

## Capitolo 29

**Nelle turbine a reazione la conversione del salto entalpico avviene, tutta o in parte, entro i condotti mobili della girante.** Per le turbine a reazione parziale l'equazione fondamentale assume la forma:

$$l_i = l_a + l_r \quad (29.1), \quad l_a = \frac{c_1^2 - c_2^2}{2}, \quad l_r = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2}$$

dove  $l_a$  è il **lavoro per azione** e  $l_r$  è il **lavoro per reazione**. La differenza con le macchine idrauliche si riscontra nell'assegnazione del valore del grado di reazione ( $G = l_r / l_i$ ) che nelle turbine idrauliche oscilla in funzione del salto netto disponibile, mentre nelle motrici a vapore è intorno a 0,5, indipendentemente dalla caduta entalpica che la macchina può utilizzare. Per  $G = 0,5$  si ottiene:

$$\frac{c_1^2 - c_2^2}{2} = \frac{w_2^2 - w_1^2}{2} \quad (29.5)$$

che stabilisce l'eguaglianza fra la variazione delle velocità assolute e relative del fluido operante.

Consideriamo una **turbina elementare a reazione** con salto entalpico disponibile  $(\Delta h)_t$  che dovrà essere convertito in energia cinetica nel distributore  $(\Delta h)_a$  e nella girante  $(\Delta h)_r$ , in parti eguali e se con  $\bar{c}_{1(a)}$  si indica la velocità teorica di efflusso di una turbina ad azione monoruota, il vapore effluisce con velocità:

$$\bar{c}_{1(r)} \cong \sqrt{2 \cdot (\Delta h)_a} \quad \text{e} \quad \bar{c}_{1(r)} = \frac{\bar{c}_{1(a)}}{\sqrt{2}} \quad (29.6)$$

Poiché metà del salto entalpico disponibile deve ancora essere convertito in energia cinetica il fluido, attraversando i condotti mobili, incrementa la propria velocità da  $w_1$  a  $w_1 > w_2$  sviluppando lavoro per reazione. Se il grado di reazione è 0,5, deve essere soddisfatta la (29.5), il che equivale a imporre:

$$\bar{c}_1 = \bar{w}_2 \quad (29.7)' \quad \bar{c}_2 = \bar{w}_1 \quad (29.7)''$$

**Quindi i triangoli delle velocità all'uscita e all'entrata sono simmetrici rispetto all'asse longitudinale della macchina. Di riflesso, le palette del distributore e della girante hanno la stessa conformazione ma disposizione simmetrica.**

Riferendoci a una generica coppia distributore girante, il rendimento della palettatura è il rapporto:

$$\bar{\eta}_p = \frac{l_i}{(\Delta h)_t} \quad (29.8)$$

$$\bar{\eta}_p = \frac{2 \cdot k_u \cdot (2 \cdot \cos \alpha_1 - k_u)}{2 / \varphi^2 - 1 + k_u \cdot (2 \cdot \cos \alpha_1 - k_u)} \quad (29.10)$$

valido sia per la turbina reale che per quella ideale (in cui  $\varphi = 1$ ),  $l_i$  è il lavoro interno sviluppato.

Affinché sia minima la perdita per energia cinetica allo scarico (**deve essere minima l'intensità del vettore  $\bar{c}_2$** ), le palette fisse e quelle mobili debbono offrire il minimo urto al getto fluido che le investe. Il coefficiente della velocità periferica per le turbine a reazione e il rendimento della palettatura diventano:

$$\bar{k}_u = \frac{\bar{u}}{c_1} = \frac{\bar{c}_1 \cdot \cos^2 \alpha_1}{c_1}$$

$$\bar{\eta}_{p \max} = \frac{2 \cdot \cos^2 \alpha_1}{1 + \cos^2 \alpha_1} \quad (29.12)$$

Dal rapporto tra la (29.12) e la (28.12) si ha:

$$\bar{\eta}_{p \max(r)} = \frac{2}{1 + \cos^2 \alpha_1} \cdot \bar{\eta}_{p \max(a)}$$

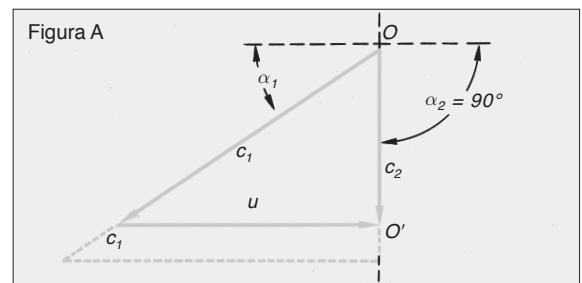
**il rendimento massimo offerto da un elemento a reazione è superiore (a parità di altre condizioni) a quello di una turbina ad azione monoruota.**

