

XXVII corso di Tecnologia per Tecnici Cartari
edizione 2021/2022

Seccheria: configurazione, ventilazione e recupero calore

di Scarabello Loris



**Scuola Interregionale
di tecnologia per tecnici Cartari**

Istituto Salesiano «San Zeno» - Via Don Minzoni, 50 - 37138 Verona
www.sanzeno.org - scuolacartaria@sanzeno.org

INDICE

- 1 - INTRODUZIONE**
- 2 - EFFETTI DELL'ASCIUGATURA**
- 3 - CONFIGURAZIONE TIPICA DI SECCHERIA**
- 4 - VENTILAZIONE E STABILIZZAZIONE**
- 5 - VAPORE E RECUPERO CONDENZA**
- 6 - CENNI DI TERMODINAMICA DELL'ARIA**
- 7 - BILANCIO ENERGETICO**
- 8 - RECUPERO CALORE**
- 9 - BIBLIOGRAFIA**

1. INTRODUZIONE

Il processo di asciugatura della carta è rimasto pressoché immutato dall'introduzione della macchina continua, basandosi sugli sviluppi introdotti da Dickinson agli inizi dell'ottocento, ovvero batterie essiccatrici costituite da cilindri metallici riscaldati da vapore.

I miglioramenti che ci sono stati nel corso degli anni erano indirizzati principalmente ad aumentare velocità macchina (aumento di produzione), "macchinabilità", efficienza e, non ultimo, ottimizzare il consumo di energia richiesto in questa fase.

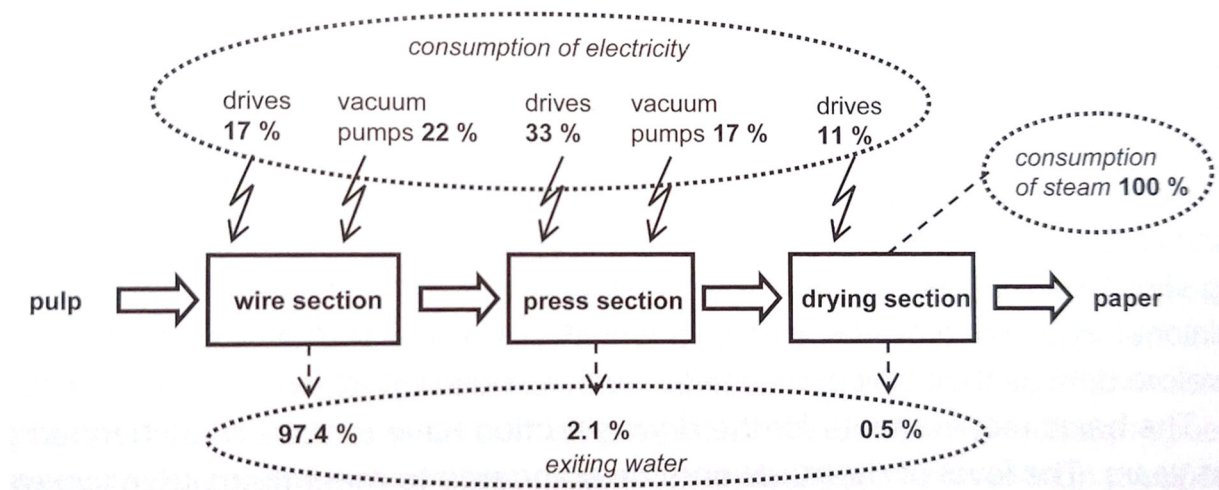
La seccheria è la sezione di macchina continua che occupa la maggior lunghezza e volume, non sono infatti rari impianti con 50/60 cilindri essiccatori, ma soprattutto è la parte di macchina dove si consuma la maggior quantità di energia.

La fabbricazione della carta in generale può essere vista come un processo continuo di drenaggio, consolidamento e asciugatura di un feltro di fibre vegetali. L'impasto si presenta in testata macchina con una consistenza di circa 1% (10 g secco/1000 g acqua). In questa zona preposta alla formazione, tramite gravità, aspirazione, vuoto, la consistenza raggiunge valori compresi tra il 15 e 25 %. Segue la sezione presse, dove per mezzo di compressione meccanica tali percentuali aumentano fra il 33 e 55 %.

Da qui il foglio di carta ormai formato entra in seccheria dove il contenuto di acqua presente è rimosso per evaporazione, raggiungendo all'arrotolatore valori di umidità del 5%.

Da un punto di vista fisico, l'ingresso in seccheria, anche con valori di secco intorno al 50 %, le fibre del contesto fibroso sono tenute tra loro da legami labili; molta è ancora l'acqua libera presente. Solo in seccheria, con l'evaporazione dell'acqua di rigonfiamento, più intimamente legata alle fibre, si ha il loro consolidamento e il nascere dei legami responsabili della resistenza meccanica.

Analizzando tutto il processo, il maggior contenuto di acqua è rimosso per via meccanica, e ipotizzando un secco in uscita presse del 50 % (1 g secco/ 1 g acqua), in seccheria viene rimosso per via termica solo l'1 % circa del volume iniziale di acqua. È desiderabile quindi il più alto valore di secco in uscita presse poiché la seccheria è la sezione di macchina continua la più dispendiosa in termini energetici. I costi complessi (di investimento, operativi ed energetici) per rimuovere una unità d'acqua nelle zone di formazione, presse e seccheria, stanno tra loro con rapporti 1:5:220.

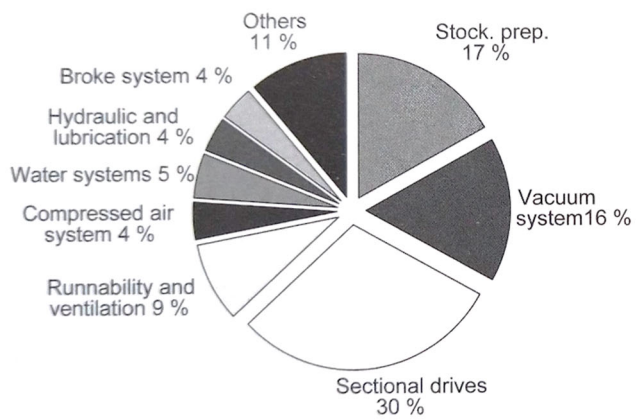


La seccheria nel suo complesso deve soddisfare i seguenti requisiti:

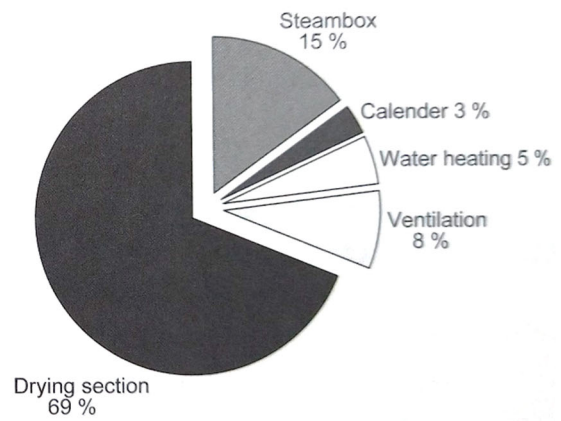
- Asciugatura: deve essere il più efficiente possibile in termini quantità d'acqua evaporata, energia ed unità di essiccatori.
- Qualità carta: il profilo trasversale di umidità deve essere più uniforme possibile, per garantire un buona qualità del foglio.
- Macchinabilità: l'aumento di velocità nelle moderne macchine continue ha portato a soluzioni tecnologiche per la conduzione del foglio in seccheria. Rotture in questa sede sono indesiderate perché determinano importanti perdite di produzione.
- Gestione ottimale energia termica: la seccheria nel suo complesso va intesa come un sistema comprendente l'involucro cappa, e circuiti vapore, condensa e ventilazione. Una attenta progettazione e corretta conduzione sono alla base per il minor dispendio termico.

Il consumo energetico varia in base alla tipologia di prodotto cartaceo, ed è la somma del consumo di energia elettrica (azionamenti, pompe, ventilatori) e termica, rimanendo quest'ultimo predominante. Una media macchina continua richiede approssimativamente 4 GJ/t di energia termica sotto forma di vapore a bassa pressione.

