

**POLITECNICO DI TORINO**  
**ESAMI DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI**  
**INGEGNERE INDUSTRIALE**  
Seconda sessione 2007  
**Classe 33/S Ingegneria Energetica e nucleare**  
Prova pratica del 17-1-2008

In un **generatore di vapore a recupero a sviluppo orizzontale** e a un solo livello di pressione è prevista l'installazione, seguendo la direzione dei fumi, dei seguenti componenti:

- a) un banco surriscaldatore SH2;
- b) una camera di post-combustione;
- c) un banco di tubi vaporizzatori lisci a 2 ranghi (EVA1);
- d) un secondo banco surriscaldatore SH1
- e) un fascio tubiero vaporizzatore con tubi alettati (EVA2)
- f) un banco economizzatore a tubi alettati

Tra i due surriscaldatori è previsto un attemperamento per il controllo della temperatura in uscita da SH2. I due banchi vaporizzatori sono connessi ad unico corpo cilindrico. Le tabelle 1, 2 e 3 riportano i dati geometrici e le informazioni relative alla installazione dei diversi banchi. I banchi surriscaldatori sono costituiti da una serpentina di tubi in parallelo non alettati.

I gas di combustione che alimentano il generatore di vapore a recupero derivano dalla combustione di **gas naturale** (composizione riportata in tabella A.1) e **da un processo di postcombustione** realizzato dopo il surriscaldatore SH2 con i dati riportati in tabella 4:

Il generatore di vapore è stato progettato per realizzare la produzione nominale di vapore e le temperature riportate in tabella 5.

Si chiede al candidato ad affrontare in modo sistematico i punti che seguono:

**1. Rappresentare graficamente lo schema termofluidodinamico del generatore di vapore a recupero.**

Si segua il percorso dei prodotti di combustione e si indichino i punti caratteristici di ingresso ed uscita dei diversi moduli di scambio termico.

Sulla base della lunghezza convenzionale dei tubi (altezza) e dei passi trasversali definire la larghezza  $L_c$  ed altezza  $H_c$  della condotta fumi all'interno del quale sia possibile installare i banchi.

**2. Caratterizzare, sulla base dei dati di tabella 4 e della composizione del combustibile riportata in tabella A1, il processo di combustione del turbogas in termini di:**

- Portata in massa di combustibile,
- Potere calorifico inferiore medio ;
- portata di aria teorica secca
- portata dei gas esausti in uscita dal turbogas nella combustione reale;
- portate dei prodotti di combustione ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $O_2$ ) nella combustione reale
- calore di combustione generato nel processo di combustione

Si chiede di completare, sulla base dei risultati delle elaborazioni, con riferimento alla combustione stechiometrica e reale le tabelle B1 e B2 riportate nell'allegato B del tema.

### **3. Verificare le prestazioni del surriscaldatore SH2 valutando, sulla base di dati geometrici di tabella 1 e dei dati di tabella 5**

- la superficie di scambio termico di SH2
- le sezioni di passaggio delle portate dei fumi e del vapore nell' SH2;
- le portate specifiche lato fumi e lato vapore;
- le adduttanze (coefficienti liminari di scambio termico) lato fumi e vapore;
- la trasmittanza (coefficiente globale di scambio termico) tra i fumi e il vapore
- la potenza termica rimossa dal banco SH2;
- la potenza termica dispersa dal condotto fumi nell'ipotesi di un rendimento termico della regione SH2 del 98%
- la variazione di temperatura dei fumi tra ingresso ed uscita dell'SH2:
- la temperatura dei fumi immediatamente a monte del post-combustore
- le cadute di pressione lato vapore e fumi associate all'SH2.

Per le correlazioni di scambio termico e per le cadute di pressione da utilizzare si può far riferimento alle relazioni fornite **nell'allegato A oppure a correlazioni disponibili nei manuali** o di letteratura purchè sia chiaramente indicata la fonte bibliografica ed il campo di applicazione delle correlazioni considerate. Le ipotesi ed assunzioni atte a semplificare il processo di calcolo sono da indicare in modo esplicito eventualmente giustificandole.