Nelle condizioni di massimo rendimento (figura A) espresse da  $u = \bar{c}_1 \cdot \cos \alpha_1$ , il lavoro interno assume anch'esso

il valore massimo  $l_i = \bar{u}^2$  (29.13). Le resistenze passive, inevitabili in una macchina reale, non modificano sostanzialmente l'espressione (29.11) della velocità di massimo rendimento dedotta per il caso ideale. Il massimo valore del rendimento della palettatura, valida anche per il caso ideale ( $\varphi = 1$ ), è:

$$\bar{\eta}_{p \max} = \frac{2 + \cos^2 \alpha_1}{\varphi^2 - 1 + \cos^2 \alpha_1} \quad (29.14)$$

L'inconveniente delle alte velocità periferiche, già riscontrato nelle turbine ad azione, si presenta ancor più sensibile in quelle a reazione. Tenendo presente la relazione che lega le velocità di efflusso della turbina a reazione e una turbina ad azione monoruota ( $c_{1(r)} = c_{1(a)} / \sqrt{2}$ ), **la velocità periferica di un elemento a reazione è 1,41 volte maggiore di quella che compete a una turbina ad azione monoruota di caratteristiche simili.** Le turbine multiple sono formate da una serie di elementi a reazione, ciascuno dei quali elabora una piccola parte del salto entalpico disponibile. Il numero degli elementi risulta in genere molto ele-



vato, tale comunque da assicurare il voluto valore della velocità periferica. Confrontando una turbina a reazione e una ad azione, a parità di velocità periferica, si ottiene:

$$(\Delta h)_r = \frac{(\Delta h)_a}{2} \quad (29.16)$$

**A parità di velocità periferica, un singolo elemento di una turbina a reazione utilizza metà salto entalpico di una turbina ad azione monoruota.**

A favore della turbina a reazione multipla vi è:

- il maggior rendimento della palettatura di un singolo elemento;
- il recupero di parte dell'energia cinetica posseduta dal vapore che abbandona le palette mobili di una girante per immettersi nel distributore successivo.

Detti  $\eta_{p(t)}$  il rendimento della turbina nel suo complesso e  $\eta_p$  il rendimento del singolo stadio, si ha:  $\eta_{p(t)} = f \cdot \eta_p$  (29.17) dove  $f$  (1,03 ÷ 1,12) è il **fattore di recupero** che contribuisce ad aumentare il rendimento della macchina multipla. Il fattore di recupero varia dal tipo di motrice, dalle caratteristiche fisiche assunte dal vapore all'ammissione e allo scarico e dalla ragione inversa al rendimento della palettatura di un singolo stadio.

Le caratteristiche di una turbina multipla a reazione sono:

- l'ammissione non può essere parzializzata;
- la costruzione delle giranti singole è troppo onero-

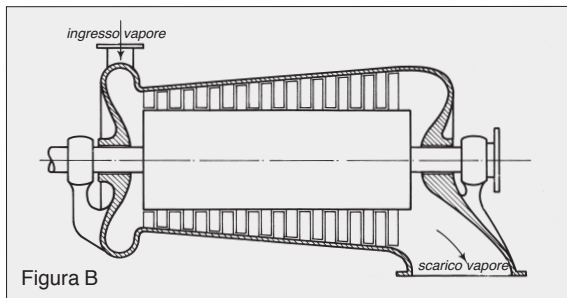


Figura B

sa e perciò si usano i rotori a tamburo (figura B);

- il volume specifico del fluido operante cresce progressivamente dall'ingresso all'uscita della motrice che comporta un graduale aumento della sezione di passaggio entro i singoli elementi, aumento che viene realizzato in modi diversi:
  - tamburo cilindrico con palette gradualmente crescenti in altezza;
  - tamburo conico con palette crescenti più moderatamente;
  - tamburo a gradini di diverso diametro;
  - frazionamento della turbina in più corpi.
- fra la sezione a monte e quella a valle di ogni corona mobile esiste una lieve differenza di pressione

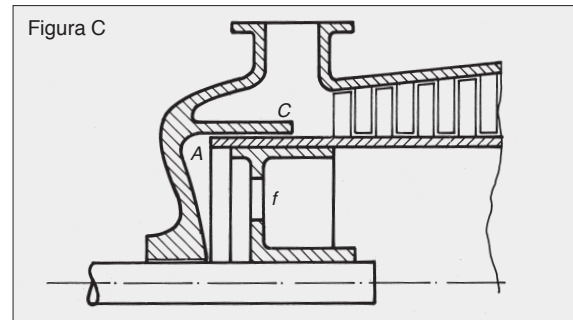


Figura C

che produce spinta sul rotore; fra la sezione di ingresso e di scarico la notevole differenza di pressione genera una spinta enorme; il problema fu risolto con l'installazione dei **cilindri equilibratori** (figura C) nella testata anteriore della turbina: poiché la spinta dipende anche dalla superficie su cui agisce il fluido, prolungando la parte anteriore del tamburo e inserendo l'estremità in una superficie cilindrica (C) fissa alla testata della macchina, si elimina la maggior parte della spinta sempreché il tamburo sia provvisto di una serie di fori (f) che pongono in comunicazione la camera A con lo scarico della macchina, in modo da avere la stessa pressione  $p_1$ . La piccola frazione della spinta che permane (le palette presentano una certa superficie sulla quale agisce il vapore), si può compensare o con un reggispianta o creando una contospinta con una maggiorazione del diametro del cilindro equilibratore. Spesso la spinta assiale viene assorbita da un cuscinetto Mitchell che consente di limitare le perdite per attriti meccanici;