Electricity usage



Process heat usage



2. EFFETTI DELL'ASCIUGATURA

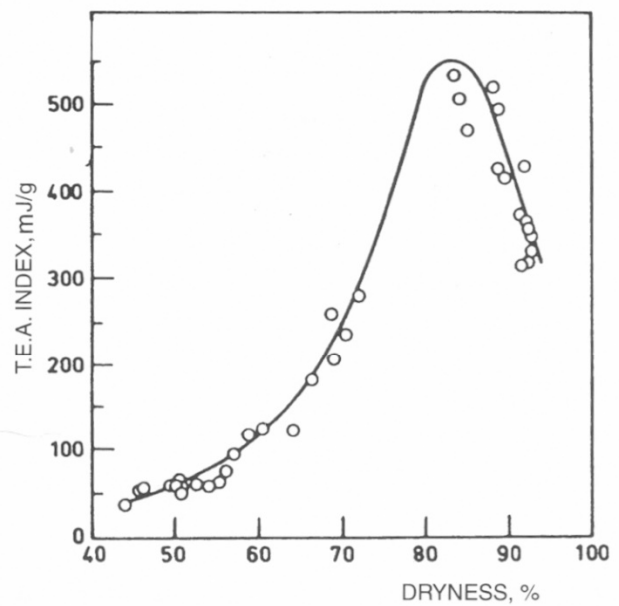
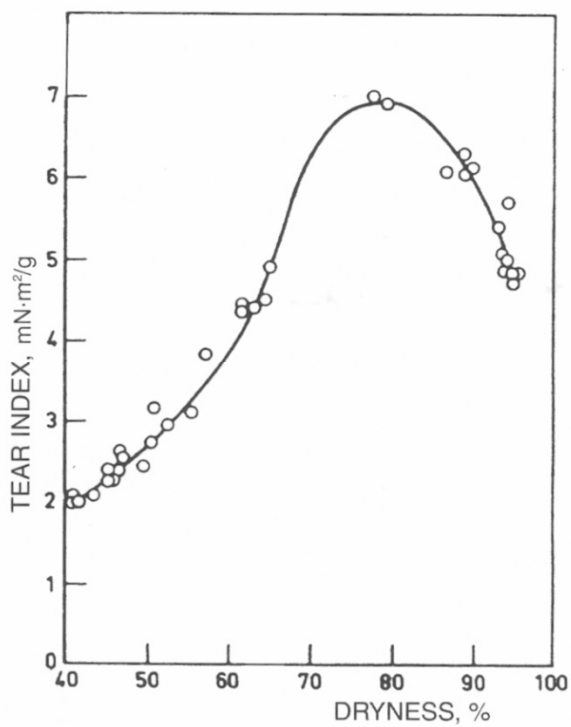
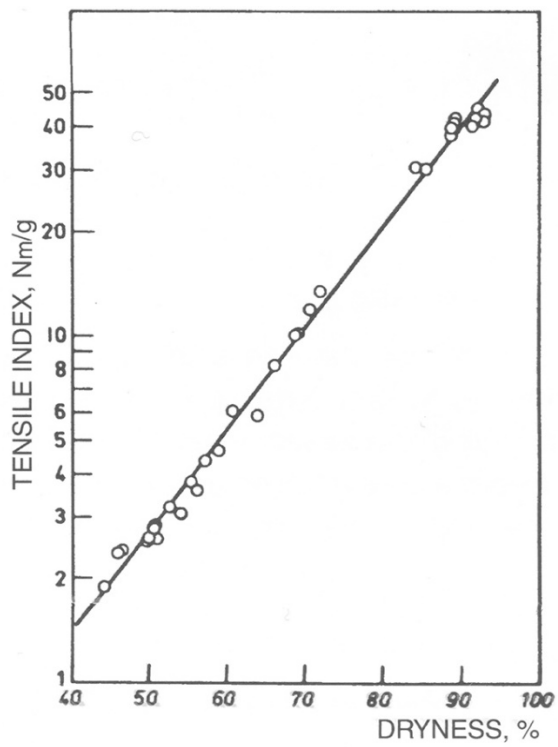
Dopo la zona presse il contenuto secco è tra il 35 e 55 %, influenzato dal tipo di fibre, grado di raffinazione, contenuto in ceneri, tipologia e carico presse. In seccheria l'acqua è rimossa per evaporazione determinando le caratteristiche finali del foglio, in particolar modo quelle meccaniche, e qui è soggetto ad un importante stress termico e rapido asciugamento. Le singole fibre sono soggette ad un blando ritiro longitudinale ($1\div2\%$), maggiore invece è il ritiro trasversale ($10\div40\%$), ed è tanto maggiore quanto è spinta la raffinazione ed il seguente rigonfiamento per idratazione della fibra.

In base all'aumento del grado di secco si possono distinguere cinque fasi nel processo di asciugatura con effetti sulla morfologia delle fibre:

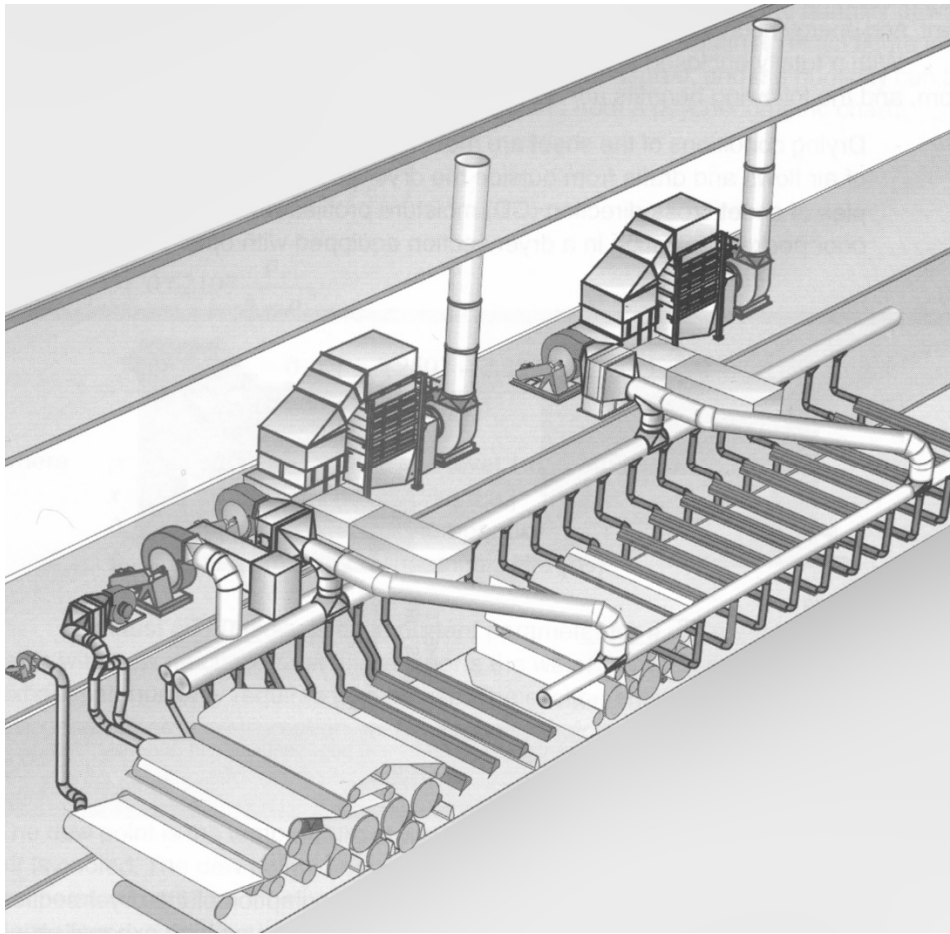
- tra il 50 e 55% la struttura delle fibre sostanzialmente non muta.
- tra il 55 e 65% l'acqua è rimossa dal lume, le fibre cominciano a comprimersi aumentando la loro superficie di contatto.
- tra il 65 e 75% si ha un corrugamento longitudinale e continua il collasso del corpo fibra.
- tra il 75 e 85% il collasso del lume è completato ed è evidente il ritiro trasversale.

All'inizio della seccheria sono le forze d'attrito e superficiali a contribuire alle caratteristiche meccaniche, influenzate da lunghezza e proprietà delle fibre, con valori di resistenza a rottura di $10\div15\%$ di quella raggiunta nel finale. A circa il 60% di secco le fibre sono sufficientemente vicine da sviluppare i legami idrogeno, tali da determinare un aumento considerevole della resistenza a rottura del foglio, in maniera esponenziale al contenuto secco. Per contro, il modulo elastico (e allungamento a rottura) aumenta inizialmente man mano che il foglio si asciuga, raggiunge un massimo verso l'80% di secco, per poi decrescere rapidamente ed assestarsi tra $80\div85\%$ di esso.

Le fibre del legno sono composte da un polimero naturale, complesso da un punto di vista strutturale e per tipologia di legami chimici. Il legame che si instaura tra le fibre è considerato essere per convenzione quello a ponte idrogeno, non trascurabile il contributo delle forze di Van der Waals. Il legame idrogeno è parte di una catena del tipo $O_H\dots O$, dove $_$ denota il legame covalente, $\dots$ denota il più debole legame idrogeno (di circa dieci volte). Il legame idrogeno forma e tiene unite le unità di glucosio nella catena della cellulosa. Tra le fibrille della parete cellulare ne conferisce la rigidità. Infine, raggiunti alti valori di secco per evaporazione, lega tra di loro le fibre. Il contributo delle forze di Van de Waals nei legami inter fibra è piccolo al confronto, ma ha la peculiarità di essere non direzionale, con raggio d'azione $0.3\div0.5\text{nm}$ contro i $0.05\div0.15\text{nm}$ del ponte idrogeno, e manifesta la sua importanza nell'assicurare la coesione inter fibra quando il foglio è ancora molto umido.



3. CONFIGURAZIONE TIPICA DI SECCHERIA



Senza scendere nel dettaglio, la seccheria di una tipica macchina continua è composta dagli elementi di seguito elencati.

CAPPA

Nelle moderne macchine continue la zona seccheria è racchiusa totalmente da una cappa coibentata che la separa dalla sala macchina, questo per:

- Creare le condizioni favorevoli per l'asciugatura del foglio di carta, in termini di controllo e uniformità, limitando correnti d'aria "fredda" dall'esterno cappa.
- Conseguire un risparmio energetico concentrando nel solo volume cappa l'impiego di energia termica, riducendo le perdite di calore. L'acqua evaporata deve essere rimossa massimizzando la quantità di vapore per volume d'aria, questo per limitare il flusso d'aria movimentato in ingresso e uscita cappa, e perché l'efficienza dei sistemi di recupero calore migliora all'aumentare di essa. Dalle fumane in uscita viene recuperato quanto più calore

possibile, ed impiegato per il preriscaldamento dei flussi d'aria calda in ingresso cappa e controsoffitto della sala macchina, e dell'acqua fresca e di processo.

