m}_C(1+\alpha_{st}(1+e))\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}(T_{fumi} - T_{amb})$ (3.11)

Le potenze termiche disperse vengono usualmente espresse come percentuale della potenza termica sprigionata dalla combustione, pertanto relativamente alla $\dot{Q}_{FUMI}$ si ha che:

$\frac{(\dot{Q}_{FUMI})}{(\dot{m}_C H_i)} = \frac{(\dot{m}_C(1+\alpha_{st}(1+e))\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}(T_{fumi} - T_{amb}))}{(\dot{m}_C H_i)} = \frac{((1+\alpha_{st}(1+e))\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}(T_{fumi} - T_{amb}))}{H_i}$ (3.12)

Si valuti adesso $\dot{Q}_{IRR}$, che si ricorda essere la potenza termica dispersa dalle pareti del generatore verso l'ambiente.

$\dot{Q}_{IRR} = S_{ext} h_c (T_p - T_a)$ (3.13),
dove S_{ext} è la superficie esterna attraverso la quale si ha la dispersione, mentre h_c[6] è il coefficiente di scambio termico convettivo.
Anche $\dot{Q}_{IRR}$, così come le altre potenze termiche disperse che si vedranno, è esprimibile in termini percentuali:
$\frac{(\dot{Q}_{IRR})}{(\dot{m}_C H_i)} \approx 2$ % (3.14)

Esistono diagrammi che permettono di valutare $\dot{Q}_{IRR}$ in base alla potenza dell'impianto:

ritenere che l'intera portata di gas combusti abbia proprietà termodinamiche ottenute come media di quelle relative ai gas componenti.

5 $\lambda = \frac{\alpha}{\alpha_{st}} = 1 + e \rightarrow \alpha = \alpha_{st}(1+e)$

6 $[\frac{W}{(m^2 K)}]$

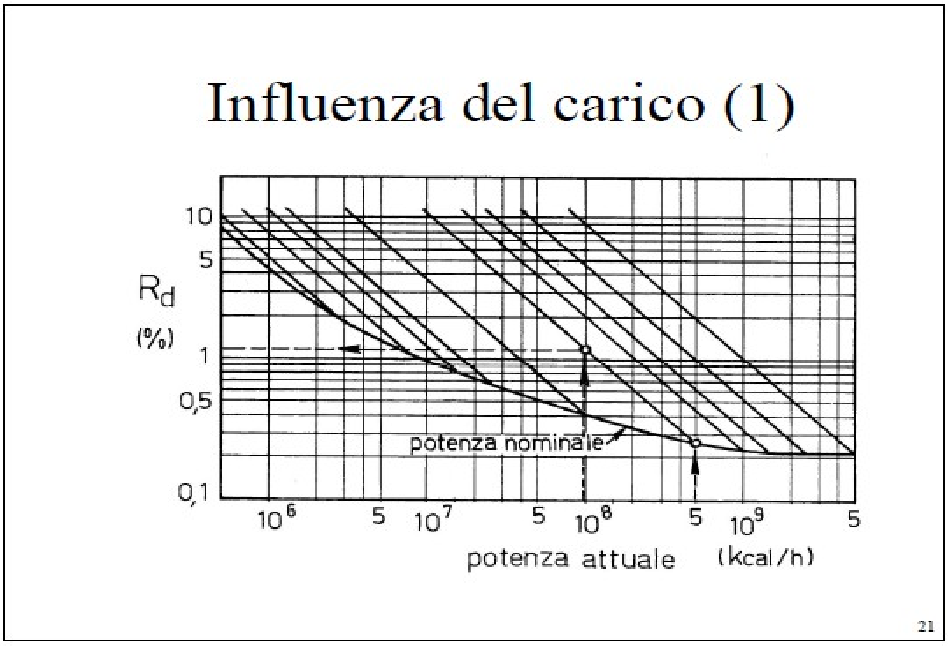

Fig.2

In Fig.2 si nota come man mano che la potenza dell'impianto va al di sotto di quella nominale, $\dot{Q}_{IRR}$ aumenta[7].

