



Il diagramma di manovra.

Prof. Ing. Raucci Biagio

1 Diagramma di manovra e di raffica per il velivolo Partenavia P68

1.1 Obiettivo

L'obiettivo dell'esercizio è determinare l'involuppo di volo, o diagramma di manovra, e il diagramma di raffica per il velivolo *Partenavia P68*, in conformità con le normative *FAR Part 23*, assumendo il velivolo appartenente alla **categoria normale**.

Il *Partenavia P68* è un aereo da turismo e da osservazione, monoplano, bimotore, progettato dal professor **Luigi Pascale**¹ alla fine degli anni '60 e prodotto prima dalla Partenavia e poi, a seguito della chiusura di quest'ultima, dalla Vulcanair con il nome di *Vulcanair P68*.

1.2 Dati del problema

Le caratteristiche principali del velivolo, necessarie per il tracciamento dei diagrammi di manovra e di raffica, sono riportate nella Tabella 1.

¹Si laureò nel 1948 in ingegneria meccanica presso l'Università di Napoli e divenne ben presto assistente di Umberto Nobile, per poi intraprendere la carriera accademica come professore. A soli 25 anni costruì, insieme al fratello Giovanni, il suo primo aeroplano, il P.48 *Astore*, che effettuò il primo volo il 2 aprile 1951 da Mario De Bernardi. A partire da questo prototipo, realizzato artigianalmente nel garage di casa, seguirono altri progetti fino alla vittoria del Giro di Sicilia, successo che portò i fratelli a fondare nel 1957 la Partenavia. L'azienda, dopo importanti risultati di mercato, fu successivamente acquisita da Aerialia. Nel 1968 Pascale progettò il bimotore leggero P.68 (ancora oggi in produzione presso Vulcanair), costruito in più di 430 esemplari. Nel 1986 fondò, insieme al fratello, la Tecnam, specializzata nella progettazione e produzione di velivoli leggeri ed ultraleggeri, tra cui il Tecnam P92. Dei circa 7000 velivoli complessivamente costruiti da Partenavia e Tecnam, circa 3500 sono riconducibili ai progetti di Pascale e risultano operativi in tutto il mondo. Nel 2016 gli è stata conferita la *Laurea ad Honorem* in Ingegneria Aerospaziale presso la seconda Università degli Studi di Napoli.



Figura 1: Partenavia P68.

Tabella 1: *Dati del velivolo Partenavia P68 Spartacus.*

Parametro	Simbolo	Valore
Peso massimo al decollo (MTOW)	W	2850 kgf
Superficie alare	S	18.6 m ²
Coefficiente di portanza massimo	$C_{L_{max}}$	1.36
Coefficiente di portanza massimo in volo rovescio	$C_{L_{max R}}$	0.8
Coefficiente di momento focale	C_{MAC}	0.02
Corda media aerodinamica	c	0.5 m
Gradiente della retta di portanza	$C_{L_{\alpha}}$	5 rad ⁻¹
Distanza fuoco velivolo parziale – baricentro	a	0.06 m
Distanza fuoco velivolo parziale – fuoco impennaggio orizzontale	$a + l$	6 m
Peso carburante in ala (esclusa riserva)	W_f	100 kgf

1.3 Richiami normativi

Per un velivolo della categoria normale, con $W < 5670$ kgf, si adottano le seguenti relazioni caratteristiche.

Fattore di carico limite positivo in manovra

$$n_{\max} = 2.1 + \frac{10886}{W[\text{kgf}] + 4536} \quad (1)$$

Fattore di carico limite negativo in manovra

$$n_{\max R} = -0.4 n_{\max} \quad (2)$$

Velocità di stallo

$$V_S = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{\max}}}} \quad (3)$$

Velocità di stallo in volo rovescio

$$V_{SR} = \sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{\max R}}}} \quad (4)$$

Velocità minima di crociera

$$V_C = 27.67 \sqrt{\frac{W[\text{kgf}]}{S[\text{m}^2]}} \quad [\text{km/h}] \quad (5)$$

