

Relazioni e - NTU

TABLE 11.3 Heat Exchanger Effectiveness Relations [5]

Flow Arrangement	Relation	
Parallel flo	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_r)]}{1 + C_r}$	(11.28a)
Counterflo	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NTU(1 - C_r)]}$	$(C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$	$(C_r = 1)$
Shell-and-tube		
One shell pass (2, 4, ... tube passes)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \times \frac{1 + \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(NTU)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$	(11.30a)
n shell passes ($2n, 4n, \dots$ tube passes)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$	(11.31a)
Cross-flow (single pass)		
Both fluids unmixed	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NTU)^{0.22} \{ \exp[-C_r(NTU)^{0.78}] - 1 \} \right]$	(11.32)
C_{\max} (mixed), C_{\min} (unmixed)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp \{ -C_r [1 - \exp(-NTU)] \})$	(11.33a)
C_{\min} (mixed), C_{\max} (unmixed)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1} \{ 1 - \exp[-C_r(NTU)] \})$	(11.34a)
All exchangers ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-NTU)$	(11.35a)

TABLE 11.4 Heat Exchanger NTU Relations

Flow Arrangement	Relation	
Parallel flo	$NTU = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r}$	(11.28b)
Counterflo	$NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1} \right)$	$(C_r < 1)$
	$NTU = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$	$(C_r = 1)$
Shell-and-tube		
One shell pass (2, 4, ... tube passes)	$(NTU)_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln \left(\frac{E - 1}{E + 1} \right)$	(11.30b)
	$E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$	(11.30c)
n shell passes ($2n, 4n, \dots$ tube passes)	Use Equations 11.30b and 11.30c with $\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r} \quad F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1} \right)^{1/n} \quad NTU = n(NTU)_1$	(11.31b, c, d)
Cross-flow (single pass)		
C_{\max} (mixed), C_{\min} (unmixed)	$NTU = -\ln \left[1 + \left(\frac{1}{C_r} \right) \ln(1 - \varepsilon C_r) \right]$	(11.33b)
C_{\min} (mixed), C_{\max} (unmixed)	$NTU = -\left(\frac{1}{C_r} \right) \ln [C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1]$	(11.34b)
All exchangers ($C_r = 0$)	$NTU = -\ln(1 - \varepsilon)$	(11.35b)

EX5 ECONOMIZZATORE CALDAIA A RECUPERO metodo e-NTU

In una caldaia a recupero (HRSG - Heat Recovery Steam Generator), l'economizzatore è lo scambiatore in controcorrente che preriscalda l'acqua prima che entri nell'evaporatore.

Nota: in una caldaia reale, bisogna verificare che questa temperatura sia inferiore alla temperatura di saturazione per evitare l'ebollizione nell'economizzatore

DATI FLUIDO CALDO (GAS DI SCARICO TURBINA A GAS)

Portata massica (mc)	50 kg/s
Calore specifico (ctc) gas turbina	1100 J/(kg K)
Temperatura Ingresso (Tci)	550 C

DATI FLUIDO FREDDO (ACQUA)

Portata massica (mf)	10 kg/s
Calore specifico (ctf) H2O	4186 J/(kg K)
Temperatura Ingresso (Tfi)	60 C

DATI SCAMBIATORE IN CC

Coefficiente globale (U)	80 W/(m2 K)
Area di scambio (A)	450 m2

CALCOLI

Portata termica Gas (Cc)	55000 W/K
Portata termica Acqua (Cf)	41860 W/K
Cmin (Acqua)	41860 W/K
Cmax (Gas)	55000 W/K
Cr=Rapporto portate termiche	0,761
NTU (U*A/Cmin)	0,860