Resta da valutare la potenza termica dispersa per incombusti, $\dot{Q}_{INC}$. Quando si parla di incombusti, ci riferiamo all'ossido di carbonio *CO*, infatti esso viene ritenuto tale in quanto la sua presenza è dovuta ad un processo di incompleta ossidazione della CO_2.

$$\dot{Q}_{INC}=\dot{m}_f[CO]\frac{\rho_{CO}}{\rho_{FUMI}}H_{(i(CO))} \quad (3.15)$$

In sostanza questa potenza termica rappresenta l'aliquota che si ricaverebbe se venisse bruciato anche l'ossido di carbonio che si trova invece allo scarico; tale potenza termica verrebbe espressa come $\dot{m}_{CO}H_{(i,CO)}$, cioè come se il *CO* fosse un combustibile dal quale è possibile ottenere una certa potenza termica. Quanto alla (3.15), [*CO*] è un termine volumetrico, pertanto per ottenere la massa si procede come segue:

$$m_{CO}=(\frac{V_{CO}}{V_{FUMI}})\times(\frac{\rho_{CO}}{\rho_{FUMI}})\times m_{fumi}=m_{fumi}[CO]\frac{\rho_{CO}}{\rho_{FUMI}} \quad (3.16)$$

Generalmente, si considera che per ogni punto percentuale di concentrazione di CO nei fumi, il rendimento del generatore di vapore diminuisce del 4% .

ESERCIZI SVOLTI

1. Un impianto brucia un combustibile liquido con un rapporto C/H =7 e avente H_i= 40000 kJ/kg; supponendo che la combustione avvenga con eccesso d'aria e=10% e che t_f=152°C e t_{amb}=27°C, si calcoli la perdita percentuale dei fumi.

7 E' dovuto al fatto che il rapporto superficie/volume aumenta in maniera inversamente proporzionale all'impianto; pertanto facendo funzionare l'impianto a potenza minore di quella nominale, si verifica un aumento del rapporto superficie/volume, con conseguente aumento della potenza termica dispersa per convezione. A potenza ridotta, la superficie di scambio risulta come "sovradimensionata" rispetto al volume utilizzato per produrre calore.

$$\dot{Q}_{FUMI}=\frac{((1+\alpha_{st}(1+e))\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}(T_{fumi}-T_{amb}))}{H_i}$$

I termini di cui abbiamo bisogno sono α_{st} e $\overline{\overline{c_p}}_{fumi}$; cominciamo a calcolare α_{st} .
Si ricorda che le reazioni di ossidazione di carbonio e idrogeno sono:

$$C+O_2\rightarrow CO_2 \quad \text{(E.1a)}$$
$$H_2+\frac{1}{2}O_2\rightarrow H_2O \quad \text{(E.1b)}$$

Dalle precedenti lezioni è ben nota la procedura da seguire per il calcolo del rapporto aria-combustibile per un combustibile assegnato. In questo caso specifico, abbiamo un combustibile liquido del quale è noto il rapporto *C/H* ed il potere calorifico inferiore; il primo passo, come è noto, consiste nel determinare le frazioni massiche rispettivamente di *C* ed *H* nel combustibile.Si ricava immediatamente che:

$\%H_2$ = 12.5 %
$\%C$ = 87.5 %

Si ricorda che per combustibili di questo tipo, il rapporto tra la massa di ossigeno stechiometrica e quella di combustibile è ottenibile con la seguente relazione:

$$\frac{kg_{(O_2)}}{kg_{FUEL}}|_{ST}=(kg_{(O_2)}/kg_C)(\frac{C}{(C+H)})+(kg_{(O_2)}/kg_{(H_2)})(\frac{H}{(C+H)})=2.67\times0.875+8\times0.125=3.34 \quad \text{(E.2}$$