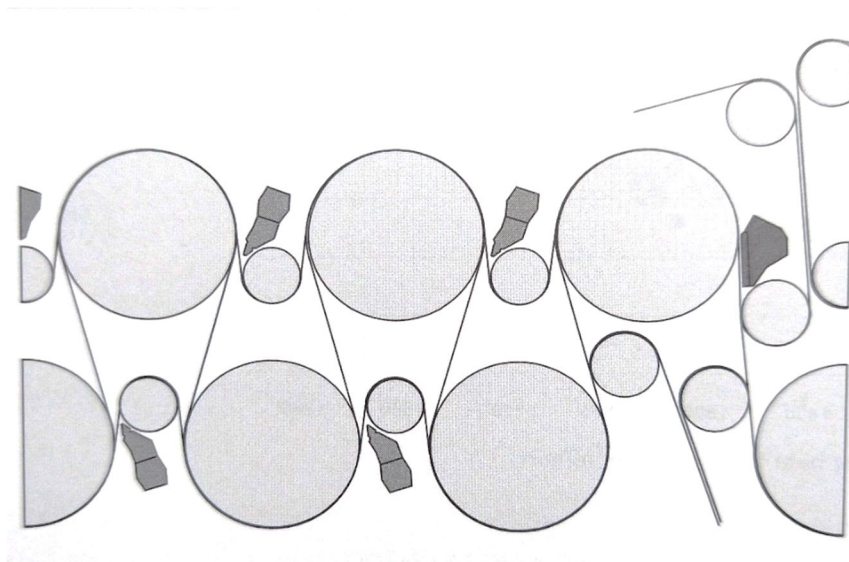
- Migliorare le condizioni di lavoro in sala macchina, riducendo umidità, calore e attenuando il rumore. L'umidità in oltre è causa di condense che vanno a deteriorare le strutture dell'edificio.

CILINDRI ESSICCATORI

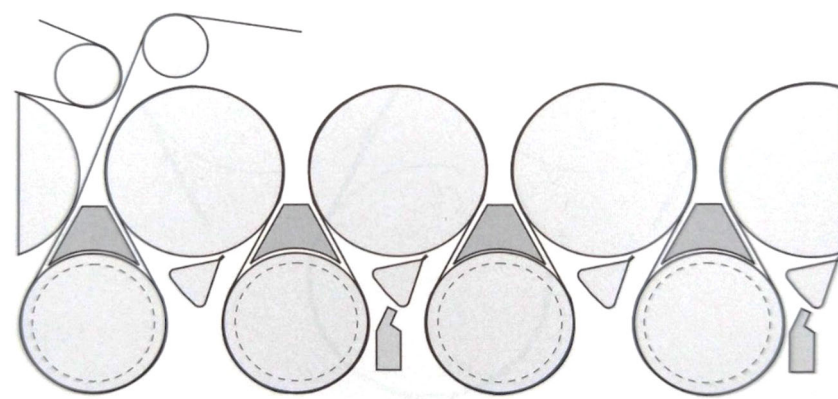
Il contatto diretto con una superficie riscaldante è il metodo più impiegato in seccheria, realizzato mediante una serie di cilindri cavi rotanti riscaldati. I motivi di tale scelta sono da ricercarsi nell'efficienza assicurata dalla trasmissione del calore per conduzione termica e nella relativa facilità tecnologica dell'impiego del vapore quale vettore di energia termica. Inoltre la possibilità di collegarli a gruppi tramite tele essiccatrici, permette il trasferimento del foglio lungo la seccheria, supportandolo e contrastandone allungamento/ritiro nelle direzioni macchina e trasversale. La velocità di rotazione di ciascun gruppo (o batteria) è comandato in maniera indipendente, permettendo il controllo delle tiri nei passaggi da un gruppo all'altro.

Il raggruppamento in batterie dei cilindri ha portato alle due configurazioni maggiormente usate, doppia e singola tela.

Con la doppia tela, i cilindri sono disposti su due file sovrapposte, tutti riscaldati da vapore e impiegati nell'asciugamento del foglio, assicurano in poco spazio un'ampia superficie di scambio termico. Ma tale configurazione implica un passaggio non supportato del foglio da cilindro a cilindro, limitandone l'impiego in macchine a bassa velocità, o nella parte terminale di seccheria per quelle ad alta velocità. Si ha comunque il vantaggio di alternare la superficie del foglio in contatto col cilindro essiccatore, di farlo aderire ad esso migliorando lo scambio termico conduttivo e contrastandone il ritiro essendo compresso tra mantello cilindrico e tela. La configurazione a tela singola (o slalom) viene incontro all'esigenza di supportare il foglio in uscita dalla zona presse nelle macchine veloci, quando ancora il foglio non ha sviluppato sufficiente resistenza meccanica, e se non supportato è soggetto ad instabilità aerodinamica e rottura per strappi. Tale configurazione prevede una doppia fila sovrapposta di cilindri, suddivisi in gruppi mono telati, con la fila superiore costituita da essiccatori veri e propri, quella inferiore da cilindri aspiranti (vacuum rolls) questi ultimi con l'obiettivo di mantenere in aderenza il foglio alla tela durante la rotazione e contrastarne il ritiro trasversale.



*Schema di seccheria con
configurazione a doppia tela
essiccatrice*



*Schema di seccheria con
configurazione a tela
essiccatrice singola (slalom)*

TELE ESSICATRICI

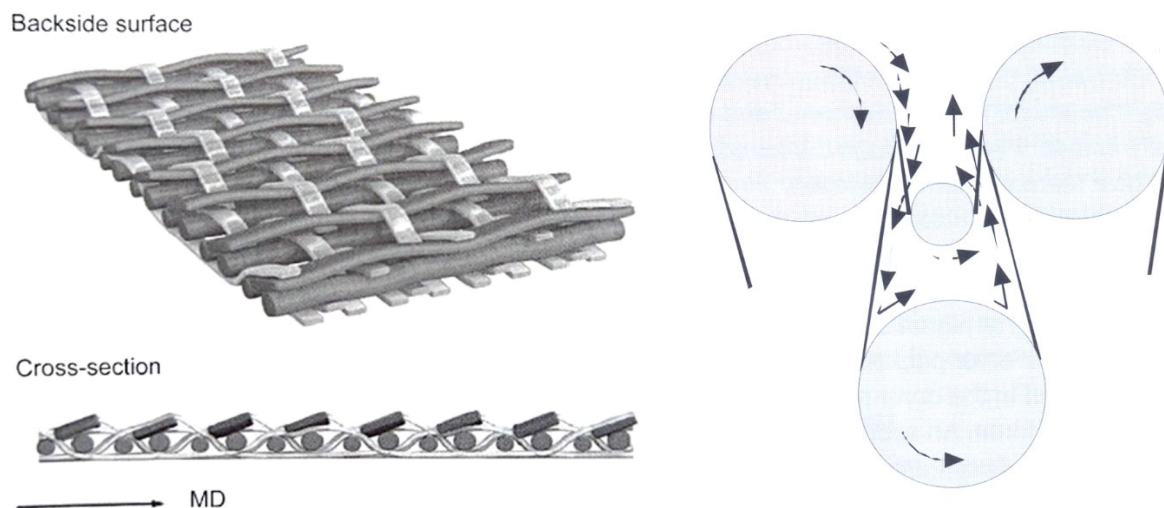
La stabilità del foglio di carta e la qualità della sua asciugatura in seccheria è assicurata anche dalle tele essiccatrici che suddividono in gruppi meccanicamente indipendenti i cilindri essiccatori e vacuum rolls.

La struttura superficiale della tela influenza la capacità di trasmettere calore alla carta assicura una distribuzione uniforme di calore e pressione

L'evaporazione è legata alla struttura geometrica (tessitura) della tela, che ne determina la permeabilità (apertura), il suo ruolo è di rompere il velo di aria satura di vapore prossimo alla superficie della carta. Il parametro base per valutare la caratteristica di tessitura della tela è il valore CFM, che indica la quantità di aria che attraversa un piede quadrato di tela in un minuto.

Non tutte le batterie avranno montate tele con la stessa apertura. Quelle più prossime all'uscita presse, dove il contenuto d'acqua è tanto ed è scarsa la resistenza del foglio, saranno più chiuse, per meglio supportarlo, offrire maggiore superficie di conduzione termica, e limitare la marcatura. Man mano che il foglio procede in seccheria, acquisisce resistenza, aumenta la

temperatura e la quantità di evaporato, saranno quindi necessarie tele più aperte, che facilitano anche il passaggio d'aria all'interno delle tasche nelle batterie doppio telate.



4. VENTILAZIONE E STABILIZZAZIONE

La produzione della carta implica l'iniziale dispersione di fibre vegetali in acqua per la sua formazione, e l'uso di aria per la rimozione di quest'ultima. Al sistema di ventilazione sono demandati i compiti di immissione di aria calda e secca, distribuendola in maniera opportuna e controllata all'interno della cappa, e rimozione di aria carica di vapore d'acqua per indirizzarla all'emissione in atmosfera previo recupero calore. L'aria in ingresso pre-riscaldata viene immessa da particolari dispositivi che vedremo in seguito, l'aria in uscita è aspirata direttamente da uscite poste sul controsoffitto, o rulli aspiranti (vacuum rolls) e casse aspiranti più prossime al foglio di carta con la funzione anche di stabilizzarlo nel movimento. La stabilizzazione del foglio infatti è un fattore di estrema importanza nelle seccherie delle moderne macchine continue. Il continuo incremento delle velocità di produzione ha reso necessario l'utilizzo di sistemi in grado di garantire il massimo supporto del foglio man mano che avanza nelle batterie della seccheria.

