



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



Dipartimento di
**Ingegneria
e Architettura**

Macchine asincrone

Elettrotecnica

A.A. 2024 - 2025

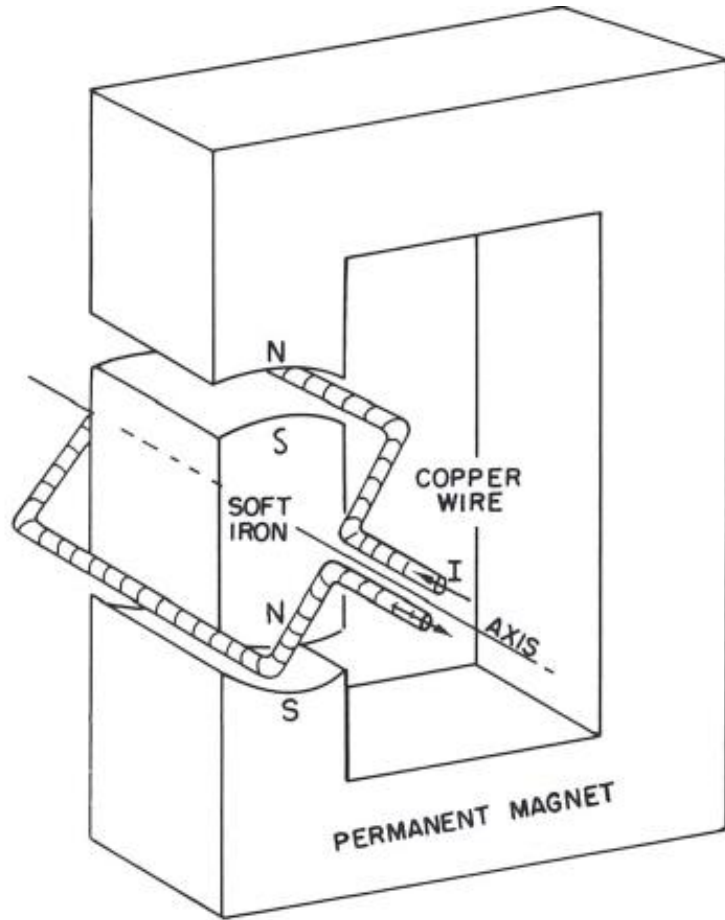
Prof. Alessandro Massi Pavan – apavan@units.it

“Modern electrical technology began with Faraday’s discoveries. The useless baby developed into a prodigy and changed the face of the earth in ways its proud father could never have imaged”

Richard Feynman



UNA SEMPLICE MACCHINA ELETTROMAGNETICA

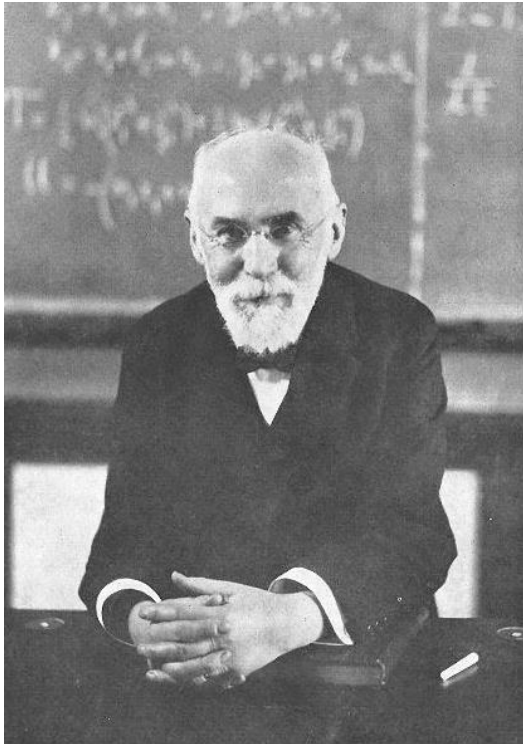


- Magnete permanente
- Cave
- Spira di rame
- Corrente elettrica
- Due forze opposte e quindi una coppia
- Albero

FORZA DI LORENTZ

$$\bar{\mathbf{F}} = q\bar{\mathbf{v}} \times \bar{\mathbf{B}}$$

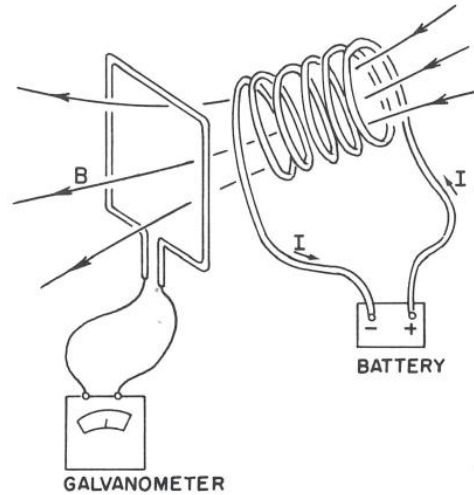
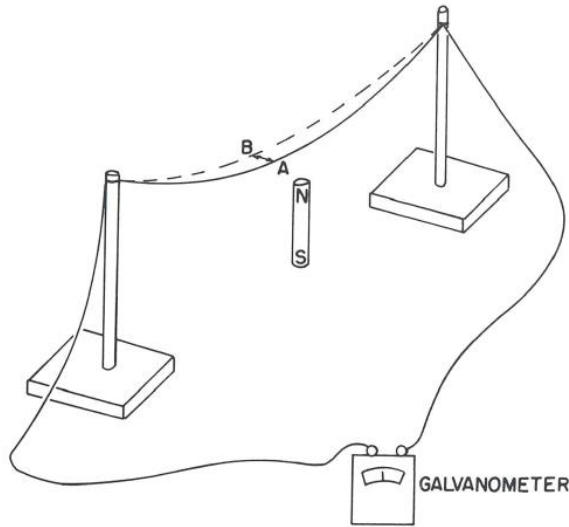
Hendrik Lorentz (1853 – 1928)



Nel caso di un conduttore percorso da corrente I e immerso in un campo uniforme $\bar{\mathbf{B}}$ la forza (dovuta al fatto che le cariche al suo interno si muovono) per unità di lunghezza è data dalla Il legge elementare di Laplace