Essendo il $Cr < 1$ si deve utilizzare la formula indicata o il diagramma

Efficienza e $0,488$

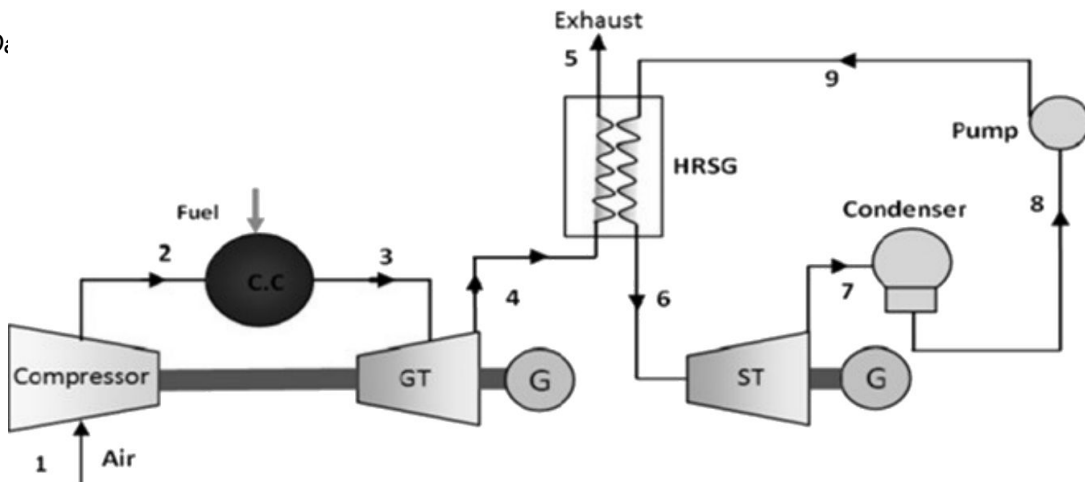
Dal diagramma e $0,49$

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU \cdot (1 - C_r)]}{1 - C_r \cdot \exp[-NTU \cdot (1 - C_r)]}$$

Potenza scambiata

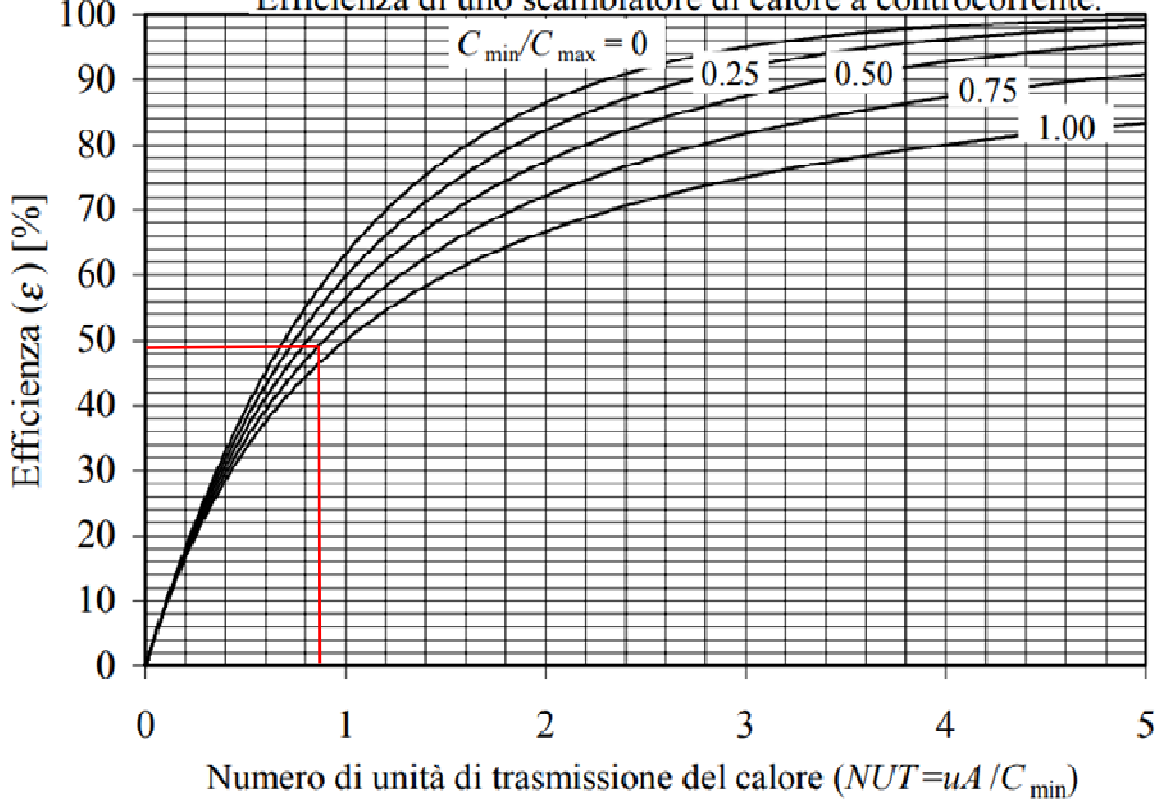
Potenza Max (Qmax)	20511400 W
Potenza Reale (Qreale)	10018213 W
Temperatura uscita Acqua (Tcu)	299 C
Temperatura uscita Gas (Tfu)	368 C

Di:



Layout di un generico ciclo combinato gas-vapore

Efficienza di uno scambiatore di calore a controcorrente.



