

Tesi di Laurea Magistrale Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Criteri d'impiego, manutenzione e sicurezza operativa degli scambiatori di calore in processi di raffinazione del petrolio

Relatore: Prof. Carlo Marco Masoero

Candidato: Andrea Vitofrancesco

# Sommario

Introduzione	Processi produttivi petrolchimici	
Distillazione frazionata sotto vuoto.	Introduzione	3
Idrodesolforazione       14         Reforming       17         Alchilazione       21         Scambiatori di calore a fascio tubiero       24         Introduzione       24         Design costruttivo       24         Classificazione       26         Componenti caratteristici       25         Air cooler       33         Introduzione       33         Conponenti costitutivi       35         Tubi alettati       44         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       43         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo F <sub>T</sub> 51         Configurazione in batteria       53         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       53         Sporcamento       51         Vibrazioni       66         Procedure operative durante SD e TA       66         Introduzione       66         Shut-down       66         Chiusura delle valvole       65         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74	Distillazione frazionata	5
Reforming.       17         Alchilazione       21         Scambiatori di calore a fascio tubiero       24         Introduzione       24         Design costruttivo       24         Classificazione       26         Componenti caratteristici       25         Air cooler       33         Introduzione       33         Conponenti costitutivi       35         Tubi alettati       40         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       43         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo F <sub>T</sub> 51         Configurazione in batteria       53         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Corrosione       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       65         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74	Distillazione frazionata sotto vuoto	11
Alchilazione       21         Scambiatori di calore a fascio tubiero       24         Introduzione       24         Design costruttivo       24         Classificazione       26         Componenti caratteristici       25         Air cooler       33         Introduzione       33         Conponenti costitutivi       35         Tubi alettati       40         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       43         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo F <sub>T</sub> 51         Configurazione in batteria       53         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Corrosione       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       66         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       65         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Idrodesolforazione	14
Scambiatori di calore a fascio tubiero.       24         Introduzione.       24         Design costruttivo.       24         Classificazione.       26         Componenti caratteristici.       25         Air cooler.       33         Introduzione.       35         Conponenti costitutivi.       35         Tubi alettati.       46         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore.       45         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD.       42         Calcolo dei fattori liminari.       45         Fattore correttivo FT.       51         Configurazione in batteria.       52         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore.       57         Corrosione.       55         Sporcamento.       61         Vibrazioni.       65         Procedure operative durante SD e TA.       68         Introduzione.       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole.       66         Safety blind.       70         Montaggio e smontaggio.       72         Pulizia e riparazioni.       74         Test ed ispezione.       76	Reforming	17
Introduzione         24           Design costruttivo         24           Classificazione         26           Componenti caratteristici         25           Air cooler         33           Introduzione         33           Conponenti costitutivi         35           Tubi alettati         46           Termodinamica applicata agli scambiatori di calore         43           Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD         43           Calcolo dei fattori liminari         45           Fattore correttivo FT         51           Configurazione in batteria         52           Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore         57           Corrosione         57           Sporcamento         61           Vibrazioni         65           Procedure operative durante SD e TA         66           Introduzione         66           Shut-down         66           Shut-down         66           Safety blind         70           Montaggio e smontaggio         72           Pulizia e riparazioni         74           Test ed ispezione         76	Alchilazione	21
Design costruttivo       24         Classificazione       26         Componenti caratteristici       25         Air cooler       33         Introduzione       33         Conponenti costitutivi       35         Tubi alettati       46         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       43         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo FT       51         Configurazione in batteria       52         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Corrosione       55         Sporcamento       66         Vibrazioni       66         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       65         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Scambiatori di calore a fascio tubiero	24
Classificazione       26         Componenti caratteristici       25         Air cooler       33         Introduzione       33         Conponenti costitutivi       35         Tubi alettati       40         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       42         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo FT       51         Configurazione in batteria       53         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Corrosione       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       66         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       65         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Introduzione	24
Componenti caratteristici       25         Air cooler       33         Introduzione       33         Conponenti costitutivi       35         Tubi alettati       40         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       42         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo FT       51         Configurazione in batteria       53         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Corrosione       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       66         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Design costruttivo	24
Air cooler       33         Introduzione       33         Conponenti costitutivi       35         Tubi alettati       40         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       42         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo F <sub>T</sub> 51         Configurazione in batteria       53         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Corrosione       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       66         Safety blind       76         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Classificazione	26
Introduzione       33         Conponenti costitutivi       35         Tubi alettati       46         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       43         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo F <sub>T</sub> 51         Configurazione in batteria       52         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       66         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       65         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Componenti caratteristici	29
Conponenti costitutivi       35         Tubi alettati       46         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       42         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo FT       51         Configurazione in batteria       52         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Corrosione       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       65         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Air cooler	33
Tubi alettati       46         Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       43         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo FT       51         Configurazione in batteria       53         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Corrosione       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       65         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Introduzione	33
Termodinamica applicata agli scambiatori di calore       43         Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       43         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo FT       51         Configurazione in batteria       53         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       69         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Conponenti costitutivi	35
Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD       43         Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo FT       51         Configurazione in batteria       53         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Corrosione       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       69         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Tubi alettati	40
Calcolo dei fattori liminari       45         Fattore correttivo FT       51         Configurazione in batteria       53         Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore       57         Corrosione       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       69         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Termodinamica applicata agli scambiatori di calore	43
Fattore correttivo FT	Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD	43
Configurazione in batteria	Calcolo dei fattori liminari	49
Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore	Fattore correttivo F <sub>T</sub>	51
Corrosione       57         Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       69         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Configurazione in batteria	53
Sporcamento       61         Vibrazioni       65         Procedure operative durante SD e TA       68         Introduzione       68         Shut-down       68         Chiusura delle valvole       69         Safety blind       70         Montaggio e smontaggio       72         Pulizia e riparazioni       74         Test ed ispezione       76	Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore	57
Vibrazioni 65  Procedure operative durante SD e TA 68  Introduzione 68  Shut-down 68  Chiusura delle valvole 69  Safety blind 70  Montaggio e smontaggio 72  Pulizia e riparazioni 74  Test ed ispezione 75	Corrosione	57
Procedure operative durante SD e TA	Sporcamento	61
Introduzione 68 Shut-down 68 Chiusura delle valvole 69 Safety blind 70 Montaggio e smontaggio 72 Pulizia e riparazioni 74 Test ed ispezione 76	Vibrazioni	65
Shut-down	Procedure operative durante SD e TA	68
Chiusura delle valvole	Introduzione	68
Safety blind	Shut-down	68
Montaggio e smontaggio	Chiusura delle valvole	69
Pulizia e riparazioni	Safety blind	70
Test ed ispezione	Montaggio e smontaggio	72
•	Pulizia e riparazioni	74
Riconsegna dell'impianto	Test ed ispezione	76
The onsegne ten impunio	Riconsegna dell'impianto	78

# Processi produttivi petrolchimici

#### Introduzione

Nella società moderna una delle materie prime più importanti è l'energia, difatti viene utilizzata per alimentare gran parte della nostra tecnologia a disposizione. Nonostante l'avanzamento tecnologico che punta a utilizzare energia alternative, il petrolio ha ancora un suo bacino di utilizzo ancora molto ampio.

Il petrolio è una miscela organica che presenta al suo interno una vastità di molecole che ne caratterizzano le proprietà chimico-fisiche. Oggigiorno il petrolio non può essere utilizzato al suo stato grezzo principalmente per due motivi. Il primo consiste nell' impossibilità di utilizzare il petrolio come combustibile, dato che, ha delle caratteristiche incompatibili con i motori di oggi. In secondo luogo il petrolio porta con sé una serie di scorie che, oltre a danneggiare gli strumenti di utilizzo, rappresentano una grande fetta di inquinamento che deve essere opportunamente filtrata.

Per questo motivo il petrolio deve subire un processo di raffinazione che rende possibile in prima fase la separazione dei fluidi nelle sue miscele costituenti, e in secondo luogo opera un upgrade e cleanup dei prodotti per migliorare le prestazioni ed evitare parte dell'inquinamento.

La raffineria ,a valle di un impianto di distillazione, inserisce una serie di impianti supplementari che operano per aumentare la richiesta di specifici prodotti in base alle richieste del mercato.

Altri impianti secondari provvedono alla produzione di tutte quelle sostanze che devono essere immagazzinate per essere opportunamente smaltite o riutilizzate in processi primari.

Ricordando che gli schemi di processo sono molto variabili in funzione delle tecnologie impiegate e in funzione dei prodotti da ottenere, si può analizzare uno schema tipico per la raffinazione delle benzine o del gasolio . Tale schema è utile per rendersi conto dei sistemi di processo principalmente utilizzati e come interagiscono fra di loro.

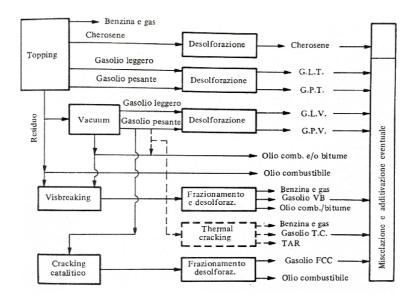


Fig 1 shema a blocchi [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici]

Il grezzo dopo aver subito trattamenti di pulizia viene introdotto nello stadio di distillazione frazionata. Lo stadio di topping rappresenta il cuore della raffineria perché attraverso il riscaldamento e il successivo raffreddamento parziale, opportunamente studiato, si può ottenere la separazione del petrolio in classi di prodotti che hanno le proprie caratteristiche fisico chimiche. Una volta avvenuta la separazione di prodotti, le raffinerie operano un secondo stadio di distillazione frazionata, avendo cura di operare in condizioni di sottovuoto. Questa accortezza permette di ottenere maggiore separazione dei prodotti leggeri, che generalmente sono più nobili. Una volta separato il grezzo in tutte le sue specie la raffineria può adoperare strategie diverse per l'ottimizzazione dei prodotti. Una delle più classiche tecniche di trattamento del greggio è il visbreaking, che consiste nella rottura meccanica delle catene organiche più lunghe attraverso un trattamento termico. Questo processo aumenta la produzione delle specie costitutive più leggere come benzine o nafte a discapito di una diminuzione di oli o bitumi. Per evitare grossi utilizzi di energia termica si può scegliere di utilizzare catalizzatori che facilitano la scissione delle catene, permettendo reazioni a temperatura più bassa. Altro importante aspetto è l'aumento di ottani all' interno dei prodotti per utilizzo motoristico. Attraverso l'isomerizzazione si possono trasformare catene a bassa percentuale di ottano in catene ad alta percentuale di ottano. Utilizzando il processo di reforming si possono ottenere frazioni di prodotto con altissimo numero di ottano fino a superare anche il valore di 100.

A valle di processi di cracking, di solito, si istallano impianti di alchilazione per recuperare fasi liquide da gas. Tali gas sono provenienti dalla rottura delle molecole ad alta temperatura. Altri processi utili alla raffineria, ma non propriamente competenti per la formazione delle benzine sono i processi a base di idrogeno che recuperano soprattutto lubrificanti da frazioni pesanti. In ultimo

bisogna ricordare che il petrolio possiede quantità non trascurabili di zolfo, che sotto forma di H2S, rappresentano un problema per l'ambiente e la sicurezza delle persone. Per tale ragione a valle degli impianti viene posta una stazione di desolforazione che prevede un assorbimento dell'H2S ed un post trattamento per l'accumulo di zolfo allo stato molecolare.

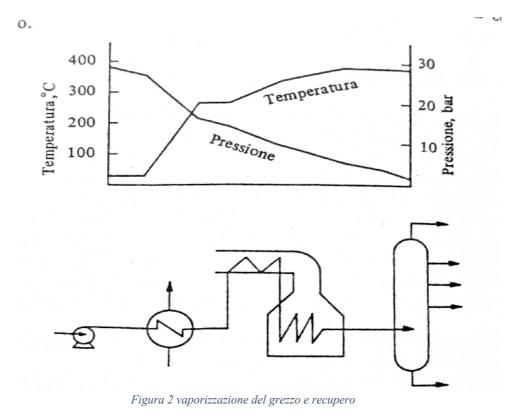
Come si è potuto notare la raffineria utilizza come forma di energia principale l'energia termica per processare il prodotto, quindi la raffineria utilizza costantemente riscaldamenti e raffreddamenti dei prodotti per ottenere diversi risultati chimici. Per diminuire al massimo il costo ed ottimizzare i processi tutti i sistemi sopracitati sono dotati di svariati scambiatori di recupero che, oltre a rendere possibile gli scambi termici, riutilizzano il calore sottratto fornendolo ad una stazione che necessita di energia termica. Oltre alla pura variazione di temperatura si ha bisogno spesso di operare passaggi di stato che necessitano di sottrazione o addizione di calore. In alcuni casi gli scambiatori di calore hanno il ruolo non di variare la temperatura, ma di sottrarre calore per stabilizzare processi e tenere sotto controllo la temperatura.

Nei successivi capitoli si mostrerà come gli scambiatori, nonostante la loro funzione sia unicamente la sottrazione o la cessione di calore, svolgono compiti diversi in esigenze diverse. Per questo cambiano sia dal punto di vista costruttivo, sia nella strategia di collocamento.

Queste caratteristiche d'impiego differenziano ogni scambiatore di calore, portando vantaggi e svantaggi sia dal punto di vista prestazionale nominale, sia di affidabilità nel tempo. Quindi per garantire il corretto funzionamento nel tempo delle unità, bisogna conoscere approfonditamente i sistemi di processo, le varianti costruttive e le modalità operative per la manutenzione

#### Distillazione frazionata

La distillazione frazionata è un processo esclusivamente di natura fisica, infatti al suo interno non avvengono reazioni chimiche, ma solo trasformazioni di stato che opportunamente sfruttate portano alla divisione in prodotti ben specifici. Da un punto di vista energetico il processo di distillazione frazionata ha un grandissimo impatto, infatti bisogna ricordare che la colonna di distillazione frazionata o "topping" smaltisce tutta la portata di greggio dell'intera raffineria ed essendo un processo produttivo basato sul' evaporazione, ha un dispendio energetico unitario molto alto. Per questi motivi diventa molto importante recuperare la maggior quantità di calore disponibile dal' impianto.



[C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Prima di poter accedere nella torre di distillazione il gregge deve essere vaporizzato.

A tale proposito si utilizza una batteria di scambiatori di calore che viene alimentata recuperando energia termica dai vari prodotti di uscita. Dato che all'uscita dagli scambiatori il gregge è solo parzialmente riscaldato, dovrà essere immesso in un forno che porterà il prodotto alla temperatura minima di immissione in colonna di circa 360 gradi centigradi. Si ricorda che l'andamento della pressione all' interno del circuito è inversamente proporzionale alla temperatura dato che, parte da una pressione di circa 30 bar fino ad una pressione di 1,8 bar.