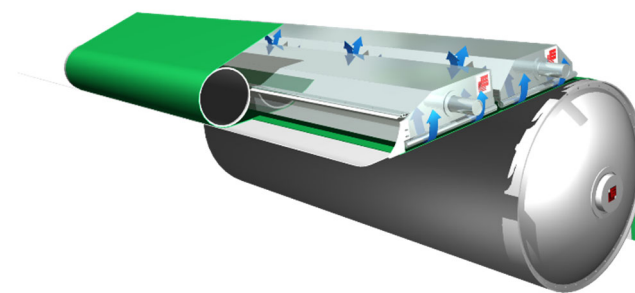
I principali vantaggi ottenibili con un efficiente sistema di stabilizzazione e ventilazione possono essere così riassunti:

- Riduzione delle rotture grazie alla maggior stabilità del foglio in appoggio alla tela e nel passaggio tra i tiri liberi e all'ottimale gestione dei flussi d'aria nelle tasche.
- Possibilità di realizzare batterie di essiccatori per il passaggio coda automatico, senza funi.
- Miglioramento della qualità della carta prodotta in quanto viene evitata la formazione di difetti dovuti dallo sventolio dei bordi e al manifestarsi di bolle, grinze e striature.
- Miglioramento del profilo trasversale di umidità assicurato da una corretta ventilazione delle tasche che evita il ristagno di aria umida.
- Riduzione del restringimento trasversale del formato grazie all'esteso supporto.
- Maggior resa della seccheria in quanto l'evaporazione avviene in ambiente termicamente controllato.

Esempi di sistemi di stabilizzazione e ventilazione sono la cassa stabilizzatrice, stabilizzatori per rulli aspiranti, stabilizzatori per sezioni mono e doppio telate, pockets ventilation.

La cassa stabilizzatrice viene installata nella sezione di ingresso delle seccherie dove la carta abbandona la sezione presse ed entra in contatto con la prima tela del gruppo essiccatore. In questo tratto è importante garantire il corretto supporto del foglio per evitare problemi di distacco che portano a difetti, restringimenti del formato e a potenziali rotture. La cassa grazie all'effetto aspirante, permette la perfetta adesione del foglio alla tela su tutta la sua superficie consentendo di ridurre il tiro sulla carta per facilitarne la conduzione in seccheria. A seconda della lunghezza del tratto in cui va sostenuta la carta, è possibile utilizzare una o due casse distinte per garantire il massimo effetto stabilizzante.

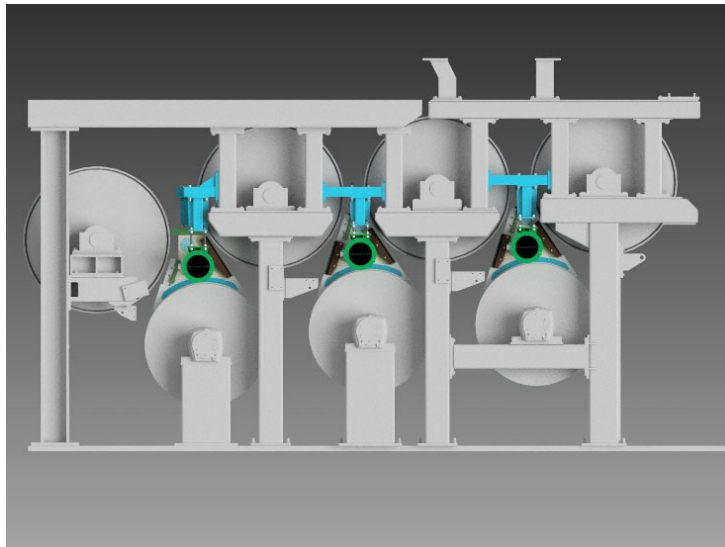
La cassa non presenta zone di contatto con la tela e grazie a particolari tenute evita ogni potenziale danneggiamento della tela stessa.



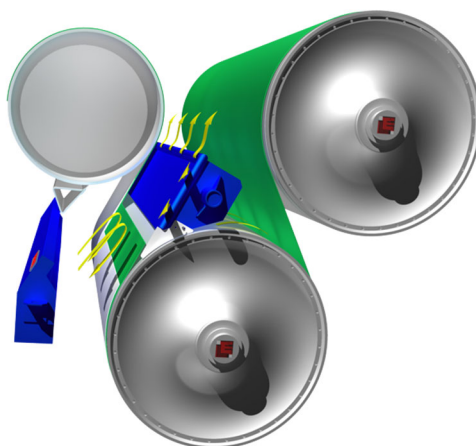
Per eliminare completamente la presenza di tiri liberi nelle seccherie è stato sviluppato per le batterie mono telate la cassa stabilizzatrice per cilindri aspiranti, che unisce l'effetto stabilizzante con un'aspirazione effettuata nella parte inferiore. Richiede l'impiego di un rullo inferiore forato (vacuum roll) in modo da permettere il supporto del foglio lungo tutto il

settore di avvolgimento. La cassa dispone di un collegamento per l'aspirazione e di un collegamento per l'immissione di aria in questo modo è possibile garantire l'effetto stabilizzante sui due tratti liberi tra i rulli e l'effetto di aspirazione dal rullo inferiore.

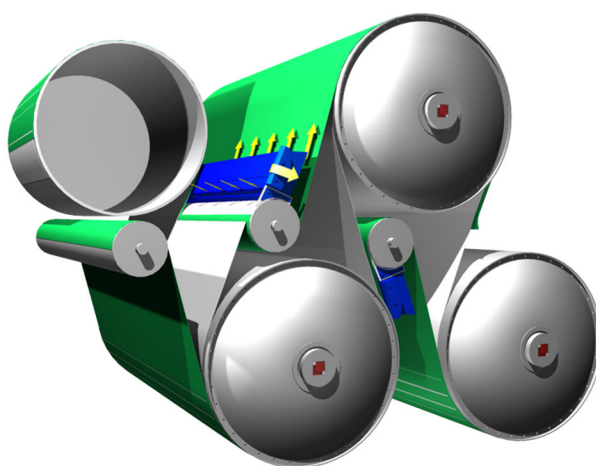
Un sistema di serrande servo comandate permette di avere una zona di trattenimento della coda evitando l'uso delle funi per il passaggio della stessa. Il passaggio della coda viene regolato in modo totalmente automatico attraverso la regolazione della portata di aria aspirata e soffiata e le serrande servo comandate.



La cassa stabilizzatrice per gruppo mono tela viene impiegata per eliminare il fenomeno di distacco del foglio di carta all'uscita del cilindro superiore e all'entrata del cilindro inferiore, l'effetto di pompaggio dell'aria crea instabilità sul foglio provocando rotture. La cassa stabilizzatrice genera una depressione nella zona di distacco del foglio supportandolo fino all'ingresso del cilindro inferiore. L'effetto di aspirazione è prodotto dal particolare profilo della cassa che si adatta a cilindro e tela, e dal controllo dei flussi di aria nella tasca. I principali vantaggi offerti dall'impiego di queste casse sono un aumento della velocità di macchina, una riduzione dei tiri sulle tele, la possibilità di aumentare il formato del foglio, la riduzione delle pieghe, un incremento della capacità essiccante della batteria e una più facile introduzione della carta. Una seconda cassa posizionata sotto la raschia del cilindro superiore consente il controllo dei flussi d'aria provenienti dal sotto macchina mediante invio di aria calda che favorisce l'evaporazione e il distacco dall'essiccatore.



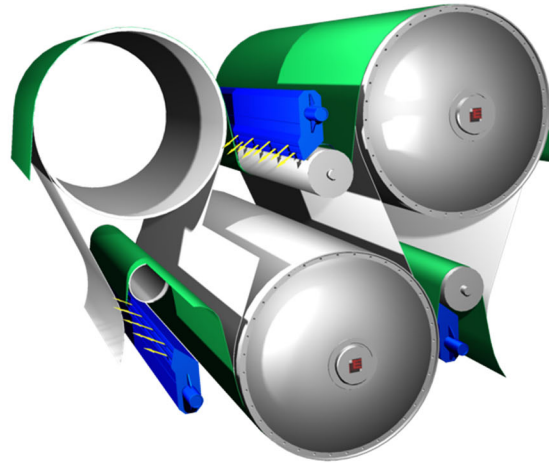
La geometria dei rulli nei gruppi doppio telati della seccheria fa sì che la carta venga supportata dalla tela all'uscita del cilindro essiccatore e questo provoca l'impossibilità di adottare un tradizionale tubo soffiatore in quanto il getto d'aria allontanerebbe la carta dalla tela stessa. Per questa ragione è stata introdotta una cassa in grado di fornire un effetto di stabilizzazione del foglio e contemporaneamente un'efficace ventilazione della tasca. E' possibile ottenere un effetto di supporto del foglio all'uscita dal cilindro essiccatore limitando il distacco dovuto agli effetti aerodinamici. La ventilazione della tasca viene eseguita dal lato posteriore dove grazie alla depressione creata viene convogliata una circolazione forzata della tasca in grado di eliminare l'aria umida dovuta all'evaporazione della carta.



Una corretta ventilazione della tasca mediante la cassa per pocket ventilation contrasta l'effetto di trascinamento di aria umida dovuto alla rotazione dei cilindri.

Il flusso di aria penetra nella tasca attraverso la tela, crea un getto che si oppone all'effetto di pompaggio generato dal movimento della tela e dei cilindri e questo impedisce l'introduzione nella tasca dell'aria umida circostante. La forma della cassa e delle lame d'aria viene ottimizzata in funzione della geometria della tasca in cui viene installata e la presenza di

supporti regolabili in ogni direzione consente il perfetto adattamento alla forma della tasca. E' inoltre possibile avere il controllo dei profili trasversali mediante una cassa a settori con la regolazione del soffiaggio a zone indipendenti.