Sulla base dei risultati delle elaborazioni completare la tabella B.3 riportata nell'allegato B

### **4. Caratterizzare il processo di post-combustione (dati di riferimento in tab. 4) valutando:**

- la potenza termica introdotta nel processo di post-combustione;
- la portata dei fumi a valle dei post combustori
- la composizione dei fumi dopo la postcombustione
- la temperatura adiabatica dei fumi dopo la post-combustione

Sulla base dei risultati delle elaborazioni completare la tabella B.4 riportata nell'allegato B

### **5. Valutare le prestazioni globali del generatore di vapore a recupero sulla base dei dati geometrici dei vaporizzatori EVA1 ed EVA2, SH1 ed economizzatore e delle informazioni di esercizio riportati in tabella 5.**

In particolare si caratterizzi il generatore di vapore a recupero in termini di :

- superfici di scambio termico;
- sezioni di passaggio dei fumi e dell'acqua;
- portate specifiche per i fumi e per l'acqua
- coefficienti liminari di scambio termico (adduttanze) lato fumi ed acqua
- potenze termiche rimosse dai fumi
- cadute di pressione lato fumi ed acqua

Rappresentare graficamente l'andamento delle temperature e della portata lato fumi lungo il percorso dei fumi.

Sulla base dei risultati delle elaborazioni completare la tabella B.5 e B.6 riportate nell'allegato B.

## Tablelle dati geometrici/ costruttivi e di esercizio

Tabella 1: Dati geometrici banchi surriscaldatori

grandezza	Unità di misura	Valore SH2	Valore SH1
Tipologia SH:		controcorrente	controcorrente
Disposizione dei tubi		In fila	In fila
Diametro esterno dei tubi	mm	51	51
Spessore dei tubi	mm	4.30	4.30
Lunghezza convenzionale dei tubi	m	4.60	4.60
Numero dei tubi per rango		56	56
Numero dei ranghi		24	8
Passo trasversale $e_{tr}$	mm	85	85
Passo longitudinale $e_l$	mm	130	130
Conducibilità termica dei tubi (acciaio)	W/(m°C)	45	45

Tabella 2: Dati geometrici fasci vaporizzatori

grandezza	Unità di misura	Valore EVA1	Valore EVA2
tipologia		vaporizzatore	vaporizzatore
disposizione		In fila	In fila
Diametro esterno tubi	mm	51	51
Spessore dei tubi	mm	4.0	4.0
Altezza alette	mm	0	19
Spessore alette	mm	0.0	1.5
Numero alette per metro		0	200
Lunghezza reale o convenzionale dei tubi	m	4.6	4.5
Numero dei tubi per rango		56	51
Numero dei ranghi		2	9
Passo trasversale $e_{tr}$	mm	85	93
Passo longitudinale $e_l$	mm	130	130
Conducibilità termica dei tubi (acciaio)	W/(m°C)	45	45

Tabella 3 Dati geometrici economizzatore con tubi alettati

grandezza	Unità di misura	valore
Tipologia		Controcorrente
Disposizione tubi		In fila
Diametro esterno dei tubi	mm	51
Spessore dei tubi	mm	4
Altezza alette	mm	19
Spessore alette	mm	1.5
Numero di alette per unità di lunghezza	Alette/m	200
Lunghezza dei tubi alettati	m	4.6
Numero dei tubi per rango		51
Numero dei ranghi		10
Passo trasversale $e_t$	mm	93
Passo longitudinale $e_l$	mm	100
Conducibilità termica dei tubi (acciaio)	W/(m*°C)	45

Tabella 4 Dati di riferimento per la caratterizzazione dei prodotti di combustione (condizioni nominali)

grandezza	simbolo	Unità di misura	valore
Portata gas naturale	$\dot{m}_{GN}$	Nm <sup>3</sup> /h	4800
Densità combustibile in condizioni normali	$\rho_{GN}$	Kg/(Nm <sup>3</sup> )	0.7476
Indice d'aria	<b>n</b>	3.37	Kg/kg
Temperatura gas esausti	T <sub>in</sub>	°C	540
Portata gas naturale di post-combustione	$\dot{m}_{post}$	Kg/h	3872