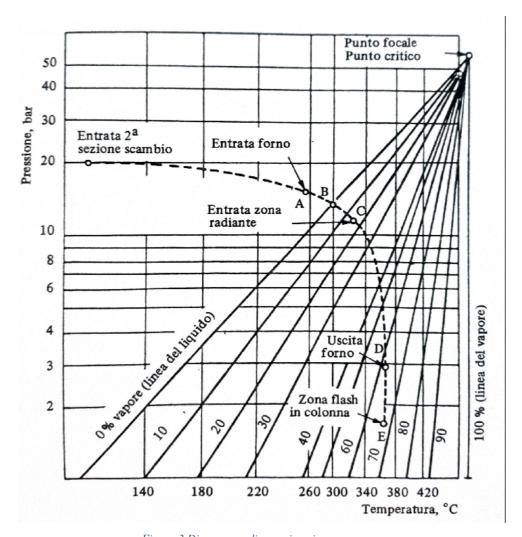


Figura 3 Diagramma di vaporizzazione
[C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Il prodotto entrando in colonna incontra una prima zona di flash ,che permette la separazione della fase liquida da quella gassosa. Ovviamente la parte liquida rimarrà sul fondo della colonna, mentre la fase vaporizzata salirà verso la testa della colonna. Il funzionamento del topping prevede che il vapore salendo all' interno della colonna vada in contro a temperature più basse e per questo alcune specie sequenzialmente liquefino e si depositino in appositi piatti atti alla raccolta e alla canalizzazione all'esterno della colonna. Così facendo si possono estrarre a diverse altezze miscele di prodotti diversi. Più l'estrazione della miscela avverrà verso l'alto più la miscela sarà leggera.

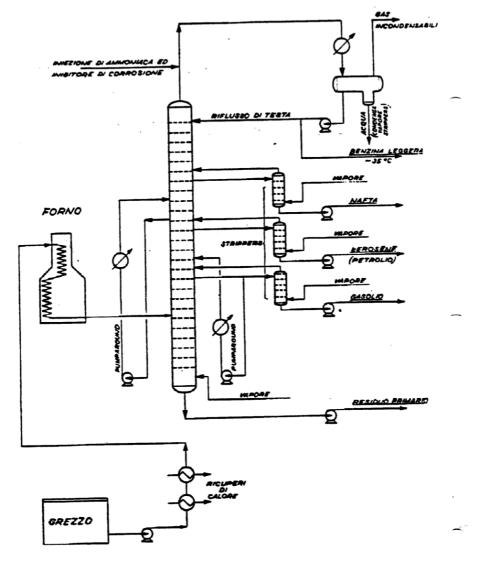


Figura 4 Schema di processo

[C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Particolare interesse risiede nel controllo delle portate estratte per garantire flessibilità al sistema nella produzione e nell'approvvigionamento di diversi tipi di prodotti. Per poter controllare i prodotti si estraggono le portate a determinate altezze e si raffreddano all'esterno della torre. Le portate in eccesso si reimmettono in colonna due piatti più in alto. Questa modalità operativa deve sempre esser compatibile con gli equilibri termodinamici presenti in colonna.

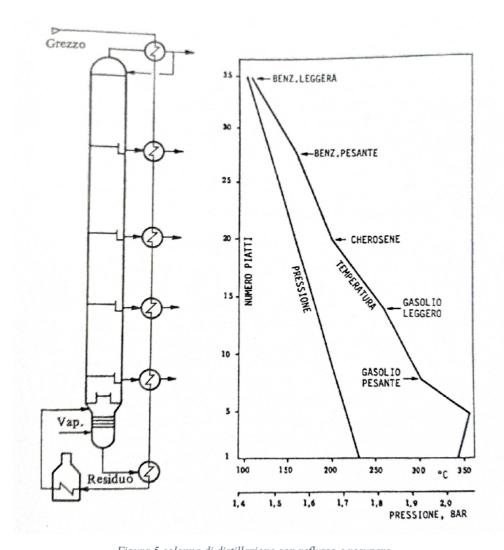


Figura 5 colonna di distillazione con reflusso e recupero

[C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Questa modalità di controllo dei riflussi viene utilizzata molto negli impianti petroliferi, perché permette:

- un adeguato controllo delle portate desiderate.
- un recupero di calore dato che gli scambiatori di calore posti alle uscite vengono collegate in controcorrente alla portata di alimentazione della torre.
- contenere i costi di realizzazione dell'impianto.

Il metodo più performante consiste di prevedere dei riflussi opportunamente refrigerati su tutta la colonna. Questa tecnica rappresenta la massima efficienza perché si può adoperare recupero termico su ogni piatto della colonna. Purtroppo i costi di messa in opera sono troppo elevati per poter trarne beneficio.

In testa alla colonna viene estratto il prodotto in fase gassosa che viene poi mandato ad uno stabilizzatore che provvederà a separare il gas dalla parte liquida.

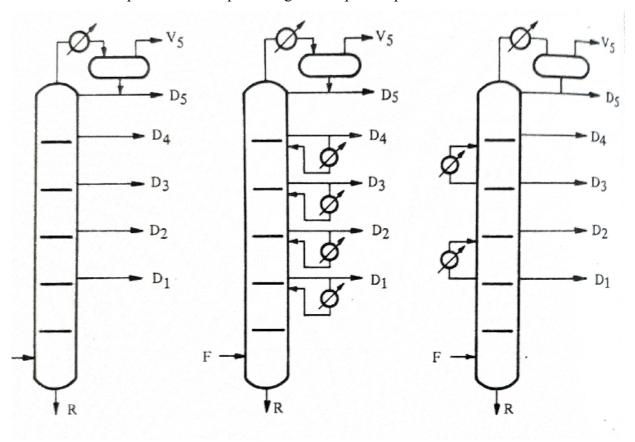


Figura 6 configurazioni di recupero termico e controllo prodotti [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

La soluzione adoperante gli scambiatori esterni permette che la colonna lavori a diverse temperature riducendone notevolmente le portate da stabilizzare all' uscita dalla testa della colonna. Per il recupero termico si preferisce asportare più calore negli stadi più bassi dato che, essendo un fluido molto caldo ho bisogno di meno portata. Questo procedimento beneficia molto in termini di stabilità della colonna.

#### Distillazione frazionata sotto vuoto

Nella distillazione a temperatura ambiente sul fondo si depositano le specie altobollenti. Affinché queste specie vengano trattate si ha bisogno di alte temperature di esercizio. Bisogna però considerare che aumentare troppo la temperatura nella zona di flash potrebbe portare a piroscissioni. Tale fenomeno induce formazioni di depositi carboniosi, che peggiorano le prestazioni delle unità. Per evitare questo il Topping usualmente viene accoppiato ad un secondo stadio di distillazione che però avviene a bassa pressione.

Questa scelta permette che le specie distillino anche a temperature più basse e di conseguenza posso ottenere prodotti molto utili che altrimenti sarebbero scartati. Di solito i prodotti uscenti dalla distillazione sottovuoto sono elementi pesanti che vengono utilizzati per oli, lubrificanti o con dovuti trattamenti successivi diesel.

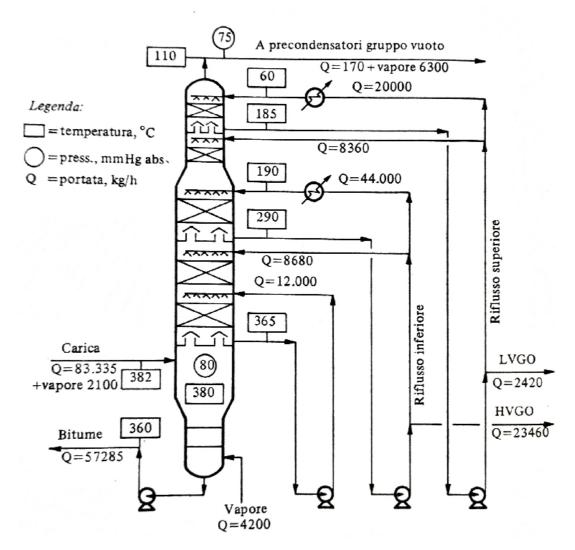


Figura 7 schema distillazione sotto vuoto [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Da notare che per garantire il corretto funzionamento della colonna i piatti e le strutture interne sono dissimili da quelli utilizzati nelle normali torri di distillazione, ciò è dovuto dalle sollecitazioni che la bassa pressione esercita sulla torre.

Per garantire il corretto funzionamento della colonna si utilizzano pochi piatti e forati per cercare di diminuire le perdite di carico tra la testa e la zona di flash.

Anche nella colonna a bassa pressione si fanno largo uso dei riflussi per il controllo delle portate dei prodotti.

La generazione del vuoto viene affidata ad un sistema di eiettori abbinati a condensatori.

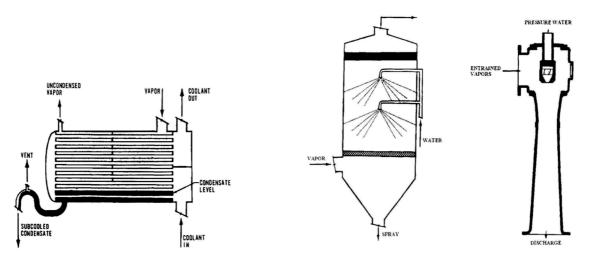


Figura 8 Sistema gen. vuoto [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Dalla testa della colonna si veicolano i prodotti in un eiettore, dove si icontrano i fluidi di processo con una corrente di vapore che espande fino a una pressione di 50-40 mmHg e successivamente portati in un condensatore per la raccolta del condensato.

La realizzazione del vuoto può anche avvenire a più stadi aumentando l'efficienza del sistema di vuoto. Così facendo si possono ottenere pressioni che si avvicinano anche ai 10 mmHg.

Fattori molto influenzanti sono la presenza di scorie all'interno del prodotto di testa che diminuisce la capacità di creare il sottovuoto, altro importante fattore è la temperatura dell'acqua disponibile che al diminuire della temperatura aumenta l'efficienza.

Per aumentare ulteriormente l'efficienza del sistema prima dell'introduzione della portata di testa nell' eiettore si può prevedere uno stadio di pre-condensazione che aiuta l' eiettore al corretto funzionamento.

#### Idrodesolforazione

L'idrodesolforazione costituisce uno dei principali sistemi di rimozione dello zolfo dai prodotti di raffineria.

Il processo viene considerato come un sistema di clean-up e upgrade dei prodotti che successivamente vengono stoccati per la vendita. In particolare il sistema viene spesso collocato come ultimo stadio della catena di processi di distillazione e posto prima dei trattamenti catalitici.

L'idrodesolforazione è un processo catalitico a base di idrogeno che ha la specificità di allontanare molecole di zolfo, azoto e ossigeno dai prodotti come benzine, diesel e metano.

La desolforazione ha due scopi principali per una raffineria. Il primo consiste nella purificazione dei prodotti dallo zolfo, dato che le attuali norme vigenti in ambito di tutela dell'ambiente prevedono sempre meno emissioni di zolfo. Di conseguenza le case automobilistiche, oltre a prevedere forme di filtraggio post combustione, impongono una diminuzione di zolfo presente nei combustibili fino a una riduzione a 10 ppm. In secondo luogo la raffineria fa largo uso in sistemi di post trattamento dei prodotti aventi agenti catalizzatori, che permettono le corrette trasformazioni delle molecole. Questi catalizzatori usualmente sono molto affini allo zolfo i quali si legano definitivamente ad esso avvelenandosi. Essendo i catalizzatori moto costosi si cerca di minimizzare i le spese sfruttando al massimo la loro durata.

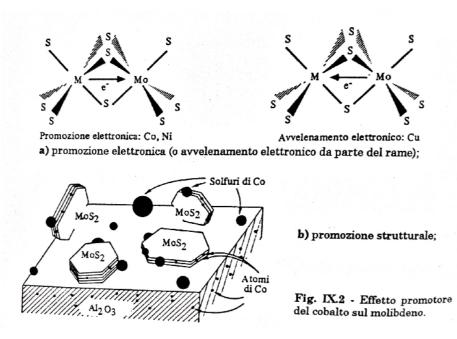


Figura 9 Catalizzatore per H2S [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

I fluidi che devono essere processati vengono preriscaldati in una serie di scambiatori che si occupano di recuperare l'energia termica a valle del reattore. Successivamente il prodotto viene immesso in un forno per terminare la fase di riscaldamento.

Affinché i prodotti inizino a preferire una configurazione molecolare che favorisca la cessione dello zolfo all' idrogeno bisogna operare con temperature elevate. Le temperature possono variare dai 150 gradi, per molecole come il mercaptano, fino a 400 gradi centigradi per molecole come i solfuri o i tiofeni.

L'impiego di temperature così elevate può provocare dei fenomeni di thermal cracking con successiva deposizione negli organi di un substrato a base carboniosa (coke) che provocano incrostazioni e corrosioni,in estremi casi anche ostruzioni per il fluido . Per evitare ciò si è scelto di favorire le reazioni di scissione con l'utilizzo di catalizzatori a base di cobalto e molibdeno ,che opportunamente depositati su un substrato poroso, come la gamma-allumina, permettono l'abbassamento della temperatura di reazione e l'aumento della velocità di reazione.

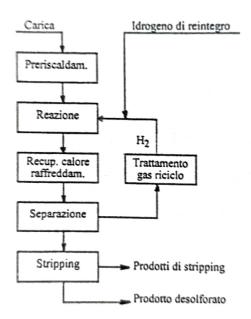


Figura 10 schema a blocchi HDS [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Una volta che i prodotti escono dal reattore vengono convogliati in uno scambiatore che recupera calore. Tale calore viene ceduto al flusso che deve entrare nel forno. Tali prodotti possono anche raggiungere i 400 gradi di temperatura, rendendo proficuo il recupero di calore. Cessata la massima

energia i prodotti vengono lavati con acqua per abbassare la carica acida che potrebbe danneggiare gli organi successivi e convogliati nei condensatori, che uniti ai separatori, divideranno definitivamente i prodotti dal H2S.

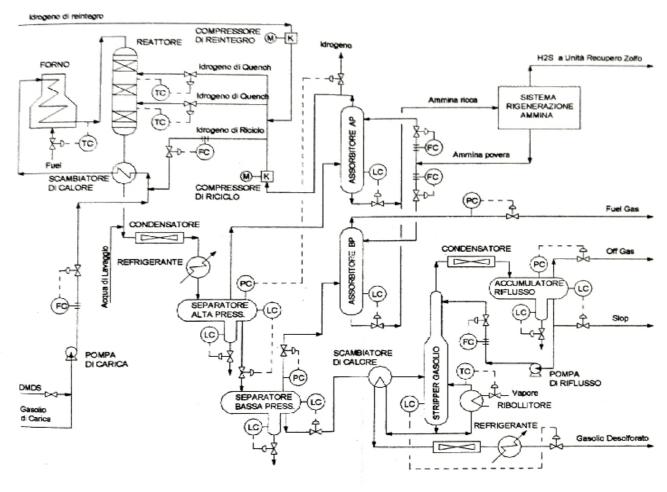


Figura 11schema di processo H2S [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Va considerato che impianto l'HDS è uno degli impianti più delicati dato che si occupa dello smaltimento dell'H2S. Infatti l'H2S è un elemento molto pericoloso sia per gli organi di processo sia per gli operatori che lavorano nell'impianto dato che, è altamente nocivo per la salute umana e non percepibile attraverso l'olfatto.