Velocità di manovra

$$V_A = V_S \sqrt{n_{\max}} \quad (6)$$

Velocità corrispondente al fattore di carico negativo limite

$$V_G = V_{SR} \sqrt{|n_{\max R}|} \quad (7)$$

Velocità di affondata

$$V_D = 1.4 V_C \quad (8)$$

1.4 Calcolo delle velocità di progetto e dei fattori di carico**Carico alare**

$$\frac{W}{S} = \frac{2850}{18.6} = 153.2 \text{ kgf m}^{-2} \quad (9)$$

Fattore di carico limite positivo

Dalla (1):

$$n_{\max} = 2.1 + \frac{10886}{2850 + 4536} = 3.57 \quad (10)$$

Fattore di carico limite negativo

Dalla (2):

$$n_{\max R} = -0.4 \cdot 3.57 = -1.43 \quad (11)$$

Velocità di crociera minima

Dalla (5):

$$V_C = 27.67 \sqrt{\frac{2850}{18.6}} = 342.4 \text{ km/h} \quad (12)$$

e quindi

$$V_C = \frac{342.4}{3.6} = 95.1 \text{ m/s} \quad (13)$$

Velocità di affondata

$$V_D = 1.4 \cdot 95.1 = 133.2 \text{ m/s} \quad (14)$$

Velocità di stalloAssumendo $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$:

$$V_S = \sqrt{\frac{2}{1.225} \frac{153.2 \cdot 9.81}{1.36}} = 42.5 \text{ m/s} \quad (15)$$

Velocità di stallo in volo rovescio

$$V_{SR} = \sqrt{\frac{2}{1.225} \frac{153.2 \cdot 9.81}{0.8}} = 55.4 \text{ m/s} \quad (16)$$

Velocità di manovra

$$V_A = 42.5 \sqrt{3.57} = 80.3 \text{ m/s} \quad (17)$$

Velocità corrispondente al carico negativo limite

$$V_G = 55.4 \sqrt{1.43} = 66.2 \text{ m/s} \quad (18)$$

Tabella 2: Valori caratteristici del velivolo per il diagramma di manovra.

Parametro	Valore
n_{\max}	3.57
$n_{\max R}$	-1.43
V_S	42.5 m/s
V_{SR}	55.4 m/s
V_C	95.1 m/s
V_D	133.2 m/s
V_A	80.3 m/s
V_G	66.2 m/s

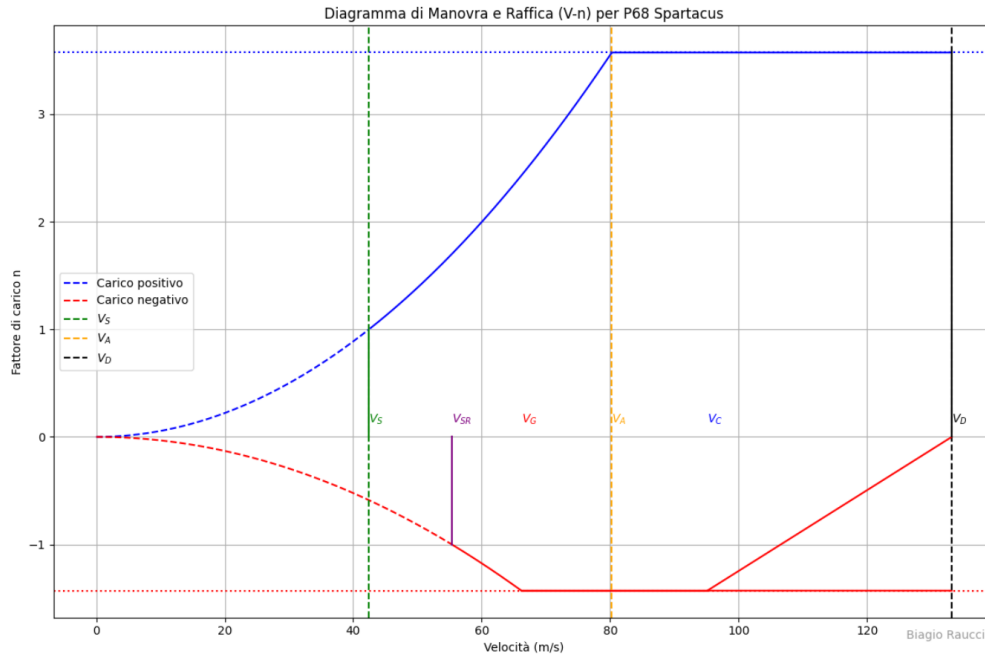


Figura 2: Diagramma di manovra del velivolo Partenavia P68.