Tabella 5 Produzione nominale di vapore del GVR con postcombustione

grandezza	simbolo	Unità di misura	valore
Produzione vapore	$\dot{m}_v$	Kg/h	90000
Pressione assoluta all'uscita dell'SH2	p <sub>v</sub>	bar	81
Pressione assoluta nel corpo cilindrico	p <sub>cc</sub>	bar	82.5
Frazione della potenza termica recuperata in EVA1	f <sub>p</sub>	%	12
Temperatura dell'acqua di alimento dell'economizzatore e dell'attemperamento	T <sub>a</sub>	°C	110
Temperatura del vapore surriscaldato in uscita da SH <sub>2</sub>	T <sub>SH</sub>	°C	500
Temperatura del vapore in ingresso all'SH2	T <sub>vap,in</sub>	°C	451.1
Temperatura dei gas esausti dopo il primo surriscaldatore	T <sub>fumi,1</sub>	°C	493

## Allegato A

Tabella A1: Composizione gas naturale

componenti	formula	Peso molecolare	Composizione % volume	Composizione % massa	Potere calorifico kJ/kg
metano	CH <sub>4</sub>	16.042	95.50	91.44	50000
etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30.068	1.40	2.51	47469
propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44.094	0.90	2.37	46369
Azoto	N <sub>2</sub>	28.016	2.20	3.68	0

### Peso molecolare del gas naturale

$$(PM)_{GN} = \frac{16.042 * (CH_4) + 30.068 * (C_2H_6) + 44.094 * (C_3H_8) + 28.016 * N_2}{100}$$

dove

CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> ed N<sub>2</sub> sono le percentuali volumiche dei componenti

### Composizione % in massa per il carbonio ed idrogeno

$$(C) = 12.01 \frac{(CH_4) + 2 * (C_2H_6) + 3 * (C_3H_8)}{(PM)_{GN}} \quad \% \text{ in massa}$$

$$(H) = 2.016 \frac{2 * (CH_4) + 3 * (C_2H_6) + 4 * (C_3H_8)}{(PM)_{GN}} \quad \% \text{ in massa}$$

### Aria teorica per la combustione in kg/kg A<sub>tm</sub>

$$A_{tm} = 0.11484 * (C) + 0.34204 * (H) + 0.04302 * (S) - 0.0431 * (O)$$

dove: (C), (H), (S), ed (O) percentuali in massa del carbonio, idrogeno, zolfo ed ossigeno nel combustibile.

Tabella A2 :Comburente di riferimento per il turbogas (aria):

grandezza	Unità di misura	valore
Contenuto di vapore nell'aria	Kg/ kg di aria secca	0.01
Rapporto in massa aria/ossigeno	-	4.31
Densità dell'aria in condizioni normali	Kg/(Nm <sup>3</sup> )	1.293

### Umidità % in massa nei gas di combustione u:

$$u = \frac{8.936 * (H)}{nA_{tm} + 1} + 0.1 \quad \%$$

### pressioni parziali per la CO<sub>2</sub> e il vapor d'acqua nei fumi (in atm)

$$P_{CO_2} = \frac{0.02413 * (C)}{nA_m + 0.07186 * (H)}$$

$$P_{H_2O} = \frac{0.14374 * (H)}{nA_m + 0.07186 * (H)}$$

C, H concentrazioni percentuali in massa di carbonio ed idrogeno nel combustibile.

