DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA INDUSTRIALE

UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

ANNO ACCADEMICO 2026-2027

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA DELL'ENERGIA

Insegnamento di

Macchine Elettriche

Docenti: *prof. Mauro Andriollo, prof. Marco Pastura*

mauro.andriollo@unipd.it, marco.pastura@unipd.it

Materiale didattico e info

grattare il codice in seconda di copertina per accedere al materiale online andando su https://ebook.editrice-esculapio.com

- **Testi di riferimento (consigliati)**:

  M. Andriollo, A. Tortella, "*I trasformatori. Teoria ed esercizi*", ed. Esculapio, 2023

  M. Andriollo, A. Tortella, "*Macchine elettriche rotanti*", ed. Esculapio, **2024**





- **Materiale didattico**

  https://stem.elearning.unipd.it/ ⇒ DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE - DII ⇒ A.A. 2026-2027 ⇒ ⇒ Laurea ⇒ IN0515 - INGEGNERIA DELL'ENERGIA ⇒ **MACCHINE ELETTRICHE 2026-2027 - IN06105497**

  - Slide in formato PDF
  - Video (quiz, esercitazioni), foto, animazioni (GeoGebra)
  - Forum
  - Temi anni precedenti, esercizi risolti con foglio di calcolo (SMath Studio)

- **Modalità e regole per l'esame**

  - Prova preliminare (quiz) e prova scritta (esercizio + 2 domande aperte di teoria)
  - 1 prova in itinere/pre-appello, 4 appelli ordinari, 1 appello straordinario
  - Istruzioni, materiali, avvisi su **pagina Moodle** https://stem.elearning.unipd.it/course/view.php?id=16925

Richiami circuiti magnetici/sistemi trifase

Verifica su richiami di circuiti magnetici / sistemi trifase

Verifica su richiami di circuiti magnetici / sistemi trifase

Si raccomanda di leggere attentamente il capitolo "**1 - Richiami di Elettrotecnica**":

I trasformatori. Teoria ed esercizi per Corsi di Laurea in Ingegneria
M. Andriollo, A.Tortella
Bologna: Esculapio, 2023. 3ª *edizione*.

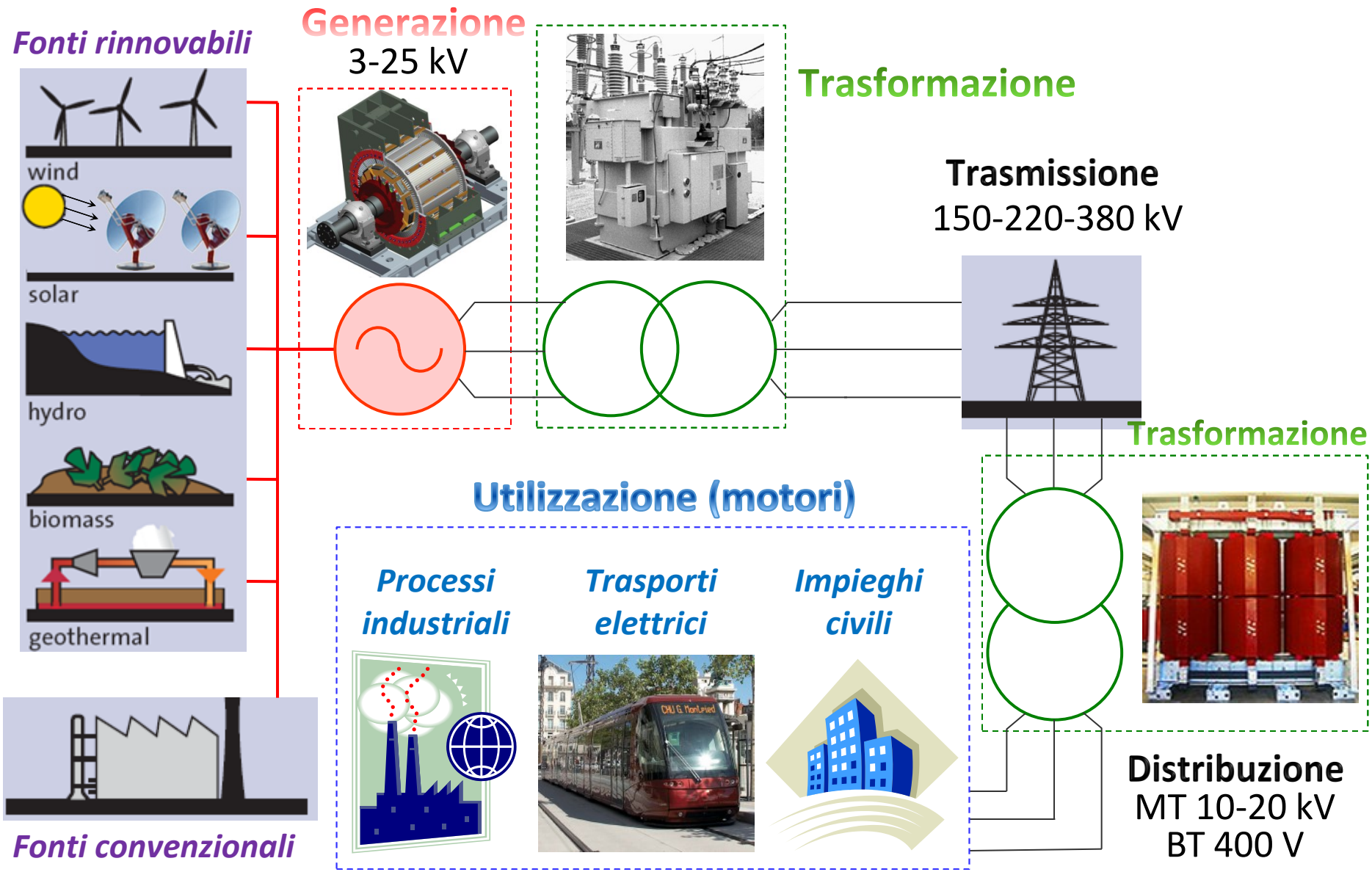
Si tratta di una prova di autovalutazione, non esiste un voto minimo e serve unicamente