Durante tutte le fasi operative di raffineria in caso di presenza di H2S si aumentano le cautele le misure e gli strumenti di sicurezza per garantire il corretto svolgimento delle operazioni.

# Reforming

Gli attuali motori a combustione interna, per aumentare le prestazioni e diminuire l'ingombro nei veicoli, vengono costruiti per aumentare sempre dipiù il valore di pressione in camera di combustione. Oltre a essere una sfida di tipo meccanico-strutturale rappresenta una sfida termodinamica-chimica essendo la benzina, ad un determinarto valore di pressione e temperatura, instabile. Se nel cilindro avviene una combustione spontanea per eccesso di compressione prima che il pistone si trovi in posizione corretta gli organi possono essere sottoposti a sforzi non voluti fino a cedimento meccanico, questo fenomeno si chiama battito in testa.

Per evitare ciò la raffineria deve garantire che la benzina deve avere delle caratteristiche di stabilità anche ad alte pressioni e temperature. Per fare ciò si può aumentare, all' interno della benzina, il grado di aromatizzazione e di ramificazione. La formazione di molecole aromatiche e la produzione di alcheni sono fortemente utili a far salire il numero di NOR che con un'unità di reforming può essere portato fino al valore di 100.

L'unità di reforming per la sua grande capacità di aumentare il numero di NOR è considerata come la più efficace e utile in campo petrolchimico.

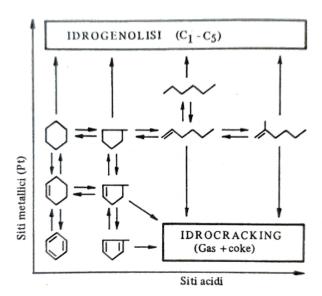


Figura 12 reazioni di reforming [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Le reazioni avvengono a temperature tra i 450 e i 500 gradi centigradi, di conseguenza da un punto di vista termodinamico risulta molto interessante recuperare parte del calore in uscita dal sistema. Il reforming principalmente avviene in presenza di catalizzatori a base di platino, renio e cloro depositato su un substrato di gamma-allumina.

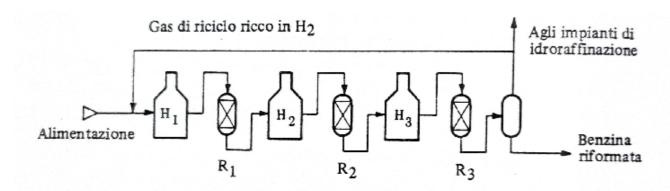


Figura 13Chema di impianto reforming [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

L'impianto è principalmente composto da tre reattori di diversa dimensione che vengono posti in serie. All' interno dei reattori avvengono le reazioni di reforming, che da un punto di vista termodinamico sono di natura endotermica molto pronunciata. Per questo si preferisce far reagire in tre stadi i prodotti, alternandoli con 3 forni che ripristinano le temperature di esercizio.

Per l'ottimale funzionamento dell'impianto le pressioni di esercizio sono molto basse date le caratteristiche di equilibrio termodinamico dei cicliesani .

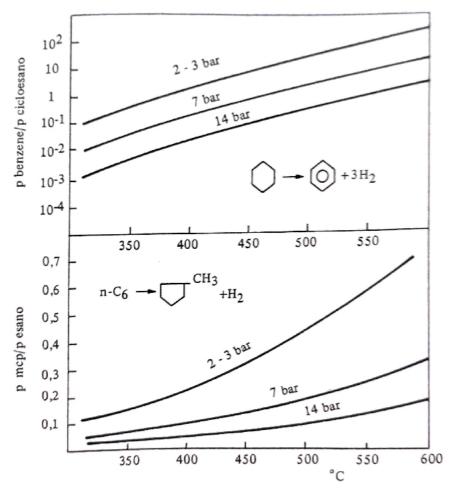


Figura 14 diagramma eq. termodinamico esano [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Oltre al suddetto vantaggio l'operazione a bassa pressione favorisce la produzione di idrogeno che è essenziale per altri impianti. In ultimo la produzione a bassa pressione permette una maggiore durata del catalizzatore che quindi deve essere rigenerato meno frequentemente.

Date le suddette caratteristiche di pressione diventa fondamentale ottimizzare le perdite di carico prima dell'immissione del prodotto all' interno del sistema. Per questo motivo diventa inutilizzabile un sistema di scambiatori di calore a batteria. Infatti per il preriscaldo della carica si utilizza un solo scambiatore di calore di dimensioni molto elevate a fascio tubiero o a piastre che usualmente viene posto in posizione verticale.

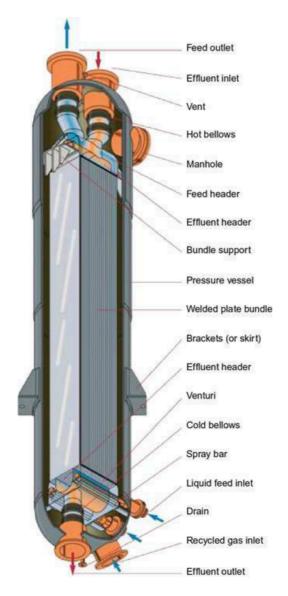


Figura 15 scambiatore verticale a piastre [Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]

L'impiego di questo tipo di scambiatore impone alla raffineria uno sforzo di manodopera ed economico molto alto rispetto ad altri sistemi.

#### Alchilazione

L'alchilazione è un processo che, insieme al reforming, hanno lo scopo di aumentare la qualità dei prodotti delle benzine. L'alchilazione è un processo che viene collocato a valle degli impianti dove avvengono i processi a base catalitica.

Nello specifico un sistema di alchilazione trasforma sottoprodotti di natura gassosa, provenienti da altri impianti e li trasforma in benzina ad alto valore di NOR. L'alchilazione, per le suddette caratteristiche, è un processo che viene molto utilizzato a valle degli impianti di thermal cracking catalitico.

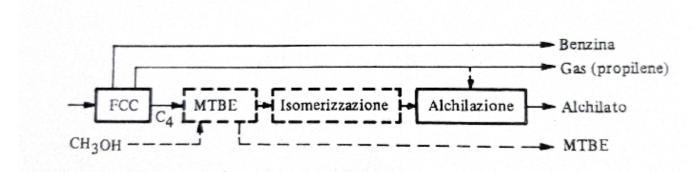


Figura 16 processi a valle dell FCC [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

I processi di alchilazione consistono nell'utilizzare molecole di isobutano e miscele di olefine C3 C4 per aumentare la qualità di molecole come l'alchilato C7 trasformandolo in alchilato C8.

Talune reazioni oltre ad aumentare la produzione e la qualità delle benzine finali, rilascia un importante quantità di calore, infatti per ogni Kg di alchilato prodotto si rilasciano tra le 150 e le 200 Cal.

Affinché le reazioni avvengano si utilizza un catalizzatore che faciliti le reazioni. A tale scopo si possono utilizzare gli acidi forti. La prima soluzione è l'utilizzo di acido solforico (H2SO4) che viene vaporizzato ed introdotto a 19,5 gradi per permettere l'alchilazione.

In alternativa Si può utilizzare l'acido fluoridrico (HF) come acido forte che a suo vantaggio ha le temperature di esercizio che si aggirano intorno ai 30 gradi.

	HF	$H_2SO_4$
Tossicità del catalizzatore Tensione di vap. del catalizzatore Acidi volatili Consumo di catalizzatore Agitazione Intervallo di temp. Flessibilità di carica Volume unitario di acido	Alta Alta HF Basso Moderata Amplio Amplia Alto	Bassa Bassa SO2 Alto Alta Ristretto Stretta Molto alto

Figura 17 tabella caratteristiche acidi per reforming [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

Da un punto di vista prestazionale è molto più efficace utilizzare l'acido fluoridrico dato che, migliora la produzione, agevola le condizioni di funzionamento e permette una alta flessibilità nella composizione della carica.

D'altro canto l'utilizzo di HF impone di valutare accuratamente il sistema di processo essendo, da un punto di vista della sicurezza, molto più pericoloso per la salute degli operatori.

Inoltre l'utilizzo di acidi così forti induce a valutare gli aspetti corrosivi che gli organi devono subire e le possibili sedimentazioni di fanghi acidi.

Affinché le reazioni avvengano, le temperature di esercizio devono essere tenute molto basse. Considerando a natura esotermica della reazione diventa necessario l'impiego di refrigeratori all' interno del reattore.

Il reattore Stratco è un esempio di reattore adoperante un fascio tubiero che, correttamente progettato, garantisce il raggiungimento delle temperature di esercizio ed il mantenimento nel tempo espellendo l'energia termica prodotta dalle reazioni.

Se fosse possibile all'interno del reattore si prevede un organo atto al mescolamento della carica, sia per facilitare le reazioni, sia per evitare zone con gradiente termico più elevato.

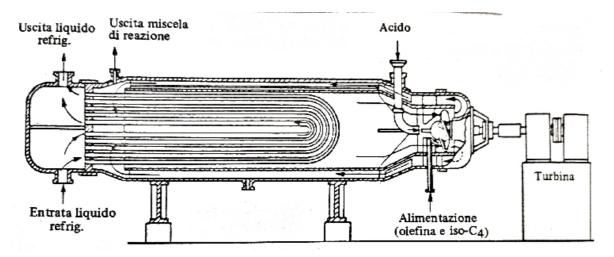


Figura 18 reattore stratco [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

#### Scambiatori di calore a fascio tubiero

#### Introduzione

Lo scambiatore di calore a fascio tubiero è una delle più importanti tipologie di unità presenti all' interno dei processi produttivi.

Come ogni scambiatore di calore ha la funzionalità di ottimizzare l'uso delle risorse combustibili per il riscaldamento dei prodotti e, allo stesso tempo, raffreddare le correnti che necessitano di diminuire le temperature di esercizio.

Lo scambiatore a fascio tubiero si basa sul principio di far interfacciare due correnti di processo, opportunamente separate, generando così un flusso termico, che riscalda il fluido freddo e raffredda il fluido caldo.

Dal punto di vista prestazionale il fascio tubiero permette di trasmettere grandi flussi di calore ad un costo relativamente basso, basso rapporto portata smaltita/peso e inoltre permette una grossa versatilità di impiego.

## Design costruttivo

Generalmente gli scambiatori di calore a fascio tubiero sono dei corpi cilindrici costituiti da:

- Mantello
- Fascio tubiero
- Coperchio del mantello
- Distributore

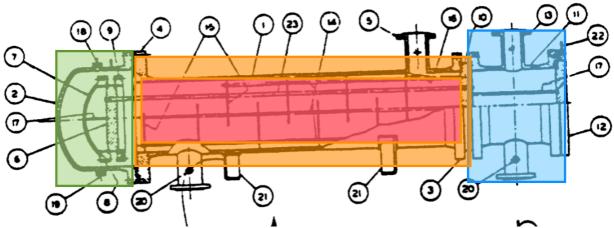


Figura 19 modello scambiatore a fascio tubiero (modificato) [Richard C. Byrne , Standard of the tubular exchanger manufacturers association]

Il mantello è l'involucro esterno che contiene il fascio ed ha il ruolo di contenere e confinare uno dei due fluidi atti allo scambio termico.

Le dimensioni caratteristiche di lunghezza, diametro e spessore del mantello sono in funzione della portata di prodotto da trattare, pressione di esercizio, ingombri e configurazione d' impiego.

Generalmente lo scambiatore di calore di una certa taglia ha uno strato esterno di isolante atto al contenimento del calore e che garantisce lo scambio termico solo con l'interfaccia attraverso il fascio. Per lo stesso motivo il mantello può essere dotato di lamelle interne che costringono il fluido a passare più vicino ai tubi e non vicino al mantello.

Il mantello può assumere dimensioni e forme diverse che gli permettono di adattarsi al tipo di impiego.

Il distributore ha lo scopo di ospitare e convogliare l'entrata e l'uscita di uno dei due fluidi di processo. Il distributore è un cilindro cavo che è diviso da uno o più setti che delimitano la mandata e il ritorno del fluido passante all' interno del fascio.

Un lato del distributore è flangiato ed imbullonato al mantello bloccando in posizione la piastra del fascio tubiero. Il coperchio del mantello è effettivamente la parte finale del mantello che banalmente chiude la struttura, ma può in base al modello, offrire diverse opportunità ed utilità.

Se il fascio è a U tipicamente il coperchio è parte del mantello e non presenta particolare interesse se non la saldatura opportunamente studiata per reggere alla pressione interna.

In caso di fascio non a U il tappo può essere sflangiato e utilizzato per un eventuale estrazione dei tubi e parziale lavaggio dello stesso permettendo una manutenzione on-site.

Dove si ritiene opportuno il coperchio del mantello ospita la testa flottante, organo atto a permettere al fascio di muoversi per compensare la dilatazione termica ed evitare i danneggiamenti.

In alcuni casi il coperchio può diventare un organo molto simile a un distributore con tappo piano e bocchelli di entrata e uscita supplementari.

Il fascio è l'organo di interfaccia tra i due fluidi di processo. È costituito sostanzialmente da una quantità n di tubi di acciaio ,che vengono trattenuti da piastre diaframmatiche usualmente a forma di semicerchi, i quali massimizzano il percorso del flusso nel mantello. Questo aumenta lo scambio termico massimo dell'unità. Il mantello può ospitare accorgimenti supplementari come piastre frangi flusso e componenti strutturali.

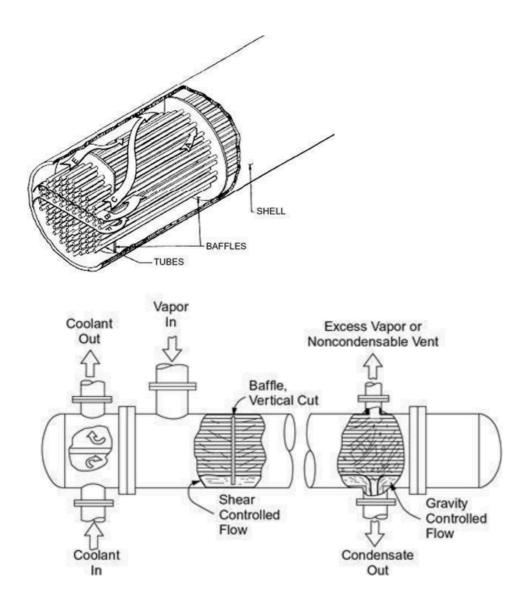


Figura 20 sezioni scambiatore a fascio tubiero [Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]

#### Classificazione

Gli scambiatori di calore a fascio tubiero possono essere classificati o in base alla loro funzione di impiego o in base alla normativa TEMA che ne identifica i componenti in base a classi di appartenenza.