EX4 SCAMBIATORE CALORE Contro-Corrente metodo e-NTU

Uno scambiatore di calore CC deve raffreddare una portata di olio tramite acqua

Dati	Valore
Coefficiente globale di scambio (U)	500 W/(m ² K)
Portata Olio (mc)	0,2 kg/s
Calore specifico Olio (ctc)	2100 J/(kg K)
Temperatura Ingresso Olio (Tci)	100 C
Temperatura uscita Olio (Tcu)	40 C
Portata Acqua (mf)	0,2 kg/s
Calore specifico Acqua (ctf)	4186 J/(kg K)
Temperatura Ingresso Acqua (Tfi)	20 C

CALCOLI

Portata termica Olio Cc	420 W/K	
Portata termica Acqua Cf	837,2 W/K	
Cmin (olio)	420 W/K	
Cmax (acqua)	837,2 W/K	
Cr=Cmin/Cmax	0,502	Rapporto portate termiche
Calore massimo (Qmax)	33600 W	Qmax= Cmin (Tci-Tfi)
Calore reale ceduto dall'olio		
Qr = mc ctc (Tci-Tcu)	25200 W	
L'efficienza dello scambiatore vale		
e = Qr/Qmax	0,75	75%

Nota l'efficienza richiesta si ricava NTU

Per scambiatori in controcorrente con Cr<1 si usa la formula indicata

NTU 1,835

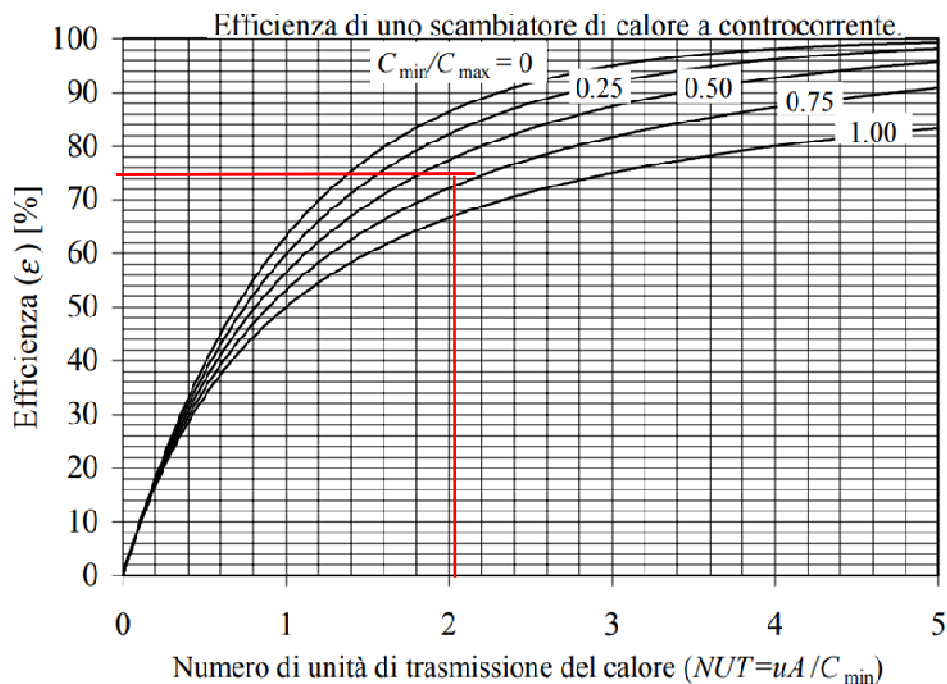
Il diagramma conferma il calcolo

$$NTU = \frac{1}{C_r - 1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1} \right)$$

Calcolo area di scambio A

Area di scambio A 1,54 m² A = NUT Cmin /U

Temperatura uscita Acqua (Tfu) 50,1 C Tfu= Tfi+Qr/Cf



EX3 SCAMBIATORE CALORE Contro-Corrente metodo e-NTU

Uno scambiatore di calore CC deve raffreddare una portata di olio tramite acqua

Dati	Valore
Coefficiente globale di scambio (U)	500 W/(m ² K)
Portata Olio (mc)	0,2 kg/s
Calore specifico Olio (ctc)	2100 J/(kg K)
Temperatura Ingresso Olio (Tci)	100 C
Temperatura uscita Olio (Tcu)	40 C
Portata Acqua (mf)	0,1 kg/s
Calore specifico Acqua (ctf)	4186 J/(kg K)
Temperatura Ingresso Acqua (Tfi)	20 C

