

Lezione 12

Ugello

12.1 Generalità

L'ugello è il componente dei motori a getto nel quale si ha trasformazione di energia termica in energia cinetica al fine di produrre la spinta mediante l'espulsione di fluido propulsivo ad alta velocità. Tale trasformazione avviene attraverso un processo di espansione, per cui la trasformazione di cui sopra risulta controllata dalla pressione.

Il comportamento dell'ugello può essere studiato in prima approssimazione attraverso le equazioni del flusso quasi-monodimensionale, sotto le ipotesi di flusso isentropico, stazionario, di un fluido propulsivo assimilabile ad un gas ideale. Come è stato già visto, queste equazioni permettono di ricavare una relazione tra le condizioni di flusso e la geometria del condotto. In particolare, la geometria dell'ugello stabilisce la portata in massa di fluido che può scorrere attraverso il motore.

Si utilizzano differenti tipi di ugello a seconda delle applicazioni. In particolare, nelle applicazioni aeronautiche (cioè nei differenti motori della famiglia dei turbogas), l'ugello è posizionato a valle della turbina, ed il suo ruolo, pur rimanendo qualitativamente lo stesso, risulta quantitativamente diverso a seconda che il motore sia uno statoreattore, un turbogetto, un turbofan, un turboelica od un turboalbero. Infatti nello statoreattore l'intero salto entalpico $h_4 - h_9$ viene sfruttato nell'ugello, mentre nei turbogetti solo il salto entalpico $h_5 - h_9$ è utilizzato nell'ugello – espandendo il fluido fino alla pressione ambiente, in quanto il salto $h_4 - h_5$ è utilizzato in turbina per produrre il lavoro necessario ad azionare il compressore. L'entità del salto $h_4 - h_5$ utilizzata in turbina risulta maggiore per i turbofan (nei quali la turbina deve azionare, oltre al compressore, anche il fan), ed in particolare nei turboelica rappresenta, come abbiamo visto, l'80 – 90 % del salto entalpico disponibile. Nei turboalbero poi l'intero salto entalpico disponibile è utilizzato in turbina, per cui in questo caso l'ugello funge semplicemente da condotto di scarico.

Per queste applicazioni aeronautiche, attualmente un notevole sforzo è dedicato a ridurre il rumore derivante dal getto. In questo contesto, è stato recentemente proposta l'adozione dei cosiddetti *chevron nozzles* Fig. 12.1, che consentono di ridurre significativamente la rumorosità, con una perdita di spinta limitata allo 0.25% circa.

In ogni caso il flusso all'uscita della turbina si trova a pressione più elevata di quella ambiente, ed a bassa velocità (regime subsonico). Lo studio dei flussi quasi-unidimensionali isentropici indica che per accelerare questo flusso subsonico la geometria del condotto deve essere convergente. Si considerano quindi nel seguito dapprima gli ugelli puramente convergenti, ampiamente utilizzati nei motori degli aviogetti commerciali.



Figura 12.1: Ugelli sperimentali per la riduzione del rumore (“chevron nozzles”, da <http://www.aerospace.nasa.gov/library/ar2001/arhtml/32.htm>).

12.2 Ugello convergente

Finora nello studio dei propulsori si è parlato di ugello adattato o, in alcuni casi, di ugello non adattato che espande fino a $u = u_e$ con $p_e \neq p_a$.

Per comprendere il comportamento di un ugello convergente, si supponga che la pressione totale a monte dell'ugello, indicata con p_0 , sia assegnata, mentre la pressione ambiente p_a viene fatta variare. Assumendo flusso isentropico si ha che la portata in massa attraverso l'ugello è data da (facendo riferimento alla sezione di gola dell'ugello – cioè di area minima – designata con l'indice t)

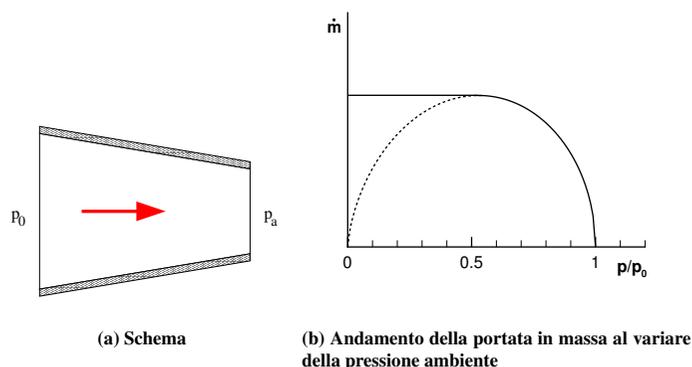


Figura 12.2: Ugello convergente.