$$d\bar{\mathbf{F}} = Id\bar{\mathbf{l}} \times \bar{\mathbf{B}}$$

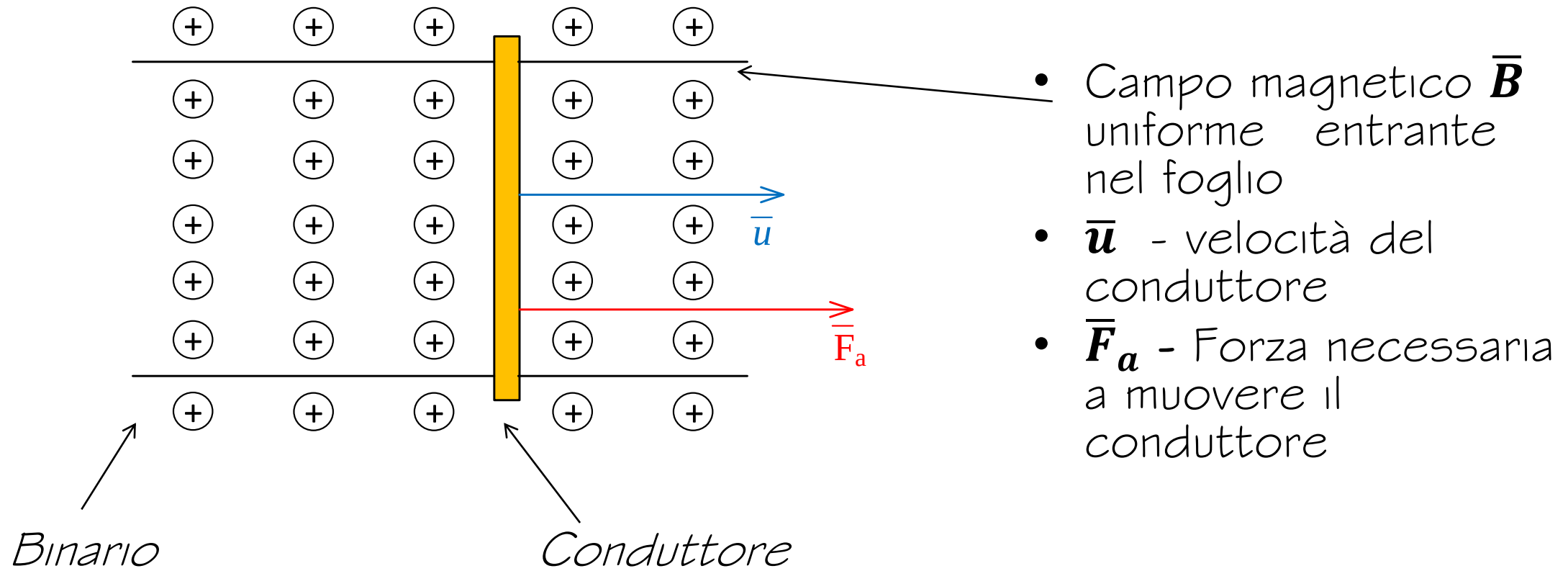
LE SCOPERTE DI FARADAY



$$f.e.m. = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

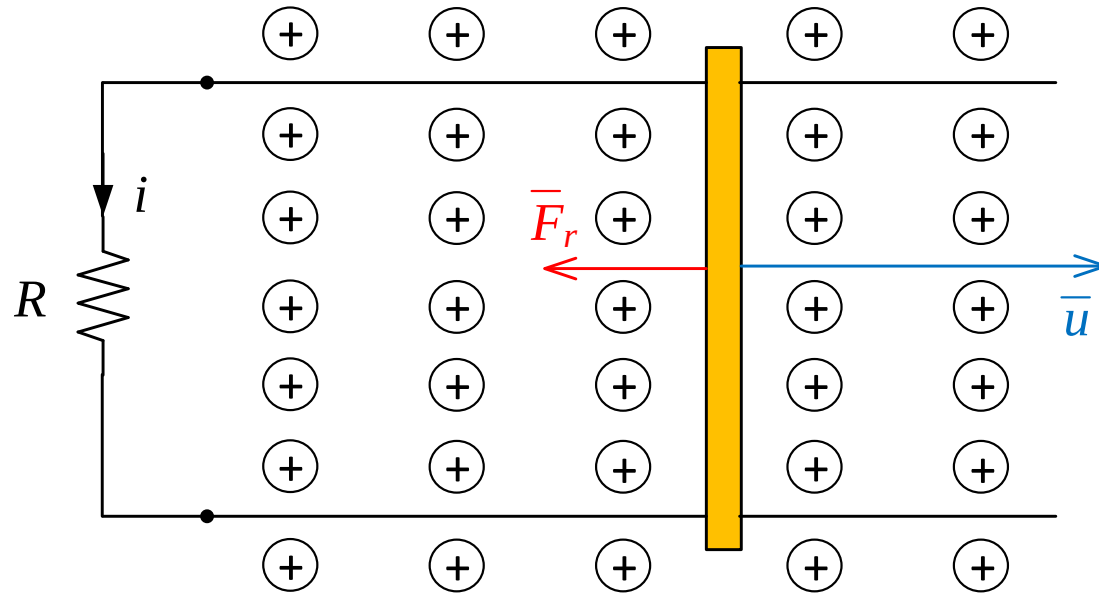
Ci sono tre modi per generare una forza elettromotrice in un conduttore: 1) muovendo il conduttore, 2) muovendo il magnete, 3) variando la corrente che scorre in un conduttore nelle vicinanze

TRASDUTTORE MECCANICO-MAGNETICO-ELETTRICO



La variazione di flusso concatenato genera una f.e.m.i.
il cui modulo vale $e = Blu$

TRASDUTTORE MECCANICO-MAGNETICO-ELETTRICO



GENERATORE

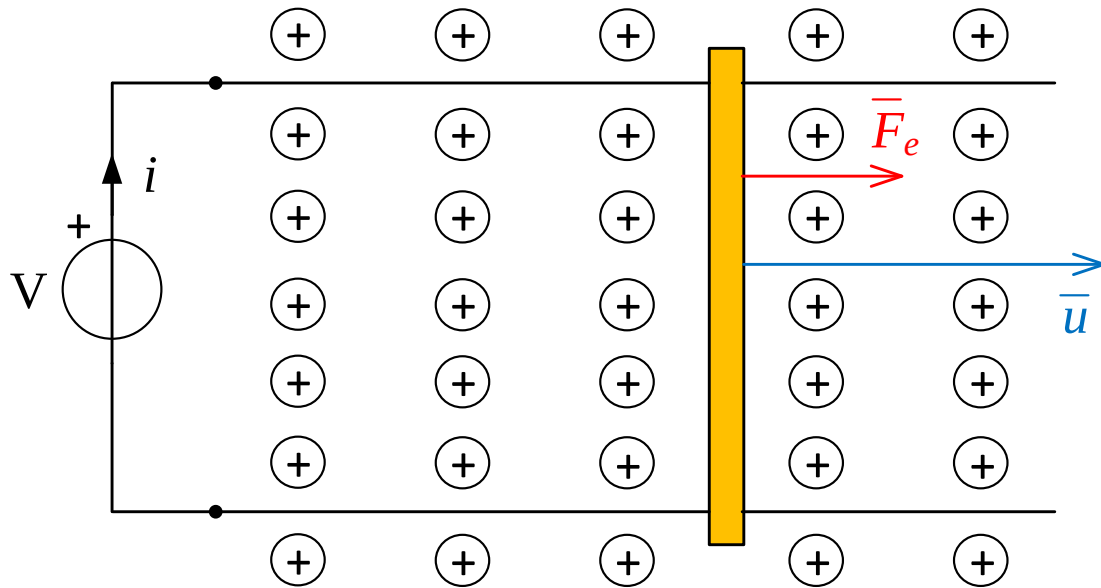
senza perdite

$$P_m = P_e$$

Chiuso il circuito su un carico, circola la corrente $i(t)$ che si oppone alla variazione del flusso creando, assieme al campo $\vec{B}$, una forza il cui modulo vale (l – lunghezza del conduttore)

$$F_r = ilB$$

TRASDUTTORE MECCANICO-MAGNETICO-ELETTRICO



MOTORE senza
perdite

$$P_m = P_e$$

Poiché il generatore fa scorrere la corrente i , sulla barra agisce una forza (che muove il conduttore con una velocità $\bar{u}$) il cui modulo vale $F_e = i l B$

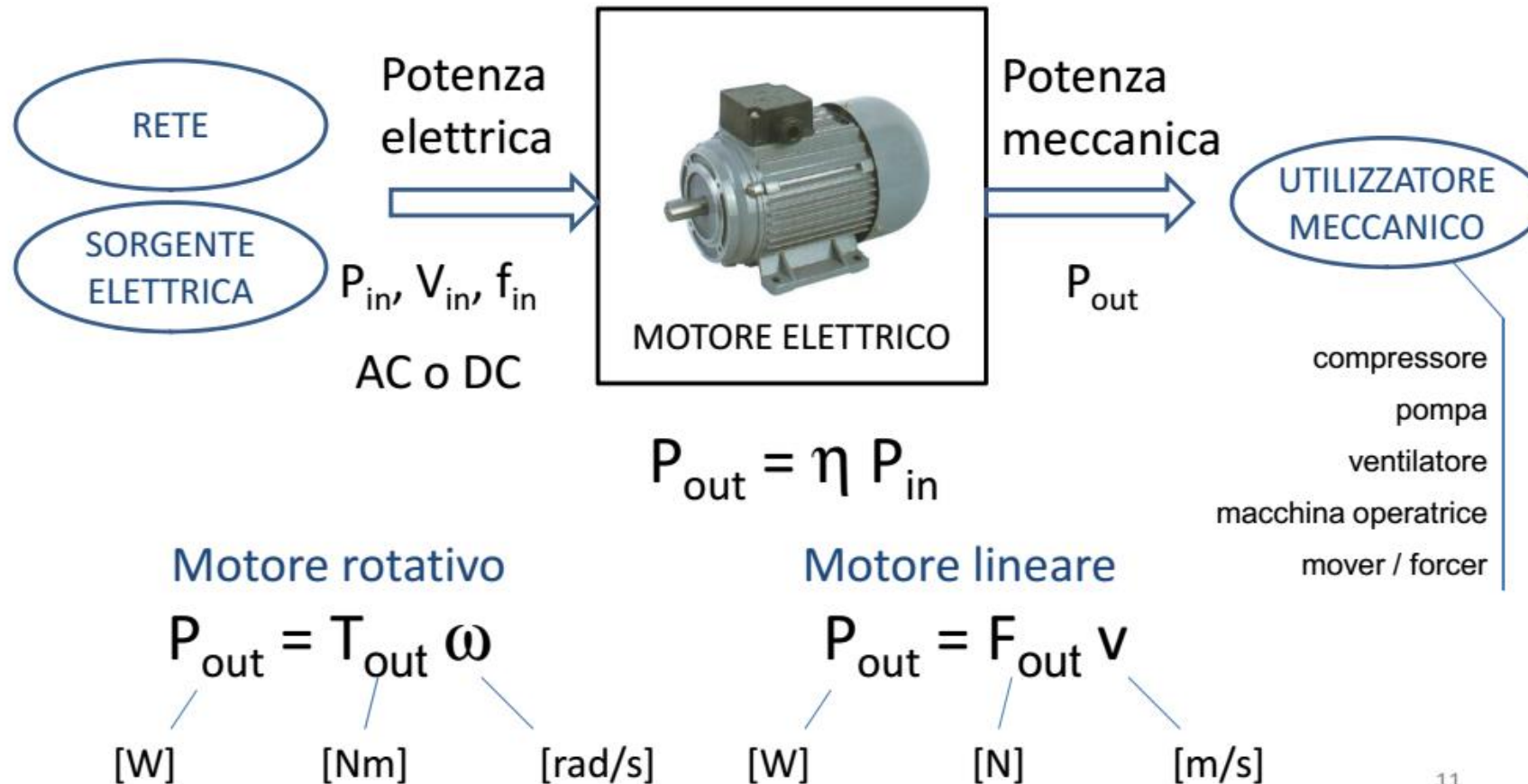
TRASDUTTORE MECCANICO-MAGNETICO-ELETTRICO

Tenendo conto del coefficiente d'attrito, dell'inerzia, della resistenza e dell'induttanza del conduttore

$$\begin{cases} Bli = F_a - Du - M \frac{du}{dt} \\ v = e - R_c i - L_c \frac{di}{dt} \end{cases}$$