Per ricavare il valore di α_{ST} basta moltiplicare la (E.2) per 4.31, che si ricorda essere uguale ai *kg* d'aria per *kg* di ossigeno.

$$\alpha_{ST}=3.34\times4.31=14.4$$

Calcolato α_{ST} si passi al calcolo di $\overline{\overline{c_p}}_{fumi}$; tale calcolo, come già accennato, è il risultato di una doppia media. La prima media viene effettuata singolarmente sulle due temperature di lavoro (T_{fumi} e T_{amb}), tenendo in considerazione le frazioni massiche delle singole specie chimiche nei fumi e i loro rispettivi calori specifici a pressione costante. Questi due valori, corrispondenti a ciascuna temperatura, vengono successivamente mediati algebricamente, ottenendo così il valore definitivo di $\overline{\overline{c_p}}_{fumi}$ .Iniziamo con la prima media: con riferimento alle (E.1a,b), è possibile risalire rispettivamente alle quantità in massa dei prodotti corrispondenti (in ciascuna reazione) ad 1 *kg* di combustibile bruciato. Partendo dalla (E.1a), si deve tener conto della CO_2 prodotta dalla combustione, dell'azoto inerte contenuto nell'aria di combustione e dell'O_2. In particolare, quest'ultimo termine è dovuto al fatto che la combustione avviene con eccesso d'aria.

$$\frac{kg_{CO_2}}{kg_C}=\frac{44}{12}=3.67 \quad \text{(E.3a)}$$
$$\frac{kg_{O_2}}{kg_C}=e\times\frac{32}{12}=0.10\times\frac{32}{12}=0.267 \quad \text{(E.3b)}$$
$$\frac{kg_{N_2}}{kg_C}=\frac{kg_{N_2}}{kg_C}|_{ST}+\frac{kg_{N_2}}{kg_C}|_e \quad \text{(E.3c)}$$

Si osservi come in questo caso i *kg* di N_2 vanno ricavati comunque sulla base dei *kg* di O_2, facendo però riferimento al rapporto in massa tra N_2 e O_2 nell'aria, anziché al rapporto il volumi trattato nelle lezioni precedenti. La composizione massica dell'aria è infatti esprimibile come:

$$\begin{array}{l} \dfrac{kg_{N_2}}{kg_{ARIA}}=0.77 \\ \dfrac{kg_{O_2}}{kg_{ARIA}}=0.23 \end{array} \quad \rightarrow \quad \frac{kg_{N_2}}{kg_{O_2}}=\frac{0.77}{0.23}=3.35$$

Ciò vuol dire che a ciascun *kg* di O_2 di combustione,ne corrispondono 3.35 di N_2. Tornando alla (E. 3c) si ha che:

$$\frac{kg_{N_2}}{kg_C}=3.35\times\frac{32}{12}+3.35\times e\times\frac{32}{12}=8.93+0.893=9.83$$

Un procedimento analogo va fatto per la reazione (E.1b):

$$\frac{kg_{H_2O}}{kg_{H_2}}=\frac{18}{2}=9 \quad \text{(E.4a)}$$

$$\frac{kg_{O_2}}{kg_{H_2}}=e\times\frac{16}{2}=0.10\times 8=0.8 \quad \text{(E.4b)}$$

$$\frac{kg_{N_2}}{kg_{H_2}}=\frac{kg_{N_2}}{kg_{H_2}}\Big|_{ST}+\frac{kg_{N_2}}{kg_{H_2}}\Big|_{e}=(1+e)\times\frac{kg_{N_2}}{kg_{H_2}}\Big|_{ST}=1.1\times 3.35\times 8=29.5 \quad \text{(E.4c)}$$