- la tenuta fra l'estremità delle palette e la cassa della turbina è importate per la differenza di pressione esistente fra le due sezioni estreme della palette turba mobile; i giochi debbono essere ridotti al minimo per limitare le fughe di vapore e contenere il rendimento volumetrico entro valori accettabili.

L'inconveniente delle turbine a reazione multiple è il notevole numero di stadi con cui si fraziona il salto entalpico per limitare la velocità periferica (ogni stadio elabora cadute entalpiche di pochi kJ). Nel campo delle alte e altissime potenze (salti entalpici disponibili dell'ordine di 600 ÷ 1000 kJ/kg) la turbina a reazione viene sostituita da turbine miste.

Le **turbine miste** sono composte da un primo gruppo funzionante ad azione e un secondo (pressione bassa)co-

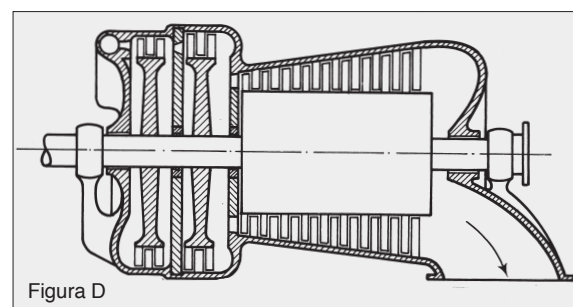


Figura D

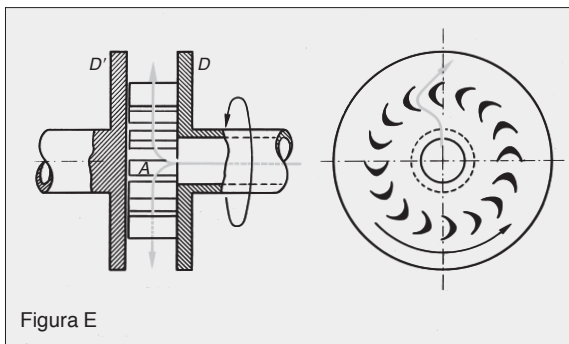


Figura E

stituito da un tamburo a reazione: ad esempio (figura D) due ruote Curtis e poi palette gradualmente crescenti.

I risultati che si conseguono sono:

- la velocità periferica può assumere valori ridotti;
- l'ammissione è parzializzata e ciò consente una buona regolazione della potenza;
- il salto entalpico viene sfruttato prevalentemente nella parte ad azione;
- la cassa risulta di spessore e ingombro contenuto;
- i diaframmi separatori e i relativi organi di tenuta sono ridotti a un unico elemento;
- il tamburo a reazione, impiegato nella parte di bassa pressione, evita di costruire palette troppo piccole nelle prime ruote e rende tollerabili le fughe di vapore;
- la spinta assiale è ridotta e dovuta solamente alla

parte a reazione.

Nelle turbine a flusso radiale, se immettiamo vapore in pressione entro l'albero (figura E), questo sboccano nell'ambiente (A) compreso fra i due dischi tende a espandersi verso la periferia, incontra la serie di palette, si insinua entro i condotti da queste generati e compiendo una deviazione sfugge all'esterno, esercitando contemporaneamente un'azione di spinta sulla faccia interna delle palette e un moto di rotazione al disco. Per sfruttare a fondo l'energia del vapore, si aumentano le corone di palette, in modo che il fluido le attraversi successivamente incrementando la spinta tangenziale, e interponendo, fra due corone successive, una serie di palette *deviatrici* (fissate alla faccia interna del disco D') per far riprendere al getto di vapore la direzione più adatta per sviluppare la spinta sulle palette mobili e per porre in rotazione anche il controdisco: ciascuna corona di palette funziona contemporaneamente da **ricevitrice** e da **deviatrice**.

La turbina radiale centripeta non possiede pertanto un distributore *fisso* e la conversione del salto entalpico disponibile avviene **interamente entro i condotti mobili (turbina a reazione totale)**. La più interessante realizzazione di motrice a flusso radiale è la turbina **Ljungström** i cui vantaggi sono: regime di rotazione abbastanza limitato senza pregiudicare il rendimento, peso e ingombro contenuti, minori perdite volumetriche, minori sollecitazioni meccaniche e facilità di regolazione. Gli svantaggi sono: potenza limitata, difficoltà di manutenzione e smontaggio ed esistenza di due alberi controrotanti.