### viscosità per i prodotti di combustione

$$\mu_g = 10^{-6} * \left[ 15.63 + 43.67 \frac{t}{1000} - 11.1 \left( \frac{t}{1000} \right)^2 \right]$$

in kg/(m\*s) e t in °C

### conducibilità termica dei fumi in W/(m\*°C)

$$\lambda_g = 0.001 * \left[ 21.27 + 72.53 \frac{t}{1000} - 11.13 \left( \frac{t}{1000} \right)^2 \right]$$

### calore specifico dei fumi in J/(kg\*°C)

$$c_g = 972.7 + 10.76 * u + (332.62 - 6.5u) \frac{t}{1000} - (83.93 - 7.33u) \left( \frac{t}{1000} \right)^2$$

u < 12% e t < 1200 °C

### Surriscaldatori a tubi lisci in fila: correlazioni di riferimento

#### Adduttanza convettiva lato fumi

$$\alpha = k_g f_d f_a \frac{G^{0.61}}{d_e^{0.39}}$$

dove:

$\alpha$  = adduttanza lato fumi in W/(m<sup>2</sup>\*°C)

G = portata specifica dei fumi in kg/(m<sup>2</sup>\*s)

d<sub>e</sub> = diametro esterno dei tubi in m

k<sub>g</sub> = conducibilità termica dei fumi

f<sub>d</sub>, f<sub>a</sub> = fattori di disposizione dipendenti dal numero dei ranghi (f<sub>d</sub>) e dalla disposizione dei tubi (f<sub>a</sub>)

$$k_g = 4.653 + 0.0182u + (6.165 + 0.0323u) \frac{t}{1000} - (2.065 - 0.0325u) \left( \frac{t}{1000} \right)^2$$

t = temperatura media dei fumi in °C

u = umidità % massica nei fumi

Tabella A.3 Fattore di disposizione  $f_d$  per il calcolo dell'adduttanza nei banchi in linea

n.ro ranghi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>10
$f_d$	0.70	0.82	0.87	0.91	0.93	0.95	0.97	0.98	0.99	1

### Correlazione per la stima del fattore di disposizione $f_a$ per i tubi in fila o in linea

Ponendo:

$e_{tr}$ = passo trasversale

$e_l$ = passo longitudinale

$d$ =diametro dei tubi

$$a = \frac{e_{tr}}{d}$$

$$b = \frac{e_l}{d}$$

$$\Psi = 1 - \frac{\pi}{4a} \quad \text{per } b \geq 1$$

$$\Psi = 1 - \frac{\pi}{4ab} \quad \text{per } b < 1$$

$$f_a = 1 + \frac{0.7}{\Psi^{1.5}} \frac{\left(\frac{b}{a} - 0.3\right)}{\left(\frac{b}{a} + 0.7\right)^2}$$

### Correlazioni per l'adduttanza lato vapore in $W/(m^2 * C)$

$$\alpha_v = k_v \frac{G_v^{0.75}}{d^{0.25}}$$

$$k_v = 5.069 - 0.0529p + (4.467 + 0.169p) \left(\frac{t}{1000}\right) - (1.268 + 0.143p) \left(\frac{t}{1000}\right)^2$$

dove  $p$  è la pressione in bar,  $t$  temperatura in °C .

### Flusso termico irraggiato da CO<sub>2</sub>

$$q_{CO_2} = 10.349N(p_{CO_2} * s)^{0.4} \left[ \left(\frac{T_m'}{100}\right)^{3.2} - \left(\frac{T_p}{100}\right)^{3.2} \left(\frac{T_m'}{T_p}\right)^{0.65} \right] \text{ in } W/m^2$$

### Flusso termico irraggiato da H<sub>2</sub>O

$$q_{H_2O} = N(46.51 - 84.89 p_{H_2O} * s)(p_{H_2O} * s)^{0.6} \left[ \left( \frac{T_m'}{100} \right)^\gamma - \left( \frac{T_p}{100} \right)^\gamma \right] \text{ in W/m}^2$$

$$\gamma = 2.32 + 1.37 \sqrt[3]{p_{H_2O} s}$$

N= grado di nero delle superfici pari a circa 0.95

$p_{CO_2}$  e  $p_{H_2O}$  pressioni parziali in atm;

s spessore dello strato irraggiante relativo ad una cavità di volume V e Superficie  $S_v$