In funzione d'impiego si classificano in:

#### a) Scambiatori

Come convenzionalmente assunto, gli scambiatori operano con un fluido obiettivo che deve essere riscaldato a scapito di una corrente che cede calore abbassando la propria temperatura. Lo scambiatore opera in condizioni monofasici, cioè il calore cambiato partecipa solo all' innalzamento o l'abbassamento della temperatura senza che i 2 flussi abbiano un cambiamento di stato.

#### b) Ribollitori

I ribollitori operano con il fluido, contenuto nel mantello, caratterizzato da composti con diversi punti di ebollizione. Fornendo calore si può dividere il liquido nelle sue diversi componenti facendo evaporare solo una frazione di prodotto più leggera e spillando successivamente la parte che voglio che rimanga liquida. Per far questo il mantello viene opportunamente modificato rendendo la camera molto più grande e inserendo un setto di travaso per lo spillamento della parte liquida. Questa modifica facilita l'evaporazione.

#### c) Condensatori

I condensatori sono scambiatori di calore che hanno lo scopo di trasformare correnti di vapore in correnti di liquido. Per questo impiego si utilizzano scambiatori con acqua come termovettore.

#### d) Vaporizzatori

I vaporizzatori sono degli scambiatori di calore che hanno il compito di far evaporare completamente tutta la fase liquida che viene introdotta nel mantello.

#### e) Preriscaldatore

Il preriscaldatore ha lo scopo di preriscaldare un fluido prima di una determinata operazione. Ad esempio la potenza per la circolazione di un fluido attraverso una condotta è fortemente influenzata dalla viscosità del fluido. Quindi se prima di convogliare un fluido all' interno di una pompa lo faccio interfacciare con uno scambiatore di calore che, innalzando la temperatura ne diminuisce la viscosità, ottengo un beneficio prestazionale.

Altra metodologia di classificazione è in base alla Normativa TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association), che prevede una classificazione dello scambiatore in funzione del tipo di design scelto.

Il metodo utilizza tre lettere che in ordine descrivono distributore, fascio e coperchio del mantello grazie a delle tabelle descrittive.

## Componenti caratteristici

- 1. Stationary Head-Channel
- 2. Stationary Head-Bonnet
- 3. Stationary Head Flange-Channel or Bonnet
- 4. Channel Cover
- 5. Stationary Head Nozzle
- 6. Stationary Tubesheet
- 7. Tubes
- 8. Shell
- 9. Shell Cover
- 10. Shell Flange-Stationary Head End
- 11. Shell Flange-Rear Head End
- 12. Shell Nozzle
- 13. Shell Cover Flange
- 14. Expansion Joint
- 15. Floating Tubesheet
- 16. Floating Head Cover
- 17. Floating Head Cover Flange
- 18. Floating Head Backing Device
- 19. Split Shear Ring
- 20. Slip-on Backing Flange

- 21. Floating Head Cover-External
- 22. Floating Tubesheet Skirt
- 23. Packing Box
- 24. Packing
- 25. Packing Gland
- 26. Lantern Ring
- 27. Tierods and Spacers
- 28. Transverse Baffles or Support Plates
- 29. Impingement Plate
- 30. Longitudinal Baffle
- 31. Pass Partition
- 32. Vent Connection
- 33. Drain Connection
- 34. Instrument Connection
- 35. Support Saddle
- 36. Lifting Lug
- 37. Support Bracket
- 38. Weir
- 39. Liquid Level Connection
- 40. Floating Head Support

# 

Figura 21 bollatura scambiatore di calore a fascio tubiero [Richard C. Byrne , Standard of the tubular exchanger manufacturers association]

#### • Flange

Le flange rappresentano il modo più utilizzato per l'accoppiamento dei vari componenti del corpo dello scambiatore. Principalmente le flange vengono progettate in funzione delle pressioni di esercizio e alla temperatura operativa dello scambiatore. Per il dimensionamento delle flange si fa riferimento alle normative corrispondenti come la DIN o ,in generale, si seguono indicazioni descritte nella normativa TEMA.

Particolare attenzione va posta nel predisporre il corretto numero di fori passanti che alloggeranno il tirante che sosterrà gli sforzi di trazione e flessione.

Di solito le flange che si trovano sono di tipo RF( rased face) per pressioni di piccola entità, invece in caso di alta pressione si opta per una flangia di tipo RTJ (rejoint).

Ovviamente la flangia sarà saldata al corpo dell' organo attraverso opportune saldature che secondo norma devono essere certificate ed ispezionate.

#### • Tiranti/dadi

I bulloni sono gli elementi fondamentali per il corretto funzionamento e sicurezza in un impianto. Dato ciò a loro è affidato il compito di tenere i corpi uniti fra di loro e garantire l'isolamento dell'apparecchiatura con l'ambiente esterno. Particolare interesse è nella scelta del diametro, lunghezza e materiale del tirante. La lunghezza del tirante e il diametro sono dati legati alla capacità di sopportare carico normale che garantisce il corretto serraggio e le tolleranze di deformazione dello stesso. Il materiale oltre all'elasticità dovuta al tensionamento è fondamentale per garantire le caratteristiche meccaniche anche ad alte temperature. Per questo si utilizzano leghe d'acciaio con arricchimento di nichel, cromo, molibdeno e vanadio. Generalmente si utilizzano tiranti di classe B7 per applicazioni a bassa temperatura di classe B16 alte temperature. Si ricorda che il bullone è generalmente l'accoppiamento tra tirante e 2 dadi.

#### • Condotti

I condotti hanno lo scopo di mettere in comunicazione lo scambiatore con l'intero sistema di processo. Usualmente uno scambiatore ha 2 coppie di entrata e uscita, una copia per il lato distributore e una per il lato mantello. In alternativa il lato tubi o il lato mantello, a seconda dell' utilizzo, può avere più condotti che possono separare o miscelare i fluidi di processo. Per uno scambiatore di media taglia i condotti hanno diametri intorno ai 6' o 8'. Usualmente i

condotti vengono saldati secondo normativa al corpo dello scambiatore.

#### Tubi

I tubi sono gli elementi costitutivi del fascio che hanno il vero e proprio scopo di trasportare il fluido all' interno del mantello e rappresentano l'elemento di interfaccia tra i due fluidi che devono scambiare calore. Essendo tipicamente di piccolo diametro, circa 1' ed essendo molto lungi risultano molto delicati. I tubi nonostante la loro delicatezza sono sottoposti a diversi sforzi derivanti principalmente da l'espansione termica, che deve essere correttamente prevista, e dal fluido del mantello che letteralmente sbatte contro i tubi. Per ovviare al problema il fascio viene dotato di supporti idonei per contenere la flessione dei tubi.

#### • Piastra tubi, aste filettate, diaframmi, frangiflusso

Rappresentano gli organi accessori ai tubi, che costituiscono lo scheletro del fascio. La piastra dei tubi ha lo scopo di interfaccia tra i tubi e il distributore. Oltre al posizionamento corretto la piastra offre anche supporto strutturale. I diaframmi hanno lo scopo strutturale di contenere i tubi in corretta posizione e di non farli flettere. Inoltre hanno la funzione di deviare il flusso, allungando così il percorso del prodotto all' interno dello scambiatore. Questo meccanismo facilita moti turbolenti, che aumentano lo scambio termico. La piastra frangiflusso offre una protezione all'erosione meccanica del tubo da parte del fluido che entrando nel fascio sbatte contro i tubi. Le aste filettate hanno lo scopo di distanziare efficacemente i diaframmi l'uno dall'altro.

#### Dreno e sfiato

Il dreno e lo sfiato sono condotti molto piccoli, massimo un paio di pollici. I dreni hanno la funzionalità, durante lo shut-down dell'apparecchiatura di permettere la fuoriuscita dell'liquido all'interno dell'apparecchiatura. Gli sfiati hanno la funzione di far uscire l'aria che è all' interno dell'apparecchiatura dopo la manutenzione. Durante l'esercizio i dreni e gli sfiati vengono sigillati da flange cieche per assicurare la corretta ermeticità.

# Predisposizioni per strumenti, supporti occhielli Sono tutti accessori aggiuntivi fondamentali al corretto utilizzo delle apparecchiature durante la marcia e durante la fase di manutenzione. La predisposizione degli strumenti

serve per il controllo di temperatura e pressione all' interno dell'unità. Gli occhielli servono al sollevamento dei componenti, che prima di ogni manutenzione devono essere controllati e certificati per il sollevamento.

#### Guarnizioni

Le guarnizioni sono elementi fondamentali per la corretta tenuta stagna dei vari componenti. La guarnizione è un anello tipicamente metallico che sottoposto a compressione tra due flange si deforma e garantisce la perfetta adesione tra le due facce, evitando una possibile perdita. Per flange di connessione come tra strumenti condotti di alimentazione flange cieche si utilizzano guarnizioni spirometalliche. Le guarnizioni spirometalliche sono composte da una parte esterna più sottile che ha la funzione di centraggio e una parte interna più spessa composta da un nastro di metallo sottile arrotolato intorno al diametro nominale che è immerso in un composto di grafite, tale spessore si deforma sotto il carico del serraggio compensando eventuali errori geometrici delle superfici a contatto. Le guarnizioni utilizzate tra i corpi principali sono unicamente in acciaio tenero che vengono appositamente costruite per rispettare le tolleranze fornite dal costruttore.

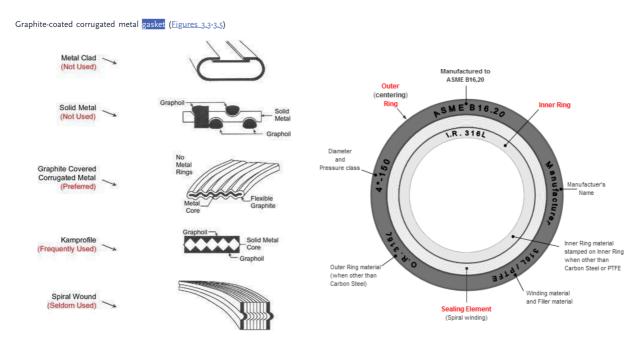


Figura 22 sx. dettaglio guarnizioni [Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions] dx guarnizione spirometallica [www.wermac.org]

#### Air cooler

#### Introduzione

La refrigerazione e la condensazione dei fluidi di processo storicamente sono affidate a scambiatori che operano acqua come termovettore di servizio. Da tempi relativamente brevi l'industria petrolifera ha introdotto l'utilizzo sempre più marcato di scambiatori che utilizzassero come termovettore l'aria. Questa soluzione dopo un primo momento di scetticismo ha iniziato a prendere sempre più piede per una serie di vantaggi rivelatisi fondati.

A partire dalla metà del novecento i volumi di combustibili derivanti dal petrolio hanno avuto un incremento esponenziale di richiesta e con esso, la necessaria costruzione di un maggiore numero di raffinerie che non sempre potevano essere poste in prossimità di grosse fonti d'acqua. Ovviamente l'assenza di acqua in grandi quantità pone un grossissimo limite per l'impiego di impianti di raffreddamento classici.

In secondo luogo, nonostante la disponibilità di acqua, bisogna considerare che spesso si tratta di acqua marina salata, che pone un limite d'impiego. L'utilizzo di acqua salata impone l'utilizzo di materiali resistenti a corrosione e inevitabilmente a un aumenta il costo delle manutenzioni. Oltre ad essere un problema di natura economica, complica le procedure di manutenzioni che diventano più complesse.

Inoltre bisogna considerare che rimuovendo l'acqua dal sistema si eliminano condutture, pompe di ricircolo, torri di raffreddamento. L'alleggerimento del sistema di processo porta anche a un costo di gestione inferiore nel tempo, anche se va considerato che l' investimento iniziale di un sistema di raffreddamento ad aria è più oneroso.

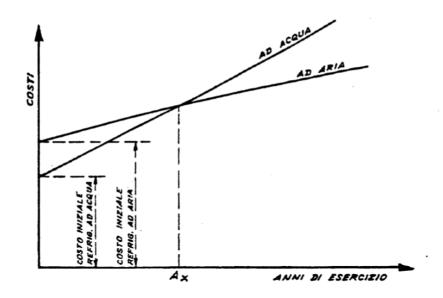


Figura 23 diagramma costo/ tempo di esercizio [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

# Conponenti costitutivi

Aircooler o air fin è costituito principalmente da due macro componenti. La prima consiste nel vero e proprio bancale, che è una struttura metallica appositamente progettata per contenere i tubi alettati dove scorre il fluido che deve essere raffreddato. La seconda è principalmente il gruppo di ventilazione.

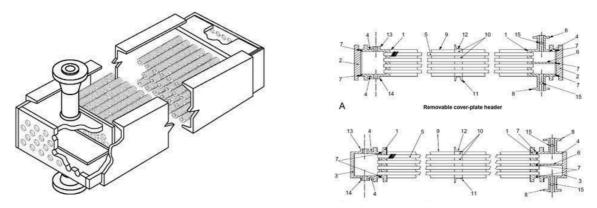


Figura 24 Bollatura aircooler [Nicholas P. Cheremisinoff, Handbook of Chemical Processing Equipment,]

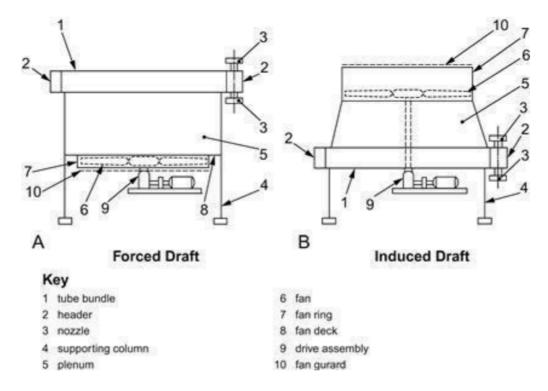


Figura 25 bollatura aircooler [Nicholas P. Cheremisinoff, Handbook of Chemical Processing Equipment,]

#### Bancale

Il bancale è composto da una carcassa esterna di contenimento che ha lo scopo di alloggiare tutti i componenti.

#### Bocchelli

I bocchelli come negli scambiatori a fascio tubiero hanno lo scopo di collegare l'unità con il resto dell'impianto attraverso le pipeline. Usualmente le flange di connessione hanno un rating classe 600 dato che operano ad alta pressione.

#### • Dreni/sfiato

I dreni e gli sfiati vengono rispettivamente collocati in basso e in alto per permettere lo svuotamento e il riempimento dell'unità in fase di manutenzione. Usualmente vengono dotati di flange cieche o in alcuni casi di tappi filettati

#### • Tubi alettati

I tubi alettati comprendono il vero e proprio organo di interfaccia che permette lo scambio termico con l'ambiente.