PER AVERE ACCESSO ALLE RISORSE (SLIDE, ECC.) DEL CORSO.

Pur non vincolando in alcun modo l'accesso, un esito decisamente insufficiente deve far riflettere sull'opportunità di ripassarsi **con molta attenzione** concetti basilari di elettrotecnica, che sono **fondamentali** per poter proficuamente seguire le lezioni di Macchine Elettriche (nonché superare l'esame).

LE VALUTAZIONI DEL QUIZ POSSONO ESSERE VISIONATE DAL DOCENTE.

Macchine elettriche e rete elettrica industriale



Materiali conduttori

- Materiali **a bassa resistività** per la realizzazione degli **avvolgimenti elettrici**

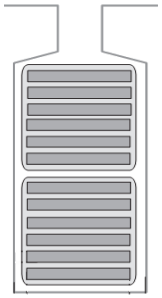
$$\rho(T) = \rho_0\left(1 + \alpha_0(T - T_0)\right)$$

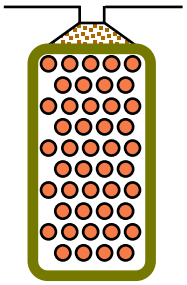
Materiale	ρ_0 @T_0=0° [Ωmm²/m]	α_0 [°C^{-1}]	ρ @T_0=75° [Ωmm²/m]	γ [kg/dm³]
rame elettrolitico	$1.60\ 10^{-2}$	0.00426	$2.1\ 10^{-2}$	8.9
alluminio	$2.65\ 10^{-2}$		$3.5\ 10^{-2}$	**2.7**

Resistenza di una bobina (in corrente continua)









Lato di bobina in cava

$$R_{cc} = N_a \frac{\rho\, l_a}{S_a}$$

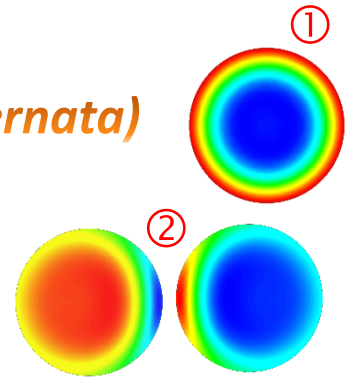
***N_a**: n. conduttori in serie della bobina*