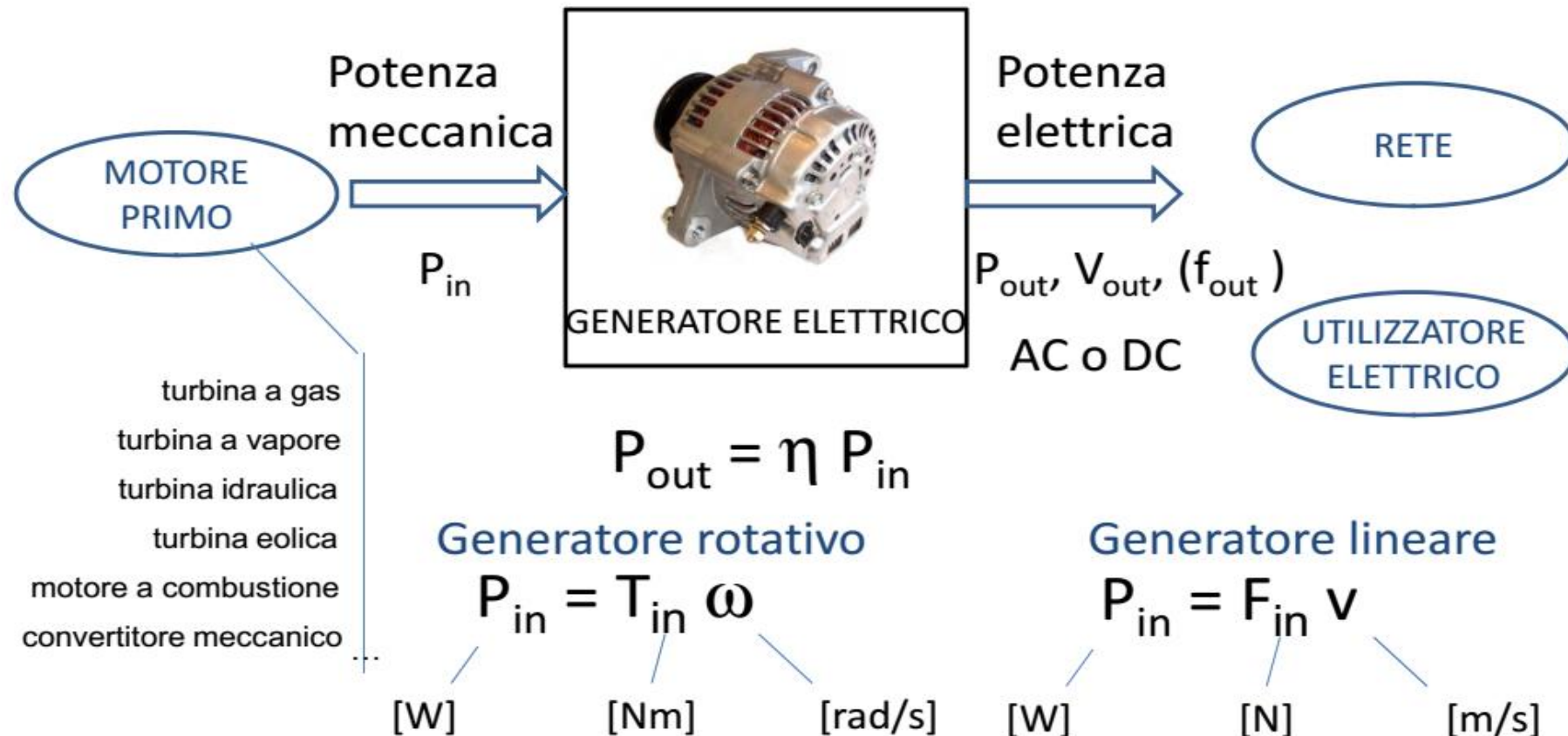
MACCHINE ROTANTI

Il motore elettrico (attuatore)

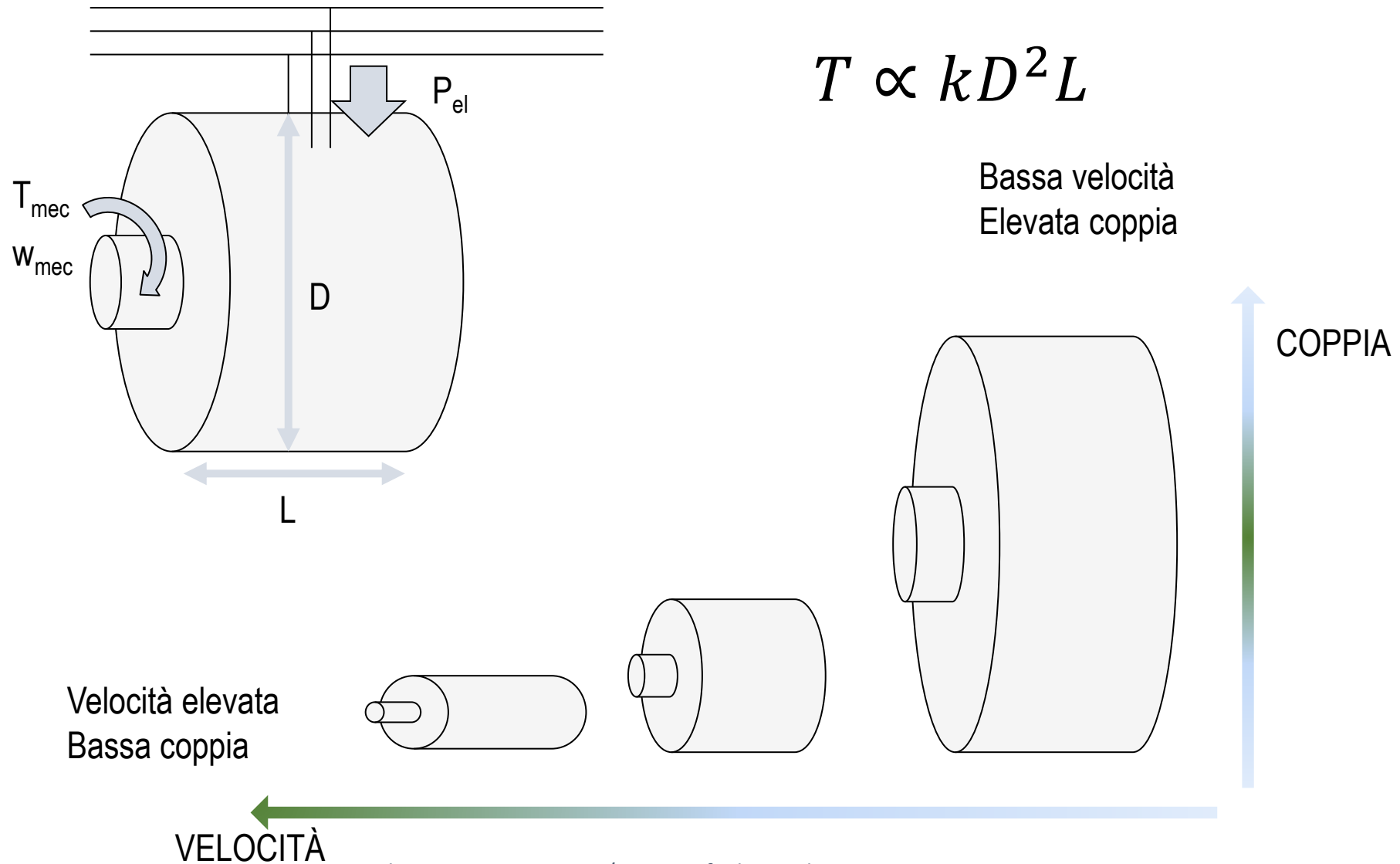


MACCHINE ROTANTI

Il generatore elettrico



DIMENSIONI E CARATTERISTICHE MECCANICHE

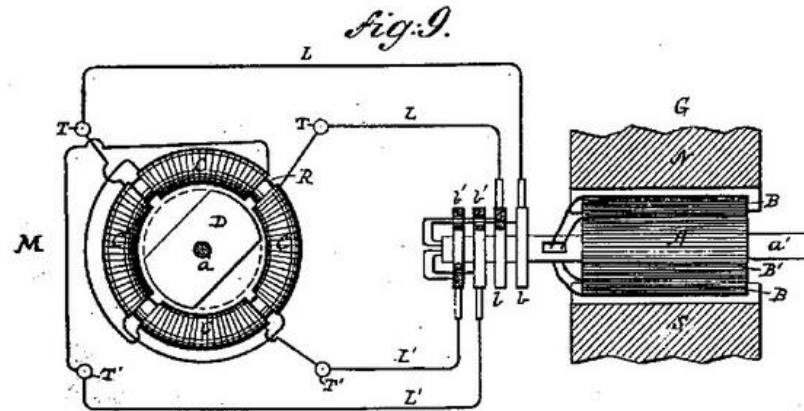


MACCHINA ASINCRONA (A INDUZIONE)

Nikola Tesla (1856-1943)

No. 381,968.

Patented May 1, 1888.



