



Esame 7 luglio 2014 - Esercizi

Esercizio 1 (9 punti).

La centrale nucleare di Goesgen opera con un ciclo Rankine ad acqua. Il ciclo è rigenerativo: parte del vapore in uscita dalla turbina di alta pressione (AP) entra in un rigeneratore a miscela posto a valle della pompa di alimento, e la portata restante subisce un nuovo riscaldamento in uno scambiatore interno al reattore e viene nuovamente espansa nella turbina di bassa pressione (BP).

Le due pompe idrauliche del sistema sono isoentropiche e con rendimento organico elettrico unitario, e sono alimentate dalla corrente elettrica generata dalla turbina, che presenta un rendimento organico elettrico pari a 0,95. La potenza termica che la reazione di fissione cede al fluido di lavoro è pari a 3 GW_{th} .

La portata di vapore totale è pari a $1125,8 \text{ kg/s}$ e la portata di vapore in uscita dalla turbina AP diretta verso il rigeneratore è pari a $241,3 \text{ kg/s}$.

Proprietà termodinamiche	no.	T °C	T K	P MPa	v m ³ /kg	h kJ/kg	s kJ/kgK	x -	h _{ls} kJ/kg	h _{vs} kJ/kg	s _{ls} kJ/kgK	s _{vs} kJ/kgK
condizioni riferimento	0	25	298,2	0,101	-	104,9	0,3672	-				
IN pompa 1	1	41,5	314,7	0,008	0,001	173,8	0,5924	0				
IN rigeneratore	2	41,5	314,7	0,500	0,001	174,3	0,5924	-				
IN pompa 2	3	151,8	425,0	0,500	0,001	640,1	1,8604	0				
IN economizzatore	4	?	?	6,450	?	?	?	-				
IN evaporatore 1	5	280,3	553,5	6,450	-	1238,7	3,0716	0				
IN turbina ap	6	280,3	553,5	6,450	-	2779,5	5,8554	1				
IN evaporatore 2	7	-	-	0,500	-	?	?	0,81	640,1	2748,1	1,8604	6,8207
IN surriscaldatore	8	-	-	0,500	-	2748,1	6,8207	1				
IN turbina bp	9	280,3	553,5	0,500	-	3023,9	7,3893	-				
IN condensatore	10	-	-	0,008	-	2336,0	7,4638	0,90	173,8	2576,2	0,5925	8,2273

Con riferimento ai dati presentati in tabella, è richiesto di:

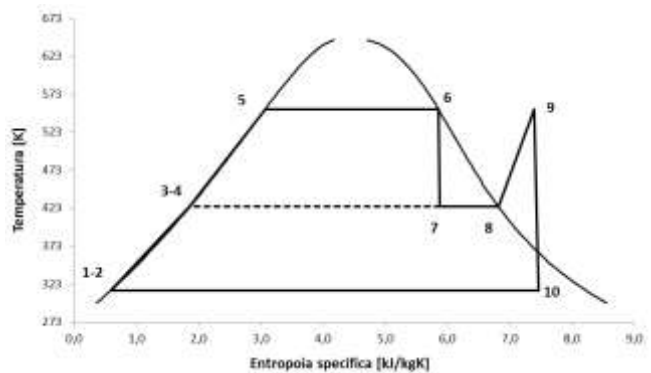
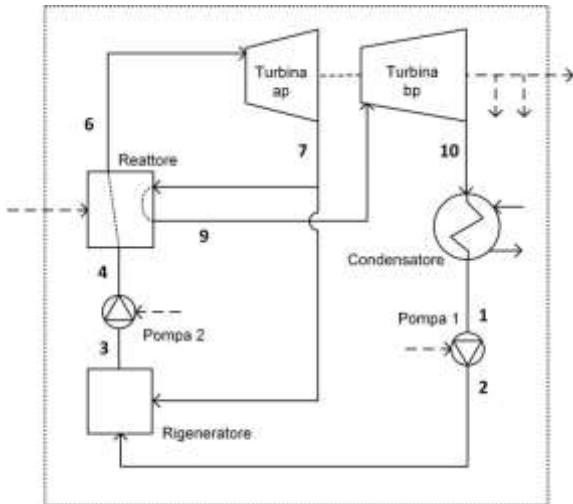
- Schematizzare l'impianto, numerando come in tabella i flussi materiali che collegano i vari componenti. Rappresentare inoltre in maniera qualitativa il ciclo sul diagramma Temperatura – Entropia specifica (T-s), numerando come in tabella i punti del ciclo;
- Completare la tabella delle proprietà termodinamiche dei punti del ciclo, sapendo che le pompe sono isoentropiche ed elaborano un liquido perfetto;
- Calcolare l'exergia fisica specifica dei punti del ciclo. Le condizioni di riferimento per l'analisi exergetica sono pari a 25 °C e 101325 Pa (punto 0 in tabella);
- Applicare il bilancio energetico all'impianto complessivo includendo le perdite organico elettriche, ricavare tutti i termini e calcolare il rendimento energetico;
- Applicare il bilancio exergetico all'impianto complessivo, ricavando exergia distrutta e rendimento exergetico razionale del sistema. Note:
 - Tracciare opportunamente il contorno del sistema in modo che il calore di condensazione e il calore delle perdite organico elettriche siano scaricati in ambiente attraverso una superficie a T_0 ;
 - Il rapporto tra exergia ed energia della radiazione nucleare (fattore di Szargut) è pari a 1;
- Applicare il bilancio exergetico secondo l'approccio Inlet/Exit, ricavando exergia distrutta e rendimento exergetico razionale, per i seguenti componenti: rigeneratore, reattore, turbina. Esplicitare le ipotesi semplificative adottate.
- Commentare i risultati ottenuti nei punti d, e, f;