$$\dot{m} = \rho u A = \rho_t u_t A_t = \frac{p_t M_t A_t}{\sqrt{RT_t/\gamma}} = \frac{p_0 A_t}{\sqrt{RT_0/\gamma}} \left(\frac{p_t}{p_0}\right) \left(\frac{T_0}{T_t}\right)^{\frac{1}{2}} M_t \quad (12.1)$$

dove la velocità è stata espressa come prodotto del numero di Mach per la velocità del suono, e la densità attraverso l'equazione di stato dei gas ideali. E' poi possibile mettere in relazione i valori locali

temperatura e pressione attraverso le espressioni

$$\left(\frac{p_0}{p_t}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{T_0}{T_t}\right) \quad \text{e} \quad \left(\frac{p_0}{p_t}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_t^2 \quad (12.2)$$

da cui si può esprimere il numero di Mach in gola come

$$M_t = \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_0}{p_t}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right]} \quad (12.3)$$

per cui la portata in massa viene espressa in funzione della pressione p_t in corrispondenza alla sezione di gola (che per un ugello convergente coincide con quella di uscita) nella forma

$$\dot{m} = \frac{p_0 A_t}{\sqrt{RT_0}} \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \left(\frac{p_t}{p_0}\right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_t}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}} \quad (12.4)$$

Perché ci sia flusso (verso l'esterno) la pressione ambiente deve essere inferiore a quella di ristagno a monte dell'ugello, ossia $p_a/p_0 < 1$. Considerando valori decrescenti di p_a/p_0 , a partire da 1, si osserva che \dot{m} cresce al diminuire di p_a/p_0 fino a raggiungere un massimo. Tale massimo si ha per

$$\frac{d\dot{m}}{d(p_t/p_0)} = 0 \quad (12.5)$$

ossia

$$\frac{d}{d(p_t/p_0)} \left\{ \left(\frac{p_t}{p_0}\right)^{\frac{2}{\gamma}} \left[1 - \left(\frac{p_t}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] \right\} = 0 \quad (12.6)$$

dalla quale si ricava la condizione

$$\left(\frac{p_t}{p_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma-1}{2}} \Rightarrow M_t = 1 \quad (12.7)$$

ossia che il flusso sia sonico sulla sezione di uscita. Continuando a diminuire p_a/p_0 , la (12.4) prevede che la portata diminuisca secondo il ramo decrescente tratteggiato in figura. Tuttavia, quello che invece si osserva sperimentalmente quando p_a/p_0 è ulteriormente ridotto al di sotto del valore che dà il massimo, è che la portata resta costante al valore massimo. Questo perché quando \dot{m} raggiunge il massimo si ha $M_t = 1$, e quindi ulteriori diminuzioni di p_a non possono essere avvertite dal flusso a monte, che rimane inalterato. Infatti, tali perturbazioni non possono più risalire a monte entro l'ugello in quanto la velocità all'uscita è pari alla velocità del suono (con la quale appunto si propagano le perturbazioni). Quindi per avere flusso sonico in gola, il valore di p_a/p_0 dovrà essere inferiore od al più uguale a

$$\frac{p_a}{p_0} = \frac{p_t}{p_0} = \frac{p^*}{p_0} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2}\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{-\frac{\gamma}{\gamma-1}} = 0.528 \quad (\text{per } \gamma = 1.4) \quad (12.8)$$

Se $p_a/p_0 < p^*/p_0$ l'ugello si dice saturato (o in *choking*), la pressione nella sezione di uscita è quindi pari a quella critica (indicata con l'asterisco).