CALCOLI

Portata termica Olio Cc	420 W/K	
Portata termica Acqua Cf	418,6 W/K	
Cmin (acqua)	418,6 W/K	
Cmax (olio)	420 W/K	
Cr=Cmin/Cmax	0,997	Rapporto portate termiche
Calore massimo (Qmax)	33488 W	Qmax= Cmin (Tci-Tfi)
Calore reale ceduto dall'olio		
Qr = mc ctc (Tci-Tcu)	25200 W	
L'efficienza dello scambiatore vale		
e = Qr/Qmax	0,75	75%

Nota l'efficienza richiesta si ricava NTU

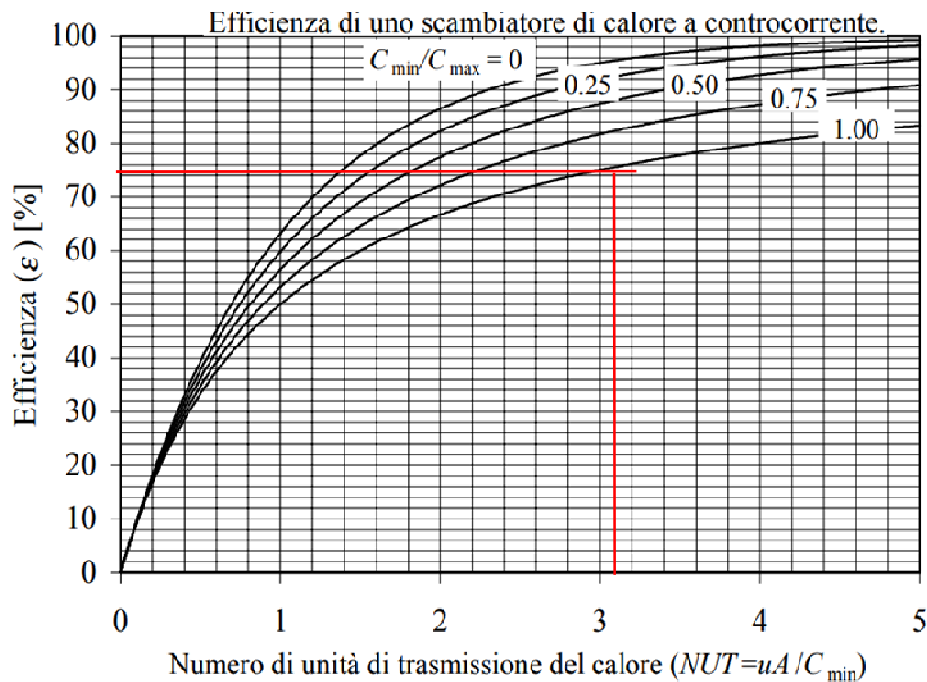
Per scambiatori in controcorrente con Cr=1

$$NTU = e / (1 - e) \quad 3,041$$

Calcolo area di scambio A

$$Area \text{ di scambio } A \quad 2,55 \text{ m}^2 \quad A = NUT \text{ Cmin} / U$$

$$Temperatura \text{ uscita Acqua (Tfu)} \quad 80,2 \text{ C} \quad Tfu = Tfi + Qr / Cf$$



EX2 SCAMBIATORE CALORE Contro-Corrente metodo e-NTU

Uno scambiatore di calore CC deve raffreddare una portata di olio tramite acqua

Dati	Valore
Coefficiente globale di scambio (U)	500 W/(m ² K)
Efficienza scambiatore e	0,8 80%%
Portata Olio (mc)	0,2 kg/s
Calore specifico Olio (ctc)	2100 J/(kg K)
Temperatura Ingresso Olio (Tci)	100 C
Portata Acqua (mf)	0,1 kg/s
Calore specifico Acqua (ctf)	4186 J/(kg K)
Temperatura Ingresso Acqua (Tfi)	20 C

CALCOLI

Portata termica Olio Cc	420 W/K	
Portata termica Acqua Cf	418,6 W/K	
Cmin (acqua)	418,6 W/K	
Cmax (olio)	420 W/K	
Cr=Cmin/Cmax	0,997	Rapporto portate termiche