Esercizio 1 (9 punti). Soluzione

a. *Schematizzare l'impianto, numerando come in tabella i flussi materiali che collegano i vari componenti. Rappresentare inoltre in maniera qualitativa il ciclo sul diagramma Temperatura – Entropia specifica (T-s), numerando come in tabella i punti del ciclo;*

In uscita dalla turbina di bassa pressione il flusso di vapore si divide in due: uno subisce un'evaporazione/surriscaldamento nel reattore per poi espandersi nella turbina di bassa pressione; il secondo viene inviato a un rigeneratore a miscela.

Si osserva come le potenze elettriche che alimentano le pompe non attraversano il volume di controllo, come anche il fluido refrigerante al condensatore, il quale rigetta il calore in ambiente alla temperatura di riferimento.



b. *Completare la tabella delle proprietà termodinamiche dei punti del ciclo, sapendo che le pompe sono e isoentropiche ed elaborano un liquido perfetto;*

Per completare la tabella occorre ricavare le proprietà dei punti 4 (uscita pompa 2 – ingresso economizzatore) e 7 (uscita turbina ap – biforcazione).

Il fluido nel punto 4 è acqua liquida schematizzabile come liquido perfetto. Il testo suggerisce inoltre che le trasformazioni di compressione avvengono in macchine ideali isoentropiche, e dalla tabella si può evincere che la differenza di temperatura del fluido a cavallo della macchina può essere trascurata.

$$T_4 = T_3 = 151,8^\circ\text{C} (425\text{K})$$

$$v_4 = v_3 = 0,001\text{m}^3/\text{kg}$$

$$s_4 = s_3 = 1,8604\text{kJ}/\text{kgK}$$

$$\Delta h = c\Delta T + v\Delta p \quad \rightarrow \quad h_4 = h_3 + v(p_4 - p_3) = 646,1\text{kJ}/\text{kg}$$

Il fluido nel punto 7 è un fluido bifase, per il quale non valgono i modelli di liquido e gas perfetto. La tabella fornisce tuttavia il titolo del vapore e le sue condizioni di entalpia ed entropia di saturazione, dal quale è possibile ricavare le proprietà del fluido:

$$x_7 = \frac{s_7 - s_{ls}}{s_{vs} - s_{ls}} = \frac{h_7 - h_{ls}}{h_{vs} - h_{ls}} \quad \rightarrow \quad \begin{cases} h_7 = h_{ls} + x_7(h_{vs} - h_{ls}) = 2347,6\text{kJ}/\text{kg} \\ s_7 = s_{ls} + x_7(s_{vs} - s_{ls}) = 5,8782\text{kJ}/\text{kgK} \end{cases}$$

c. *Calcolare l'exergia fisica specifica dei punti del ciclo. Le condizioni di riferimento per l'analisi exergetica sono pari a 25 °C e 101325 Pa (punto 0 in tabella);*

Entalpia ed entropia specifiche del fluido di lavoro alle condizioni di riferimento sono calcolate in tabella, quindi è possibile ricavare l'exergia specifica del fluido di lavoro in tutti i punti del ciclo come:

$ex_{ph,i} = h_i - h_0 - T_0 (s_i - s_0)$ che risulta pari a:

punto	ex_ph kJ/kg
0	0
1	1,8
2	2,3
3	90,0
4	96,0
5	327,4
6	1038,3
7	599,6
8	719,1
9	825,4
10	115,2

d. Applicare il bilancio energetico all'impianto complessivo includendo le perdite organico elettriche, ricavare tutti i termini e calcolare il rendimento energetico;

Il volume di controllo del sistema complessivo, al suo massimo livello di aggregazione, è attraversato da una potenza termica radiativa entrante (nota), un flusso di calore ceduto all'ambiente dal condensatore (incognito) e una potenza elettrica netta (incognita). A chiudere il bilancio ci sono le perdite organico elettriche (incognite).