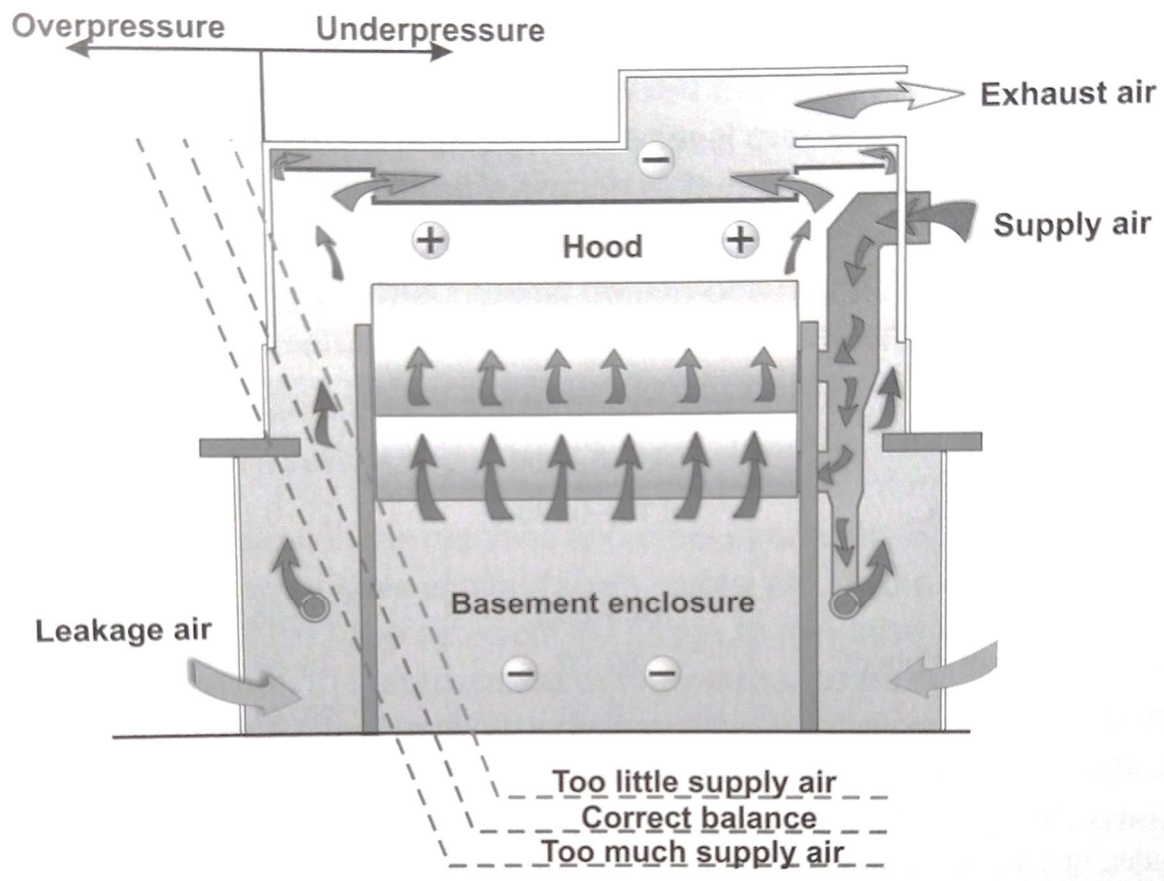


LIVELLO ZERO

La densità dell'aria è funzione di pressione, temperatura e umidità, ed è causa dell'effetto camino, cioè lo spostamento di aria a bassa densità verso l'alto. Viste le particolari condizioni termodinamiche, nella parte alta della cappa vi è sempre un eccesso di pressione rispetto alla parte inferiore, differenza che cambia in senso verticale.

Il livello al quale la pressione tra interno ed esterno cappa si eguaglia è detto livello zero.

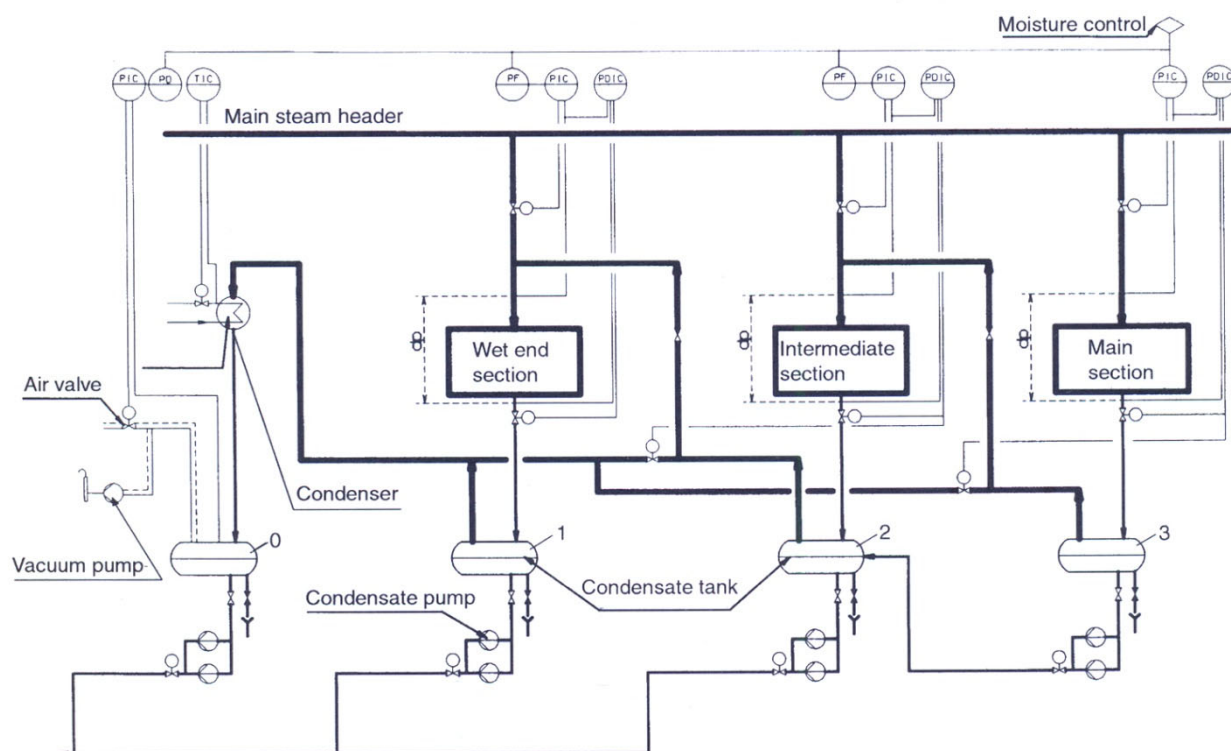
Questo livello zero è sempre presente ed è possibile modificarne la quota, controllando il flusso di aria secca in ingresso cappa. Per limitare infiltrazioni d'aria nella cappa tale livello dovrebbe essere mantenuto sopra i livelli di ingresso ed uscita del nastro di carta nella zona presse e pope, e quelli delle grandi aperture. Se il flusso d'aria immesso è insufficiente, il livello zero si sposta in alto con aspirazione di aria fredda dall'esterno cappa, abbassamento del punto di rugiada e pericolo di condensazione del vapore d'acqua. Per contro una eccessiva immissione d'aria crea una sovra pressione eccessiva, abbassa il livello zero con fuoriuscita dalla cappa di aria calda e umida.



5. VAPORE E RECUPERO CONDENSA

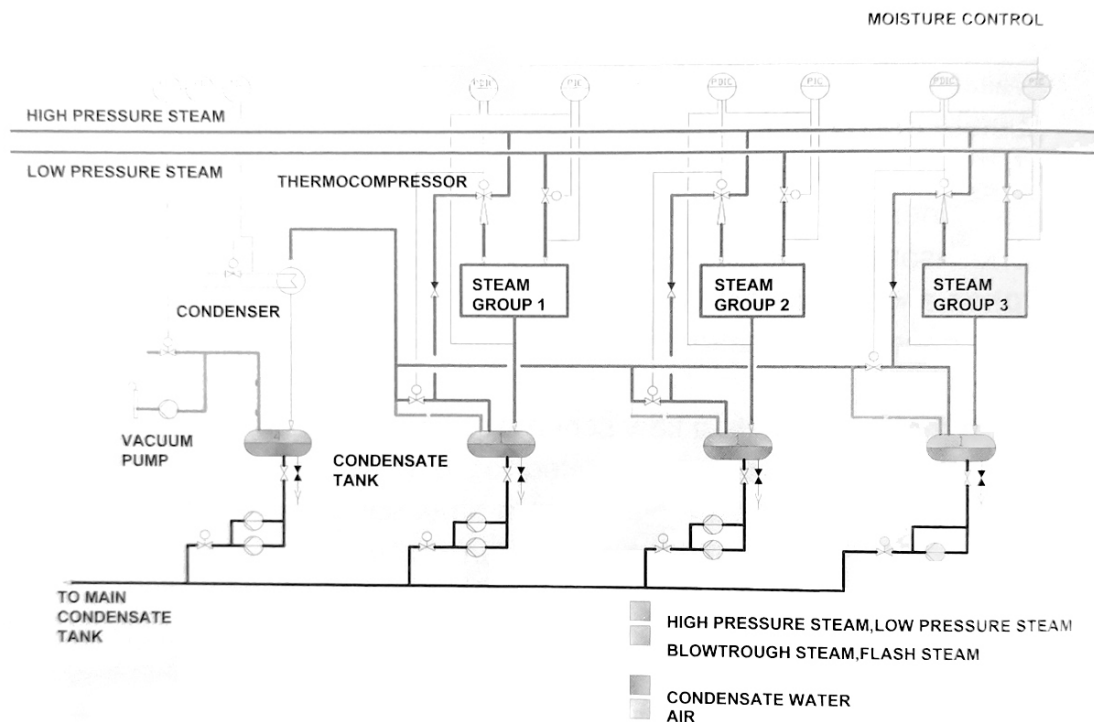
In una macchina continua vengono impiegate due tipologie di impianto vapore e recupero condensa, a cascata o termocompressore (o combinazione di questi), entrambi distribuiscono il vapore in seccheria perché ceda il calore latente agli essiccatori in modo controllato.