#### Ventola

La ventola permette di creare un flusso convettivo forzato che migliora l'efficienza dello scambio termico.

#### • Il motore/trasmissione

Il motore e la trasmissione comprendono quegli organi atti ad alimentare meccanicamente la pala. Usualmente si usano motori asincroni trifase a gabbia di scoiattolo con trasmissioni a cinghia o giunto.

#### • Distributori

I distributori sono posti ai due estremi dei tubi e hanno lo scopo di convogliare e raccogliere il fluido di processo che passa attraverso i tubi alettati. Per aircooler a bassa pressione si possono utilizzare piastre flangiate per assicurare la chiusura dei distributori. Per impieghi ad alte pressioni si preferisce utilizzare tappi filettati previsti in asse a ogni tubo garantire le operazioni di manutenzione. singolo per L' utilizzo dei tappi è preferibile anche per un vantaggio manutentivo. Infatti nel caso di ossidazioni dei bulloni, che sono prigionieri, diventa veramente complesso lo smontaggio delle di chiusura. piastre Particolare attenzione deve essere posta nello smontaggio dei tappi filettati, che dovendo idraulica, garantire la tenuta sono molto delicati.

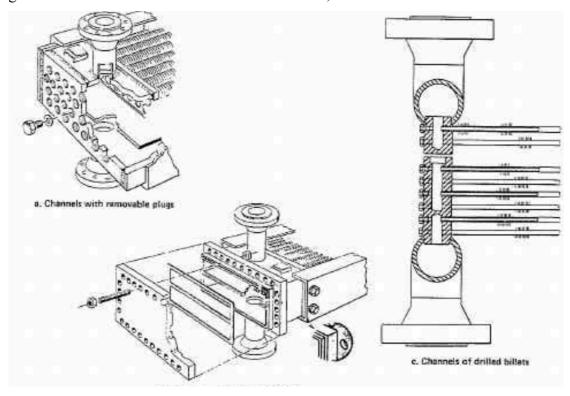


Figura 26 variante distributore con tappi o con piastra[process desine criteria, g. ganapathy,]

### GLI SCAMBIATORI DI CALORE

;

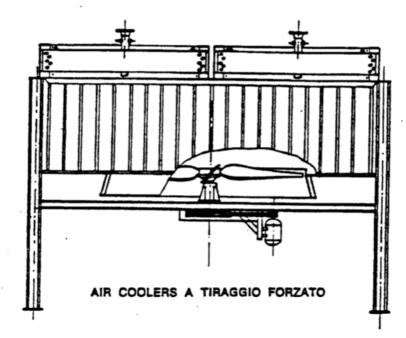


Fig. 40

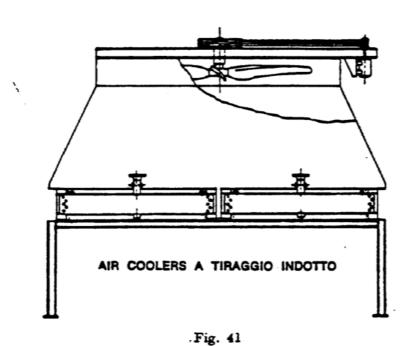


Figura 27 aircooler in configurazione tiraggio forzato e tiraggio indotto [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Se i ventilatori vengono posti al di sotto del bancale l'air cooler viene definito a tiraggio forzato, se invece il ventilatore viene posto sopra al bancale si definisce a tiraggio indotto.

La scelta della modalità di impiego viene generalmente lasciata al costruttore, che decide la configurazione di utilizzo in base alle esigenze del caso.

Generalmente l'utilizzo in configurazione forzata consente un minore utilizzo di energia elettrica a parità di prestazioni rispetto a una modalità in configurazione indotta. Garantisce maggiore facilità tubi per smontaggio dei e maggiore facilità per l'accesso distributori. L'utilizzo di air cooler in configurazione di tiraggio indotto consente un maggiore ricircolo di aria, che, in caso di piccoli delta di temperatura tra aria esterna e fluido da raffreddare, diventa un valore determinante per il corretto funzionamento. Inoltre in caso di mancanza di corrente, in configurazione di tiraggio indotto il ricircolo naturale di aria è migliore, consentendo un più flessibile adattamento del sistema.

### Tubi alettati

I tubi alettati sono l'organo più importante all' interno degli scambiatori ad aria, in quanto, dissipando il calore nell' atmosfera, hanno lo scopo di interfaccia con l'ambiente.

Affinché le alette operino correttamente nel tempo bisogna valutare, oltre ai parametri geometrici e di caratteristiche di conduzione, tutte quelle caratteristiche che nel tempo permettono la durabilità e l'efficienza dello scambio termico.

"

- L'aletta deve garantire un contatto intimo e indeformabile con il tubo al fine di garantire sempre il corretto scambio termico
- Le alette devono essere sufficientemente rigide e resistenti nonostante debbano essere progettate per avere la minima perdita di carico
- Le alette devono essere progettate per avere una alta resistenza agli agenti atmosferici.
- Le alette devono essere progettate per avere un tenore di sporcamento basso affinché le caratteristiche di trasmissione del calore vengano mantenute nel tempo stabili

"

[G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Le alette hanno diversi design che in funzione del costo e del processo produttivo portano a diversi range di temperatura.

• Tubo ad aletta incastrata

Sul tubo viene effettuato un solco senza asportazione di materiale e successivamente viene inserito all' interno della scanalatura un nastro di alluminio. Una volta inserito i lembi al lato del solco vengono premuti sull'aletta per garantire la corretta adesione.

La temperatura massima di esercizio è di circa 370 gradi centigradi

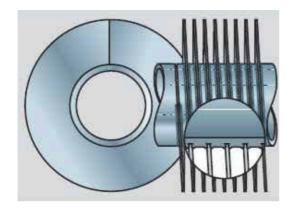


Figura 28 alettatura ad incastro [gea luftkuhler ghbh]

#### • Tubo ad alette estrude

Il tubo di acciaio viene inserito in un tubo di alluminio sulle quali erano state generate di pezzo delle alettature.

La temperatura massima di esercizio è di circa 310 gradi centigradi.

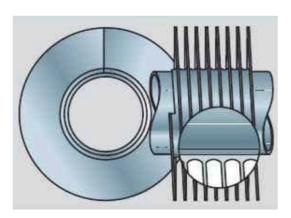


Figura 29 alette estruse [gea luftkuhler ghbh]

### • Tubo alettato ellittico

Sul tubo di acciaio vengono inserite delle alette equi distanziate di forma rettangolare e successivamente zincate o stagnate per vincolare le alette al tubo.

La temperatura massima di esercizio è di circa 310 gradi centigradi.

### • Il tubo con alette a "L"

Il tubo di acciaio viene rivestito con un nastro di alluminio che viene piegato ad "L".

Il piede della "L" è la parte che entra in contatto con il tubo.

La temperatura massima di esercizio è di circa 260 gradi centigradi.

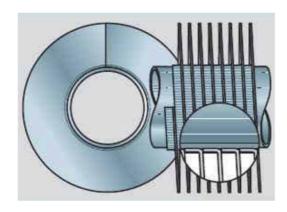


Figura 30 alette piegate a L [gea luftkuhler ghbh]

### • Tubo con alette avvolte

Come per le alette a "L" sul tubo viene avvolto un nastro che però non viene piegato, per questo il piede interno del nastro si corruga mostrando un design caratteristico.

La temperatura massima di esercizio è di circa 110 gradi centigradi.

# Termodinamica applicata agli scambiatori di calore

### Modellizzazione scambio termico e calcolo LMTD

La trasmissione del calore è un comportamento fisico macroscopico che si fonda sul trasporto di energia cinetica delle singole molecole che collidendo trasferiscono la propria energia alle molecole circostanti. Affinché il fenomeno si noti bisogna avere un gradiente termico dato che, la cinetica termica proporzionale alla temperatura del corpo.

Il secondo principio sancisce che, dati due corpi con un gradiente termico, il corpo più caldo cercherà di compensare la temperatura del corpo più freddo fino ad un equilibrio di temperatura. Il corpo più caldo per innalzare la temperatura del corpo più freddo cederà calore. Inoltre il secondo principio enuncia che nel passaggio di calore una parte di esso viene dissipato. Ma noi non tratteremo questo aspetto se non marginalmente.

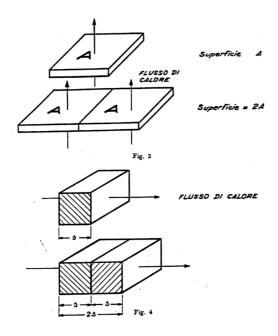


Figura 31modellizazione conduzione [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Lo scambio di calore per conduzione dipende da:

• Differenza di temperatura

- Capacità termica del materiale
- Superficie di scambio
- Spessore della parete

Le dipendenze ed i loro rapporti vengono espressi nella formula di Furier per lo scambio di calore per conduzione.

$$\frac{Q}{\phi} = A \frac{K}{s} (t_1 - t_2) = A \frac{K}{s} \Delta t$$

Figura 32 equazione di Furier [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Mentre la conduzione è caratteristica dei corpi solidi la convezione rappresenta un metodo preferenziale di scambio termico per i gas e i liquidi. Infatti la conduzione avviene per il rimescolamento delle molecole ed ovviamente è un comportamento fisico riconducibile solo a molecole appartenenti a fluidi.

I fattori che influenzano lo scambio termico sono la velocità di mescolamento e i gradienti di temperature.

La legge di newton esprime il rapporto tra le varie variabili.

$$Q/\phi = h.A \cdot (t_1 - t_2),$$

Figura 33 Newton [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Nell' equazione si utilizza il coefficiente h che rappresenta la convezione del fluido che è funzione alla velocità dello stesso.

In ultimo l'irraggiamento è una metodologia di trasmissione del calore che non si trasmette per contatto o per mescolamento ma utilizza le onde elettromagnetiche per propagare energia.

Di preciso gli atomi ad alta temperatura eccitano i propri elettroni, che vanno ad uno stadio di energia superiore. Gli elettroni per loro natura non appartenendo all' orbitale dove sono, tendono a ritornare

nella posizione iniziale. Per fare ciò devono emettere un fotone (o onda elettromagnetica) che propaga anche nel vuoto fino all'incontro con altri atomi, i quali, assorbiranno l'onda. Tale onda sarà trasformata in agitazione molecolare

La legge che si utilizza per descrivere l'emissione di calore per irraggiamento è stato descritto dai fisici Stefan-Boltzman nell'equazione:

$$\frac{dQ}{\phi dA} = \varepsilon \delta \ T^4 = E$$

Figura 34 equazione irraggiamento [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

L'emissività rappresenta la capacità di un corpo di assorbire o emettere energia riferita a quella di un corpo nero ideale

Per lo studio e l'analisi delle problematiche relative agli scambiatori di calore diventa essenziale trattare, anche se velocemente, la stratigrafia dei materiali.

Prendendo due pareti a contatto di materiale diverso ed imponendo agli estremi un gradiente termico. Per calcolare la quantità di calore scambiata tra gli estremi delle due pareti, si può utilizzare un'analogia elettrica considerando la temperatura come un potenziale elettrico. Quindi un gradiente termico come una differenza di potenziale, la resistenza elettrica come una resistenza del materiale a trasportare calore e la corrente come il calore

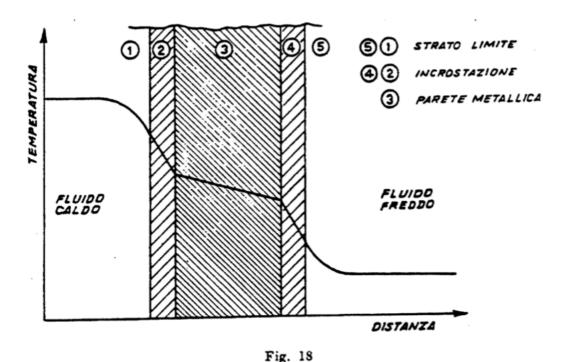
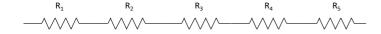


Figura 35 analisi monodimensionale parete tubo [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]



In ambito elettrotecnico per risolvere il quesito bisogna conoscere tutte le resistenze elettriche del circuito e calcolarne la resistenza equivalente, dopodiché calcolare l'intensità di corrente.

Per quanto riguarda il problema termodinamico la metodologia è la stessa. Unica differenza è il calcolo della resistenza termica, che nel caso di conduzione viene definita come spessore su conducibilità termica, in caso di convezione la resistenza si calcola come uno su il coefficiente conduttivo.

Una volta effettuato il calcolo della resistenza termica bisogna ricordare che U è il coefficiente globale di scambio termico per unità di superficie e rappresenta ed è il reciproco della resistenza termica.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + ff_2 + \frac{s_3}{K_3} + ff_4 + \frac{1}{h_5}}$$

Figura 36 formula coefficiente di scambio termico [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Quindi il calore di una parete generica consiste in:

$$\frac{Q}{\phi} = UA \ (T_c - T_f)$$

Figura 37 eq. flusso termico [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Il precedente calcolo del flusso termico usa la temperatura costante agli estremi delle piastre. In realtà, durante il passaggio della carica attraverso lo scambiatore di calore, la carica subisce una variazione di temperatura. Tale fenomeno induce una diminuzione di scambio termico e il calcolo della quantità di superficie necessaria diventa meno ovvio.

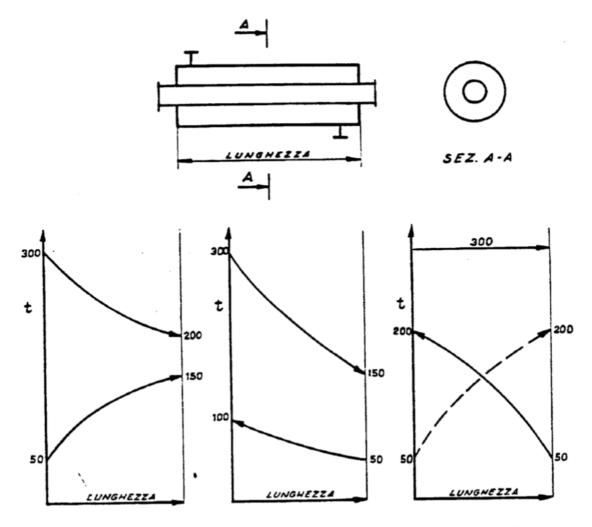


Figura 38 configurazioni scambiatori [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Per capire i diagrammi sopra citati bisogna analizzare come sono le modalità e le casistiche che si possono incontrare. In generale possiamo ammettere 3 casi:

- Scambio termico in equicorrente
- Scambio termico in controcorrente
- Scambio termico con una sorgente fissa

In equicorrente il fluido caldo e il fluido freddo percorrono lo scambiatore nello stesso verso. Lo svantaggio di questa configurazione è che all'entrata dello scambiatore il gradiente termico è molto alto e all' uscita diventa molto piccolo. In controcorrente, il fluido di servizio e la carica percorrono direzioni opposte, così facendo il gradiente termico subisce una minore variazione, permettendo alla carica di raggiungere una temperatura finale più efficace. In alcuni casi il fluido di servizio può essere

considerato per varie ragioni a temperatura costante e così facendo crea una configurazione di impiego differente dalle precedenti descritte.