Il rendimento di primo principio sarà pari al rapporto tra la potenza elettrica netta prodotta e il flusso di calore entrante nel sistema.

$$\frac{dE^A}{dt} = \sum_i \dot{W}_i^{A\leftarrow} + \sum_j \dot{Q}_j^{A\leftarrow} + \sum_k (\dot{m}_k^{A\leftarrow} \cdot e_k)$$

$$\frac{dE^A}{dt} = 0 \quad \text{regime stazionario}$$

$$\sum_k (\dot{m}_k^{A\leftarrow} \cdot e_k) = 0 \quad \text{sistema chiuso}$$



Quindi:

$$\dot{Q}_{reatt} - \dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{loss,oe} - \dot{W}_{el,N} = 0 \quad \rightarrow \quad \eta_{I,el} = \frac{\dot{W}_{el,N}}{\dot{Q}_{reatt}}$$

Il calore disperso al condensatore si calcola come prodotto della portata di vapore che lo attraversa per la sua variazione di entalpia. La portata fluente nel condensatore è pari alla portata totale di fluido di lavoro diminuita della portata diretta al rigeneratore:

$$\dot{m}_{v,tot} = \dot{m}_{v,bp} + \dot{m}_{v,rig} \quad \rightarrow \quad \dot{m}_{v,bp} = \dot{m}_{v,tot} - \dot{m}_{v,rig} = 884,5 \text{ kg/s}$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{v,bp} \cdot q_{cond} \quad \rightarrow \quad \dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{v,bp} (h_{10} - h_1) = 1912465 \text{ kW} (1912,5 \text{ MW})$$

La potenza elettrica lorda prodotta dalla turbina è pari alla somma della potenza elettrica prodotta dai due stadi della turbina. La potenza elettrica netta si ottiene sottraendo a questo valore la potenza elettrica necessaria ad alimentare le due pompe:

$$\dot{W}_{el,TV} = (\dot{W}_{ap} + \dot{W}_{bp}) \eta_{oe} \rightarrow \dot{W}_{el,TV} = [\dot{m}_{v,tot} (h_6 - h_7) + \dot{m}_{v,bp} (h_9 - h_{10})] \eta_{oe} = 1039993 \text{ kW} (1040 \text{ MW})$$

$$\dot{W}_{el,P} = \dot{W}_{el,P1} + \dot{W}_{el,P2} = [\dot{m}_{v,tot} (h_3 - h_4) + \dot{m}_{v,bp} (h_2 - h_1)] = 7194 \text{ kW} (7,2 \text{ MW})$$

$$\dot{W}_{el,N} = \dot{W}_{el,TV} - \dot{W}_{el,P} = 1032799 \text{ kW} (1032,8 \text{ MW})$$

Per differenza è possibile ricavare le perdite organico elettriche di sistema:

$$\dot{Q}_{loss,oe} = 54736kW (54,7MW)$$

Il rendimento di primo principio vale:

$$\eta_{l,el} = \frac{\dot{W}_{el,N}}{\dot{Q}_{reatt}} = 0,344$$

e. Applicare il bilancio exergetico all'impianto complessivo, ricavando exergia distrutta e rendimento exergetico razionale del sistema. Note:

- Tracciare opportunamente il contorno del sistema in modo che il calore di condensazione e associato alle perdite di sistema siano scaricati in ambiente attraverso una superficie a T_0 ;
- Il fattore di Szargut necessario a calcolare l'exergia della radiazione nucleare è pari a 1;

Tracciando il contorno del sistema come da consegna, il bilancio exergetico generalizzato può essere semplificato come segue:

$$\frac{dEx_A}{dt} = \sum_i \dot{Ex}_{W,i}^{A\leftarrow} + \sum_j \dot{Ex}_{Q,j}^{A\leftarrow} + \sum_k \dot{m}_k^{A\leftarrow} ex_k - \dot{Ex}_D$$

$$\frac{dEx_A}{dt} = 0 \quad \text{regime stazionario}$$

$$\sum_k \dot{m}_k^{A\leftarrow} ex_k = 0 \quad \text{sistema chiuso}$$

$$\sum_j \dot{Ex}_{Q,j}^{A\leftarrow} = 0 \quad \text{il calore di condensazione e delle perdite ha exergia nulla}$$

$$\dot{Q}_{reatt} = \dot{Ex}_{W,reatt} \quad \text{dato che il fattore di Szargut è unitario, il flusso termico della radiazione termica è assimilabile interamente a lavoro meccanico}$$