Fatto ciò, il passo successivo consiste nel calcolare le frazioni massiche di CO_2, N_2, O_2 e H_2O rispetto al *kg* di combustibile (*FUEL*) bruciato

$$\frac{kg_{CO_2}}{kg_{FUEL}}=\frac{kg_{CO_2}}{kg_C}\times\frac{kg_C}{kg_{FUEL}}=3.67\times 0.875=3.2 \quad \text{(E.5a)}$$

$$\frac{kg_{O_2}}{kg_{FUEL}}=\frac{kg_{O_2}}{kg_C}\times\frac{kg_C}{kg_{FUEL}}+\frac{kg_{O_2}}{kg_{H_2}}\times\frac{kg_{H_2}}{kg_{FUEL}}=0.267\times 0.875+0.8\times 0.125=0.234+0.1=0.334 \quad \text{(E.5b)}$$

$$\frac{kg_{N_2}}{kg_{FUEL}}=\frac{kg_{N_2}}{kg_C}\times\frac{kg_C}{kg_{FUEL}}+\frac{kg_{N_2}}{kg_{H_2}}\times\frac{kg_{H_2}}{kg_{FUEL}}=9.83\times 0.875+29.5\times 0.125=8.6+3.69=12.29 \quad \text{(E.5c)}$$

$$\frac{kg_{H_2O}}{kg_{FUEL}}=\frac{kg_{H_2O}}{kg_{H_2}}\times\frac{kg_{H_2}}{kg_{FUEL}}=9\times 0.125=1.125 \quad \text{(E.5d)}$$

Arrivati a questi risultati, abbiamo tutti gli elementi per poter calcolare le frazioni massiche delle singole specie chimiche nei fumi;infatti, frazione massica di una certa specie chimica *A* (x_A) in una miscela è definita in maniera simile a quanto visto per la composizione volumetrica, si ha infatti che:

$$x_A=\frac{kg_A}{kg_{TOT}} \quad \text{(E.6)}$$ [8]

8 Si noti che nella (E.6) compaiono le masse assolute delle specie in gioco; nel nostro calcolo invece sono state ricavate le masse prodotte per *kg* di combustibile bruciato. Siccome x_A è data da un rapporto, i kg_{FUEL} si semplificano tra numeratore e denominatore della (E.6), ottenendo così lo stesso risultato.

Applicando la (E.6) a ciascuna delle specie chimiche in gioco otteniamo che:

$$x_{CO_2}=\frac{3.2}{3.2+0.334+12.29+1.125}=\frac{3.2}{16.95}=18.9\% \quad (E.7a)$$

$$x_{O_2}=\frac{0.334}{3.2+0.334+12.29+1.125}=\frac{0.334}{16.95}=2\% \quad (E.7b)$$

$$x_{N_2}=\frac{12.29}{3.2+0.334+12.29+1.125}=\frac{12.29}{16.95}=72.5\% \quad (E.7c)$$

$$x_{H_2O}=\frac{1.125}{3.2+0.334+12.29+1.125}=\frac{1.125}{16.95}=6.6\% \quad (E.8c)$$

Fatto ciò, abbiamo bisogno di conoscere i valori di calore specifico a pressione costante di ciascuna specie chimica, sia a t_f sia a t_{amb}.

	c_p(152°C) [kJ/kgK]	c_p(27°C) [kJ/kgK]
N_2	1.048	1.04
CO_2	0.961	0.871
H_2O	1.997	2.06
O_2	0.951	0.92

Tab.2

Come già anticipato, la prima delle due media si ottiene(per ciascuna delle due temperature, T_{fumi} e T_{amb}) come media pesata dei calori specifici delle singole specie (CO_2, N_2, O_2 e H_2O), dove il peso è rappresentato dalle frazioni massiche delle stesse specie nei fumi, espresse dalle (E.8a,b,c,d). Più precisamente abbiamo che:

$$\bar{c}_{p\ fumi}(t=152\,°C)=x_{N_2}\times c_{p\ N_2}+x_{CO_2}\times c_{p\ CO_2}+x_{H_2O}\times c_{p\ H_2O}+x_{O_2}\times c_{p\ O_2}=$$
$$=0.725\times 1.048+0.189\times 0.961+0.066\times 1.997+0.02\times 0.951=1.092\frac{kJ}{kgK} \quad (E.9a)$$

$$\bar{c}_{p\ fumi}(t=27\,°C)=x_{N_2}\times c_{p\ N_2}+x_{CO_2}\times c_{p\ CO_2}+x_{H_2O}\times c_{p\ H_2O}+x_{O_2}\times c_{p\ O_2}=$$
$$=0.725\times 1.04+0.189\times 0.871+0.066\times 2.006+0.02\times 0.92=1.073\frac{kJ}{kgK} \quad (E.9b)$$