Il sistema a cascata è usato con linee vapore a bassa pressione e dove è previsto il recupero condensa con sifone stazionario.

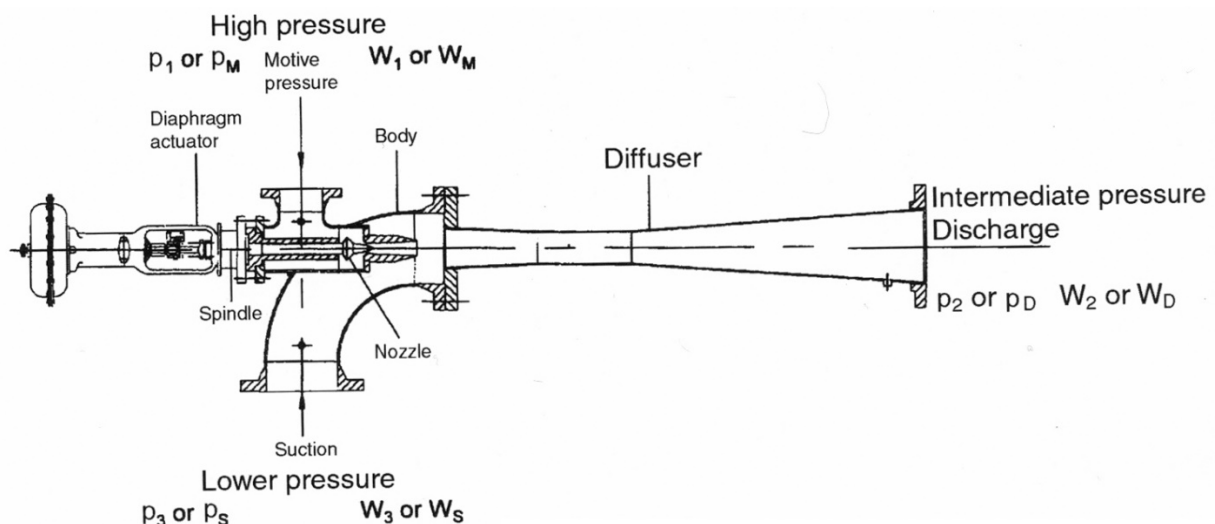


Una configurazione a cascata può prevedere ad esempio la suddivisione della seccheria in più gruppi termici a pressione decrescente, principale, intermedio ed iniziale (wet-end), e la presenza di un sistema di condensazione a vuoto. Il gruppo principale riceve il vapore necessario direttamente dalla condotta principale. Circa metà degli essiccatori fanno parte di tale gruppo, che può essere a sua volta suddiviso in sottogruppi per meglio gestire pressione vapore e recupero condensa. La condensa viene raccolta in un serbatoio che la separa dal vapore passante. Da qui vapore passante (blow-through) e nascente (flash), integrati con vapore vivo, confluiscono nel gruppo intermedio sfruttando il differenziale negativo di pressione che deve essere mantenuto col gruppo principale. Stesso discorso vale per il flusso di vapore che confluisce dal gruppo intermedio a quello iniziale, sfruttando la minor pressione col gruppo intermedio. La condensazione del vapore è il meccanismo principale e semplice per ottenere il vuoto richiesto nel gruppo iniziale essendo il volume specifico dello stato gassoso maggiore di quello liquido, oltre a rilasciare calore di vaporizzazione. La funzione della pompa a vuoto posta a fine linea è di mantenere la depressione del sistema ed estrarre aria e gas non condensabili.

Nel sistema a termocompressore, usato in linee ad alta pressione e con sifoni rotazionali, la seccheria è suddivisa in gruppi termici indipendenti gli uni dagli altri, con presenza di condensatore e pompa a vuoto.



Il termocompressore è un dispositivo che usa il vapore della linea ad alta pressione per ricomprimere nel gruppo termico alla pressione desiderata il vapore passante e nascente, che esce dallo stesso gruppo. È formato da un corpo diffusore, da un ugello, un ago e un attuatore a diaframma che regola la posizione dell'ago. Il vapore vivo in ingresso si espande velocemente all'uscita dall'ugello che lo immette nella camera di aspirazione del vapore in uscita dal gruppo termico, riportandolo alla pressione desiderata.



6. CENNI DI TERMODINAMICA DELL'ARIA

Per meglio comprendere le problematiche connesse con l'evaporazione è necessario definire dei concetti propri della fisica tecnica e di termodinamica dell'aria umida, qui di seguito solo brevemente esposti.

Calore specifico

Il calore specifico misura la capacità termica dell'unità di massa di una sostanza ed è definito come la quantità di calore necessaria per variarne di un grado °C la temperatura.

Le sostanze che ci interessano sono le fibre dell'impasto e acqua, e assumeremo come calori specifici $c_f = 1,4 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ e $c_a = 4,2 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ rispettivamente.

Capacità termica ed energia interna (entalpia)

La capacità termica di un corpo, o di sistema fisico in generale, è una valutazione della sua energia interna, ed è dato dal prodotto tra la massa e il calore specifico

$$C = m c_s$$

Se moltiplichiamo tale quantità per la temperatura del corpo otteniamo una valutazione della sua energia interna (o entalpia) a quella temperatura

$$h = m c_s T$$

che equivale al calore necessario per portare la sua massa alla temperatura T , al netto dell'energia richiesta per i passaggi di stato.

Calore latente

A seconda della temperatura, una sostanza può trovarsi allo stato solido, liquido o aeriforme. Esistono delle temperature caratteristiche per ciascuna sostanza in corrispondenza delle quali si verifica il cambiamento di stato. Nel caso dell'acqua, sostanza di nostro interesse (la fase solida è rappresentata dal ghiaccio, quella aeriforme dal vapore).

Alla pressione atmosferica $P_0 = 1 \text{ atm}$, si hanno i valori di $0 \text{ } ^\circ\text{C}$ e $100 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Durante il cambiamento di stato la temperatura rimane costante, e il calore ceduto o assorbito è proporzionale alla massa per un coefficiente proprio della sostanza chiamato calore latente.

$$q = m L$$

Per l'acqua il calore latente di evaporazione vale circa 2.310 kJ/kg

Umidità dell'aria

Consideriamo l'aria umida da un punto di vista fisico come una miscela tra vapore d'acqua condensabile, e un componente gassoso ideale, l'aria secca, a sua volta miscela di altri gas (tra i quali prevalgono azoto e ossigeno), e definiamo alcune grandezze che la definiscono:

- umidità specifica, o grado di umidità, è definita dal rapporto tra la massa di vapore d'acqua e la massa d'aria secca contenuta nello stesso volume;
- umidità relativa è definita come rapporto tra la massa di vapore d'acqua presente in un certo volume di aria umida, e la massa di vapore contenibile in condizione di saturazione;
- grado di saturazione è il rapporto tra l'umidità specifica e quella a saturazione nelle stesse condizioni di temperatura e pressione;
- umidità assoluta e massima definiscono le masse di vapore d'acqua contenute nell'unità di volume di aria umida e satura rispettivamente.

Entalpia dell'aria umida

Nell'ipotesi dell'aria intesa come miscela ideale di gas e vapore, la sua entalpia può essere espressa come somma delle entalpie della componente aria secca e vapore d'acqua, risulta dunque

$$h = h_{aria} + x h_{vapore}$$

Assumendo come stato a valore di entalpia nullo il gas ideale a $T_0 = 273,15$ K, risulta

$$h_{aria} = c_{aria} (T - T_0)$$

Si assume per l'acqua lo stato ad entalpia nullo quello a liquido saturo a $T_0 = 273,15$ K, quindi

$$h_{vapore} = r_0 + c_{vapore} (T - T_0)$$

essendo r_0 il suo calore di vaporizzazione a $T_0 = 273,15$ K e c_{vapore} il calore specifico del vapore surriscaldato a pressione costante.

Per i calcoli si assumono i seguenti valori:

$$c_{aria} \quad 1,01 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

$$r_0 \quad 2500 \text{ kJ/kg}$$

$$c_{vapore} \quad 1,88 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

7. BILANCIO ENERGETICO

Il consumo specifico di una macchina continua varia in base alla tipologia di impianto e al tipo di produzione cartaria. Valori indicativi di energia per tonnellata si aggirano sui 2500_5500 MJ di vapore richiesto in seccheria e circa 1800_2700 MJ di energia elettrica. Circa 80% dell'energia consumata in seccheria è sotto forma di energia termica, indirizzata principalmente ai soli cilindri essiccatori.

Parte dell'energia viene espulsa con l'aria esausta (fumane), di questa si riesce a recuperare una quota valutabile in 30 MW, rimpiegandola per preriscaldare aria e acqua di processo.

La richiesta di energia termica può essere stimata applicando semplici leggi di bilancio di massa ed energia, calcolando i singoli flussi energetici richiesti al processo di asciugatura qui di seguito esposti.