Quindi:

$$\dot{Ex}_{W,reatt} - \dot{W}_{el,N} - \dot{Ex}_D = 0 \quad \rightarrow \quad \begin{cases} \dot{Ex}_D = 1967201kW (1967,2MW) \\ \eta_{ex,R} = \frac{\dot{W}_{el,N}}{\dot{Ex}_{W,reatt}} = 0,344 \end{cases}$$

f. Applicare il bilancio exergetico secondo l'approccio Inlet/Exit, ricavando exergia distrutta e rendimento exergetico razionale, per i seguenti componenti: rigeneratore, reattore, turbina. Esplicitare le ipotesi semplificative adottate.

Di seguito si schematizzano i componenti da analizzare con le relative ipotesi. Tutti i componenti operano in regime stazionario.

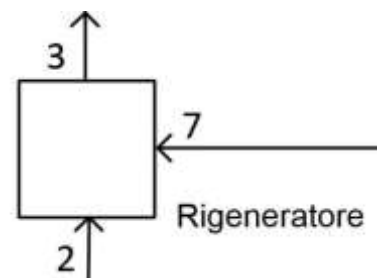
Rigeneratore:

Componente adiabatico e rigido.

Variazioni di velocità e dislivello dei fluidi trascurabile.

$$\dot{Ex}_2 + \dot{Ex}_7 - \dot{Ex}_3 - \dot{Ex}_{D,rigen} = 0$$

$$\dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_7 ex_7 - \dot{m}_3 ex_3 - \dot{Ex}_{D,rigen} = 0$$



$$\dot{E}x_{D,rogen} = 45381kW (45,4MW)$$

$$\eta_{ex,R,rogen} = \frac{\dot{m}_3 ex_3}{\dot{m}_2 ex_2 + \dot{m}_7 ex_7} = 0,691$$

Reattore:

Componente adiabatico e rigido.

Variazioni di velocità e dislivello dei fluidi trascurabile.

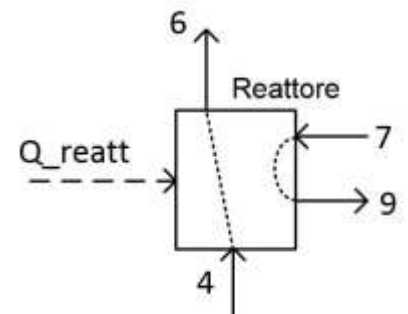
La radiazione nucleare è assimilabile a exergia da lavoro.

$$\dot{E}x_4 + \dot{E}x_7 + \dot{Q}_{reatt} - \dot{E}x_9 - \dot{E}x_6 - \dot{E}x_{D,reatt} = 0$$

$$\dot{m}_4 ex_4 + \dot{m}_7 ex_7 + \dot{Q}_{reatt} - \dot{m}_9 ex_9 - \dot{m}_6 ex_6 - \dot{E}x_{D,reatt} = 0$$

$$\dot{E}x_{D,reatt} = 1939184kW (1939MW)$$

$$\eta_{ex,R,rogen} = \frac{\dot{m}_9 ex_9 + \dot{m}_6 ex_6}{\dot{m}_4 ex_4 + \dot{m}_7 ex_7 + \dot{Q}_{reatt}} = 0,467$$



Turbina a vapore:

Componente adiabatico e rigido.

Variazioni di velocità e dislivello dei fluidi trascurabile.

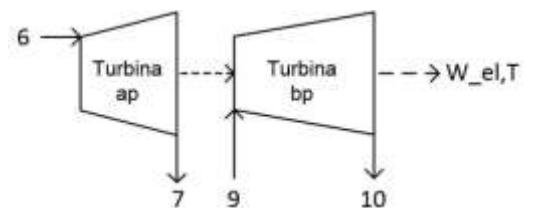
Il calore delle perdite o-e attraversa il contorno del sistema a temperatura T0.

$$\dot{E}x_6 + \dot{E}x_9 - \dot{E}x_7 - \dot{E}x_{10} - \dot{W}_{el,T} - \dot{E}x_{D,T} = 0$$

$$\dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_9 ex_9 - \dot{m}_7 ex_7 - \dot{m}_{10} ex_{10} - \dot{W}_{el,T} - \dot{E}x_{D,T} = 0$$

$$\dot{E}x_{D,T} = 89258kW (89,3MW)$$

$$\eta_{ex,R,T} = \frac{\dot{m}_7 ex_7 + \dot{m}_{10} ex_{10} + \dot{W}_{el,T}}{\dot{m}_6 ex_6 + \dot{m}_9 ex_9} = 0,953$$



Esercizio 2 (8 punti).