La legge delle aree per flussi isentropici in condotti quasi-monodimensionali dà

$$\frac{A}{A^*} = \frac{1}{M} \left(\frac{1 + \delta M^2}{1 + \delta} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}} \quad (12.9)$$

che correla quindi il rapporto tra area della sezione generica e della sezione critica, al valore di M nella sezione generica considerata. I propulsori a getto subsonici hanno ugelli convergenti. Se si riprende l'espressione della spinta a punto fisso:

$$F = \dot{m}_a u_e + (p_e - p_a) A_e \quad (12.10)$$

si osserva che, fissate le condizioni a monte, la spinta cresce sempre al diminuire della pressione ambiente p_a . Possono verificarsi due differenti condizioni operative:

- se $p_a > p^*$, l'ugello è adattato. Essendo infatti il numero di Mach di uscita inferiore ad uno, sarà necessariamente $p_e = p_a$, quindi $F = \dot{m}_a u_e$. La portata in massa \dot{m}_a e la velocità d'uscita u_e crescono al diminuire di p_a ;
- se $p_a < p^*$, l'ugello è saturato, ossia la portata in massa ha raggiunto il massimo valore possibile, ed il valore del numero di Mach in uscita è pari ad uno; anche la velocità in uscita ha raggiunto il massimo. Quindi, la spinta impulsiva $\dot{m}_a u_e =$ rimane costante, mentre la spinta di pressione $(p_e - p_a) A_e$ cresce al diminuire della pressione ambiente (p_e ed A_e risultano costanti).

12.3 Ugello convergente-divergente

Quando il rapporto tra la pressione ambiente e la pressione totale all'uscita della turbina è minore di quello dato dalla (12.8), risulta conveniente utilizzare un ugello convergente-divergente per poter sfruttare più completamente il salto entalpico disponibile. Se il flusso nella sezione di gola, al termine della parte convergente dell'ugello, risulta critico (numero di Mach pari ad uno), per poter continuare l'espansione è necessario ricorrere ad un'ulteriore porzione di ugello, questa volta con pareti divergenti (si ricordi che per un flusso supersonico la velocità aumenta se l'area della sezione cresce). Quindi per accelerare il flusso a velocità supersoniche occorre un condotto convergente-divergente, il cosiddetto *ugello de Laval*. In Fig. 12.3 viene studiato il comportamento di un ugello siffatto al variare del rapporto p_a/p_0 .

Osserviamo innanzitutto che se la pressione ambiente p_a è uguale alla pressione totale, quindi alla pressione a monte dell'ugello (ove le velocità sono ancora basse, per cui la pressione statica quasi coincide con quella totale), non sussistendo una differenza di pressione attraverso l'ugello, evidentemente non c'è flusso (se poi addirittura fosse $p_a > p_0$ si avrà flusso dall'ambiente verso l'ugello). Per valori di p_a poco inferiori a p_0 , il flusso è subsonico lungo tutto l'ugello: la velocità va aumentando nella parte convergente dell'ugello, raggiunge un massimo (subsonico) in gola, e poi diminuisce nuovamente nel divergente (essendo appunto il flusso ancora subsonico). Quando, al diminuire della p_a , si raggiungono condizioni soniche in gola, la successiva evoluzione del flusso nel divergente può avvenire o attraverso una compressione subsonica, nel qual caso la pressione all'uscita dell'ugello è qui indicata come p_{sub} , oppure attraverso un'espansione supersonica, nel qual caso la pressione in uscita è indicata come p_{sup} .

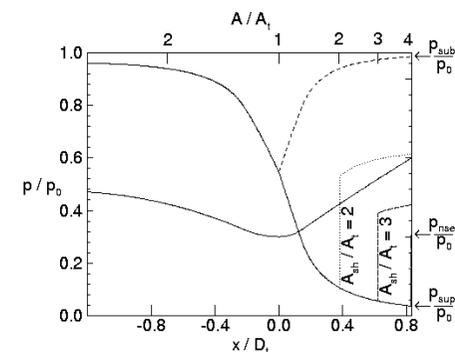


Figura 12.3: Andamento della pressione statica lungo un ugello convergente-divergente, per diversi valori del rapporto pressione ambiente/pressione totale.