$T_m'$  temperatura media assoluta dei fumi

$T_p$  temperatura assoluta della parete

$$s = \frac{3.6V}{S_v}$$

V volume della cavità

$S_v$  superficie totale delle pareti che delimitano la cavità

### Contributo dell'irraggiamento all'adduttanza

$$\alpha_r' = \frac{q_{CO_2} + q_{H_2O}}{T_m' - T_p}$$

$$\alpha_{fumi} = \alpha_f + \alpha_r'$$

### Trasmittanza (o coefficiente globale di scambio termico) per i tubi lisci

$$k_e = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{fumi}} + \frac{s}{\lambda} \left( \frac{d_e}{d_m} \right) + \frac{1}{\alpha_v} \left( \frac{d_e}{d_i} \right)} \text{ in W/(m}^2\text{°C)}$$

$d_i$ = diametro interno

$d_e$ = diametro esterno

$d_m$ = diametro medio

### Tubi lisci vaporizzatori:

**adduttanza lato fumi:** usare le stesse correlazioni usate per i surriscaldatori;

**adduttanza lato acqua:** adottare il valore di  $\alpha_v=10000 \text{ W/(m}^2\text{°C)}$ ;

### Trasmittanza

$$k_e = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{fumi}} + \frac{s}{\lambda} \left( \frac{d_e}{d_m} \right) + \frac{1}{\alpha_v} \left( \frac{d_e}{d_i} \right)}$$

**Correlazioni per le perdite di carico lato fumi dei fasci tubieri surriscaldatori, vaporizzatori in Pa**

$$\Delta p = 1.83 f_d f_b N \frac{G^2}{\delta_0} * \frac{T}{1000}$$

dove:

- $\Delta p$  cadute di pressione per attrito nel fascio  
 $N$  numero dei ranghi del fascio attraversati dai fumi  
 $G$  portata specifica dei fumi  
 $\delta_0$  densità in condizioni normali dei fumi  
 $T$  temperatura media assoluta dei fumi (fasci surriscaldatori, vaporizzatori)  
 $f_d, f_b$  fattori di disposizione

Tabella A.4 Fattore di disposizione  $f_d$  per il calcolo delle perdite di carico nei banchi in linea

n.ro ranghi	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>10
$f_d$	1.20	1.12	1.06	1.03	1.025	1.01	1.005	1.003	1.002	1.0

Tabella A.5 Fattore di disposizione  $f_b$  per il calcolo delle perdite di carico nei banchi in linea:  $e_l/d=2$  ;  $e_t/d=2$

n.ro Reynolds	2000	4000	6000	8000	10000	12000	14000	16000	18000	>20000
$f_b$	0.230	0.235	0.234	0.232	0.230	0.229	0.228	0.226	0.224	0.220

Per i fasci vaporizzatori far riferimento alla temperatura:

$$T = T_v + \frac{(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{T_1 - T_v}{T_2 - T_v}\right)}$$

dove  $T_1, T_2$  temperature assolute dei fumi in ingresso – uscita del fascio ,  $T_v$  temperatura assoluta del vapore saturo alla pressione media di esercizio.

### Adduttanza lato fumi in fasci tubieri alettati: tubi in fila

Nomenclatura per lo studio dei banchi alettati

	simbolo	Unità di misura
Diametri interno ed esterno dei tubi	$d_i, d_e$	m
Spessore della parete dei tubi	s	m
Altezza alette	h	m
Spessore delle alette	$s_a$	m
Numero di alette per unità di lunghezza	n	Alette/metro
Superficie interna del tubo riferita all'unità di lunghezza	$S_i$	$m^2$
Superficie media del tubo riferita all'unità di lunghezza	$S_m$	$m^2/m$
Diametro del tubo alettato	$d_a$	m
Spazio fra le alette	b	
Superficie esterna del tubo riferita all'unità di	$S_{p0}$	$m^2/m$