L'impianto in figura si compone di tre processi che scambiano tra di loro e con l'ambiente esterno flussi di materia ed energia con un contenuto di exergia riportato nella tabella sottostante.

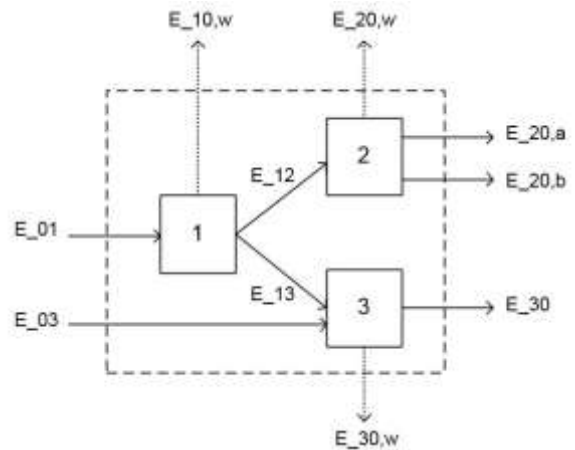
Il processo 1 riceve un flusso di materiali ed energia dall'esterno, producendo reagenti chimici che fornisce ai processi 2 e 3 e rilasciando scarti reflui in ambiente.

Il processo 2 produce due prodotti, che cede all'esterno del sistema.

Il processo 3 riceve un flusso di reagenti chimici e un apporto rinnovabile dall'esterno, producendo prodotti chimici lavorati.

Flusso	simbolo	Ex - MW
Flusso materiali / energia	E_01	100
Apporto rinnovabile	E_03	20
Prodotti chimici	E_12	40
Prodotti chimici	E_13	15
Prodotti chimici lavorati	E_20a	10
Prodotti chimici lavorati	E_20b	10
Energia termica	E_30	5
Reflui	E_10w	10
Reflui	E_20w	5
Reflui	E_30w	10

Processo	no	Z - €/h
processo 1	1	1050
processo 2	2	600
processo 3	3	500



Note:

- i reflui sono rilasciati in atmosfera senza alcun costo aggiuntivo;
- il costo specifico per unità di exergia del flusso E_01 è pari a 30 €/MWh;
- il flusso exergetico E_03 è un apporto rinnovabile gratuito;
- I costi di investimento dei processi sono riportati in tabella e sono costi livellati;
- La nomenclatura indica la direzione dei flussi (E_01: da esterno a processo 1, E_10: da processo 1 a esterno);

Noti i contenuti di exergia dei flussi e i costi di investimento dei tre processi, in tabella, è richiesto di:

- Scrivere i bilanci exergetici secondo l'approccio Fuel - Product, definendo i flussi appartenenti alle categorie Fuel, Product, Loss e ricavando l'ammontare di exergia distrutta e dissipata in ogni componente e nel sistema complessivo. Calcolare poi i rendimenti exergetici funzionali per tutti i componenti e per l'impianto complessivo, e le frazioni di exergia distrutta in ogni componente;
- Introducendo opportune equazioni ausiliarie, scrivere il sistema termoeconomico per i singoli sottosistemi 1, 2 e 3 secondo l'approccio preferito, ricavando i bilanci di costo su base exergetica e quindi i costi specifico e totale dei flussi in uscita dai sistemi;
- Introducendo opportune ipotesi per valutare il costo economico dell'exergia distrutta, applicare la procedura di Design Evaluation e discutere i risultati ottenuti.