Bilancio energetico della massa fibrosa attraverso la seccheria:

$$q_f = \dot{m}_f (h_{f2} - h_{f1})$$

$$\dot{m}_f = g_{fs} v f$$

$$h = c_f T$$

con q_f	calore ceduto per riscaldare le fibre (kW)
$\dot{m}_f$	flusso massa fibre secche (kg/s)
g_{fs}	grammatura secca (g/m ²)
v	velocità macchina (m/min)
f	formato macchina (m)
h_{f1} e h_{f2}	entalpia fibre in ingresso ed uscita (kJ/kg)
c_f	calore specifico fibre (1,4 kJ/kg °C)
T_1 e T_2	temperatura in ingresso ed uscita (°C)

Bilancio energetico dell'umidità residua:

$$q_a = \dot{m}_a (h_{a,2} - h_{a,1})$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_t u_2$$

$$h = c_a T$$

con q_a	calore ceduto per riscaldare l'acqua residua (kW)
$\dot{m}_a$	flusso massa acqua residua (kg/s)
$\dot{m}_t$	flusso totale (kg/s)
u_2	umidità in uscita

h_{a1} e h_{a2} entalpia acqua in ingresso ed uscita (kJ/kg)
 c_a calore specifico acqua (4,19 kJ/kg °C)

Flusso termico per portare l'acqua evaporata alla temperatura di evaporazione:

$$q_{ae} = \dot{m}_e c_a (T_e - T_1)$$

$$\dot{m}_e = \dot{m}_f (u_1 - u_2)$$

con q_{ae} calore ceduto per riscaldare la frazione di acqua evaporata (kW)
 $\dot{m}_e$ flusso massa acqua evaporata (kg/s)
 T_e temperatura evaporazione (°C)
 m_e massa acqua evaporata (kg)
 u_1 e u_2 contenuto acqua in ingresso ed uscita (%)

Il calore necessario per far evaporare la massa d'acqua evaporata vale:

$$q_e = \dot{m}_e L_v$$

con q_e calore richiesto per evaporazione (kW)
 L_v calore latente di evaporazione (2310 kJ/kg)

L'acqua evaporata raggiunge poi la temperatura di estrazione con le fumane:

$$q_{ex} = \dot{m}_e c_v (T_{ex} - T_e)$$

con q_{ex} calore del vapore d'acqua in uscita (kW)
 c_v calore specifico del vapore d'acqua (1,88 kJ/kg °C)
 T_{ex} temperatura espulsione fumane (°C)

Il bilancio delle masse dei flussi d'aria in ingresso, uscita, infiltrazioni nella cappa, e quello d'acqua vale:

$$\dot{m}_{ex} x_{ex} = \dot{m}_{in} x_{in} + \dot{m}_p x_p + \dot{m}_e$$

$$\dot{m}_{ex} = \dot{m}_{in} + \dot{m}_p$$

$$\dot{m}_p = \dot{m}_{ex} p$$

con $\dot{m}_{ex}$ flusso aria espulsa dalle fumane (kg aria secca/s)
 $\dot{m}_{in}$ flusso aria ingresso (kg aria secca/s)
 $\dot{m}_p$ flusso aria infiltrazioni (kg aria secca/s)
 x_{ex} aria umida espulsa (kg acqua/kg aria secca)
 x_{in} aria umida in ingresso (kg acqua/kg aria secca)
 x_p aria umida infiltrazioni (kg acqua/kg aria secca)
 p perdite (%)

Bilancio energetico dell'aria in ingresso e poi espulsa:

$$q_{in} = \dot{m}_{in} (e_{in2} - e_{in1})$$

$$e_{in} = (c_{aria} + c_v x_{in}) T + r_a x_{in}$$

con q_{in} calore richiesto per riscaldare l'aria in ingresso (kW)

e_{in} entalpia in ingresso ed uscita della massa d'aria espulsa (kJ/kg aria secca)

c_{aria} calore specifico dell'aria (1,01 kJ/kg aria secca °C)

r_a calore di evaporazione acqua a 0°C (2500 kJ/kg)

Bilancio energetico del flusso d'aria per infiltrazioni nella cappa tra ingresso ed espulsione:

$$q_p = \dot{m}_p (e_{in2} - e_{in1})$$

$$e_p = (c_{aria} + c_v x_p) T + r_a x_p$$

con q_p calore richiesto per scaldare l'aria di infiltrazione

x_p aria per infiltrazioni e dal sotto macchina (circa 30% dell'aria espulsa)

Parte del calore va perso per trasmissione termica attraverso le pareti (al piano macchina ed interrato) della cappa ed il suo pavimento:

$$q_c = k A (T_e - T_i)$$

con q_c calore perso attraverso superfici cappa (kW)

k coefficienti di trasmissione termica pareti e pavimento cappa che assumiamo pari a 3,0 W/m² °C e 8,0 W/m² °C rispettivamente

A superfici pareti e pavimento (m²)

T_e e T_i temperature esterna ed interna cappa, per pareti e pavimento (°C)

ESEMPIO NUMERICO

Il seguente esempio numerico, applicando le formule di bilancio esposte sopra, da una stima della richiesta termica per una seccheria di macchina continua simile per tipologia di produzione e dimensioni a quella di Villorba (TV) di Burgo Group, dove lavoro.

Dati macchina:

- grammatura secca	42,0 g/m ²
- umidità in uscita	4,0 %
- formato carta	4,5 m
- velocità macchina	1300 m/minuto
- secco in uscita presse	48 %
- temperatura foglio ingresso seccheria	40 °C

- temperatura foglio uscita seccheria	85 °C
- temperatura media interna seccheria	80 °C
- aria in uscita (fumane)	82 °C e 0,160 kg acqua/kg aria secca
- aria ingresso seccheria	70 °C e 0,020 kg acqua/kg aria secca
- aria infiltrazioni e da sotto macchina	25 °C e 0,015 kg acqua/kg aria secca

Le dimensioni della cappa sono di circa 41 m in lunghezza, 8,5 m in larghezza, per 6,0 m di altezza al piano macchina e 4,0 m nel sotto macchina. Assumo come temperatura interna ed esterna delle pareti al piano macchina i valori di 85 °C e 25 °C rispettivamente, mentre per il sotto macchina 45 °C e 20 °C.

Otteniamo quindi i seguenti valori numerici espressi in kW, dai quali prevale nettamente la quota di calore necessario per far evaporare l'acqua:

q_f	258 kW
q_a	32 kW
q_{ae}	744 kW
q_e	10.256 kW
q_{ex}	17 kW
q_{in}	394 kW
q_p	619 kW
q_c	270 kW

Totale	12.590 kW
---------------	------------------

8. RECUPERO CALORE

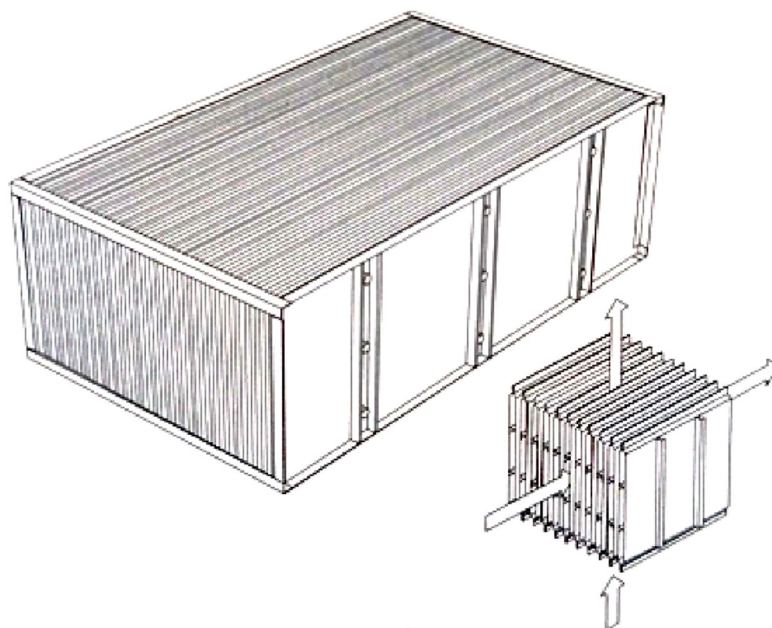
Gli impianti aerotermici sulla macchina continua hanno lo scopo di garantire la corretta ventilazione della seccheria e di condizionare l'ambiente nel quale avviene l'asciugamento della carta. Come conseguenza, l'impianto aerotermico deve mantenere il corretto bilancio dei flussi d'aria in ingresso ed in uscita dalla cappa chiusa. Il vapore acqueo evaporato dalla seccheria deve essere captato dal sistema di aspirazione delle fumane ed espulso dalla cappa verso l'esterno. L'impianto aerotermico, attraverso i sistemi di ventilazione, genera anche l'aria calda e secca necessaria ai sistemi di stabilizzazione del foglio e alla sua asciugatura. Per questi motivi riveste un ruolo fondamentale nella produttività e nel controllo dei consumi energetici, oltre a determinare le corrette condizioni ambientali per gli operatori nella sala macchina. Il contenuto di energia delle fumane espulse dalla cappa di una macchina continua rappresenta una quota notevole del bilancio energetico della cartiera e, se opportunamente sfruttato nello stesso processo produttivo che lo genera, diventa uno strumento in grado di ridurre i costi.

L'impianto aerotermico per poter fornire le massime prestazioni deve essere integrato con una cappa chiusa coibentata in modo da far raggiungere alle fumane estratte un elevato contenuto energetico (sull'ordine di 90°C e 150 gr acqua/kg aria secca), in questo modo parte dell'energia espulsa dalla seccheria può essere recuperata con il massimo rendimento.

E' necessaria anche un'interazione con l'impianto vapore e condensa, in quanto è possibile sfruttare l'energia contenuta nelle condense calde e nel vapore nascente evitando che questi, inviati a serbatoi non in pressione, vengano dispersi in atmosfera.

Il recupero calore dall'aria esausta viene realizzato principalmente attraverso gli scambiatori aria-aria, e aria-acqua.

Lo scambiatore di calore aria-aria rappresenta la soluzione di base per il recupero di calore dalle fumane espulse. La fumana viene fatta passare all'interno di tubi a sezione circolare (oppure piastre) e cede la sua energia termica al flusso d'aria fatto passare perpendicolarmente ad esso. L'aria riscaldata all'esterno dei tubi viene utilizzata per essere inviata alla pocket ventilation o al riscaldamento del controsoffitto della sala macchina. Il lato fumana del recuperatore è pulibile dai depositi di fibra da un sistema di lavaggio automatico in quanto i tubi (o le piastre) sono a superficie liscia. La geometria del recuperatore è basata su un sistema a moduli i quali, una volta composti in base al fabbisogno di scambio termico, formano il recuperatore vero e proprio con rapporto tra i flussi incrociati di espulsione ed immissione di circa 8:1.