$\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}$ viene calcolata dunque come media aritmetica delle (E.9a,b);

$$\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}=\frac{\bar{c}_{p\ fumi}(t=152\,°C)+\bar{c}_{p\ fumi}(t=27\,°C)}{2}=\frac{1.092+1.073}{2}=1.083\frac{kJ}{kgK} \quad (E.10)$$

In definitiva,

$$\dot{Q}_{FUMI}=\frac{((1+\alpha_{st}(1+e))\bar{\bar{c}}_{p\ fumi}(T_{fumi}-T_{amb}))}{H_i}=2.7\%$$

2. Facendo riferimento all'esercizio 1, si calcoli la potenza termica dispersa per incombusti supponendo che allo scarico [CO]=1 %. Per CO si consideri un valore di potere calorifico inferiore pari a 2500 kcal/kg.

Si ricorda che, in percentuale, la potenza termica dispersa per incombusti è data da:

$$\dot{Q}_{INC} = \frac{\dot{m}_f [CO] \frac{\rho_{CO}}{\rho_{FUMI}} H_{i,CO}}{\dot{m}_C H_i}$$

Dalla letteratura si ricava che $\rho_{CO}(t=152\,°C)=1.145\,\frac{kg}{Nm^3}$; si assume inoltre che:

$\rho_{fumi} \approx \rho_{ARIA} = 1.29\,\frac{kg}{Nm^3}$ [9].

Si osserva ancora che il rapporto $\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_C}$ non è altro che $1+\alpha$; a questo punto è possibile procedere al calcolo della $\dot{Q}_{INC}$:

$$\dot{Q}_{INC} = 16.8 \times 0.01 \times \frac{1.145}{1.29} \times \frac{2500 \times 4.187}{40000} = 3.9\,\% \quad \text{(E'.1)}$$

3. Si consideri un impianto che brucia propano (C_3H_8) con un eccesso d'aria pari allo 8%. Nell'ipotesi che l'impianto sia sprovvisto di preriscaldatore dell' aria, viene rilevato che la temperatura dei fumi è $t'_f = 145\,°C$. Se invece si considera la presenza di un preriscaldatore d'aria, la temperatura dei fumi è $t''_f = 130\,°C$. Si calcoli come cambia il rendimento η_{GV} del generatore di vapore nel passare da un caso all'altro.

Com è noto, il preriscaldatore d'aria non è altro che uno scambiatore di calore nel quale il fluido caldo è rappresentato proprio dai fumi del generatore di vapore. Viene infatti sfruttata la potenza termica che i fumi sono ancora in grado di cedere al fine preriscaldare l'aria di combustione; questo vuol dire che i gas lasciano il generatore ad un temperatura minore, con una conseguente riduzione delle dispersioni termiche e quindi con un incremento del rendimento. E' chiaro che questo confronto verrà effettuato a parità di output del sistema stesso (ovvero a parità di temperatura di uscita del vapore). Un'altra cosa da sottolineare è che nel computo delle potenze termiche disperse dal generatore , solo la potenza termica dispersa dai fumi risente della presenza o meno del preriscaldatore, pertanto la variazione di rendimento è imputabile esclusivamente a questo termine. Più precisamente, nelle ipotesi fatte tale variazione di rendimento risulta essere esattamente uguale alla variazione percentuale della $\dot{Q}_{FUMI}$.