1.5 Tracciamento del diagramma di manovra

Dalla definizione del fattore di carico:

$$n = \frac{L}{W} = \frac{\frac{1}{2}\rho V^2 S C_L}{W} \tag{19}$$

si ottiene, per $C_L = C_{L_{max}}$,

$$n = \left(\frac{V}{V_S}\right)^2 \tag{20}$$

mentre per il volo rovescio:

$$n_R = -\left(\frac{V}{V_{SR}}\right)^2 \tag{21}$$

Il diagramma di manovra si costruisce quindi come segue:

- nel tratto $V_S \leq V \leq V_A$, il ramo positivo è descritto dalla parabola (20);
- nel tratto $V_A \leq V \leq V_D$, il fattore di carico positivo resta costante e pari a n_{max} ;
- nel tratto $V_{SR} \leq V \leq V_G$, il ramo negativo è descritto dalla parabola (21);
- nel tratto $V_G \leq V \leq V_C$, il fattore di carico negativo resta costante e pari a $n_{max R}$;
- nel tratto $V_C \leq V \leq V_D$, il ramo negativo varia linearmente da $n_{max R}$ a 0.

1.6 Calcolo del diagramma di raffica

Formula del fattore di carico da raffica

Per il diagramma di raffica si utilizza la relazione:

$$n_g = 1 \pm K_g \frac{C_{L\alpha} U_{de} V}{57.6 \left(\frac{W}{S}\right)} \tag{22}$$

dove il segno + fornisce il fattore di carico da raffica positiva e il segno – quello da raffica negativa.

Rapporto di massa

$$\mu_g = \frac{2 \left(\frac{W}{S}\right)}{\rho_0 c C_{L\alpha} g} \quad (23)$$

Sostituendo i valori del problema:

$$\mu_g = \frac{2 \cdot 153.2}{1.225 \cdot 0.5 \cdot 5 \cdot 9.81} = 10.20 \quad (24)$$

Fattore di attenuazione

$$K_g = \frac{0.88 \mu_g}{5.3 + \mu_g} \quad (25)$$

da cui:

$$K_g = \frac{0.88 \cdot 10.20}{5.3 + 10.20} = 0.579 \quad (26)$$

Tabella 3: Valori caratteristici per il calcolo della raffica.

Grandezza	Valore
μ_g	10.20
K_g	0.579

Velocità equivalente della raffica

Si assumono:

$$U_{de} = 15.2 \text{ m/s} \quad \text{per } V \leq V_C \quad (27)$$

$$U_{de} = 7.6 \text{ m/s} \quad \text{per } V > V_C \quad (28)$$

Fattore di carico da raffica positiva

$$n_{g+} = 1 + K_g \frac{C_{L\alpha} U_{de} V}{57.6 \left(\frac{W}{S}\right)} \quad (29)$$

Espressione numerica per $V \leq V_C$

$$n_{g+} = 1 + 0.579 \frac{5 \cdot 15.2 \cdot V}{57.6 \cdot 153.2} \quad (30)$$

Espressione numerica per $V > V_C$

$$n_{g+} = 1 + 0.579 \frac{5 \cdot 7.6 \cdot V}{57.6 \cdot 153.2} \quad (31)$$

Fattore di carico da raffica negativa

$$n_{g-} = 1 - K_g \frac{C_{L\alpha} U_{de} V}{57.6 \left(\frac{W}{S}\right)} \quad (32)$$

Espressione numerica per $V \leq V_C$

$$n_{g-} = 1 - 0.579 \frac{5 \cdot 15.2 \cdot V}{57.6 \cdot 153.2} \quad (33)$$

Espressione numerica per $V > V_C$

$$n_{g-} = 1 - 0.579 \frac{5 \cdot 7.6 \cdot V}{57.6 \cdot 153.2} \quad (34)$$

Valori in corrispondenza di V_C

Per $V = V_C = 95.1$ m/s e $U_{de} = 15.2$ m/s:

$$n_{g+}(V_C) = 1 + 0.579 \frac{5 \cdot 15.2 \cdot 95.1}{57.6 \cdot 153.2} = 1.48 \quad (35)$$

$$n_{g-}(V_C) = 1 - 0.579 \frac{5 \cdot 15.2 \cdot 95.1}{57.6 \cdot 153.2} = 0.52 \quad (36)$$

Valori in corrispondenza di V_D

Per $V = V_D = 133.2$ m/s e $U_{de} = 7.6$ m/s:

$$n_{g+}(V_D) = 1 + 0.579 \frac{5 \cdot 7.6 \cdot 133.2}{57.6 \cdot 153.2} = 1.33 \quad (37)$$

$$n_{g-}(V_D) = 1 - 0.579 \frac{5 \cdot 7.6 \cdot 133.2}{57.6 \cdot 153.2} = 0.67 \quad (38)$$

Tabella 4: Valori notevoli del diagramma di raffica.