Esercizio 2 (8 punti). Soluzione

a. Scrivere i bilanci exergetici secondo l'approccio Fuel - Product, definendo i flussi appartenenti alle categorie Fuel, Product, Loss e ricavando l'ammontare di exergia distrutta e dissipata in ogni componente e nel sistema complessivo. Calcolare poi i rendimenti exergetici funzionali per tutti i componenti e per l'impianto complessivo, e le frazioni di exergia distrutta in ogni componente;

$$\dot{E}_F = \dot{E}_P + \dot{E}_L + \dot{E}_D \quad \rightarrow \quad \psi_{ex,f} = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_F}$$

Processi	no	F - MW	P - MW	L - MW	D - MW	eta,ex,F	rho_D
processo 1	1	100,0	55,0	10,0	35,0	0,55	0,500
processo 2	2	40,0	20,0	5,0	15,0	0,50	0,214
processo 3	3	35,0	5,0	10,0	20,0	0,14	0,286
complessivo	tot	120,0	25,0	25,0	70,0	0,21	1,000

b. *Introducendo opportune equazioni ausiliarie, scrivere il sistema termoeconomico per i singoli sottosistemi 1, 2 e 3 secondo l'approccio Inlet/Exit, ricavando i bilanci di costo su base exergetica e quindi i costi specifico e totale dei flussi in uscita dai sistemi;*

$$1: \begin{cases} \dot{E}_{01} = \dot{E}_{10W} + \dot{E}_{12} + \dot{E}_{13} + \dot{E}_{D,1} \\ \dot{C}_{01} + \dot{Z}_1 = \dot{C}_{10W} + \dot{C}_{12} + \dot{C}_{13} \\ \dot{C} = c \cdot \dot{E} \end{cases} \rightarrow c_{01} \dot{E}_{01} + \dot{Z}_1 = c_{10W} \dot{E}_{10W} + c_{12} \dot{E}_{12} + c_{13} \dot{E}_{13}$$

$$2: \begin{cases} \dot{E}_{12} = \dot{E}_{20W} + \dot{E}_{20a} + \dot{E}_{20b} + \dot{E}_{D,2} \\ \dot{C}_{12} + \dot{Z}_2 = \dot{C}_{20W} + \dot{C}_{20a} + \dot{C}_{20b} \\ \dot{C} = c \cdot \dot{E} \end{cases} \rightarrow c_{12} \dot{E}_{12} + \dot{Z}_2 = c_{20W} \dot{E}_{20W} + c_{20a} \dot{E}_{20a} + c_{20b} \dot{E}_{20b}$$

$$3: \begin{cases} \dot{E}_{13} + \dot{E}_{03} = \dot{E}_{30W} + \dot{E}_{30} + \dot{E}_{D,3} \\ \dot{C}_{13} + \dot{C}_{03} + \dot{Z}_3 = \dot{C}_{30W} + \dot{C}_{30} \\ \dot{C} = c \cdot \dot{E} \end{cases} \rightarrow c_{13} \dot{E}_{13} + c_{03} \dot{E}_{03} + \dot{Z}_3 = c_{30W} \dot{E}_{30W} + c_{30} \dot{E}_{30}$$

Le equazioni ausiliarie necessarie a risolvere il problema sono le seguenti:

$c_{01} = 30 \text{ €/MWh}$	costo specifico flusso E_01 (dato dal testo)
$c_{10W} = c_{20W} = c_{30W} = 0 \text{ €/MWh}$	reflui emessi in ambiente senza costi aggiuntivi (dato dal testo)
$c_{03} = 0 \text{ €/MWh}$	apporto gratuito
$c_{12} = c_{13} = c_1$	i prodotti di 1 hanno il medesimo costo specifico per unità di exergeria
$c_{20a} = c_{20b} = c_2$	i prodotti di 2 hanno il medesimo costo specifico per unità di exergeria

Con queste equazioni ausiliarie, il sistema dato dai tre bilanci di costo per unità di exergeria diventa:

$$\begin{cases} c_{01} \dot{E}_{01} + \dot{Z}_1 = c_1 (\dot{E}_{12} + \dot{E}_{13}) \\ c_1 \dot{E}_{12} + \dot{Z}_2 = c_2 (\dot{E}_{20a} + \dot{E}_{20b}) \\ c_1 \dot{E}_{13} + \dot{Z}_3 = c_{30} \dot{E}_{30} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} c_1 = 73,6 \text{ €/MW} \\ c_2 = 177,3 \text{ €/MW} \\ c_3 = 320,9 \text{ €/MW} \end{cases}$$

I costi specifici e totali sono quindi pari a:

Costi		c - €/MWh	C - €/h
Flusso materiali / energia	E_01	30	3000
Apporto gratuito rinnovabile	E_03	0	0
Prodotti chimici	E_12	73,6	2945
Prodotti chimici	E_13	73,6	1105
Prodotti chimici lavorati	E_20a	177,3	1773
Prodotti chimici lavorati	E_20b	177,3	1773
Energia termica	E_30	320,9	1605
Reflui	E_10w	0	0
Reflui	E_20w	0	0
Reflui	E_30w	0	0

c. Introducendo opportune ipotesi per valutare il costo economico dell'exergia distrutta, applicare la procedura di Design Evaluation e discutere i risultati ottenuti.