***l_a** : perimetro <u>medio</u> bobina*

***S_a** : sezione singolo conduttore (filo, piattina, sbarra, nastro)*

Perdite joule (n bobine, corrente alternata)

$$P_{ep} = k_{ac} \sum_{i=1}^{n} R_{cc,i} I_i^2 \qquad k_{ac} > 1$$



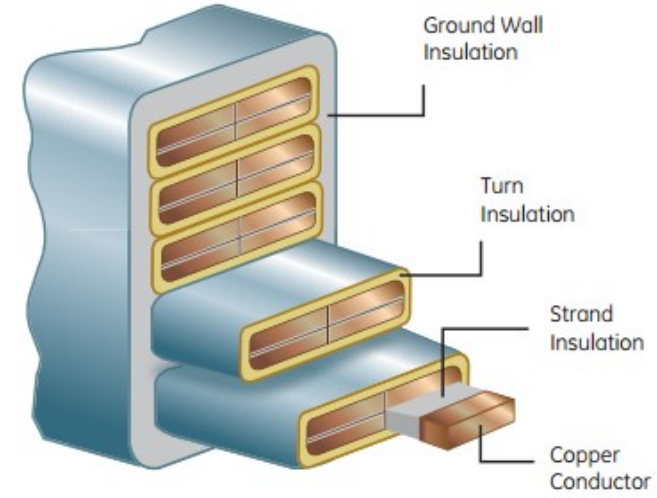
***Incremento perdite** per la **distribuzione non uniforme** della corrente nella sezione di conduttore in presenza di **campi magnetici variabili nel tempo** (effetto <u>pelle</u> ① e di <u>prossimità</u> ②)*

Materiali isolanti

Caratteristiche principali

- Resistività molto elevata ⇒ **$10^8 \div 10^{17}$ Ω·m**
- **Perdite trascurabili** rispetto agli altri materiali
- **Solidi** (polimeri, mica, carta) / **liquidi** (olio)/**gassosi** (aria, SF_6)
- Alta **rigidità dielettrica** ⇒ aria → **30 kV/cm**
  SF_6 → **89 kV/cm**
  olio → **100÷250 kV/cm**
  solido → **50÷600 kV/cm**

  SPESSORE ISOLANTE
- **Costanti dielettriche diverse** ⇒ problemi per la ripartizione del campo elettrico con materiali isolanti accoppiati (o formazione di gas)



Materiale			ε_r	Rigidità dielettrica (kV/cm)
Liquidi	Olio minerale		2,2	250
	Olio sintetico		2,8	200
	Olio siliconico		2,5	100÷150
Gas	Esafluoruro di zolfo		1,002	89
	Aria secca		1	30
Solidi	Materiali termoindurenti a base di resine:	fenoliche	4,5 ÷ 7	30 ÷ 250
		melamminiche	10 ÷ 15	50 ÷ 150
		epossidiche	4 ÷ 5	70 ÷ 210
		siliconiche	4 ÷ 4,5	140 ÷ 210
		poliesteri	4,5 ÷ 5	120 ÷ 180
		poliuretaniche	1 ÷ 1,5	130 ÷ 300
		politetra-fluoroetileniche	2 ÷ 3	150 ÷ 200
	Materiali termoplastici a base di resine:	poliammidiche	3 ÷ 4	110 ÷ 200
		polietileniche	2,2 ÷ 2,5	90 ÷ 400
		polipropileniche	2,0 ÷ 2,5	180 ÷ 260
		polistiroliche	2,4 ÷ 4,75	120 ÷ 270
		policlorovinilliche	2,8 ÷ 3,6	470 ÷ 600
		poliacetaliche	3,7 ÷ 3,9	180 ÷ 220
		cellulosiche	2,5 ÷ 3,5	100 ÷ 230
		poliacriliche	2,8 ÷ 4,0	150 ÷ 210
	Prodotti micati		5 ÷ 6,5	200 ÷ 400
	Vernici isolanti con solvente		–	50 ÷ 90
	Porcellana		6 ÷ 7	200 ÷ 400
	Vetro		4 ÷ 10	100 ÷ 500