Nella formula della trasmissione di calore si può utilizzare un solo gradiente termico, preso all' ingresso o all' uscita dello scambiatore, non descriverebbe correttamente le condizioni necessarie per il corretto funzionamento. Infatti si utilizza un valore medio chiamato LMTD, che attraverso un calcolo medio logaritmico stima un gradiente rappresentativo per la stima opportuna dell'area di scambio termico.

$$LMTD = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

Figura 39 eq. LMTD [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

### Calcolo dei fattori liminari

Per il calcolo dei coefficienti liminari si può partire dall'osservazione che all' aumentare della velocità del fluido, aumenta il coefficiente di scambio liminare. Quindi inseriamo nel calcolo una massa G definendola cole il rapporto tra la portata massica sulla sezione di passaggio.

$$G = \frac{W}{Q}$$
 espressa in kg/hm<sub>2</sub>

Figura 40 eq. portata massica su superficie [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Analizziamo che il valore h è anche funzione del calore specifico, conducibilità e viscosità.

$$\mu = \frac{Fx}{VS} = \frac{mgx}{VS} \qquad \left[ \frac{\text{kg massa}}{\text{m sec}} \right]$$

Figura 41 eq. rielab. fluidi newtoniani [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

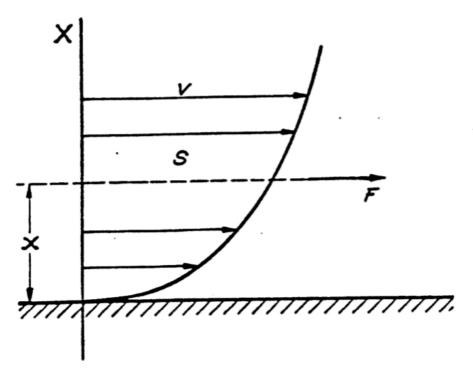


Figura 42 andamento forze di Newton su fluido viscoso [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Seguendo alcuni passaggi matematici si arriva a definire così la viscosità.

$$v = \frac{\mu}{\delta}$$

Figura 43 viscosità cinematica [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Da questa relazione si definisce la viscosità cinematica come la viscosità dinamica diviso la densità del fluido.

Detto ciò bisogna considerare che la densità viene influenzata dalla temperatura a cui il liquido è sottoposto. Per questo per calcolare i coefficienti liminari si fa largamente uso dell'equazione di Nusselt.

$$\frac{hD}{K} = f \left(\frac{GD}{\mu}\right)^m \cdot \left(\frac{Cp\mu}{K}\right)^{1/3}$$

Figura 44 eq. di Nusselt [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Questa equazione adimensionale lega il numero di Nusselt, che contiene il coefficiente liminare, con il numero di prandl, che contiene tutte le caratteristiche fisiche termodinamiche del fluido e il numero di Reynolds, che contiene tutte le informazioni relative alla modalità cinematiche del fluido. I numeri f ed n sono valori che competono a dove scorre il fluido, quindi se è lato tubi o lato mantello.

$$\frac{hD}{K} = \text{numero di Nüsselt;}$$

$$\frac{DG}{\mu} = \text{numero di Reynolds;}$$

$$\frac{Cp\mu}{K} = \text{numero di Prandlt.}$$

Figura 45 componenti eq. di Nusselt

### Fattore correttivo F<sub>T</sub>

Prendendo in esame uno scambiatore a fascio tubiero ed analizzando il percorso che il fluido percorre all' interno dei tubi, ci rendiamo conto che il fluido può effettuare più passaggi all' interno del mantello. I vari passaggi vengono effettuati alternativamente in configurazione di equicorrente e controcorrente.

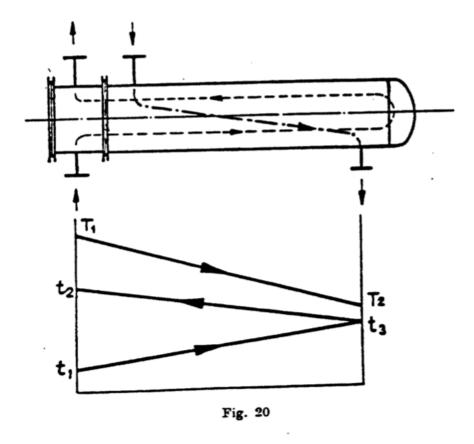


Figura 46 Andamento corrente / controcorrente scambiatore [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Per risolvere il problema termodinamico si dovrebbe identificare la temperatura t3, che però risulta molto complessa da calcolare. Per rendere più snello il calcolo della trasmissione del calore si ipotizza che lo scambiatore di calore operi in controcorrente lungo tutto il percorso. Così facendo sovrastimo la capacità di scambio termico della mia apparecchiatura.

Per correggere la capacità di scambio termico inserisco un fattore correttivo  $F_T$ , tale valore sarà sempre inferiore a 1. Il fattore stimerà quale è il rapporto tra il nostro modello e le effettive capacità dello scambiatore.

Quindi CMTD rappresenta il reale gradiente di temperatura che mi assicura una buona modellizzazione del mio scambiatore di calore per stimare l'area di scambio termico.

Per stimare F<sub>T</sub> si utilizza la seguente equazione.

e:
$$F_T = \frac{\sqrt{R_2 + 1} \ln \frac{1 - P}{1 - PR}}{(R - 1) \ln \frac{2 - P(R + 1 - \sqrt{R_2 + 1})}{2 - P(R + 1 + \sqrt{R_2 + 1})}}$$

Figura 47 eq Fattore correttivo [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Dato che l'equazione è piuttosto elaborata si preferisce utilizzare dei diagrammi dove in entrata si forniscono i valori di P ed R.

Generalmente possiamo identificare dei casi particolari notevoli per capire l'andamento della variabile.

- Quando almeno una delle due variabili di temperatura assume valore costante allora  $F_T = 1$
- Nel momento in cui le due correnti in uscita hanno la stessa temperatura allora il valore di  $F_T = 0.8$
- Quando la temperatura di uscita lato tubi è più alto della temperatura di uscita lato mantello allora il valore di F<sub>T</sub> assume valori minori di 0,8

Per il dimensionamento dell'area di scambio termico bisogna ipotizzare un coefficiente  $U_1$ . Avendo a disposizione una superficie posso ricontrollare i coefficienti liminari che sono influenzati dalla velocità e quindi anche dalla sezione . Ricalcolando il nuovo coefficiente di scambio termico U posso valutare se il disallineamento tra U e  $U_1$  è trascurabile o posso accettare l'errore. In caso negativo devo iniziare con un valore medio tra U e  $U_1$  e procedere iterativamente fino ad arrivare ad un valore di convergenza accettabile.

# Configurazione in batteria

Spesso l'impiego di un unico scambiatore di calore, che singolarmente deve soddisfare l'intera richiesta di scambio termico, non rappresenta la migliore soluzione progettuale.

Da un punto di vista economico l'impiego di un grande scambiatore di calore rappresenta un costo molto più elevato rispetto all' utilizzo di una batteria di scambiatori di dimensioni standard montati per lavorare in serie.

Oltre ad una giustificazione puramente economica, il montaggio di una batteria, ha l'utilità di permettere maggiore flessibilità alla raffineria, che in caso di anomalie, può bypassare alcuni scambiatori, ma senza eliminare l'intera batteria.

In ultimo nelle procedure di manutenzione operare su un unico scambiatore di grossa taglia comporta un aumento di tempo in quanto le procedure diventano più complesse.

Se prendiamo come esempio una batteria di scambiatori ed uno scambiatore verticale di grosse dimensioni, possiamo notare che, già in fase di preparazione, le ore aumentano a sfavore degli scambiatori di grosse dimensioni, in quanto il sistema in sé è più complesso.

Il distributore di uno scambiatore di medie dimensioni ha come diametro circa un metro, uno scambiatore equivalente verticale può avere diametro di 6 metri. Solo da questo dato si può capire che le gru per lo smontaggio di uno scambiatore verticale devono avere portate di carico molto più elevate, personale più qualificato, pianificazione per il posizionamento dei mezzi più complesso, serraggio dei componenti più difficile e lavaggio dei componenti obbligatoriamente on-site. Oltre a questo, garantire la sicurezza durante talune operazioni aumenta il costo e il tempo.

Quindi ove possibile la raffineria cercherà di usare batterie di scambiatori montati opportunamente e di impiegare dimensioni standard al fine di rendere più facili le procedure di manutenzione e ,di conseguenza, mantenere i costi più bassi possibile.

Una volta effettuato il calcolo dell'area totale di scambio termico ,la superficie totale viene distribuita su tutti gli scambiatori, che montati in serie, corrispondono alla modellizzazione prima trattata. Affinché si possa utilizzare la modellizzazione si deve tenere conto che il fattore F<sub>T</sub> deve rimanere pari a 0,8.

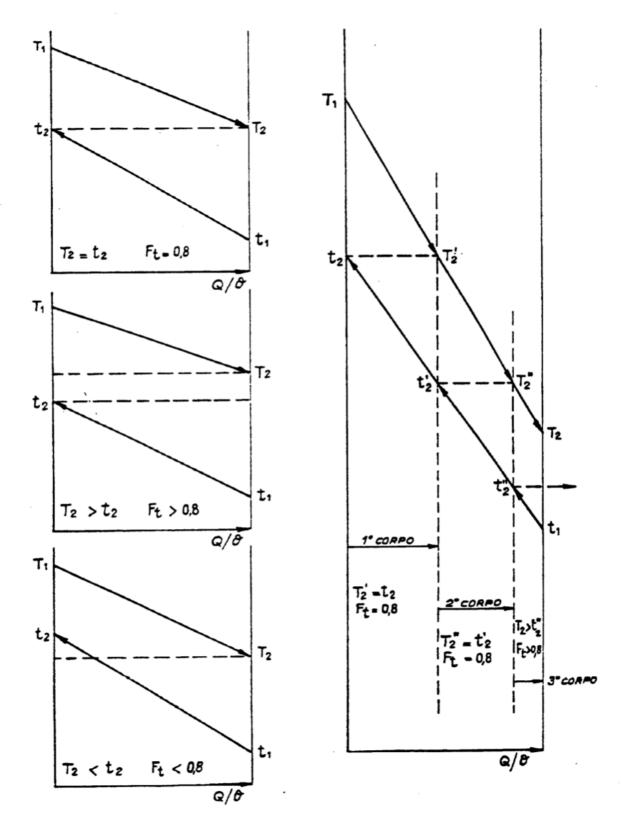


Figura 48 modellizazione configurazione in batteria di scambiatori [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

# Fattori di invecchiamento e danneggiamento degli scambiatori di calore

### Corrosione

La corrosione è un fenomeno molto complesso che rappresenta un fattore principale di danneggiamento delle unità all' interno di una raffineria.

Principalmente il fenomeno della corrosione si manifesta per natura elettrochimica. In due zone diverse del nostro sistema, per i più svariati motivi, si presentato due potenziali elettrochimici, che interposti da un fluido elettrolita inducono una corrente elettrica. Tale corrente fa si che una zona rappresenti un anodo e l'altra un catodo di un circuito elettrico. Si ricorda che qualsiasi fluido all' interno della raffineria può essere trattato come un fluido elettrolita.



Figura 49 tubo corroso [Annual-Corrosion-Survey-Report-2013-14]



Figura 50 cedimento da corrosione scambiatore di calore a fascio tubiero [Annual-Corrosion-Survey-Report-2013-14]

Una soluzione che può proteggere da questo comportamento è l'impiego di sostanze che utilizzano il cromo. Tale elemento ossidandosi crea uno strato di ossido che maschera la superficie metallica e crea una barriera che impedisce ulteriori ossidazioni.

La corrosione può avvenire principalmente in due meccaniche diverse. In modo omogeneo l'ossidazione si nota come uniforme su tutta la zona. Al contrario l'ossidazione si può manifestare in tante piccole zone non omogenee (vaiolatura).

#### Corrosione sotto tensione

La corrosione sotto tensione consiste in una corrosione che attacca le zone con tensioni di trazioni all' interno dei materiali. Usualmente le zone sotto trazione sono le zone che dopo saldature o lavorazioni meccaniche hanno conservato tensioni residue che risultano particolarmente soggette a corrosione.

Possibili soluzioni sono trattamenti termici che garantiscono la stabilizzazione delle tensioni interne, rendendo il materiale più resistente. La corrosione sotto tensione è molto pericolosa perché è generatrice di cricche, che propagando, potrebbero innescare gravi danni.

Questo tipo di fenomeno avviene in presenza principalmente in presenza di acidi, come l' H2S.

### Attacco da idrogeno

L' attacco da idrogeno si manifesta in presenza di unità che operano con l'idrogeno ad alta pressione e alta temperatura.

Di fatto l'idrogeno, in tali condizioni, diffonde all' interno di leghe d'acciaio e, legandosi agli atomi di carbonio, forma delle molecole di metano. Questo fenomeno porta alla formazione di porosità che può generare cricche.

Per evitare questo tipo di fenomeno si possono impiegare acciai austenitici inossidabili o leghe bassolegate a base di cromo e molibdeno.



Figura 51corrosione interno tubo [Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]

#### • Corrosione intercristallina

La corrosione intercristallina avviene principalmente in leghe a base di cromo-nichel.

All'interno di queste leghe si può manifestare una migrazione del cromo all' interno della matrice, fino a portare il cromo a precipitare in piccole zone. Questa precipitazione comporta un impoverimento di crome che porta all' infragilimento della lega e la conseguente possibile manifestazione di cricche.

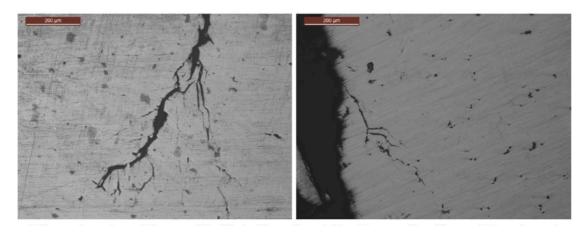


Figura 52 metallografia intergranulare [Annual-Corrosion-Survey-Report-2013-14]

# Sporcamento

Lo sporcamento rappresenta uno dei problemi più comuni che un'apparecchiatura incorre durante la propria fase operativa. Esso è un comportamento inevitabile.

Quello che però è interessante per una progettazione e un corretto utilizzo nel tempo è capire che tipo di sporcamento si possono presentare all' interno della nostra apparecchiatura, la quantità di sporcamento e le relative perdite di prestazione, i limiti di utilizzo che ci impone tale fenomeno, come limitare il fenomeno nel tempo e come pulire un'unità per il ripristino prestazionale.