E' quindi possibile avere, per flusso isentropico critico in gola, solo due possibili valori della pressione in uscita, p_{sub} oppure p_{sup} ; quale delle due condizioni (flusso rispettivamente subsonico o supersonico nel divergente) si stabilirà dipende dal valore della pressione ambiente. Se $p_a = p_{sub}$ si avrà evidentemente la soluzione subsonica nel divergente, mentre per $p_a = p_{sup}$ si instaurerà evidentemente la soluzione supersonica. Si noti che in tutte le condizioni sinora esaminate l'ugello è adattato, in quanto si è assunto che la pressione ambiente sia pari a quella di uscita dall'ugello. Se però $p_a \leq p_{sup}$, il flusso nel divergente non sarà in alcun modo alterato, in quanto le perturbazioni di pressione che provengono dall'ambiente non riescono a risalire entro l'ugello, in quanto il flusso è appunto supersonico. La pressione in uscita però non è più uguale a quella ambiente, per cui l'ugello non è più adattato; si parla di condizioni di *ugello sottoespanso* (perché il flusso è espanso meno di quanto richiede la condizione di adattamento). In queste condizioni quindi la portata in massa e la velocità all'uscita dell'ugello restano invariate, per cui la spinta impulsiva $\dot{m}_a u_e$ non varia, mentre nasce un termine di spinta di pressione $A_e (p_e - p_a)$. La possibilità di una biforcazione della soluzione deriva dal fatto che la soluzione in corrispondenza alla gola dell'ugello, quando questa è critica, assume la forma indeterminata 0/0, e quindi non dipende più solo dalle condizioni a monte, ma anche da quelle di pressione a valle (quindi dalla pressione ambiente). Resta da acclarare cosa accade quando la pressione ambiente assume valori compresi tra p_{sup} e p_{sub} , nel qual caso si parla di *ugello sovraespanso* (in quanto l'espansione dell'ugello è proseguita oltre la condizione di adattamento). In queste condizioni non può aversi una soluzione isentropica; per far sì che la pressione all'uscita dell'ugello eguagli il valore della pressione ambiente, dovrà necessariamente instaurarsi un urto entro la parte divergente dell'ugello. A valle dell'urto il flusso è nuovamente subsonico, per cui continuando a scorrere entro un condotto divergente subirà una ricompressione, fino a portarsi, in corrispondenza alla sezione di uscita, ad una pressione pari alla pressione ambiente. E' quindi la condizione di uguaglianza della pressione di uscita con la pressione ambiente la condizione che determina la posizione dell'urto nella parte divergente dell'ugello. Nella Fig. 12.3 sono indicati due possibili andamenti della pressione lungo l'ugello, in corrispondenza a due diversi valori del rapporto A_{sh}/A_t tra area della sezione dove si instaura l'urto, ed area di gola. Ovviamente attraverso l'urto si ha un forte incremento della pressione statica, come si nota dalla figura, ma anche una perdita di pressione totale, con conseguenze negative sulle prestazioni del motore. Una situazione limite si ha quando

l'urto normale si localizza in corrispondenza alla sezione di uscita dell'ugello; indichiamo con p_{nse} la pressione a valle dell'urto che si ha in questo caso (nse sta per *normal shock at exit*). Possiamo allora precisare quando detto sopra: quando la pressione ambiente è compresa tra p_{sup} e p_{nse} si ha formazione di un urto *esterno* all'ugello (che quindi non comporta ripercussioni sul flusso entro l'ugello; in particolare, si possono continuare ad usare tutte le espressioni valide per flusso isentropico per determinare la spinta), mentre quando la pressione ambiente è compresa tra p_{nse} e p_{sub} l'urto si localizza internamente all'ugello (e quindi non si possono più usare le formule per flusso isentropico).

La situazione descritta nel paragrafo precedente è quella che si ha sotto l'ipotesi di flusso quasi-monodimensionale. In realtà, nel caso in cui la pressione ambiente sia compresa tra p_{sup} e p_{sub} , si formano urti *obliqui* anziché normali, che non possono essere trattati da una descrizione quasi-monodimensionale. Ad ogni modo, il comportamento risulta qualitativamente analogo. Occorre comunque considerare che per effetto di urti obliqui può aversi la possibilità di separazione del flusso, vedi Fig. 12.4; tale eventualità può comportare perdite, e rischio di instabilità del flusso.

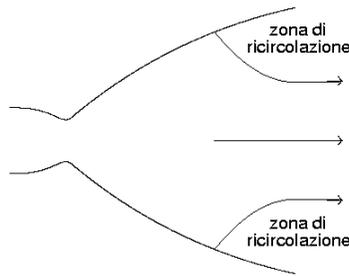


Figura 12.4: Separazione del flusso per effetto di urti obliqui.