$$\Delta\eta_{GV} = \Delta\%\dot{Q}_{FUMI} \quad \text{(E''.1)}$$

La (E''.1) è spiegabile se si considera che $\Delta\eta_{GV} = \eta_{GV}\,(T_f = 130\,°C) - \eta_{GV}\,(T_f = 145\,°C)$ (E''.2);

applicando la (3.5) ad entrambi i termini della (E''.2), si nota che questi due rendimenti, nelle ipotesi fatte, si differenziano esclusivamente per la $\dot{Q}_{FUMI}$. Nell'ipotesi che $\dot{Q}_a$ e $\dot{Q}_C$ siano nulle, si ottiene proprio che:

9 In realta ρ_{fumi} è calcolabile con un procedimento uguale a quello seguito per il calore specifico a pressione costante dei fumi

$$\Delta\eta_{GV} = \Delta\dot{Q}_{FUMI} \quad \text{(E''.3)};$$

esprimendo il $\Delta\dot{Q}_{FUMI}$ in percentuale, si ottiene esattamente la (E".1). A sua volta, il $\Delta\%\dot{Q}_{FUMI}$ risulta essere pari a:

$$\Delta\%\dot{Q}_{FUMI} = \frac{(1+\alpha_R)\overline{\overline{c_p}}(T'_f - T''_f)}{H_i} \times 100 \quad \text{(E''.4)}$$

Cominciamo a calcolare il valore di α_R per il propano, sapendo che *e*=8%.
La reazione di combustione del propano è espressa da:

$$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O \quad \text{(E''.5)}$$

La (E".5) rappresenta la reazione di combustione stechiometrica del propano, pertanto da essa possiamo facilmente ricavare il valore di α_{ST} ; infatti i *kg* stechiometrici di O_2 per *kg* di C_3H_8 si ottengono come segue:

$$\frac{kg_{O_2}}{kg_{C_3H_8}} = \frac{5\times 32}{12\times 3 + 1\times 8} = 3.63$$

Come è noto, il valore di α_{ST} si ottiene moltiplicando i $\frac{kg_{O_2}}{kg_{C_3H_8}}$ per 4.31.

$$\alpha_{ST} = 3.63\times 4.31 = 15.64$$

Ricordando che:

$\lambda = \frac{\alpha_R}{\alpha_{ST}} = e+1$ si ottieme facilmente che $\alpha_R = \alpha_{ST}\times(e+1) = 15.64\times 1.08 = 16.9$

A questo punto passiamo al calcolo di $\overline{\overline{c_p}}$: si ricorda ancora che esso è il risultato di una doppia media, fatta rispettivamente sulla composizione <u>massica </u>(e non volumetrica!!) dei fumi e sul calore specifico a pressione costante delle singole specie componenti. Siccome siamo in ipotesi di combustione con eccesso d'aria e senza incombusti, le sostanze rinvenibili allo scarico sono CO_2, H_2O, O_2 ed N_2.
Così come nell'Esercizio 1, non potendo calcolare le quantità assolute di ciascuna sostanza, faremo firerimento ai *kg* di ciascuna sostanza per *kg* di C_3H_8 bruciato; dalla (E".5) si ricava infatti che:

$$\frac{kg_{CO_2}}{kg_{C_3H_8}} = \frac{3\times 44}{12\times 3 + 1\times 8} = 3$$

$$\frac{kg_{H_2O}}{kg_{C_3H_8}} = \frac{4\times 18}{12\times 3 + 1\times 8} = 1.64$$

$$\frac{kg_{O_2}}{kg_{C_3H_8}} = 0.08\times\frac{5\times 32}{12\times 3 + 1\times 8} = 0.29$$

$$\frac{kg_{N_2}}{kg_{C_3H_8}}=3.35\times\frac{5\times32}{12\times3+1\times8}\times(0.08+1)=13.16$$