- Macchina elettrica rotante usata soprattutto come motore, raramente come generatore
- Il motore industriale più usato (90%)
- Una parte significativa dell'energia elettrica è consumata per alimentare motori a induzione

MOTORE A INDUZIONE

- No magneti permanenti
- No spazzole
- Semplice da costruire e robusto
- Affidabile ed economico
- Self-starting
- Molteplici applicazioni
- Si può controllarne facilmente la velocità
- Fattore di potenza basso

MOTORE A INDUZIONE

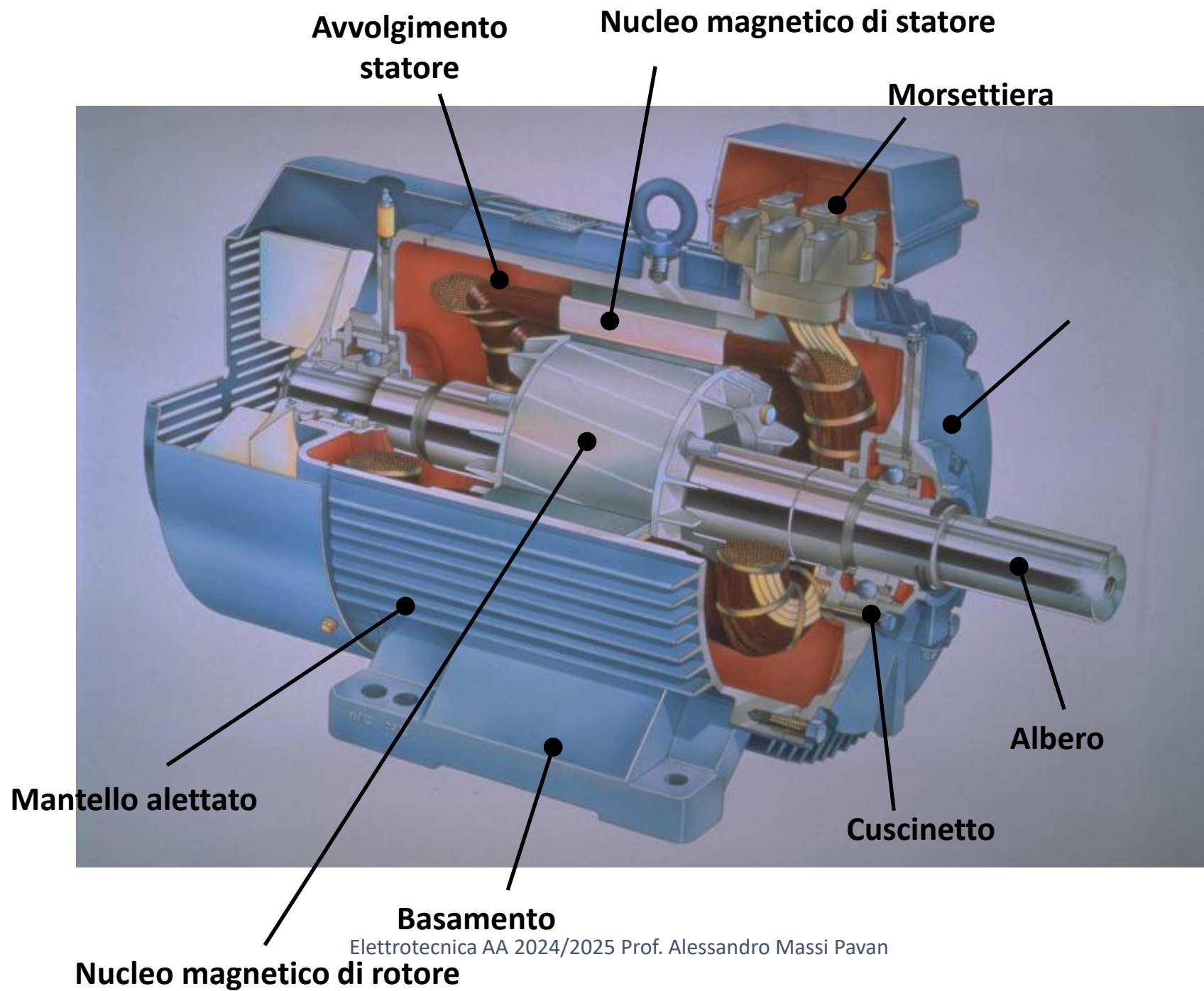


https://www.youtube.com/watch?v=AQqyGNOP_3o

MOTORE A INDUZIONE

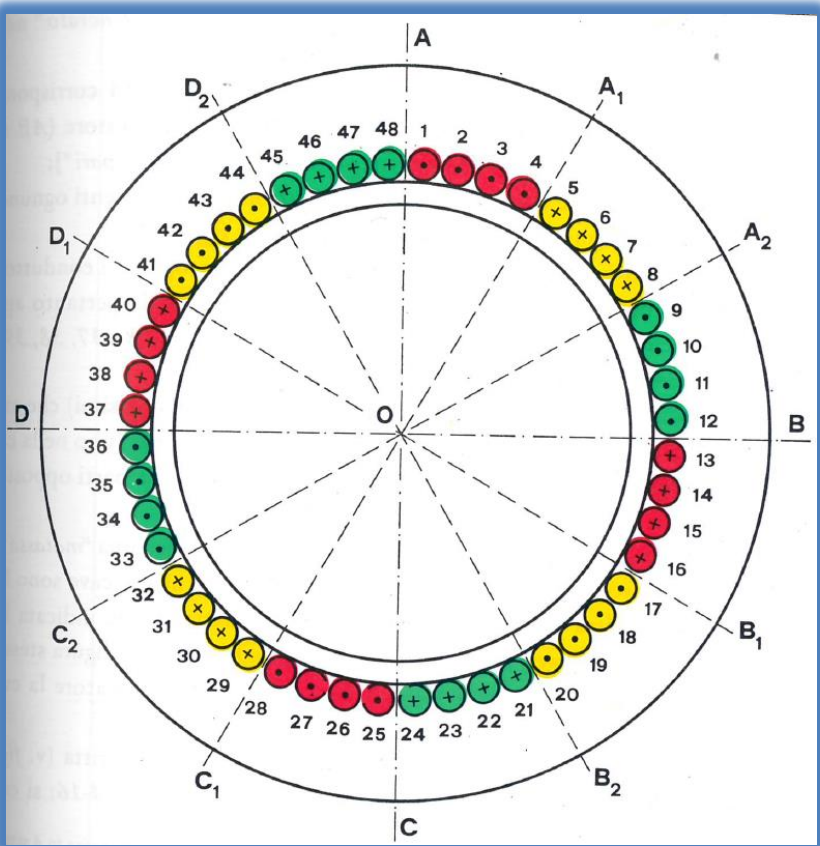
PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

- 2 parti principali: statore (che nel caso della macchina asincrona è l'induttore) e rotore (indotto)
- Lo statore comprende **3** avvolgimenti, alloggiati entro cave, che vengono alimentati con tensioni simmetriche a pulsazione ω
- Gli avvolgimenti vengono quindi attraversati da una terna equilibrata di correnti che crea un campo magnetico uniforme e rotante (si ricordi la legge di Biot e Savart) che è la causa della rotazione del rotore



AVVOLGIMENTO DI STATORE

- Il campo magnetico ruota alla velocità $n_s = 60f/p$ [giri/minuto] - p è il numero delle coppie polari



$$\omega_s = \omega/p$$

- Uguale per macchine sincrone e asincrone
- Tre avvolgimenti connessi a stella oppure a triangolo
- 48 cave distribuite su $2p = 4$ poli

MOTORE A INDUZIONE

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

- Il campo magnetico ruota alla velocità $\omega_s = \omega/p$ ($n_s = 60f/p$ [giri/minuto])
- Se tra gli avvolgimenti di statore è inserito un conduttore chiuso, allora per la Legge di Faraday su questo si induce una forza elettromotrice che innesca una circolazione di corrente (di pulsazione $\omega' = s \times \omega$)

MOTORE A INDUZIONE

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

- La corrente interagisce con il campo magnetico generando una coppia elettromagnetica (data dalla forza di Lorentz) sul conduttore che entra in rotazione
- La velocità del rotore ω_r è di poco inferiore a quella del campo magnetico ω_s (nel caso del generatore l'inverso)

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad \text{Scorrimento}$$

CAMPO MAGNETICO ROTANTE

Galileo Ferraris (1847-1897)

IPOTESI DI CAMPO



G. Ferraris

GALILEO FERRARIS

nato a Livorno Vercellese (Piemonte) il 31 ottobre 1847
morto a Torino il 7 febbraio 1897.

Da una fotografia di Gibson di Chicago.