12.4 Configurazioni

Gli ugelli hanno forme e dimensioni diverse a seconda dei compiti loro richiesti:

- turbogetti semplici, e turboelica spesso hanno ugelli convergenti a geometria fissa;
- i turbofan hanno ugelli coassiali in cui il flusso principale viene espulso dall'ugello centrale e il flusso secondario da quello anulare, nel caso di flussi separati; nel caso di flussi associati i flussi vengono mescolati ed espulsi nell'unico ugello (la cui parte iniziale funziona anche da camera di mescolamento);
- i turbogetti con postcombustore e gli statoreattori spesso hanno ugelli convergenti-divergenti a geometria variabile. La geometria variabile rende tali ugelli pesanti, ma fornisce prestazioni migliori in un campo di condizioni di volo più vasto degli ugelli a geometria fissa;
- la maggior parte degli ugelli è a geometria assialsimmetrica, tuttavia recentemente sono stati studiati ugelli a geometria rettangolare che permettono di deflettere facilmente il getto per modi-

ficare la direzione della spinta (*thrust vectoring*), soluzione adottata da alcuni aerei militari per migliorarne la manovrabilità.



Figura 12.5: Ugello a spina conica.

I turbogetti, turboelica e turbofan hanno normalmente ugelli solo convergenti in quanto il rapporto tra pressione totale a monte dell'ugello e pressione ambiente è normalmente di poco superiore al valore minimo che garantisce flusso critico all'uscita, dato dall'inverso della (12.8). In queste condizioni l'incremento di spinta che si potrebbe avere adottando un ugello convergente-divergente risulta marginale, e non giustifica quindi la sua adozione. Un particolare accorgimento che permette comunque di avvicinare le condizioni di adattamento, migliorando quindi in qualche misura le prestazioni di ugelli convergenti funzionanti in condizioni di saturazione, e che spesso si trova nei turbofan degli aerei commerciali, è quello di introdurre un cono (spina) assiale, vedi Fig. 12.5. In questo modo si permette di proseguire l'espansione del flusso esternamente all'ugello, raccogliendo la relativa spinta addizionale sul cono stesso.

12.4.1 Inversori di spinta

Allo scopo di ridurre lo spazio di frenata necessario all'atterraggio, spesso gli ugelli presentano meccanismi per l'inversione della spinta. Essi constano di un congegno meccanico che muove alcune paratie che possono ostruire il percorso del flusso nell'ugello, e costringere il getto ad uscire dopo aver subito una rotazione di un angolo maggiore di 90° . Tale meccanismo, attivato al momento della frenata sulla pista di atterraggio, consente quindi di espellere il getto con una componente in direzione opposta al moto, generando così una spinta negativa, normalmente intorno al 40% della spinta massima del motore.

Domande di verifica

12.1 Dove è posizionato l'ugello propulsivo (rispetto agli altri componenti del motore)?

12.2 Quale obiettivo si vuole conseguire per mezzo dell'ugello propulsivo?

12.3 Cosa si intende per ugello subsonico, e qual'è la sua forma geometrica?

- 12.4** Si consideri un turbogetto semplice con ugello convergente. Nel caso in cui le condizioni a monte dell'ugello restino costanti, come varia la spinta al diminuire della pressione ambiente?
- 12.5** Si disegni nel piano $T - s$ l'evoluzione del flusso attraverso un ugello, distinguendo i valori delle grandezze statiche e delle grandezze totali. Si confronti il caso in cui l'ugello è sovraespanso con quello di ugello adattato.
- 12.6** Si disegni nel piano $T - s$ l'evoluzione del flusso attraverso un ugello, distinguendo i valori delle grandezze statiche e delle grandezze totali. Si confronti il caso in cui l'ugello è sottoespanso con quello di ugello adattato.
- 12.7** Cosa si intende per ugello saturato?
- 12.8** Quali sono la massima velocità di efflusso e la minima pressione di efflusso di un ugello convergente?
- 12.9** Perché è interessante considerare ugelli convergenti-divergenti?
- 12.10** Descrivere il comportamento del flusso in un ugello convergente-divergente al diminuire del rapporto tra pressione ambiente e pressione totale.
- 12.11** Si consideri un turbogetto semplice con ugello convergente-divergente. Nel caso in cui le condizioni a monte dell'ugello restino costanti, come varia la spinta al diminuire della pressione ambiente?

