

# Càlcul Vectorial en $\mathbb{R}^3$

JOSEP MOLLERA BARRIGA

Versió 14 (1 de maig de 2023)

## 1 Introducció

Aquest escrit és una breu introducció al càlcul vectorial en  $\mathbb{R}^3$ , és a dir, en tres dimensions. Es presenten de forma directa —sense demostracions— operadors, relacions i teoremes vectorials.

S'utilitzen els tres tipus de coordenades més usuals: cartesianes, cilíndriques i esfèriques.

Totes les versions d'aquest text, així com els programes de la calculadora HP Prime inclosos, poden trobar-se a GitHub: <https://github.com/jmollera/Calcul-Vectorial-GitHub>.

## 2 Definicions

Es dona, en primer lloc, la definició de les variables i funcions que s'utilitzen en aquest document.

$\mathcal{V}$  Volum d'integració.

$\mathcal{S}$  Superfície d'integració.

$\mathcal{C}$  Corba d'integració.

$d\tau$  Diferencial de volum del volum  $\mathcal{V}$ .

$d\mathbf{a}$  Vector diferencial de superfície de la superfície  $\mathcal{S}$ .

$d\mathbf{a}$  és perpendicular a  $\mathcal{S}$ .

$d\mathbf{l}$  Vector diferencial de longitud de la corba  $\mathcal{C}$ .

$d\mathbf{l}$  és tangent a  $\mathcal{C}$ .

$x, y, z$  Coordenades d'un punt en un sistema de coordenades cartesianes.

$\rho, \varphi, z$  Coordenades d'un punt en un sistema de coordenades cilíndriques.

$r, \theta, \varphi$  Coordenades d'un punt en un sistema de coordenades esfèriques.

$u, v, w$  Coordenades d'un punt en un sistema de coordenades qualssevol.

$\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z$  Vectors directores d'un sistema de coordenades cartesianes.

$\mathbf{e}_\rho, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_z$  Vectors directores d'un sistema de coordenades cilíndriques.

$\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta, \mathbf{e}_\varphi$  Vectors directores d'un sistema de coordenades esfèriques.

$\mathbf{e}_u, \mathbf{e}_v, \mathbf{e}_w$  Vectors directores d'un sistema de coordenades qualssevol.

$\mathcal{P}, \mathcal{Q}$  Punts en  $\mathbb{R}^3$ .

$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$  Vectors en  $\mathbb{R}^3$ .

$\alpha$  Angle entre dos vectors en  $\mathbb{R}^3$ .

$f, g$  Funcions escalars.

$f, g: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$

$\mathbf{F}, \mathbf{G}$  Funcions vectorials.

$\mathbf{F}, \mathbf{G}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$

$\nabla f$  Gradient de la funció escalar  $f$ .

$\nabla f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$

$\nabla \cdot \mathbf{F}$  Divergència de la funció vectorial  $\mathbf{F}$ .

$\nabla \cdot \mathbf{F}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$

$\nabla \times \mathbf{F}$  Rotacional de la funció vectorial  $\mathbf{F}$ .

$\nabla \times \mathbf{F}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$

$\nabla^2 f$  Laplaciana de la funció escalar  $f$ .

$\nabla^2 f: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$

$\nabla^2 \mathbf{F}$  Laplaciana de la funció vectorial  $\mathbf{F}$ .

$\nabla^2 \mathbf{F}: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$

### 3 Sistemes de Coordenades

Es representen en la figura 1 a la pàgina següent tres dels sistemes de coordenades més utilitzats: el cartesià, el cilíndric i l'esfèric. L'orientació dels eixos i els orígens dels angles corresponen a un sistema de coordenades destre, tal com es defineix en la norma ISO 80000-2 *Quantities and units — Part 2: Mathematics*.

En el sistema de coordenades cartesianes els vectors directores tenen una orientació fixa, mentre que en els sistemes de coordenades cilíndriques i esfèriques, els vectors directores tenen una orientació variable que depèn del punt  $\mathcal{P}$  al qual ens referim.