Punto	V [m/s]	U_{de} [m/s]	n_{g+}	n_{g-}
C	95.1	15.2	1.48	0.52
D	133.2	7.6	1.33	0.67

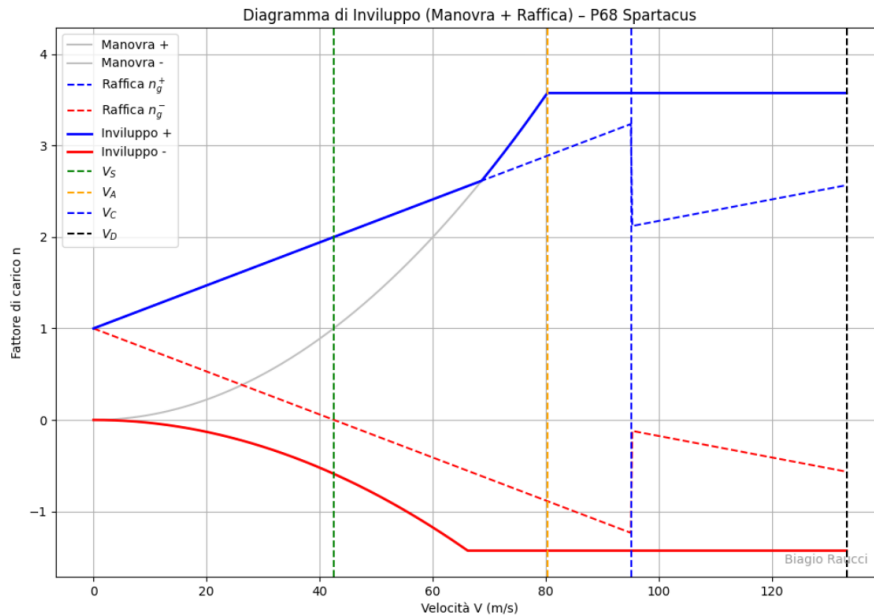


Figura 3: Involuppo finale di volo del velivolo Partenavia P68.

1.7 Osservazioni conclusive

Dai risultati ottenuti si osserva che:

- il diagramma di manovra è governato, nel ramo positivo, dalla parabola di stallo fino a V_A , e successivamente dal valore limite n_{\max} ;
- nel ramo negativo, il comportamento è analogo fino a V_G , seguito dal tratto a carico costante e dal ramo lineare fino a V_D ;
- il diagramma di raffica, nel caso in esame, risulta meno gravoso del diagramma di manovra sul ramo positivo;
- il calcolo del fattore di raffica positivo è stato effettuato con la forma corretta della relazione normativa (29).

Tabella 5: Valori caratteristici per la costruzione del diagramma di manovra come da norme FAR espresse nel sistema internazionale.