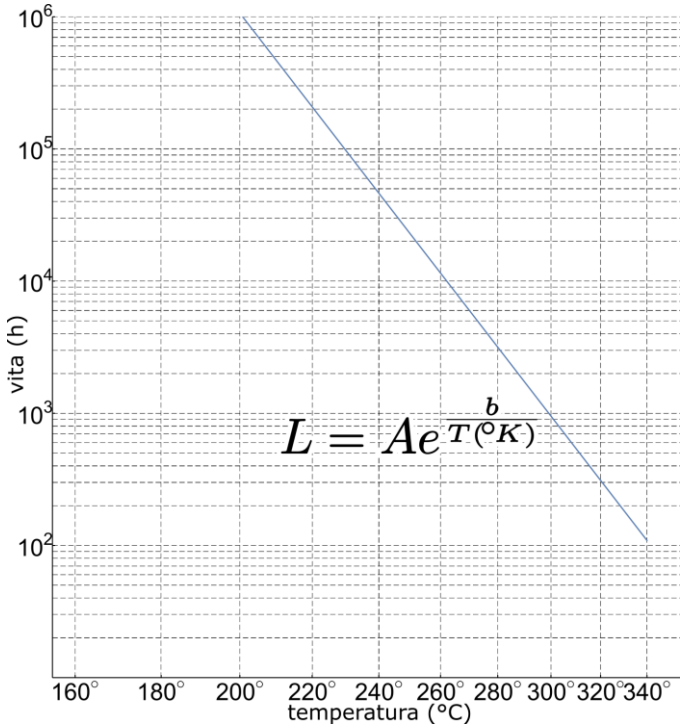
Materiali isolanti solidi – CLASSI TERMICHE

Sensibilità alla **temperatura** ⇒ degrado tanto più rapido quanto più alta è la temperatura

TEMPERATURA MASSIMA DI ESERCIZIO che garantisce una durata adeguata dell'isolante ⇒ **CLASSI TERMICHE DI ISOLAMENTO**

CLASSE TERMICA	MATERIALI PRINCIPALI INCLUSI NELLE VARIE CLASSI	TEMP. MAX [°C]
Y	CARTA,COTONE,LEGNO, PRESSPAN	90
A	MATERIALI DELLA CLASSE Y IMPREGNATI IN OLIO O VERNICIATI	105
E	POLIURETANO, ACETATO	120
B	MATERIALI ACCOPPIATI A BASE DI MICA; MATERIALI ACCOPPIATI A BASE DI FIBRA DI VETRO; PELLICOLE E LAMINATI A BASE DI RESINE EPOSSIDICHE; SMALTI PER FILI E VERNICI PER AVVOLGIMENTI	130
F		155
H	ISOLANTI SILICONICI	180
200 220 250	PORCELLANA, MATERIALI CERAMICI VETRO, QUARZO	200 220 250

Nomex® 410 (classe H, 0.25mm, 300 kV/cm)



CLASSE TERMICA ⇔ TEMPERATURA MASSIMA RAGGIUNTA DALL'ISOLANTE legata a:

- CONDIZIONI DI **RAFFREDDAMENTO** (tipo di raffreddamento, temperatura ambiente)
- **CICLO DI SERVIZIO** DELLA MACCHINA (potenza scambiata ⇔ potenza dissipata, tempo)

Materiali ferromagnetici dolci

Caratteristiche principali

- **Alta permeabilità** relativa μ_r nelle condizioni di esercizio (curva di prima magnetizzazione)
- **Piccola area del ciclo d'isteresi** → riduzione perdite per unità di volume associate alla magnetizzazione del materiale con campo magnetico variabile
- **Struttura laminata** in direzione parallela al flusso → riduzione perdite ohmiche causate dalle correnti indotte dal campo magnetico variabile

Perdite specifiche: per u. di volume (W/m³)/densità (kg/m³) ⇨ per u. di massa (W/kg)

$$p_{fp} = \alpha\, f\, B_M^{1.6\div 2} + \beta\, f^2\, B_M^2\, d^2$$

isteresi correnti parassite

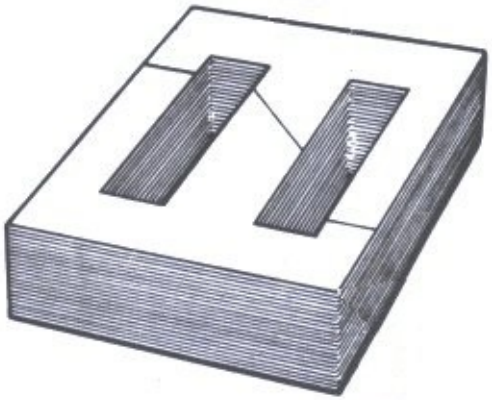
f, B_M*: frequenza e valore massimo induzione sinusoidale*

d *: spessore lamierino (0.2÷0.6 mm)*

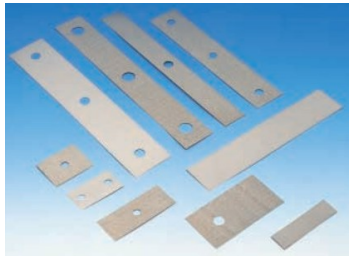
α, β*: coefficienti dipendenti dal materiale*