lunghezza dedotta la superficie occupata dalle alette		
Superficie delle alette riferita all'unità di lunghezza	$S_{f0}$	$m^2/m$
Superficie esterna totale per metro di tubo	$S_0$	$m^2/m$
Proiezione del tubo alettato per unità di lunghezza	$A_c$	$m^2/m$
Sezione del vano a disposizione	$A_d$	$m^2$
Numero di tubi per rango	$N$	
Lunghezza dei tubi	$L$	$m$
Sezione di passaggio del fluido lato esterno	$A_e$	
Numero dei ranghi	$N_r$	
Passo trasversale	$e_t$	$m$
Passo longitudinale	$e_l$	
Portata specifica lato esterno (fumi)	$G_e$	$Kg/(m^2*s)$
Adduttanze lato esterno , interno	$\alpha_e , \alpha_i$	$W/(m^2*s)$

Definite le grandezze:

$$C_1 = 0.25R_e^{-0.35}$$

$$C_3 = 0.20 + 0.65 \exp\left(-0.25 \frac{h}{b}\right)$$

$$C_5 = 1.1 - (0.75 - 1.5 \exp(-0.7N_r)) \exp\left(-2 \frac{e_l}{e_t}\right)$$

temperatura di riferimento

$$t_c = t_i + 0.3(t_e - t_i)$$

fattore J

$$J = C_1 C_3 C_5 \sqrt{\frac{d_a}{d_e} \left[ \frac{t_e + 273.15}{t_c + 273.15} \right]^{0.25}}$$

**Adduttanza di base in  $W/(m^2*^{\circ}C)$  per tubi puliti**

$$\alpha_0^* = J G_e c_p \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{0.67}$$

**Adduttanza di base corretta per sporcamento della superficie esterna**

$$\alpha_0 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_0^*} + f_e}$$

Effetto alettatura

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_0}{\lambda_a} \frac{1}{S_a}}$$

$$g = h + \frac{S_a}{2}$$

$$x = \frac{\tanh(m * g)}{m * g}$$

$$y = (0.7 + 0.3 * x) * x$$

$$E = \left[ 0.45(y - 1) \ln\left(\frac{d_a}{d_e}\right) + 1 \right]$$

### Adduttanza lato fumi

$$\alpha_e = \alpha_0 \left( \frac{ES_{f0} + S_{p0}}{S_0} \right)$$

### Trasmittanza:

$$k_e = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_e} + \frac{s}{\lambda_a} \frac{S_0}{S_m} + \left( \frac{1}{\alpha_i} + f_i \right) \left( \frac{S_0}{S_i} \right)}$$

**Acqua in cambiamento di fase (tubi vaporizzatori)**  $\alpha_i = 10000$  o  $12000$  W/(m<sup>2</sup>\*°C)

**acqua sottoraffreddata (economizzatori)**

$$\alpha_i = K_{ac} \frac{G_i^{0.8}}{d_i^{0.2}}$$

$$K_{ac} = 5.78 + 9.09 \frac{t_{im}}{100} - 1.39 \left( \frac{t_{im}}{100} \right)^2$$

Tabella A.4 Proprietà termodinamiche di riferimento per l'acqua-vapore

Pressione bar	Temperatura °C	Densità kg/m <sup>3</sup>	Entalpia kJ/kg
83	110	955	467
83	216	851	927
82.5	297.2	718.1 (liq. Saturo)	1328.5
82.5	297.2	44.1 (vapore saturo)	2754
82	451	26.9	3272
81	500	24.3	3397

## Allegato B: Tabelle per la sintesi dei risultati

### Tabella B.1 Combustione stechiometrica nel turbogas

	Portata in massa fuel kg/h	Portata in massa aria kg/h	Portata in massa CO <sub>2</sub> Kg/h	Portata in massa H <sub>2</sub> O Kg/h	Portata in massa N <sub>2</sub> Kg/h	Calore di combustione kW
metano						
etano						
propano						
azoto						0