Per incrementare e rendere più flessibile l'utilizzo dell'energia recuperata dall'aria di espulsione della cappa sono stati sviluppati dei recuperatori di calore di tipo aria-acqua.

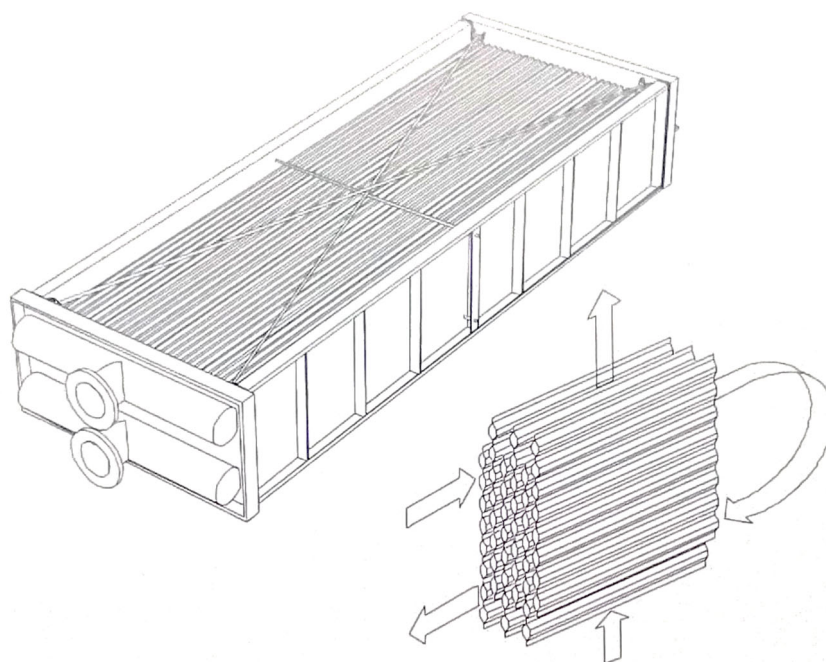
Il riscaldamento di acqua per mezzo delle fumane permette una maggiore flessibilità nella distribuzione del calore recuperato in quanto, trattandosi di un circuito idraulico, la rete di trasporto risulta più semplice ed economica. Il calore viene trasferito principalmente per condensazione sul lato fumana, e per convezione sul lato acqua.

Particolare attenzione è posta alla pulizia del recuperatore dal lato fumana per consentire al sistema di lavaggio automatico una buona efficienza.

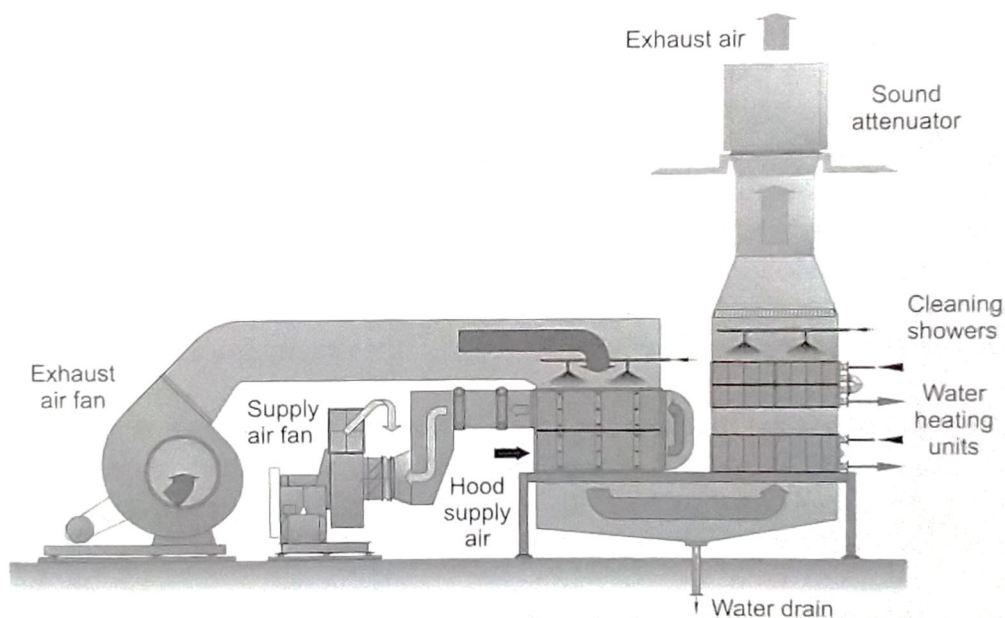
Vengono realizzati moduli con piastre di scambio in acciaio inossidabile, dove all'interno della piastra viene ricavato il circuito idraulico nel quale scorrerà liquido riscaldato. Questo sistema permette di ottenere basse perdite di carico sul lato fumana e una superficie liscia adatta ad evitare l'intasamento e l'accumulo di sporco. Le piastre possono essere collegate in serie per ottenere diversi stadi di recupero in base al carico termico di scambio.

In un'altra tipologia l'acqua circola all'interno di tubi connessi da lamelle per aumentare la superficie di scambio termico.

Anche per questo scambiatore il rapporto tra flusso aria espulso e volume d'acqua riscaldata è circa 1:8.

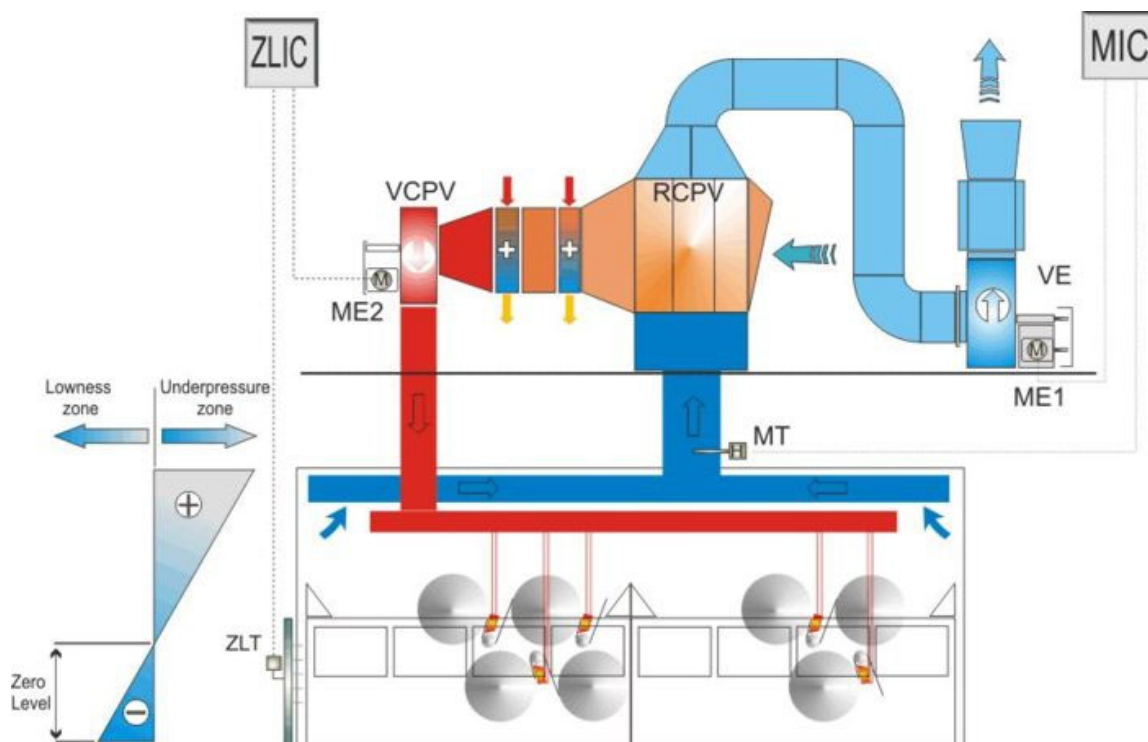


L'approccio al recupero calore prevede la combinazione di entrambe le tipologie di scambiatori in un'unica struttura dove la fumana in uscita incrocia prima lo scambiatore aria-aria, e poi quello aria-acqua.



Monitorando i parametri di funzionamento degli impianti aerotermici, quali flusso d'aria in ingresso e uscita, rispettive umidità e temperatura, e livello zero in seccheria, si ottengono il controllo e la riduzione dei consumi energetici in tutte le differenti fasi di produzione.

Per questo è importante che l'impianto aerotermico disponga delle necessarie regolazioni automatiche per una ottimizzazione delle variabili nell'ottica del risparmio energetico. Fondamentalmente il quantitativo di aria estratta dalla cappa deve essere funzione del carico evaporante della seccheria per una determinata produzione. Questa correlazione permette di per sé un risparmio di calore e energia elettrica limitando la portata d'aria estratta dai ventilatori; per questo i quantitativi di aria estratta ed immessa devono essere regolati automaticamente da un controllo di processo in grado di valutare e mantenere i rapporti corretti.



9. BIBLIOGRAFIA

- “Introduzione ai cicli di produzione cartaria” di Paolo Zaninelli, Scuola Cartaria San Zeno, Verona.
- Appunti di lezione del “27° Corso di tecnologia per tecnici cartari, anno 2021”, Scuola Cartaria San Zeno, Verona.
- “Papermaking Part 2, Drying” di Markku Karlsson.
- “Termodinamica applicata” di Cavallini A. e Mattarolo L., cleup editore.