Nota l'efficienza richiesta si ricava NTU

Per scambiatori in controcorrente con Cr=1

$$NTU = e / (1 - e) \quad 4,000$$

Calcolo area di scambio A

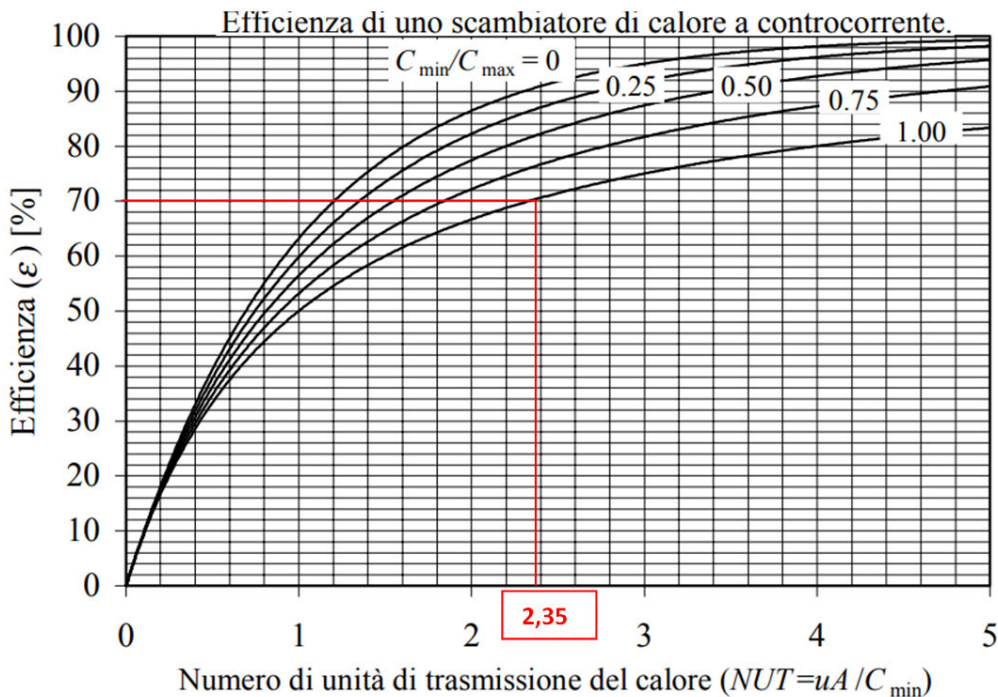
Dalla definizione di NUT = U A / Cmin si ricava area di scambio

Area di scambio A	3,35 m ²	A = NUT Cmin / U
-------------------	---------------------	------------------

Calore scambiato e temperature in uscita

Calore massimo (Qmax)	33488 W	Qmax= Cmin (Tci-Tfi)
Calore reale (Qreale)	26790 W	Qreale= e * Q_max
Temperatura uscita Acqua (Tfu)	84,0 C	Tfu= Tfi+Qr/Cf
Temperatura uscita Olio (Tcu)	36,2 C	Tcu= Tci-Qr/Cc

* Il valore di NTU si può ricavare anche dai diagrammi degli scambiatori



EX1 SCAMBIATORE CALORE Contro-Corrente metodo e-NTU

Uno scambiatore di calore CC deve raffreddare una portata di olio tramite acqua

Dati	Valore
Coefficiente globale di scambio (U)	500 W/(m ² K)
Area di scambio (A)	2 m ²
Portata Olio (mh)	0,2 kg/s
Calore specifico Olio (ctc)	2100 J/(kg K)
Temperatura Ingresso Olio (Tci)	100 C
Portata Acqua (mf)	0,1 kg/s
Calore specifico Acqua (ctf)	4186 J/(kg K)
Temperatura Ingresso Acqua (Tfi)	20 C

CALCOLI

Portata termica Olio Cc	420 W/K	
Portata termica Acqua Cf	418,6 W/K	
Cmin (acqua)	418,6 W/K	
Cmax (olio)	420 W/K	
Cr=Cmin/Cmax	0,997	Rapporto portate termiche

Possiamo calcolare il valore di NTU dalla definizione

$$NTU = U \cdot A / C_{min} = 2,39$$

Per scambiatori in controcorrente con Cr=1

$$e = NTU / (1 + NTU) = 0,70$$

Calore scambiato e temperature in uscita

Calore massimo (Qmax)	33488 W	$Q_{max} = C_{min} (T_{ci} - T_{fi})$
Calore reale (Qreale)	23606 W	$Q_{reale} = e \cdot Q_{max}$
Temperatura uscita Acqua (Tfu)	76,4 C	$T_{fu} = T_{fi} + Q_r / C_f$
Temperatura uscita Olio (Tcu)	43,8 C	$T_{cu} = T_{ci} - Q_r / C_c$

* Il valore di NTU si può ricavare anche dai diagrammi degli scambiatori