### Tabella B.2 Combustione reale nel turbogas

grandezza	Unità di misura	valore
<b>Indice d'aria</b>	-	<b>3.37</b>
Portata aria teorica secca	Kg/h	
Portata aria teorica massica umida	Kg/h	
Portata dei gas esausti	Kg/h	
Densità ,in condizioni normali, dei gas esausti	Kg/(Nm <sup>3</sup> )	
Umidità percentuale in massa nei fumi	%	
Pressione parziale nei fumi CO <sub>2</sub>	atm	
Pressione parziale nei fumi H <sub>2</sub> O	atm	
% volumetrica O <sub>2</sub> nei fumi secchi	%	
Portata in massa CO <sub>2</sub>	Kg/h	
Portata in massa H <sub>2</sub> O	Kg/h	
Portata in massa N <sub>2</sub>	Kg/h	
Portata in massa O <sub>2</sub>	Kg/h	

### Tabella B.3 Sintesi della prestazioni del SH2

grandezza	Unità di misura	valore
Portata dei gas esausti	Kg/h	
Temperatura di ingresso fumi	°C	540
Temperatura di uscita fumi dopo SH2	°C	
Superficie esterna dei tubi	m <sup>2</sup>	
Area di passaggio dei gas	m <sup>2</sup>	
Rendimento scambio termico	%	98
Fattore di disposizione f <sub>a</sub>		
Fattore di disposizione f <sub>d</sub>		
Rapporto s/d irraggiamento gas		
Adduttanza dei gas	W/(m <sup>2</sup> °C)	
Portata specifica dei gas nel fascio	Kg/(m <sup>2</sup> *s)	
Velocità media dei fumi	m/s	
Numero di Reynolds Re		
Fattori di disposizione per le perdite di carico fb, fd		
Fattore di disposizione fb		
Fattore di disposizione fd		1
Perdite di carico lato gas	Pa	
<b>Lato vapore</b>		
Portata	Kg/h	
Pressione assoluta Psh	bar	

Area passaggio del fluido	m <sup>2</sup>	
Temperatura di ingresso SH2 lato vapore	°C	
Entalpia vapore ingresso SH2	KJ/kg	
Adduttanza fluido interno	W/(m <sup>2</sup> *°C)	
Portata specifica	Kg/(m <sup>2</sup> *s)	
Velocità massima in uscita vapore	m/s	
Trasmittanza del banco	W/(m <sup>2</sup> *s)	
Potenza trasferita al vapore dai fumi	kW	

Tabella B.4 Sintesi dei risultati del processo di post-combustione

grandezza	Unità di misura	valore
Portata di ossigeno necessaria per la combustione	Kg/h	
Potenza termica prodotta dal processo di postcombustione	kW	
Portata dei fumi dopo il processo di post combustione	Kg/h	
Temperatura adiabatica dei fumi dopo il processo di post-combustione	°C	
Densità in condizioni normali dei gas esausti	Kg/(Nm <sup>3</sup> )	
Umidità percentuale in massa nei fumi	%	
Pressione parziale nei fumi CO <sub>2</sub>	atm	
Pressione parziale nei fumi H <sub>2</sub> O	atm	
% volumetrica O <sub>2</sub> nei fumi secchi	%	
Portata in massa CO <sub>2</sub>	Kg/h	
Portata in massa H <sub>2</sub> O	Kg/h	
Portata in massa N <sub>2</sub>	Kg/h	
Portata in massa O <sub>2</sub>	Kg/h	

Tabella B.5 Generatore di vapore a recupero a valle della post-combustione

grandezza	Unità di misura	valore
Portata dei gas esausti a valle della post-combustione	Kg/h	
Temperatura dei gas dopo la post-combustione	°C	
Densità dei gas in condizioni normali gas esausti	Kg/(Nm <sup>3</sup> )	
Umidità percentuale massica	%	
Pressione parziale CO <sub>2</sub>	atm	
Pressione parziale dell'acqua nei fumi	atm	
Produzione di vapore	Kg/h	
Spurgo continuo	Kg/h	
Pressione assoluta nel corpo cilindrico	bar	
Temperatura dell'acqua di alimento	°C	
Entalpia dell'acqua di alimento	kJ/kg	
Entalpia dell'acqua satura	kJ/kg	
Temperatura del vapore saturo	C	
Entalpia del vapore saturo e secco	KJ/kg	