Durante la vita di uno scambiatore si possono presentare incrostazioni per diversa natura, che possono manifestarsi anche contemporaneamente durante l'utilizzo dell'unità.

Il fenomeno dello sporcamento è fortemente influenzato dalle condizioni operative alle quali l'apparecchiatura viene sottoposta. In sostanza il fenomeno viene influenzato da temperature di esercizio, pressioni di esercizio, direzione dei flussi, tipo di moto (turbolento o laminare), caratteristiche fisiche del fluido, materiale della parete metallica e trattamenti superficiali.



Figura 53 fascio tubiero con incrostazione [Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]

I principali meccanismi per sporcamento derivano da:

• Incrostazioni per precipitazione

- Incrostazione di particolato
- Incrostazioni derivanti da reazioni chimiche
- Incrostazioni da corrosione
- Incrostazioni biologiche

Considerando il coefficiente globale di scambio termico "U" e rianalizzando la stratigrafia di uno scambiatore di calore a fascio tubiero dobbiamo inserire l'esistenza di un layer di incrostazioni sia lato mantello che lato tubi al fine di modellizzare correttamente il fenomeno.

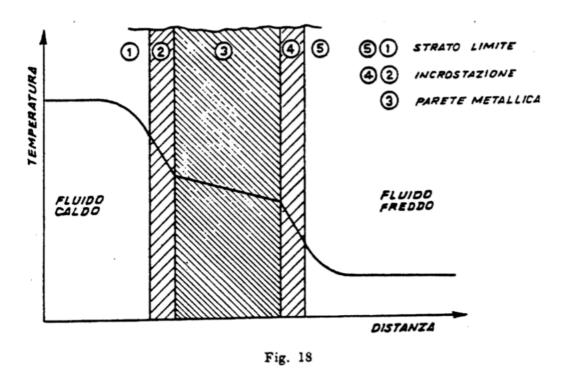


Figura 54 stratigrafia monodimensionale [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]

Come si può notare dall' immagine, lo sporcamento della superficie inserisce due nuovi parametri resistivi, che devono essere aggiunti nel calcolo del coefficiente globale di scambio termico ,inserendoli come resistenze in serie. Per la determinazione dei valori di conducibilità termica si utilizza il modello della conduzione. Le incrostazioni risultano particolarmente danneggianti dal

punto di vista prestazionale ,dato che, nonostante abbiano piccolo spessore di deposito, hanno caratteristiche di conducibilità termiche molto basse.

Al fine di assicurare il corretto funzionamento dell'unità durante un arco di tempo piuttosto lungo, in fase di progetto, lo sporcamento va previsto aumentando la superficie di scambio termico. Cosi facendo il sistema diventa più flessibile e durante le fasi iniziali di vita lo scambiatore verrà regolato per ottenere le prestazioni richieste. Durante la vita lo scambiatore sarà adattato per funzionare correttamente anche se presenta uno strato di incrostazione.

L'unità viene dimensionata con un eccesso di superficie di scambio termico che deve durare fino a una data manutentiva compatibile con uno shut-down o un turnaround durante il quale può essere effettuato il ripristino prestazionale.

Per in calcolo dello sporcamento si utilizza un fattore correttivo ,che in funzione dei fluidi e le temperature di esercizio, stima un valore di incrostazione ed il relativo peggioramento prestazionale per unità di tempo.

D'altra parte bisogna cercare di allungare il più possibile la prestazione di uno scambiatore senza operare manutenzione.

"Le incidenze economiche del recovery dipendono da:

- Frequenza e importo dei costi di pulizia
- Costi di manutenzione
- Costi operativi e di produzione
- Periodi di tempo più lunghi sotto vapore
- Costi di pompaggio fluidi
- Tassi di ammortamento
- Aliquote fiscali
- Costo iniziale e variazione con le dimensioni
- Costi di spegnimento

### • Costo di smaltimento

"

[Richard C. Byrne, Standard of the tubular exchanger manufacturers association]

La raffineria in base ai suddetti parametri fisici-economici e alle esperienze operative passate, valuta la strategia da operare. Optando o per un costo maggiore ed un allargamento dei tempi minimi di manutenzione o un costo iniziale minore e una frequenza maggiore per il ripristino prestazionale.

### Vibrazioni

Oltre allo sporcamento e alla corrosione le analisi di fallimento dei sistemi hanno evidenziato che molti dei cedimenti strutturali sono dovuti a comportamenti associabili a vibrazioni che stressavano i componenti dell'unità.

Al fine di definire la natura del fenomeno vibrazionale si sono condotti approfonditi studi sui fenomeni. Si è scoperto che il passaggio del fluido attraverso le unità, in determinate caratteristiche di funzionamento, potevano generare dei vortici. Questi se caratterizzati da una frequenza ben specifica, compatibile con la frequenza di risonanza naturale della struttura, potevano innescare comportamenti vibrazionali nell'unità. Queste vibrazioni possono portare al cedimento o al fallimento delle strutture.

I fasci tubieri all' interno degli scambiatori di calore risentono molto di questo comportamento data la loro geometria.

Definire il fenomeno è molto complesso e la trattazione differisce in funzione delle condizioni operative, ma di seguito si elencheranno i parametri base e i comportamenti tipici del fenomeno.

Le vibrazioni possono innescare i seguenti comportamenti:

- Danneggiamento da collisione
  - I tubi che risentono di questa vibrazione possono collidere con il mantello dello scambiatore e danneggiarsi
- Danneggiamento del deflettore
  - I tubi possono impattare contro il deflettore provocando l'assottigliamento del tubo fino alla rottura
- Effetto di serraggio dei tubi
  - I tubi sono serrati all'interno della piastra di sostegno. Tale serraggio aumenta la frequenza di risonanza dei tubi. Si ricorda che in prossimità della piastra di sostegno si trova il valore massimo di stress meccanico
- Propagazioni dei difetti nel materiale
  - Anche se si studiano apposite soluzioni per rendere la struttura libera da vibrazioni, una parte sarà sempre manifesta. Queste piccole vibrazioni rendono possibile la propagazione di cricche.

La propagazione dei vortici sui fasci tubieri viene modellizzata attraverso li numero di Strouhal:

$$S = \frac{f_s d_0}{12V}$$

 $f_s = Vortex$  shedding frequency, cycles/sec

V = Crossflow velocity of the fluid relative to the tube, ft/sec

 $d_0$  = Outside diameter of tube, inches

For integrally finned tubes:

 $d_0$  = Fin root diameter, inches

Figura 55 eq di strouhan [Richard C. Byrne, Standard of the tubular exchanger manufacturers association]

Utile per la predizione della vibrazione indotta dal flusso è la seguente formula:

$$X = \frac{144\omega_0 \delta_T}{\rho_0 d_0^2}$$

Figura 56 eq. per deteminazione frequenza vortici [Richard C. Byrne , Standard of the tubular exchanger manufacturers association]

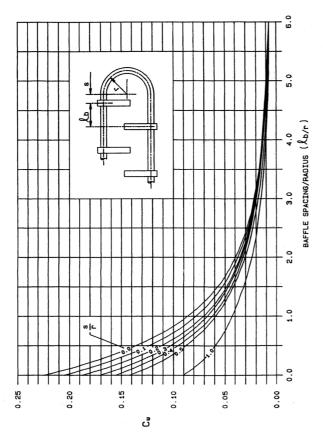
Le attuali conoscenze ed analisi vibrazionale non consentono una corretta analisi della struttura nel suo insieme. Infatti si studiano le frequenze di risonanza per ogni deflettore che compone la struttura, rendendo così la struttura più elementare nella modellizzazione.

Le frequenze naturali degli organi non suportati sono influenzate da:

- Proprietà elastiche, inerzia, geometria del tubo
- Forma delle campate
- Supporto di ciascuna campata
- Carico assiale sulle singole campate

Attraverso Le tabelle contenute nella normativa TEMA si possono stimare le vibrazioni naturali delle singole campate non supportate.

Sam Constant	Equation	Nomeno	lations.
Span Geometry	Equation	Nomeno	clature
Edge condition: both ends simply supported (2)		Tube axial stress multiplier. See Paragraph V-6     C = Constant depending on edge condition geometry.	
Edge condition: one end fixed, other end simply supported	$f_n = 10.838 \frac{AC}{l^2} \left[ \frac{EI}{w_0} \right]^{1/2}$	Span Geometry	c
(3)		1	9.9
Tubesheets			
		3	15.42 22.37
Edge condition: both ends fixed			
Edge condition: both ends simply supported		$r$ = Mean bend radius, inches $C_{\rm w}$ = Mode constant of U-bend	
(5)  Edge condition: both ends simply supported	$C [FI]^{V2}$		
(6)	$f_n = 68.06 \frac{C_u}{r^2} \left[ \frac{EI}{w_0} \right]^{V^2}$	Span Geometry	C <sub>u</sub> Figure
	. <i>r</i> [ <i>w</i> <sub>0</sub> ]	4	V-5.3
Edge condition: both ends simply		5	V-5.3.1
supported (7)		6	V-5.3.2
		7	V-5.3.3
Edge condition: both ends simply supported			



Figura~57~diagrammi~per~determinazione~frequenza~di~risonanza~di~campate~libere~[Richard~C.~Byrne~,~Standard~of~the~tubular~exchanger~manufacturers~association]

# Procedure operative durante SD e TA

### Introduzione

Di seguito verranno elencate le procedure che vengono disposte per la corretta manutenzione di un'apparecchiatura durante uno shut-down o un turnaround.

Le operazioni sono più complesse di come verranno trattate dato che hanno moltissime sfaccettature e campi di competenza. Per questo motivo in questa trattazione si cercherà solo di definire i capisaldi operativi, i problemi e le procedure di sicurezza necessari per il corretto svolgimento delle operazioni.

### Shut-down

In questa fase la raffineria, una volta decise le zone che devono essere sottoposte a manutenzione, inizia le procedure di raffreddamento e diminuzione dei volumi di processo al fine di regolare gradualmente lo spegnimento.

In impianti così delicati e complessi è impossibile spegnere "di botto" il sistema. Ciò comporterebbe molteplici danni alle unità.

Prendendo in esame uno scambiatore di calore, l'immediata cessazione di immissione di flusso potrebbe portare a shock termico o a una mancanza di liquido refrigerante, che porterebbe alla rottura dei tubi e al cedimento termico. Altro problema è legato alle temperature di impiego, le quali, se fossero abbassate di botto potrebbero portare all' aumento della viscosità fino a rendere il prodotto "mieloso" o addirittura solido. In questo caso si dovrebbe poi smantellare l'unità e rompere attraverso sistemi meccanici l'ostruzione.

Di conseguenza la raffineria opera gradualmente uno spegnimento e in contemporanea la pulizia dei condotti attraverso l'impiego di vapore e altri fluidi.

Ove non è possibile l'impiego di vapore, le unità vanno o spurgate attraverso i dreni o attraverso l'utilizzo di pompe a vuoto, che estraggono il prodotto, per poi trattarlo opportunamente per lo smaltimento.

### Chiusura delle valvole

La chiusura delle valvole serve per sezionare parti dell'impianto ed effettuare operazioni di lavaggio selettive di singoli tratti o di singole unità. Le valvole durante la fase di shut-down vengono aperte e chiuse più volte per permettere tutte le operazioni di sezionamento e bonifica.

Le valvole tipiche che si utilizzano in raffineria sono le valvole a volantino, le quali, vengono aperte o chiuse attraverso una rotazione di una ruota posta sulla valvola.

Alla fine delle fasi di lavaggio e di spegnimento dell'impianto buona norma vuole che tutte le valvole vengono chiuse e bloccate attraverso lucchetti di sicurezza. Tutte le chiavi delle valvole vengono cedute alla ditta meccanica che opererà nell' impianto.

Avvenuta la cessione delle chiavi, l'impianto passa ufficialmente nelle mani dell'azienda meccanica per la manutenzione. Questa procedura viene fatta per assicurare che durante l'operazione di ciecatura non si possa incorrere in danni agli operatori.

# Safety blind

Una volta che l'impianto è stato consegnato, in collaborazione tra gli addetti della raffineria e l'azienda, si smontano tutte le tubature che entrano ed escono da un impianto e si inseriscono i dischi ciechi.

L' inserimento dei dischi ciechi è una procedura fondamentale per garantire la sicurezza per l'isolamento dell'impianto.

La ciecatura consiste nell' apertura di una flangia e nell'immissione al suo interno di una piastra di acciaio che ha la funzione di bloccare il passaggio del fluido.

L'impiego delle cieche è indispensabile per garantire sicurezza, in quanto la sola chiusura della valvola è una procedura che è facilmente reversibile da un operatore ,che può accidentalmente aprire la valvola, permettendo rischi di sversamento o danneggiamento a persone o unità. Si immagini se durante lo smontaggio di uno scambiatore fuoriuscisse una portata nominale di petrolio a temperature elevate.

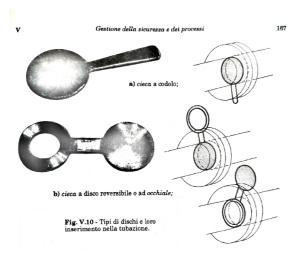


Figura 58 cieca a codolo e disco a 8 reversibile [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]

### La procedura meccanica consiste nelle seguenti fasi:

Detensionamento dei tiranti che assicurano le due facce della flangia, assicurandosi di lasciare
 4 tiranti. I quattro tiranti devono essere disposti a croce per assicurare una corretta tenuta.
 Questa procedura assicura che se in caso di perdita di liquido si possa velocemente richiudere
 la tubatura evitando danni a persone ed equipaggiamento

- Gradualmente si detensiona il tirante più lontano dagli operatori. Questo assicura che in caso di perdita si possa velocemente richiudere la flangia. Usualmente il tirante più comodo è quello più in basso.
- Una volta aperta la flangia si estrae la vecchia guarnizione e si inserisce la cieca.
- Si inseriscono due guarnizioni idonee al tipo di flangia che vengono poste prima e dopo la cieca per assicurare la tenuta.
- Si ritensionano i tiranti seguendo un classico schema a croce.

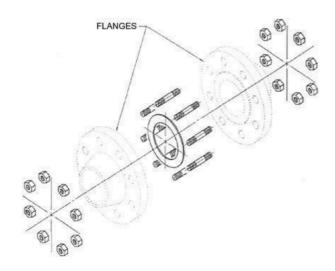


Figura 59 esploso assieme flangia

[Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]

Per decidere come e dove sezionare un impianto il reparto HSE della raffineria, in fase di preparazione, studia la migliore disposizione delle cieche per garantire la sicurezza delle operazioni. In questa fase la ciecatura ha lo scopo di isolare le zone dove verranno le operazioni di manutenzione. Questo tipo di ciecatura si definisce come "limite batteria".