Esercizi svolti

- 12.1** Si consideri un ugello convergente-divergente con sezione di ingresso pari a 3 volte la sezione di gola e sezione di uscita pari a 2 volte la sezione di gola. Calcolare il rapporto tra la pressione nella sezione di uscita e la pressione totale nella sezione di ingresso nelle seguenti condizioni di funzionamento:

- ugello non saturato con $M = 0.7$ in gola;
- ugello saturato con urto normale nel divergente nella sezione in cui $A/A_t = 1.5$;
- condizioni di progetto;

Per effettuare il calcolo si consideri $\gamma = 1.4$ e che il flusso sia isentropico ovunque, tranne che attraverso le onde d'urto. Si può ricorrere alle tabelle dei flussi compressibili o applicare direttamente la legge delle aree e le relazioni di salto per un urto normale.

R.

Si usa la convenzione vista per i turbogetti: 7=sezione di ingresso; 8=sezione di gola; e 9=sezione di uscita.

- A. In questo caso $M_8 = 0.7$ da cui si calcola con la legge delle aree $A_8/A^* = 1.094$. Essendo $A_9/A_8 = 2$ si ha $A_9/A^* = 2.189$. Dalle tabelle dei flussi isentropici si ha che per $A/A^* = 2.166 \rightarrow p/p_0 = 0.947$ e per $A/A^* = 2.238 \rightarrow p/p_0 = 0.951$. Interpolando si ha $p_9/p_0 = 0.948$ o $p_0/p_9 = 1.055$.



- B. Nel secondo caso $M_8 = 1.0$ e, indicando con 81 la sezione a monte dell'urto normale nel divergente e con 82 la sezione a valle, si ha che:
 $A_{81}/A_8 = A_{81}/A^* = 1.5$ e dalle tabelle $M_{81} = 1.854$
dalle relazioni di salto attraverso un'onda d'urto normale o dalle tabelle dell'urto normale si ottiene $M_{82} = 0.605$, da cui $A_{82}/A^* = 1.182$ e $p_{082}/p_{081} = 0.788$
Si può quindi calcolare il Mach nella sezione di uscita:
 $A_9/A^* = (A_{82}/A^*)(A_9/A_{82}) = 1.576$ e dalle tabelle $M_9 = 0.405$ e
 $p_{07}/p_9 = (p_{07}/p_{09})/(p_{09}/p_9) = (1 + \delta M_9^2)^{\gamma/(\gamma-1)}/0.788 = 1.421$ o $p_9/p_{07} = 0.704$
- C. L'ultimo caso è il più semplice in quanto il flusso è isentropico e supersonico nel divergente con $A_9/A^* = A_9/A_8 = 2$. Dalle tabelle $M_9 = 2.20$ e quindi $p_0/p_9 = (1 + \delta M_9^2)^{\gamma/(\gamma-1)} = 10.693$ o $p_9/p_0 = 0.094$

Esercizi proposti

- 12.2** Si calcoli la forma e le aree della sezione di ingresso e di uscita di un ugello che in condizioni di funzionamento adattato fornisca a punto fisso la spinta di 35 kN. Si consideri $\gamma = 1.4$, $R = 287$ J/K/kg e flusso isentropico. Le condizioni nella sezione di ingresso nell'ugello sono $p_7 = 150$ kPa, $T_7 = 700$ K e $M_7 = 0.2$.
R.
 $A_7 = 1.088$ m²; $A_9 = 0.380$ m².
- 12.3** Si consideri l'ugello del flusso secondario di un turbofan a flussi separati in volo a $M = 0.85$. Per quale valore del rapporto di compressione del fan l'ugello viene saturato? Si considerino componenti ideali.
R.
 $\beta_f = 1.18$.
- 12.4** Dimensionare un ugello perché funzioni adattato quando $p_7 = 200$ kPa e $p_a = 27$ kPa, nel caso in cui $T_7 = 1000$ K, $\gamma = 1.3$, $R = 287$ J/(K kg), $\eta_n = 0.98$ e $\dot{m} = 50$ kg/s.
R.
 $A_8 = 0.203$ m²; $A_9 = 0.356$ m².