Tabella B.6 Fasci tubieri vaporizzatori

grandezza	Unità di misura	valore	
Tipo (vaporizzatore, surriscaldatore)		EVA1	EVA2
Superficie esterna del fascio	m <sup>2</sup>		
Superficie totale tubi vaporizzatori	m <sup>2</sup>		
Area passaggio gas	m <sup>2</sup>		
Fattore di disposizione fa			
Fattore di disposizione fd			
Rapporto s/d per irraggiamento gas			
Moto dei fluidi			
Area passaggio vapore	m <sup>2</sup>		
Adduttanza dei gas per convenzione	W/(m <sup>2</sup> °C)		
Adduttanza dei gas per irraggiamento	W/(m <sup>2</sup> °C)		
Adduttanza totale lato gas	W/(m <sup>2</sup> °C)		
Adduttanza lato interno	W/(m <sup>2</sup> °C)		
trasmissione	W/(m <sup>2</sup> °C)		
Temperatura ingresso dei gas	°C		
Potenza termica trasferita	kW		
Fattori di disposizione per le perdite di carico			
Fattore di disposizione fb			
Fattore di disposizione fd			
Portata specifica	Kg/(m <sup>2</sup> *s)		
Velocità media dei gas	M/s		
Numero di Reynolds			
Perdita di carico lato gas	Pa		
Perdita di carico lato vapore	bar		

### Surriscaldatore SH1

grandezza	Unità di misura	valore	
Superficie del surriscaldatore	m <sup>2</sup>		
Pressione assoluta uscita	bar		
Temperatura del vapore all'uscita	°C		
Volume specifico vapore all'uscita	m <sup>3</sup> /kg		
Entalpia del vapore all'uscita	KJ/kg		
Pressione ingresso banco	bar		
Portata del vapore nel banco	Kg/h		
Attemperamento			
Temperatura richiesta al vapore	°C		
Temperatura acqua di iniezione per attemperamento	°C		
Entalpia acqua di iniezione	kJ/kg		
Portata da iniettare a monte di SH2	kg/h		
Velocità del vapore all'uscita di SH1	m/s		
Potenza termica trasferita in SH1	kW		

### Economizzatore lato fumi

grandezza	Unità di misura	valore	
Portata fumi	Kg/h		
Temperatura di ingresso	°C		

Temperatura di uscita	°C	
Densità fumi condizioni normali	Kg/m <sup>3</sup>	
Umidità percentuale massica	%	
Sezione di passaggio dei gas	m <sup>2</sup>	
Portata specifica	Kg/(m <sup>2</sup> *s)	
Velocità media	m/s	
Numero di Reynolds		
Perdita di carico lato fumi	Pa	
<b>Economizzatore lato acqua</b>		
grandezza	Unità di misura	valore
Portata	Kg/s	
Temperatura di ingresso	°C	
Entalpia di ingresso acqua	KJ/kg	
Pressione assoluta	bar	
Temperatura di uscita	°C	
Entalpia dell'acqua all'uscita	KJ/kg	
Portata specifica	Kg/(m <sup>2</sup> *s)	
Densità dell'acqua all'uscita	Kg/m <sup>3</sup>	
sezione di passaggio lato acqua	m <sup>2</sup>	
Adduttanza lato acqua	W/(m <sup>2</sup> *°C)	
Velocità massima dell'acqua in uscita	m/s	
Perdita di carico lato acqua	bar	
Trasmittanza	W/(m <sup>2</sup> *°C)	
Potenza termica trasferita nell'economizzatore	kW	

### **Generatore con economizzatore**

grandezza	Unità di misura	valore
Potenza totale trasferita	kW	
Rendimento GVR	%	
Perdita di carico lato gas ECO	Pa	
Perdita di carico totale GVR	Pa	