- Permeabilità infinita
- Traferro di spessore trascurabile e costante
- Linee di campo al traferro radiali
- Distribuzione del campo uguale in tutti i piani perpendicolari all'asse

EQUAZIONI INTERNE MACCHINA ASINCRONA

$$\begin{cases} \bar{V}_1 = (R_1 + jX_{d1})\bar{I}_1 + j\frac{\omega}{2}k_{a1}N_1\bar{\Phi} \\ 0 = \left(R_2 + R_2\frac{1-s}{s} + jX_{d2}\right)\bar{I}_2 + j\frac{\omega}{2}k_{a2}N_2\bar{\Phi} \\ 3k_{a1}N_1\bar{I}_1 + 3k_{a2}N_2\bar{I}_2 = 2p\pi R\bar{\Phi} \end{cases}$$

$\bar{V}_1$ - tensione alimentazione statore

R_i - resistenze avvolgimenti

X_{di} - reattanza dispersione avvolgimenti

$\bar{I}_i$ - correnti di fase

k_{ai} - fattori di avvolgimento,

q_i - numeri di cave per polo

α_i - angoli elettrici,

τ_i - semipassi polari

τ_{ci} - passi di cava

N_i - conduttori attivi per fase

$\bar{\Phi}$ - flusso principale

R - riluttanza al traferro, $R_t = \frac{\pi\delta}{2\tau\mu_0 l}$

δ - spessore traferro

l - lunghezza della macchina

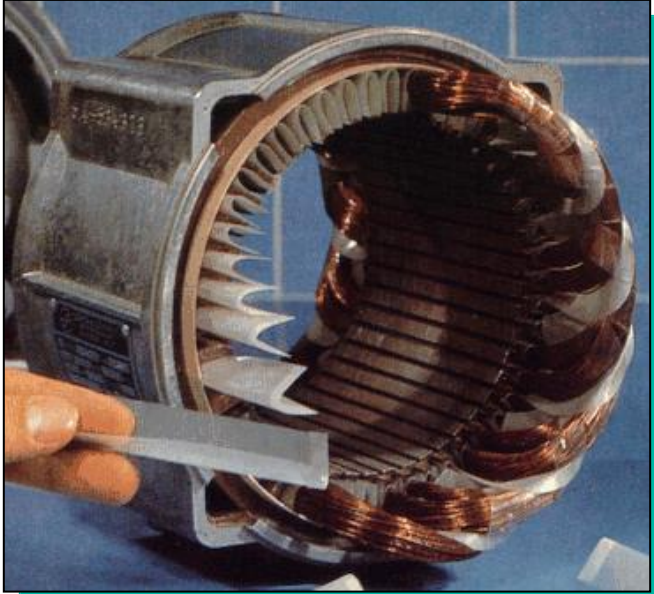
EQUAZIONI ESTERNE, POTENZA E COPPIA MACCHINA ASINCRONA

$$\begin{cases} V_1 = V_{alim} \\ C = C_r(s) \end{cases}$$

$$P_m = 3R_2 \frac{1-s}{s} I_2^2$$

$$C = \frac{P_m}{\omega_m} = 3 \frac{p}{\omega} \frac{s R_2 \left(\frac{\omega}{2} k_{a2} N_2 \Phi \right)^2}{R_2^2 + s^2 X_{d2}^2}$$

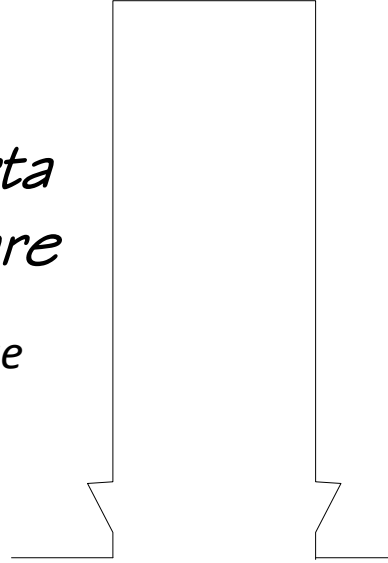
ASPETTI COSTRUTTIVI



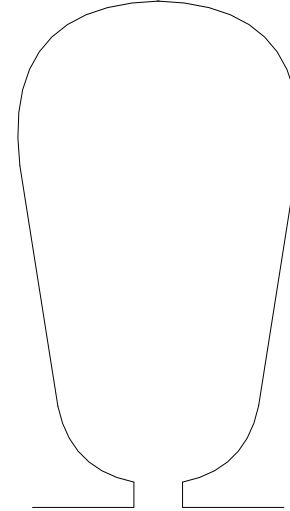
ASPETTI COSTRUTTIVI

*Cava aperta
rettangolare*

*Tipica per MT e potenze
medio-alte*



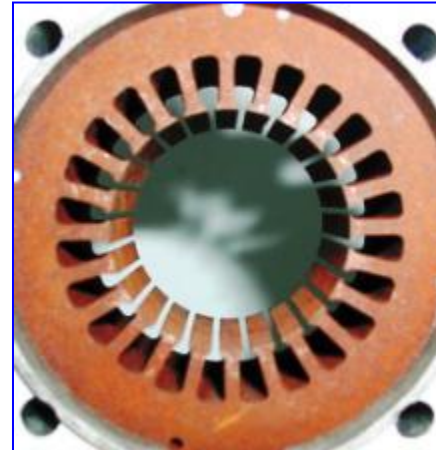
Avvolgimento in piattina



*Cava semichiusa
trapezia*

*Tipica per BT e potenze
medio-basse*

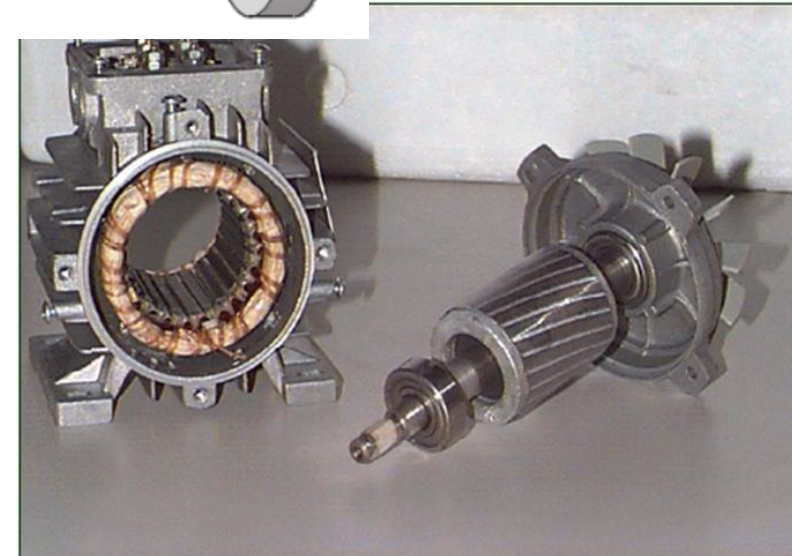
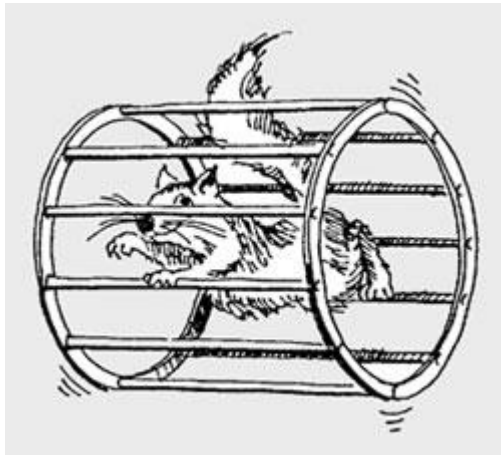
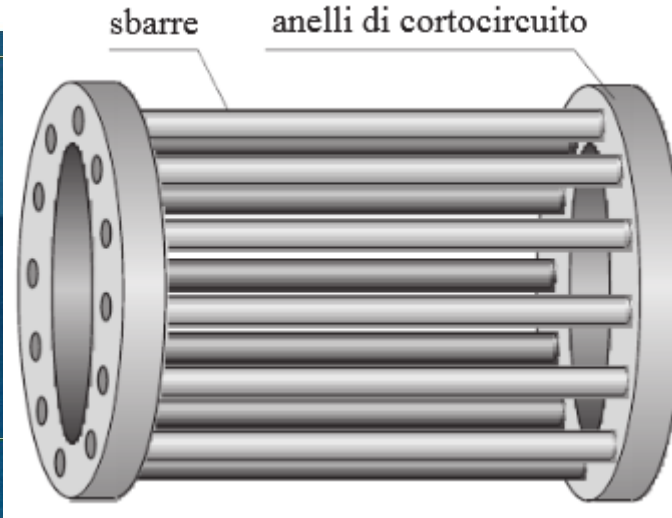
Avvolgimento in filo