Applicando la (E.6) (esercizio precedente):

$$x_{N_2}=\frac{13.16}{13.16+0.29+1.64+3}=0.73=73\,\%$$

Procedendo allo stesso modo per tutte le altre specie si ottiene che:

$$x_{O_2}=\frac{0.29}{13.16+0.29+1.64+3}=0.016=1.6\,\%$$
$$x_{CO_2}=\frac{3}{13.16+0.29+1.64+3}=0.166=16.6\%$$
$$x_{H_2O}=\frac{1.64}{13.16+0.29+1.64+3}=0.09=9\,\%$$

	c_p(t=145°C) [*kJ/kgK*]	c_p(t=130°C)[*kJ/kgK*]
N_2	1.0464	1.0452
O_2	0.94684	0.94254
CO_2	0.95625	0.94432
H_2O	1.9892	2.0048

Tab.3

Tenendo presente i valori presenti in Tab.3, si ha che la "prima" media su c_p dei fumi alle rispettive temperature è:

$$\overline{c_p}(t=145\,°C)=0.73\times1.0464+0.016\times0.94684+0.166\times0.95625+0.09\times1.9892=1.105\,\frac{kJ}{kgK}$$

$$\overline{c_p}(t=130\,°C)=0.73\times1.0452+0.016\times0.94254+0.166\times0.94432+0.09\times2.0048=1.106$$

La seconda media, come già visto, non è altro che la media aritmetica dei due termini appena calcolati:

$$\overline{\overline{c_p}}=\frac{\overline{c_p}(t=145\,°C)+\overline{c_p}(t=130\,°C)}{2}=1.1055\,\frac{kJ}{kgK}$$

A questo punto, tenendo presente che il potere calorifico inferiore del propano è di 46500 *kJ*/*kg* è possibile calcolare $\Delta\,\%\dot{Q}_{FUMI}$ applicando la (E".4):

$$\Delta\,\%\dot{Q}_{FUMI}=\frac{(1+16.9)\times1.1055\times15}{46500}\times100=0.64\,\%$$

La conclusione del problema è che l'utilizzo dei fumi per il preriscaldamento dell'aria di combustione comporta un guadagno del rendimento dello 0.64 %

4. In riferimento all'esercizio precedente, si assuma che l'impianto produca 200 MW elettrici e che abbia un rendimento globale $\eta_g = 0.42$ ***. Si ritenga che nel caso di assenza del preriscaldamento, il rendimento del generatore di vapore*** $\eta_{GV}(t = 145\,°C) = \eta'_{GV} = 0.90$ ***.Si calcoli il risparmio che si ottiene in un anno utilizzando un preriscaldatore che porti i fumi alla temperatura*** $t''_f = 130\,°C$ ***. Si consideri che il costo del propano è di 0.45 Euro/kg.***

Se l'impianto è sprovvisto di preriscaldatore, la portata di combustibile utilizzata la si ricava semplicemente come:

$$\dot{m}'_C = \frac{P_{el}}{\eta_g H_i} = \frac{200 \times 1000}{0.42 \times 49400} = 9.63\,\frac{kg}{s} = 34700\,\frac{kg}{h}$$

$\dot{m}'_C$ è quindi la portata di combustibile corrispondente al caso di assenza di preriscaldatore, alla quale corrisponde un rendimento $\eta'_{GV} = 0.90$. Dal problema 3, sapendo che $\Delta\eta_{GV} = 0.0064$ si ha che $\eta''_{GV} = \eta'_{GV} + \Delta\eta_{GV} = 0.90 - 0.006 = 0.9064$. E' facilmente dimostrabile che:

$$\frac{\dot{m}''_C}{\dot{m}'_C} = \frac{\eta'_{GV}}{\eta''_{GV}} = 0.99 \rightarrow \dot{m}''_C = 34700 \times 0.99 = 34350\,\frac{kg}{h}$$

Il risparmio di combustibile è dunque $\Delta\dot{m}_C = 350\,\frac{kg}{h}$ al quale corrisponde un risparmio annuo di $\Delta EURO = 350 \times 8000 \times 0.45 = 1260000\,Euro$