Successivamente, prima di procedere allo smontaggio delle unità, bisognerà ciecare le singole unità per garantire la sicurezza degli operatori durante tutte le fasi di manutenzione. Oltre alla sicurezza, la ciecatura viene utilizzata come strumento per garantire che non entrino corpi all'interno delle apparecchiature e, durante le fasi di test, garantire di mettere sotto pressione solo l'apparecchiatura da collaudare.

# Montaggio e smontaggio

Una volta che l'apparecchiatura è stata correttamente isolata e preparata la raffineria consente allo smontaggio dei componenti che compongono le varie unità per permettere la manutenzione.

Di seguito si tratterà solamente lo smontaggio di scambiatori a fascio tubiero.

Per lo smontaggio dello scambiatore a fascio tubiero prendiamo in esame uno scambiatore di media taglia di tipologia con fascio a "u" avente distributore e tappo piano.

- La prima fase consiste nell'adattamento dell'ambiente e la messa in sicurezza della zona secondo normative vigenti. Di fatto si prevede che la zona deve essere sgomberata di ogni intralcio sulle movimentazioni, fornita delle dovute impalcature per permettere agli operatori di arrivare nei luoghi di servizio per lo smontaggio, provvedere all' istallazione di gru e di mezzi di trasporto idonee al sollevamento e al trasporto, previsione di manichette antincendio, controllo dei sistemi di ancoraggio per i sollevamenti, controllo reti fognarie.
- Una volta preparato l'ambiente gli operatori, avuto in via libera dal reparto HSE, si occupano di smontare i tiranti che serrano il tappo piano e distributore. Per lo sbullonamento si possono utilizzare pistole pneumatiche o chiavi idrauliche.
- Sollevamento ed il trasporto alla zona di lavaggio attraverso l'utilizzo di gru e camion.
- L'estrazione del fascio avviene grazie ad un estrattore dedicato che clampa il fascio sulla
  piastra di sostegno e lo fa scorrere all' interno del mantello. Molte raffinerie richiedono che
  durante l'estrazione il fascio deve essere costantemente bagnato da acqua per prevenire
  possibili pirolisi del fluido residuo.
- Una volta puliti e riparati tutti i componenti dello scambiatore la fase di montaggio avviene esattamente a ritroso.



Figura 60 estrazione fascio con apposito estrattore [www. mausitalia.it]

Particolare attenzione va posta per il tensionamento dei tiranti, che secondo istruzioni di raffineria, avviene seguendo precise regole normate. Di solito le flange vengono chiuse inserendo 4 tiranti a croce e tensionando la struttura il necessario per allinearla. Successivamente si inseriscono tutti gli altri tiranti e seguendo lo schema delle croci successive si tensiona gradualmente tutta l'unità. Si ricorda che durante la fase di rimontaggio si sostituiscono le vecchie guarnizioni, che di solito sono composte da una lega morbida li acciaio, che consente l'ermetizzazione dell'unità. Il metodo a croce successive risulta utile in quanto permette di caricare uniformemente sia i tiranti che la guarnizione, che così facendo, si deforma omogeneamente.

# Pulizia e riparazioni

Dopo che i componenti sono stati smontati e trasportati, vengono analizzati e valutate le operazioni necessarie per la rimessa in funzione.

I componenti per il lavaggio vengono portati in una zona adibita dove ditte specializzate utilizzano lance ad alta pressione per il lavaggio con acqua o solventi. Questi lavaggi molto particolari vengono operati da personale formato ed equipaggiato per rispettare gli standard di sicurezza dal punto di vista di controllo dell'alta pressione e agenti chimici.

In ultimo i componenti vengono portati in officina se necessitano di riparazioni specifiche o sostituzioni di parti.

Le operazioni tipiche sono:

#### Barenatura



Figura 61barenatura tappo piano

[Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]

### • Alesatura



Figura 62 ripristino superficie interna tubi del mantello

[Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]

### • Saldatura



Figura 63 Saldatura piastra fasciotubiero [www.radleyeng.com]

A parte in casi molto particolari le operazioni di questa natura vengono effettuate in officina, dato che, vengono definite come operazioni "a caldo".

Avvolte è necessario svolgere all' interno dell'impianto queste operazioni. In questo caso, per garantire la sicurezza degli operatori ed evitare incendi, bisogna seguire una procedura molto complessa:

- richiesta
- Istallazione di un corsone di sicurezza
- Istallazione di una tenda ignifuga che circonda la zona di lavoro
- Presenza di almeno due pompieri pronti all' intervento
- Sigillo su tombini della rete fognaria

# Test ed ispezione

Dopo il montaggio l'unità deve essere collaudata per verificare il corretto assemblaggio e l'efficacia delle riparazioni.

Un test standard prevede di mettere sotto pressione un'unità per almeno 30 minuti, in alternativa, test ufficiali possono richiedere anche 3 ore sotto pressione per avere la certificazione.

Usualmente le pressioni di test sono più elevate delle pressioni di esercizio nominale a cui l'unità verrà sottoposta.

Per uno scambiatore di calore a fascio tubiero il test avviene in due fasi diverse.

La prima fase compete al fascio che una volta montato deve essere controllato.

### La procedura operativa consiste nel:

- Montaggio cieche
- Montaggio test ring (anello che permette il fissaggio del lasciando libera l'ispezione dei tubi)
- Montaggio manichette acqua
- Montaggio manometri certificati
- Montaggio pompa per alta pressione

La seconda fase compete al mantello, che viene messo sotto pressione ad unità completamente chiusa.

Le operazioni avvengono come di seguito:

- Montaggio cieche
- Montaggio manichetta acqua e caricamento acqua
- Montaggio manometri certificati
- Smontaggio manichetta acqua e montaggio pompa per alta pressione

Dopo mezzora si controlla se in manometro riporta delle variazioni sostanziali. Inoltre, bisogna controllare le misurazioni calcolando un possibile dilatamento termico dovuto all' irraggiamento de sole o altri fattori simili.

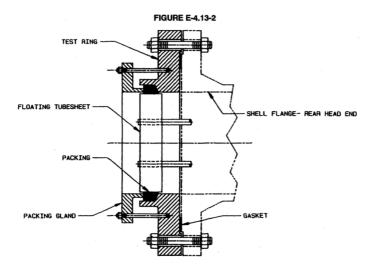


Figura 64 testring installato per test idraulico [Richard C. Byrne, Standard of the tubular exchanger manufacturers association]

Oltre al controllo manometrico, l'operatore HSE, per il controllo qualità ,si assicura che non ci siano perdite di nessun tipo , controlla se i tiranti sono stati correttamente tensionali , controlla se i tiranti utilizzati sono tutti del materiale corretto e presentano a vista le diciture di classe e lotto.

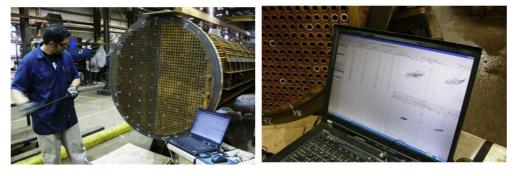


Figura 65 test integrità lubi [Richard C. Byrne , Standard of the tubular exchanger manufacturers association]

# Riconsegna dell'impianto

Una volta che la raffineria certifica che tutti i lavori sono stati svolti correttamente si può procedere alla rimozione definitiva delle cieche installate sulle unità.

Da questo momento in poi l'impianto viene riconsegnato alla raffineria, che provvederà, in affiancamento con le ditte di manutenzione, al lavaggio delle unità con vapore, asciugatura e preriscaldo per l'inserimento del prodotto.

La fase di avviamento può durare anche alcune settimane, durante le quali, le aziende meccaniche aprono e chiudono le valvole di servizio per fornire i necessari collegamenti di servizio. Congruentemente alle esigenze procedurali, vengono rimosse le cieche di limite batteria.

Alla fine di questo periodo il sistema è pronto per rilavorare a pieno regime, fino alla prossima manutenzione.

# Indice delle figure

Fig 1 shema a blocchi (C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimic	٠.
Figura 2 vaporizzazione del grezzo e recupero	
Figura 3 Diagramma di vaporizzazione	
Figura 4 Schema di processo	
•	9
Figura 6 configurazioni di recupero termico e controllo prodotti [C Giavarini, Guida allo studio de	
	10
Figura 7 schema distillazione sotto vuoto [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di	
	.12
Figura 8 Sistema gen. vuoto [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e	
	.13
Figura 9 Catalizzatore per H2S [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici.]	.14
Figura 10 schema a blocchi HDS [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e	17
	.15
Figura 11schema di processo H2S [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e	
	16
Figura 12 reazioni di reforming [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e	
	.17
Figura 13Chema di impianto reforming [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazion	ıe
	18
Figura 14 diagramma eq. termodinamico esano [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di	
1 -	.19
Figura 15 scambiatore verticale a piastre [Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger	•
Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]	.20
Figura 16 processi a valle dell FCC [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e	21
L J	21
Figura 17 tabella caratteristiche acidi per reforming [C Giavarini, Guida allo studio dei processi d	
raffinazione e petrolchimici.]Figura 18 reattore stratco [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e	.22
	.23
Figura 19 modello scambiatore a fascio tubiero (modificato) [Richard C. Byrne, Standard of the	23
tubular exchanger manufacturers association]	25
Figura 20 sezioni scambiatore a fascio tubiero [Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchange:	
Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]	
Figura 21 bollatura scambiatore di calore a fascio tubiero [Richard C. Byrne, Standard of the	20
tubular exchanger manufacturers association]	29
Figura 22 sx. dettaglio guarnizioni [Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger Equipmer	
Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions] dx guarnizione spirometallic	
[www.wermac.org]	
Figura 23 diagramma costo/ tempo di esercizio [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti	i -
petrolchimici e di raffinazionel	
Figura 24 Bollatura aircooler [Nicholas P. Cheremisinoff, Handbook of Chemical Processing	
Equipment,]	35
Figura 25 bollatura aircooler [Nicholas P. Cheremisinoff, Handbook of Chemical Processing	
	35

Figura 26 variante distributore con tappi o con piastra[process desine criteria, g. ganapathy,]3'	7
Figura 27 aircooler in configurazione tiraggio forzato e tiraggio indotto [G. Pirola, Guida alla	
progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]	8
Figura 28 alettatura ad incastro [gea luftkuhler ghbh ]4	
Figura 29 alette estruse [gea luftkuhler ghbh]4	
Figura 30 alette piegate a L [gea luftkuhler ghbh]42	
Figura 31 modellizazione conduzione [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti	
petrolchimici e di raffinazione]4	3
Figura 32 equazione di Furier [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di	
raffinazione]4	
Figura 33 Newton [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di	
raffinazione]44	4
Figura 34 equazione irraggiamento [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimic	i
e di raffinazione]4	
Figura 35 analisi monodimensionale parete tubo [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti	
petrolchimici e di raffinazione]40	
Figura 36 formula coefficiente di scambio termico [G. Pirola, Guida alla progettazione degli	
impianti petrolchimici e di raffinazione]4	7
Figura 37 eq. flusso termico [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di	
raffinazione]4	7
Figura 38 configurazioni scambiatori [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti	
petrolchimici e di raffinazione]48	8
Figura 39 eq. LMTD [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di	
raffinazione]49	9
Figura 40 eq. portata massica su superficie [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti	
petrolchimici e di raffinazione]49	9
Figura 41 eq. rielab. fluidi newtoniani [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti	
petrolchimici e di raffinazione]49	9
Figura 42 andamento forze di Newton su fluido viscoso [G. Pirola, Guida alla progettazione degli	
impianti petrolchimici e di raffinazione]50	
Figura 43 viscosità cinematica [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di	
raffinazione]50	0
Figura 44 eq. di Nusselt [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di	
raffinazione]50	0
Figura 45 componenti eq. di Nusselt	1
Figura 46 Andamento corrente / controcorrente scambiatore [G. Pirola, Guida alla progettazione	_
degli impianti petrolchimici e di raffinazione]	
Figura 47 eq Fattore correttivo [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e d	
raffinazione]	3
Figura 48 modellizazione configurazione in batteria di scambiatori [G. Pirola, Guida alla	_
progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]	
Figura 49 tubo corroso [Annual-Corrosion-Survey-Report-2013-14]	/
Figura 50 cedimento da corrosione scambiatore di calore a fascio tubiero [Annual-Corrosion-	_
Survey-Report-2013-14]	8
Figura 51 corrosione interno tubo [Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger Equipment	_
Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]	
Figura 52 metallografia intergranulare [Annual-Corrosion-Survey-Report-2013-14]	J
Figura 53 fascio tubiero con incrostazione [Maurice Stewart e Oran T. Lewis, Heat Exchanger	1
Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions]	1
Figura 54 stratigrafia monodimensionale [G. Pirola, Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione]	า
DCHORGHUBG E 01 (ATTIBAZIONE) 0.	1.

Figura 55 eq di strouhan [Richard C. Byrne, Standard of the tubular exchanger manufacturers	
association]	66
Figura 56 eq. per deteminazione frequenza vortici [Richard C. Byrne, Standard of the tubular	
exchanger manufacturers association]	66
Figura 57 diagrammi per determinazione frequenza di risonanza di campate libere [Richard C.	
Byrne, Standard of the tubular exchanger manufacturers association]	67
Figura 58 cieca a codolo e disco a 8 reversibile [C Giavarini, Guida allo studio dei processi di	
raffinazione e petrolchimici.]	70
Figura 59 esploso assieme flangia	71
Figura 60 estrazione fascio con apposito estrattore [www. mausitalia.it]	73
Figura 61barenatura tappo piano	74
Figura 62 ripristino superficie interna tubi del mantello	74
Figura 63 Saldatura piastra fasciotubiero [www.radleyeng.com]	75
Figura 64 testring installato per test idraulico [Richard C. Byrne, Standard of the tubular exchan	ıger
manufacturers association]	77
Figura 65 test integrità lubi [Richard C. Byrne, Standard of the tubular exchanger manufacturers	S
association]	77

# **BIBLIOGRAFIA**

**Richard C. Byrne**, Standard of the tubular exchanger manufacturers association, 9<sup>a</sup> ed.,2007, TEMA Association.

**G. Pirola,** Guida alla progettazione degli impianti petrolchimici e di raffinazione, 2ª ed.,1975, Snamprogetti.

J. D. Harston and F. Ropital, Corrosion in Refineries, 1<sup>a</sup> ed., 2014, Whoodhead Publishing.

**Maurice Stewart e Oran T. Lewis**, Heat Exchanger Equipment Field Manual: Common Operating Problems and Practical Solutions, 1<sup>a</sup> ed., 2013, Elsevier Inc.

**Nicholas P. Cheremisinoff**, Handbook of Chemical Processing Equipment, 1<sup>a</sup> ed., 2000, Butterworth Heinemann

Carlo Giavarini, Guida allo studio dei processi di raffinazione e petrolchimici, 3ª ed.,2006, Siderea