ASPETTI COSTRUTTIVI



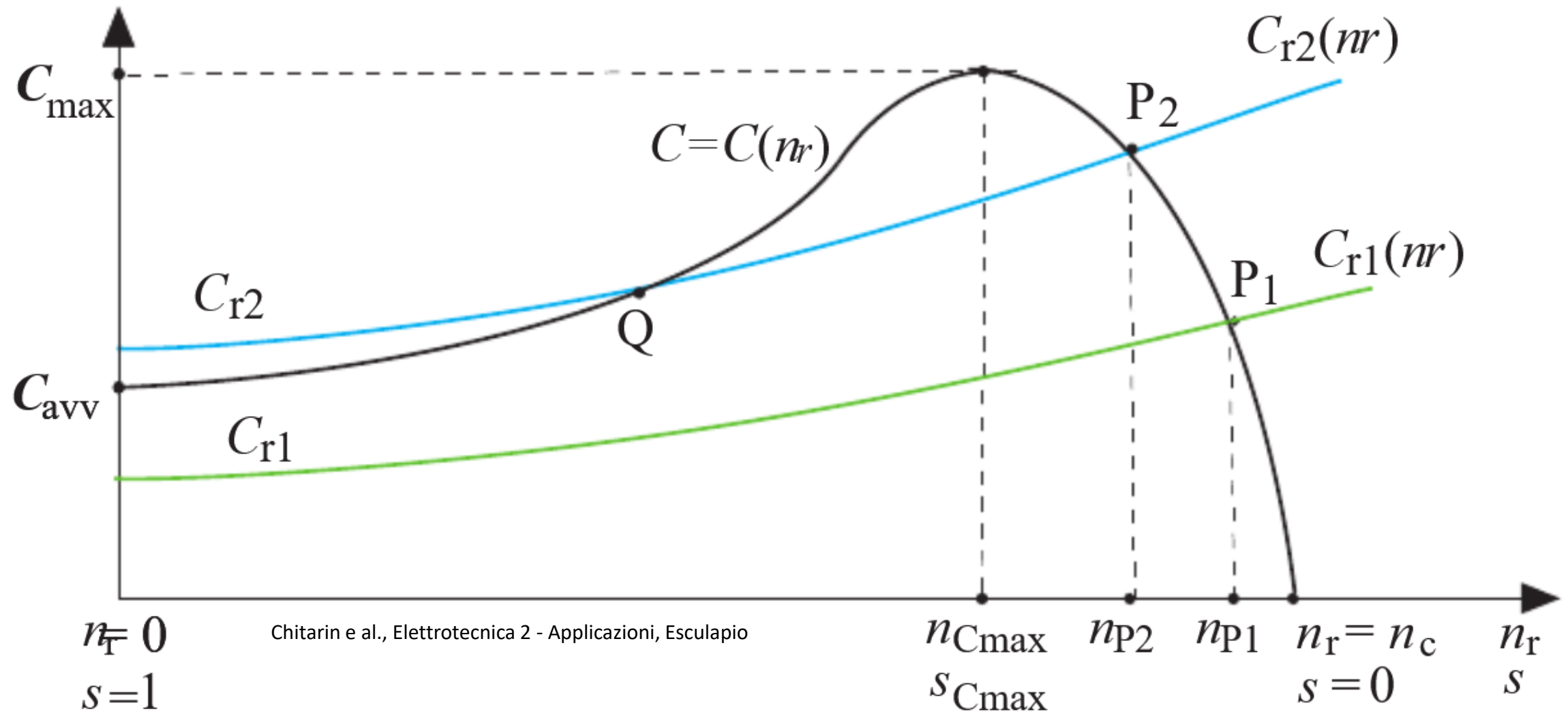
Rotore a gabbia in alluminio pressofuso



ASPETTI COSTRUTTIVI

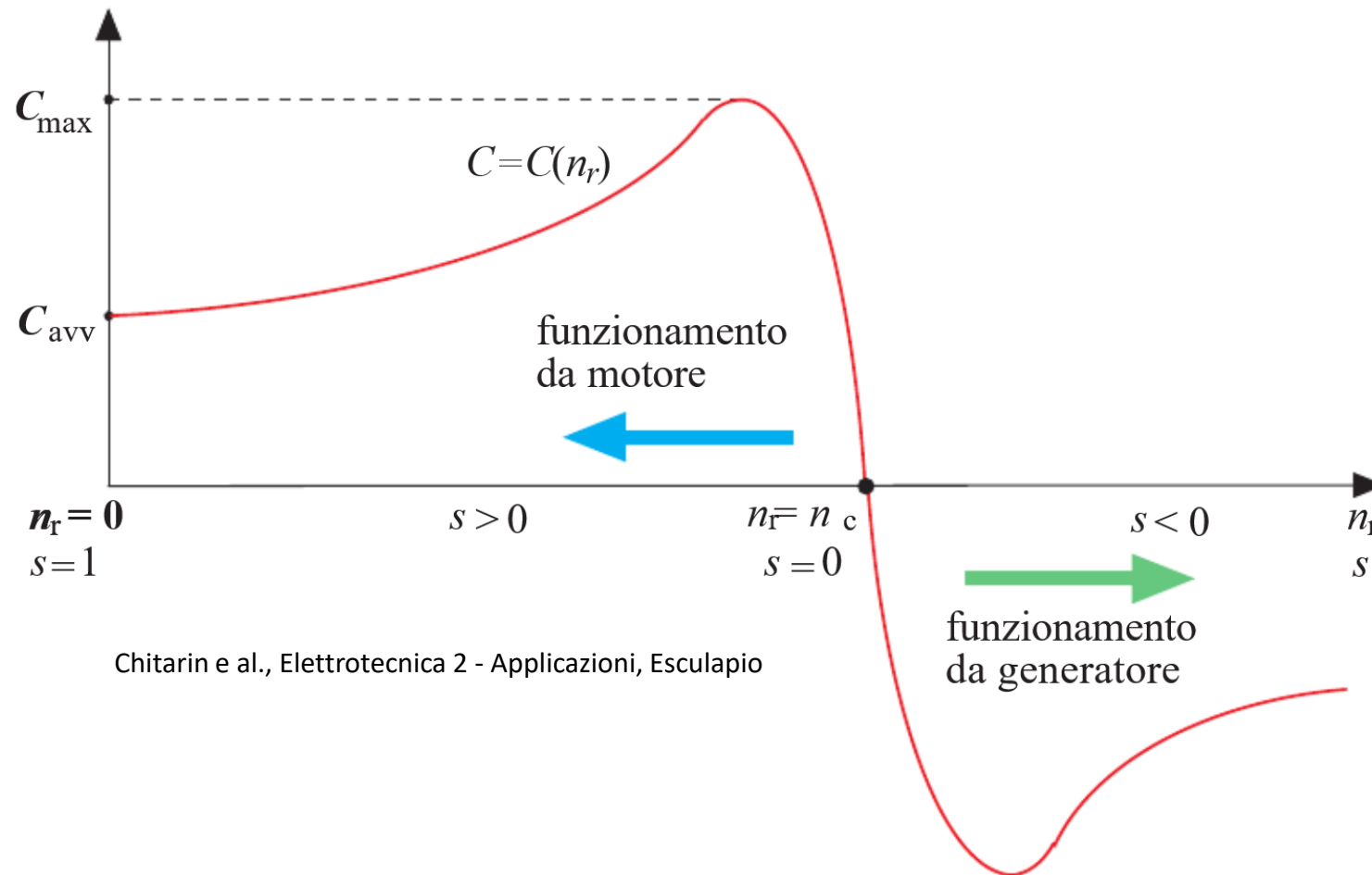


CARATTERISTICA MECCANICA (MOTORE)



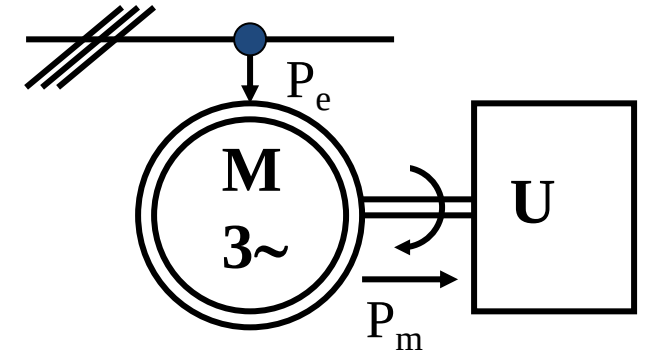
Chitarin e al., Elettrotecnica 2 - Applicazioni, Esculapio