- $\beta \propto \sigma = 1/\rho$ → uso di **lamierini al silicio** (riduce anche α) in frazioni **2 ÷ 4 %** per non peggiorare la permeabilità e la resistenza meccanica
- Lamierino **a cristalli orientati** → aumento permeabilità e riduzione area del ciclo secondo la direzione privilegiata (flusso a direzione fissa ⇒ trasformatori)

Lamierini magnetici

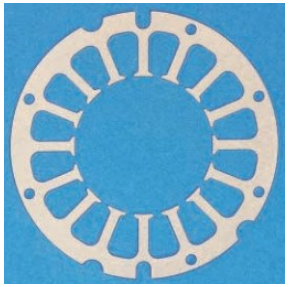


Trasformatore

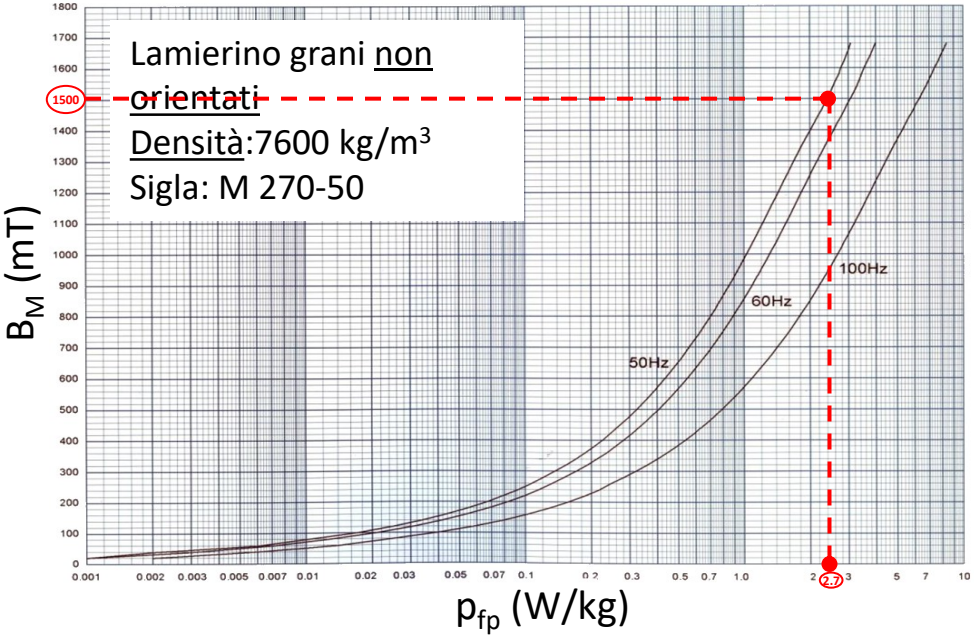




Asincrono



Curva perdite da catalogo



- Curve in scala semi-logaritmica in **funzione dell'induzione massima e della frequenza** fornite dai produttori di lamierini (dipendono da materiale, trattamento e spessore)
- **Sigla materiale**: **perdite (W/kg) per B_M=1.5 T, f=50 Hz** e **spessore del lamierino in centesimi di mm** (es. M 270 – 50 ⇒ 2.7 W/kg)



Quiz di autovalutazione in piattaforma

Altre voci di perdita / rendimento

- **Perdite addizionali P_{ad}**
  - Perdite per isteresi e correnti parassite nelle **parti metalliche strutturali** (es. esempio carcassa, albero) investite da un flusso magnetico variabile nel tempo
  - Determinate normalmente in base alle norme tecniche
- **Perdite meccaniche P_{mp}**
  - Perdite per **attrito** e **ventilazione** nelle macchine **rotanti** (dipendono dalla velocità di rotazione)

Perdite totali

$$P_p = P_{ep} + P_{fp} + P_{ad} + P_{mp}$$

Rendimento

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_p} = \frac{P_{in} - P_p}{P_{in}}$$

Macchine rotanti

Motore

$$\eta = \frac{P_m}{P_m + P_p} = \frac{P_m}{P_m + P_{fp} + P_{mp} + P_{ep} + P_{ad}}$$

Generatore

$$\eta = \frac{P_e}{P_e + P_p} = \frac{P_e}{P_e + P_{fp} + P_{mp} + P_{ep} + P_{ad}}$$