Immaginando di operare l'impianto in modo tale che produca un ammontare costante dei prodotti E_20°, E_20b ed E_30, il costo economico dell'exergia distrutta si ottiene moltiplicando il costo specifico dei flussi in ingresso al sistema per l'ammontare di exergia distrutta dal processo:

$$\dot{C}_{D,1} = c_{01} \cdot \dot{E}_{D,1}$$

$$\dot{C}_{D,2} = c_1 \cdot \dot{E}_{D,2}$$

Il processo 3 è alimentato da due flussi exergetici, uno dei quali è gratuito: è necessario pertanto calcolare un costo specifico medio dell'exergia entrante nel sistema come segue.

$$c_{3,in} = \frac{c_1 \cdot \dot{E}_{13} + 0 \cdot \dot{E}_{03}}{\dot{E}_{13} + \dot{E}_{03}} = 31,6 \text{ €/MWh} \rightarrow \dot{C}_{D,3} = c_{3,in} \cdot \dot{E}_{D,3}$$

La procedura di Design Evaluation è finalizzata ad individuare i processi o i componenti "critici" di un dato sistema. Per la sua applicazione, è necessario calcolare il costo dell'exergia distrutta, la differenza di costo relativa e l'exergoeconomic factor.

$$\dot{C}_{D,k} = c_{F,k} \cdot \dot{E}_{D,k} \quad \text{Costo dell'exergia distrutta del componente k-esimo;}$$

$$\dot{C}_{L,k} = c_{F,k} \cdot \dot{E}_{L,k} \quad \text{Costo dell'exergia distrutta del componente k-esimo;}$$

$$\dot{Z}_i + \dot{C}_{D,i} + \dot{C}_{L,i} \quad \text{Somma dei costi di investimento ed exergia distrutta;}$$

$$r_i = \frac{c_p - c_f}{c_f} \quad \text{Coefficiente di "differenza di costo relativa";}$$

$$f_i = \frac{\dot{Z}_i}{\dot{Z}_i + \dot{C}_{D,i} + \dot{C}_{L,i}} \quad \text{Exergoeconomic Factor;}$$

Risultati:

Processi	no	C_D €/h	C_L €/h	Z+C_D,L €/h	r	f
processo 1	1	1050	300	2400	1,455	0,438
processo 2	2	1105	368	2073	1,407	0,289
processo 3	3	631	316	1447	9,169	0,346

Considerazioni:

- Il processo 1 è il più "importante" dal punto di vista dei costi (ha il costo di investimento più exergia distrutta più alto), a prima vista è quello al quale occorre dedicare più attenzione;
- Seguono per ordine di importanza il secondo e il terzo;
- La relative cost difference è elevata molto elevata per il terzo processo, che tuttavia è il meno importante dal punto di vista dei costi;
- La relative cost difference dei processi 1 e 2 è molto simile;
- L'indice f è 0,5 per il primo processo, ed è invece sbilanciato verso i costi delle irreversibilità per il secondo.

Quindi: se avessi a disposizione un colpo solo, mirerei a scegliere un costo di investimento superiore per il secondo processo.

Esercizio 3 (8 punti).

Con riferimento all'anno 2012, l'incentivazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili ha comportato una spesa complessiva pari a circa 12 miliardi di euro l'anno, per una produzione di energia elettrica stimabile in circa 67 TWh all'anno. Si supponga, a parità di produzione complessiva di energia elettrica, che:

- gli impianti alimentati da fonti rinnovabili incentivati sostituiscano impianti a ciclo combinato, alimentati da gas naturale (approssimabile come CH₄ con PCI = 46 MJ/kg);
- il prezzo medio di approvvigionamento del gas naturale all'ingrosso sia pari a circa 28 €/MWh, mentre il valore di mercato di una tonnellata di CO₂ emessa sia pari a circa 4 €/t;
- l'aumento dei cicli di accensione e spegnimento degli impianti alimentati da gas naturale, che hanno prodotto circa 130 TWh, nonché il loro prolungato funzionamento a carico parziale comporti una riduzione del loro rendimento medio da 52% fino a circa 49%.