MODALITA' DI FUNZIONAMENTO

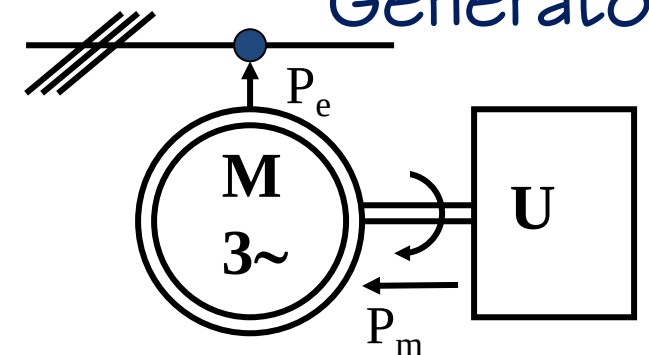


Chitarin e al., Elettrotecnica 2 - Applicazioni, Esculapio

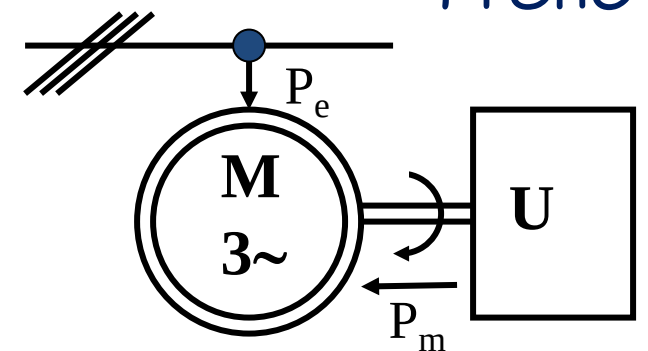
Motore



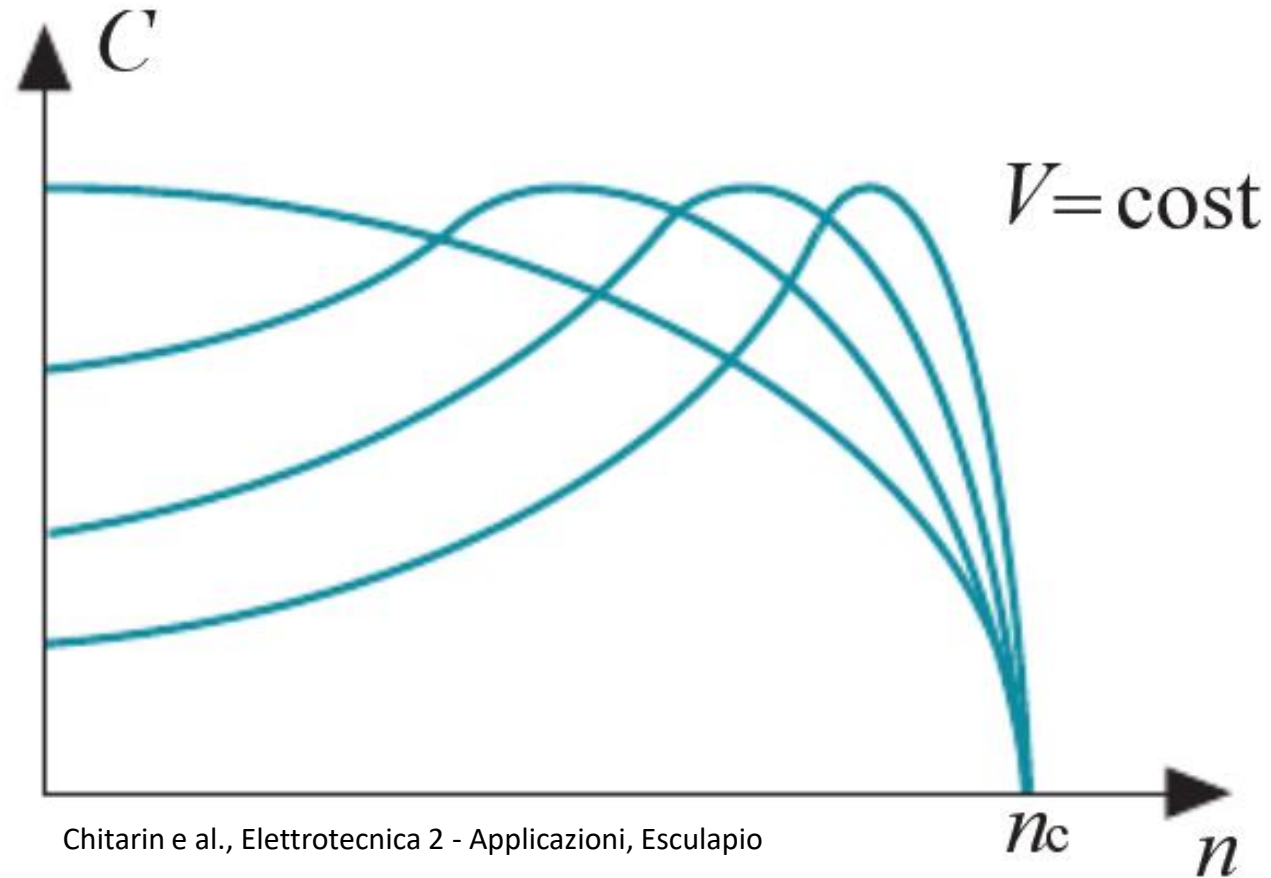
Generatore



Freno

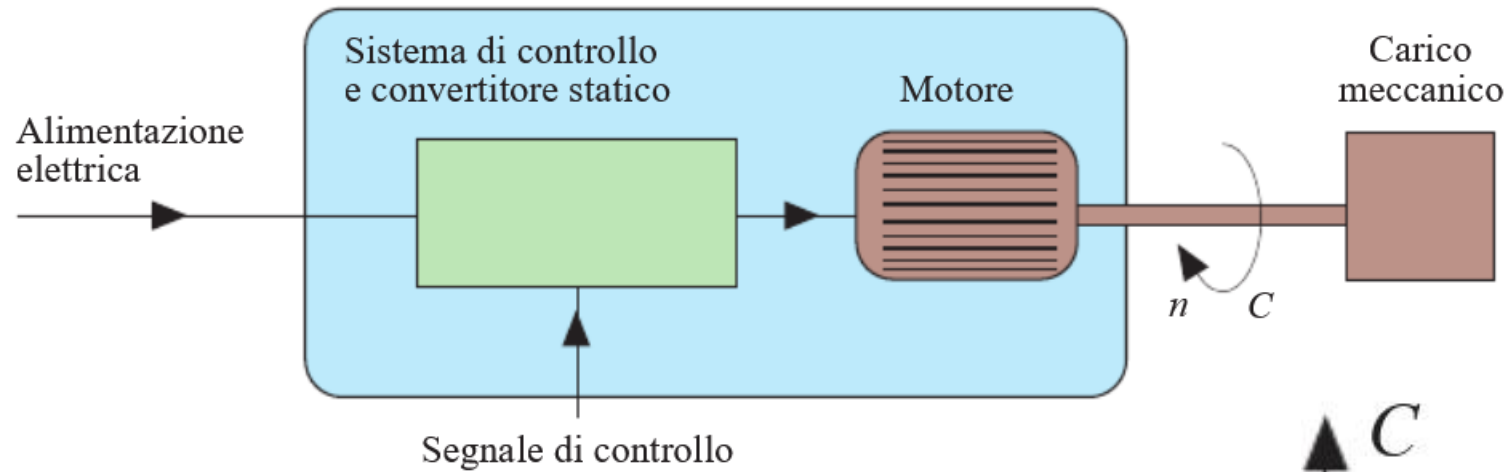


AZIONAMENTI DEI MOTORI REOSTATO DI AVVIAMENTO

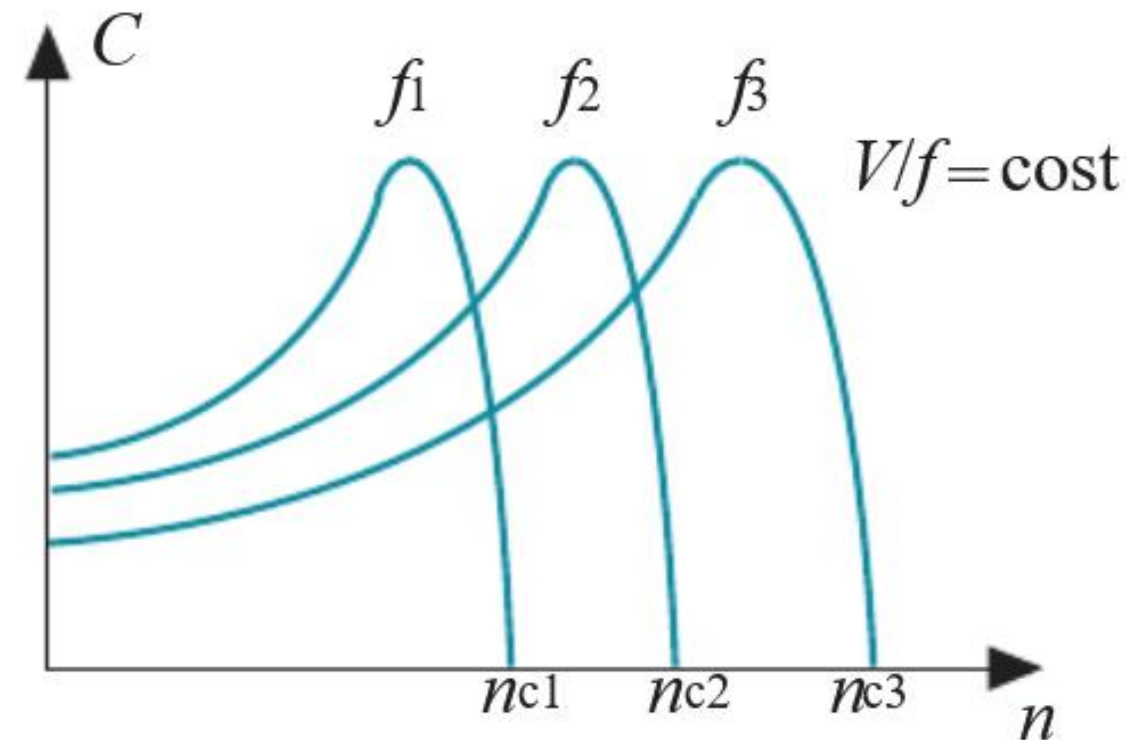


Chitarin e al., Elettrotecnica 2 - Applicazioni, Esculapio

AZIONAMENTI DEI MOTORI



Chitarin e al., Elettrotecnica 2 - Applicazioni, Esculapio



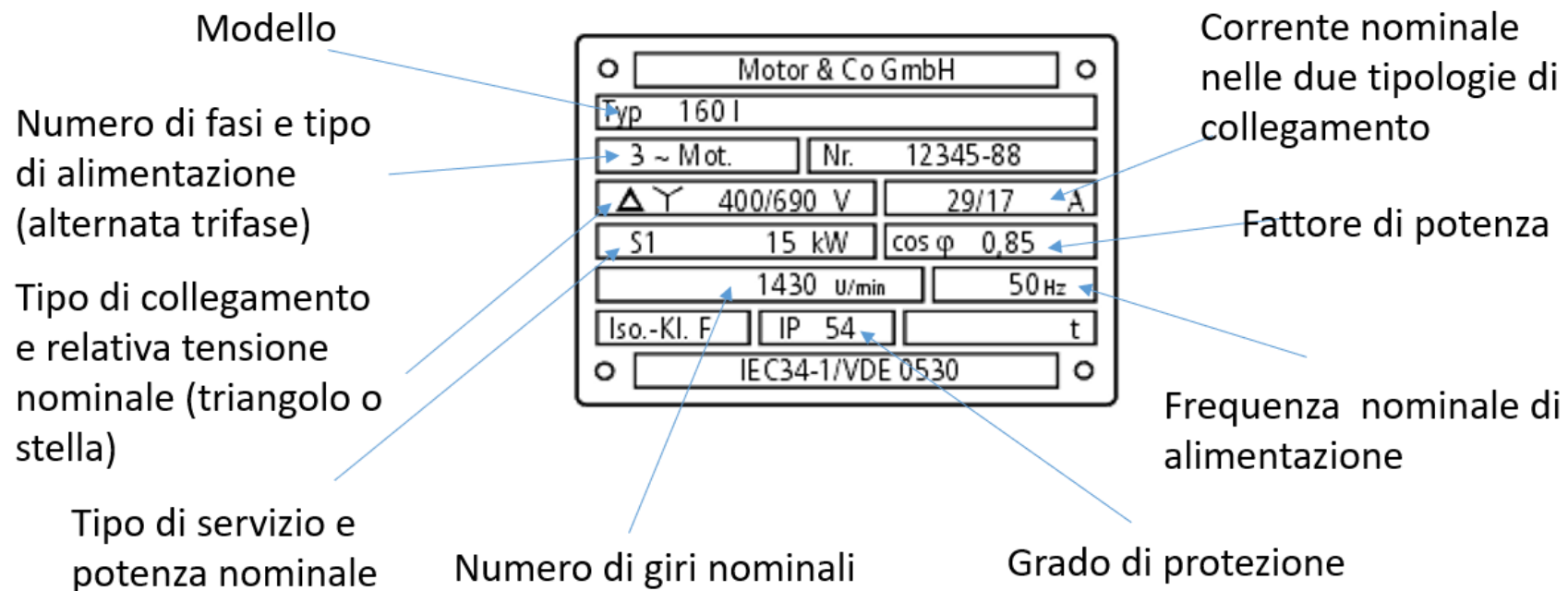
QUANDO SCEGLIERE UN MOTORE A INDUZIONE

- Macchina rotante più diffusa
- Applicazioni in cui la velocità non deve essere precisa (pompe, compressori, ventole, trapani, sollevatori,...)
- Non si vuole usare un'elettronica di controllo
- Ampia variazione di velocità di funzionamento (da centinaia a migliaia di giri al minuto)
- Ampia variazione della potenza (frazioni di kW fino a decine di MW)
- Applicazioni con frequenti sovraccarichi momentanei
- Non è una valida soluzione per applicazioni in cui è necessaria un'efficienza elevata
- Non è una valida soluzione quando si hanno a disposizione spazi ristretti e/o i pesi devono essere contenuti

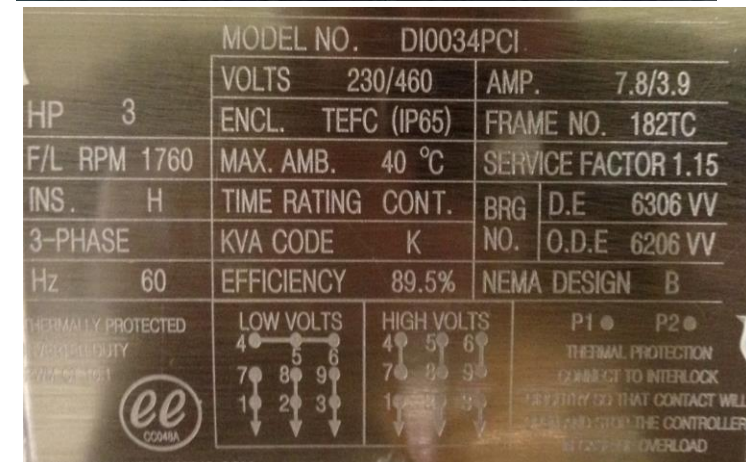




Dati di targa



Motor & Co GmbH	
Typ 160 I	
3 ~ Mot.	Nr. 12345-88
Δ Y 400/690 V	29/17 A
S1 15 kW	cos ϕ 0,85
1430 U/min	50 Hz
Iso.-Kl. F	IP 54
IEC34-1/VDE 0530	



MODEL 8J 215THTL7726ET-R130 L FRAME 215TC					
POLES 4	ENC TENV	CODE M DES A	TYPE TTL	INS F3	
VOLTS 230/460	FL RPM 1774	FL AMPS 27/13.5			
SF 1.0	DUTY CONT	MAX AMB °C 40	TEMP. SENSORS T-STATS		
SERIAL		N.L. AMPS 14.9/7.4			
MAX RPM 4200	S.E. BRG. 309	O.S.E. 206	ROTOR WK² 1.3		
HZ	HP	RPM	TORQUE (LB FT)	VOLTS (HIGH CONN)	AMPS (HIGH CONN)
1	—	0	29.5	—	13.5
60	10	1774	29.5	460	13.5
120	10	3540	14.8	460	12.5
OHMS PH.	R1: .369	R2: .338	X1: 1.42	X2: 2.28	XM: 34.9

Dati tecnici

Classe di efficienza IE1
(IEC 60034-30; 2008 + IEC 60034-30-1; 2014)
Isolamento Classe F - Sovratemperatura Classe F
Servizio S1 - 400 V - 50 Hz
2 poli - 3.000 giri/min

Technical data

IE1 Efficiency class
(IEC 60034-30; 2008 + IEC 60034-30-1; 2014)
Insulation Class F - Temperature rise Class F
S1 Duty - 400 V - 50 Hz
2 poles - 3.000 rpm