		FAR Part 23 (W < 5670 kgf)		
		normale	semiacrobatico	acrobatico
Fattore di carico limite positivo in manovra	n_{Max}	$2.1 < 2.1 + \frac{10886}{W[kgf]+4536} < 3.8$	4.4	6.0
Fattore di carico limite negativo in manovra	n_{MaxR}	$V < V_C:$ $0.4 \cdot n_{Max}$ $V \geq V_C:$ da $0.4 \cdot n_{Max}$ a 0	$V < V_C:$ $0.4 \cdot n_{Max}$ $V \geq V_C:$ da $0.4 \cdot n_{Max}$ a 1	$V < V_C:$ $0.5 \cdot n_{Max}$ $V \geq V_C:$ da $0.5 \cdot n_{Max}$ a 1
Velocità di stallo	V_S	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{Max}}}}$	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{Max}}}}$	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{Max}}}}$
Velocità di stallo in volo rovescio	V_{SR}	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{MaxR}}}}$	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{MaxR}}}}$	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{MaxR}}}}$
Velocità di crociera minima	V_C	$27.67 \sqrt{\frac{W[kgf]}{S[mq]}} \text{ [km/h]}$	$27.67 \sqrt{\frac{W[kgf]}{S[mq]}} \text{ [km/h]}$	$30.19 \sqrt{\frac{W[kgf]}{S[mq]}} \text{ [km/h]}$
Velocità a n_{Max}	V_A	$V_S \sqrt{n_{Max}}$	$V_S \sqrt{n_{Max}}$	$V_S \sqrt{n_{Max}}$
Velocità a n_{MaxR}	V_G	$V_{SR} \sqrt{n_{MaxR}}$	$V_{SR} \sqrt{n_{MaxR}}$	$V_{SR} \sqrt{n_{MaxR}}$
Velocità di affondata	V_D	$1.4 V_C$	$1.5 V_C$	$1.55 V_C$
Fattore di carico in raffica positiva/negativa. Ricorda che W va espresso in [kgf] e $\rho_0^* = \frac{\rho_0}{g} [kgf \cdot s^2/m^2]$. Nella relazione: il segno + è per la raffica ascendente; il segno - per quella discendente.	n_{g+}/n_{g-}	$1 \pm K_g \frac{\rho_0^* C_{L\alpha} U_{de} V}{2 \frac{W}{S}}$ Dove: Fattore di attenuazione $K_g = \frac{0.88 \mu_g}{5.3 + \mu_g}$ Rapporto di massa $\mu_g = \frac{2 \frac{W}{S}}{\rho_0 c C_{L\alpha} g}$ $V < V_C: U_{de} = 15.2 \text{ m/s}; \quad V > V_C: U_{de} = 7.6 \text{ m/s}$		

Tabella 6: Valori caratteristici per la costruzione del diagramma di manovra come da norme FAR espresse nel sistema imperiale.

		FAR Part 23 (W < 12 500 lb)		
		normale	semiacrobatico	acrobatico
Fattore di carico limite positivo in manovra	n_{Max}	$2.1 < 2.1 + \frac{24000}{W[\text{lbs}] + 10^4} < 3.8$	4.4	6.0
Fattore di carico limite negativo in manovra	n_{MaxR}	$V < V_C:$ $0.4 \cdot n_{Max}$ $V \geq V_C:$ da $0.4 \cdot n_{Max}$ a 0	$V < V_C:$ $0.4 \cdot n_{Max}$ $V \geq V_C:$ da $0.4 \cdot n_{Max}$ a 1	$V < V_C:$ $0.5 \cdot n_{Max}$ $V \geq V_C:$ da $0.5 \cdot n_{Max}$ a 1
Velocità di stallo	V_S	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{Max}}}}$	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{Max}}}}$	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{Max}}}}$
Velocità di stallo in volo rovescio	V_{SR}	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{MaxR}}}}$	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{MaxR}}}}$	$\sqrt{\frac{2}{\rho} \frac{W}{S} \frac{1}{C_{L_{MaxR}}}}$
Velocità di crociera minima	V_C	$33 \sqrt{\frac{W[\text{lbs}]}{S[\text{sq.ft.}]}} \text{ [nodi]}$	$33 \sqrt{\frac{W[\text{lbs}]}{S[\text{sq.ft.}]}} \text{ [nodi]}$	$36 \sqrt{\frac{W[\text{lbs}]}{S[\text{sq.ft.}]}} \text{ [nodi]}$
Velocità a n_{Max}	V_A	$V_S \sqrt{n_{Max}}$	$V_S \sqrt{n_{Max}}$	$V_S \sqrt{n_{Max}}$
Velocità a n_{MaxR}	V_G	$V_{SR} \sqrt{n_{MaxR}}$	$V_{SR} \sqrt{n_{MaxR}}$	$V_{SR} \sqrt{n_{MaxR}}$
Velocità di affondata	V_D	$1.4 V_C$	$1.5 V_C$	$1.55 V_C$
Fattore di carico in raffica positiva	n_{g+}	$1 + K_g \frac{C_{L\alpha} U_{de} V}{498 \frac{W}{S}}$ Dove: Fattore di attenuazione $K_g = \frac{0.88 \mu_g}{5.3 + \mu_g}$ Rapporto di massa $\mu_g = \frac{2}{\rho_0 c C_{L\alpha} g} \frac{W}{S}$ $V < V_C: U_{de} = 50 \text{ f.p.s.}; V > V_C: U_{de} = 25 \text{ f.p.s.}$		
Fattore di carico in raffica negativa	n_{g-}	$1 - K_g \frac{C_{L\alpha} U_{de} V}{498 \frac{W}{S}}$		