Con tali ipotesi, trascurando tutto quanto non esplicitamente richiamato, si calcoli:

- a. il minore costo complessivo annuo per l'acquisto all'ingrosso di gas naturale;
- b. il minore costo complessivo annuo sostenuto per l'acquisto di quote di emissione della CO₂;
- c. il numero degli anni necessari affinché i maggiori costi sostenuti per l'erogazione degli strumenti incentivanti nel solo 2012 siano compensati dai sopra richiamati minori costi (a parità di tutto il resto).
- d. Utilizzando i dati del bilancio di energia dell'Italia nel 2012, si chiede infine di calcolare l'incidenza percentuale del consumo finale di gas naturale sul consumo finale totale (al lordo delle perdite di rete e dei servizi ausiliari), evidenziando quale parte è riferita al settore elettrico, quale al settore termico e quale al settore trasporti (trascurando gli usi non energetici).

Esercizio 3 (8 punti). Soluzione

a. *il minore costo complessivo annuo per l'acquisto all'ingrosso di gas naturale;*

Il risparmio di energia primaria (gas naturale) è dato dal mancato consumo di gas naturale degli impianti standard (con rendimento 0,52), diminuito dell'extraconsumo di combustibile dovuto al calo di efficienza dei cicli combinati:

$$EP_{risp} = \frac{EE_{fr}}{\eta_{CC, std}} - \left(\frac{EE_{CC}}{\eta_{CC, offd}} - \frac{EE_{CC}}{\eta_{CC, std}} \right) \rightarrow EP_{risp} = (128,8 - 15,3) TWh/y = 113,5 TWh/y$$

Il risparmio di gas naturale si calcola come (attenzione alle unità di misura, le conversioni non sono esplicitate nella formula):

$$C_{ng, risp} = c_{ng} \cdot EP_{risp} = 3179,1 M €/y$$

b. *il minore costo complessivo annuo sostenuto per l'acquisto di quote di emissione della CO₂;*

Il consumo evitato di combustibile si ricava grazie al potere calorifico:

$$m_{ng, risp} = \frac{EP_{risp}}{LHV_{ng}} \cdot 3600 = 8885,7 kt_{ng}/y$$

$$m_{CO_2, risp} = m_{ng, risp} \cdot \frac{44}{16} = 24435,8 kt_{CO_2}/y$$

$$C_{CO_2, risp} = c_{CO_2} \cdot m_{CO_2, risp} = 97,7 M €/y$$

c. *il numero degli anni necessari affinché i maggiori costi sostenuti per l'erogazione degli strumenti incentivanti nel solo 2012 siano compensati dai sopra richiamati minori costi (a parità di tutto il resto).*

Gli anni di rientro nell'investimento si calcolano come rapporto tra il costo totale netto dell'investimento e il risparmio dato dal costo evitato di combustibile ed emissioni di CO₂:

$$C_{inv,N} = C_{inv} - (C_{ng,risp} + C_{CO2,risp}) = 8723,1 M\text{€}/y \quad \text{costo di investimento totale al netto dei risparmi}$$
$$C_{risp} = C_{ng,risp} + C_{CO2,risp} = 3276,9 M\text{€}/y \quad \text{risparmi totali}$$

$$n_{inv} = \frac{C_{inv,N}}{C_{risp}} = 2,66$$

d. Utilizzando i dati del bilancio di energia dell'Italia nel 2012, si chiede infine di calcolare l'incidenza percentuale del consumo finale di gas naturale sul consumo finale totale (al lordo delle perdite di rete e dei servizi ausiliari), evidenziando quale parte è riferita al settore elettrico, quale al settore termico e quale al settore trasporti (trascurando gli usi non energetici).

Il consumo finale totale al lordo delle perdite di rete e dei servizi ausiliari è dato da. Il consumo finale di gas naturale è dato dal consumo di gas per gli usi finali (consumo finale diretto) più la quota di energia elettrica prodotta da impianti alimentati a gas (consumo finale indiretto).

$$E_{cf,lorido} = (124,9 + 2,79) Mtep = 127,69 Mtep$$

$$E_{cf,ng} = E_{cf,D,ng} + E_{cf,E,ng} = (39,02 + 129058 \cdot 0,086) Mtep = 50,119 Mtep$$

$$i_{ng} = \frac{E_{cf,ng}}{E_{cf,lorido}} = 0,3925$$

Tale incidenza è suddivisa sui settori elettrico, termico e trasporti come segue:

$$i_{ng,elettrico} = \frac{E_{cf,E,ng}}{E_{cf,lorido}} = 0,0869$$

$$i_{ng,termico} = \frac{E_{cf,T,ng}}{E_{cf,lorido}} = 0,2960$$

$$i_{ng,trasporti} = \frac{E_{cf,Tras,ng}}{E_{cf,lorido}} = 0,006$$