Tipo Type	Potenza Power	Velocità Speed	J	Rend. Eff.	Fattore di potenza Power factor	Corrente Current In (400 V)	Coppia nom. Nominal torque	Coppia di spunto Starting torque	Corrente di spunto Starting current	Coppia massima Max torque	Rumor. Noise	Forma B3 Mount B3 Peso Weight
	kW	giri/min rpm	kgm²	%	cosφ	A	Nm	Ca/Cn Tst/Tn	Ia/In Ist/In	Cmax/Cn Tmax/Tn	dB (A)	kg
Serie CA (carcassa in alluminio) - CA Series (aluminium frame)												
CA 63-a	0.18	2680	0.0002	64	0.75	0.54	0.641	2.4	3.5	2.5	57	3.3
CA 63-b	0.25	2700	0.0002	64	0.75	0.75	0.884	2.4	3.5	2.5	57	3.8
CA 71-a	0.37	2800	0.0004	71	0.8	0.94	1.262	2.2	4	2.3	59	6
CA 71-b	0.55	2810	0.0005	71	0.8	1.4	1.869	2.5	4.6	2.6	59	7
C1A 80-a	0.75	2820	0.0012	76	0.81	1.8	2.54	2.3	4.5	2.4	63	8.6
C1A 80-b	1.1	2820	0.0017	76.2	0.81	2.6	3.72	2.3	4.8	2.4	63	10.2
C1A 90S	1.5	2840	0.0012	78.5	0.8	3.4	5.04	2.4	4.9	2.5	68	11.5
C1A 90L	2.2	2840	0.0019	81	0.78	5	7.4	2.4	4.9	2.5	68	13.5
C1A 100L	3	2850	0.0032	82.6	0.81	6.4	10.1	2.6	6.5	2.8	72	20.5
C1A 112MT-a	4	2860	0.0042	84.2	0.8	8.6	13.4	2.6	6.5	2.8	72	23
C1A 112MT-b	5.5	2880	0.0055	83.5	0.84	11.3	18.2	2.5	7	2.8	72	28.2
C1A 132S-a	5.5	2900	0.009	85.7	0.85	10.9	18.1	2.5	7	2.8	74	38.4
C1A 132S-b	7.5	2900	0.0113	87	0.85	14.7	24.7	2.5	7	2.8	74	42
C1A 132M	9	2910	0.015	86	0.86	17.6	29.5	2.4	7	2.7	74	47.5
C1A 160MT-a	11	2910	0.017	88.4	0.84	21	36.1	2.5	6.5	2.7	74	58
C1A 160MT-b	15	2930	0.023	89.4	0.85	29	48.9	2.6	6.7	2.8	75	68
C1A 160L	18.5	2940	0.043	90	0.85	35	60.1	2.5	6.9	2.8	75	90
C1A 180MT	22	2950	0.051	90.5	0.85	42	71.2	2.5	7	2.9	75	110
C1A 180LT	25	2950	0.059	89.5	0.86	47	80.9	2.5	7	2.9	75	116
C1A 200LT-a	30	2950	0.089	91.4	0.86	55	97	2.5	7.3	3	83	142
C1A 200LT-b	37	2960	0.111	92	0.86	68	119	2.5	7.3	3	83	162
C1A 225MT	45	2960	0.18	92.5	0.86	82	145	2.5	7.5	3	83	210
C1A 250MT	55	2970	0.283	93	0.87	98	177	2.5	7.6	3	83	280
C1A 280ST	75	2970	0.493	93.6	0.87	132	241	2.5	7.2	2.9	84	372
C1A 280MT	90	2970	0.587	93.9	0.88	158	289	2.7	7.5	3	87	407
C1A 315ST	110	2975	0.751	93.5	0.89	191	353	2.6	7.5	2.8	87	496
C1A 315M	132	2980	1.27	93.5	0.89	229	423	2.5	7.4	2.7	90	620
C1A 315M	160	2980	1.52	93.5	0.89	278	513	2.5	7.4	2.7	90	668
C1A 315M	200	2980	1.83	94	0.9	342	641	2.5	7.4	2.7	90	760
C1A 355LT	250	2980	2.29	94	0.9	427	801	2.2	7.5	2.4	90	895

I valori di rendimento sono calcolati in accordo con IEC 60034-2-1.

Efficiency values are given according to IEC 60034-2-1.