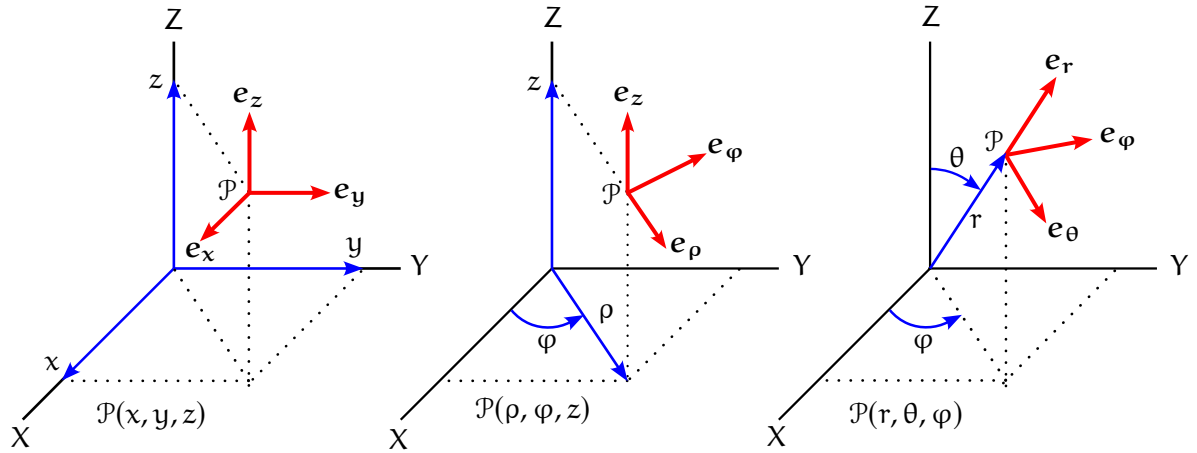


Figura 1 Coordenades cartesianes, cilíndriques i esfèriques

En la taula 1 es donen els rangs de les coordenades de cadascun d'aquests tres sistemes.

Taula 1 Rangs de les Coordenades

Cartesianes	Cilíndriques	Esfèriques
$x \in (-\infty, \infty)$	$\rho \in [0, \infty)$	$r \in [0, \infty)$
$y \in (-\infty, \infty)$	$\varphi \in [0, 2\pi)$	$\theta \in [0, \pi]$
$z \in (-\infty, \infty)$	$z \in (-\infty, \infty)$	$\varphi \in [0, 2\pi)$

### 3.1 Relacions entre les coordenades cartesianes i cilíndriques

Les coordenades cartesianes d'un punt  $\mathcal{P}(x, y, z)$  s'obtenen a partir de les seves coordenades cilíndriques  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$ , mitjançant les relacions següents:

$$x = \rho \cos \varphi \quad (1a)$$

$$y = \rho \sin \varphi \quad (1b)$$

$$z = z \quad (1c)$$

Les coordenades cilíndriques d'un punt  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$  s'obtenen a partir de les seves coordenades cartesianes  $\mathcal{P}(x, y, z)$ , mitjançant les relacions següents:

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2a)$$

$$\varphi = \arctan \frac{y}{x} \quad (2b)$$

$$z = z \quad (2c)$$

Els vectors directores de les coordenades cartesianes  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$  i  $\mathbf{e}_z$  en un punt  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$ , s'obtenen a partir dels vectors directores de les coordenades cilíndriques  $\mathbf{e}_\rho$ ,  $\mathbf{e}_\varphi$  i  $\mathbf{e}_z$  en el mateix punt  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$ , mitjançant les relacions:

$$\mathbf{e}_x = \cos \varphi \mathbf{e}_\rho - \sin \varphi \mathbf{e}_\varphi \quad (3a)$$

$$\mathbf{e}_y = \sin \varphi \mathbf{e}_\rho + \cos \varphi \mathbf{e}_\varphi \quad (3b)$$

$$\mathbf{e}_z = \mathbf{e}_z \quad (3c)$$

Els vectors directores de les coordenades cilíndriques  $\mathbf{e}_\rho$ ,  $\mathbf{e}_\varphi$  i  $\mathbf{e}_z$  en un punt  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$ , s'obtenen a partir dels vectors directores de les coordenades cartesianes  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$  i  $\mathbf{e}_z$  en el mateix punt  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$ , mitjançant les relacions següents:

$$\mathbf{e}_\rho = \cos \varphi \mathbf{e}_x + \sin \varphi \mathbf{e}_y \quad (4a)$$

$$\mathbf{e}_\varphi = -\sin \varphi \mathbf{e}_x + \cos \varphi \mathbf{e}_y \quad (4b)$$

$$\mathbf{e}_z = \mathbf{e}_z \quad (4c)$$

Les components d'un vector en coordenades cartesianes  $\mathbf{A}(A_x, A_y, A_z)$  amb origen al punt  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$ , s'obtenen a partir de les seves components en coordenades cilíndriques  $\mathbf{A}(A_\rho, A_\varphi, A_z)$  amb origen al mateix punt  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$ , mitjançant les relacions següents:

$$A_x = A_\rho \cos \varphi - A_\varphi \sin \varphi \quad (5a)$$

$$A_y = A_\rho \sin \varphi + A_\varphi \cos \varphi \quad (5b)$$

$$A_z = A_z \quad (5c)$$

Les components d'un vector en coordenades cilíndriques  $\mathbf{A}(A_\rho, A_\varphi, A_z)$  amb origen al punt  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$ , s'obtenen a partir de les seves components en coordenades cartesianes  $\mathbf{A}(A_x, A_y, A_z)$  amb origen al mateix punt  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$ , mitjançant les relacions següents:

$$A_\rho = A_x \cos \varphi + A_y \sin \varphi \quad (6a)$$

$$A_\varphi = -A_x \sin \varphi + A_y \cos \varphi \quad (6b)$$

$$A_z = A_z \quad (6c)$$

### 3.2 Relacions entre les coordenades cartesianes i esfèriques

Les coordenades cartesianes d'un punt  $\mathcal{P}(x, y, z)$  s'obtenen a partir de les seves coordenades esfèriques  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , mitjançant les relacions següents:

$$x = r \sin \theta \cos \varphi \quad (7a)$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi \quad (7b)$$

$$z = r \cos \theta \quad (7c)$$

Les coordenades esfèriques d'un punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$  s'obtenen a partir de les seves coordenades cartesianes  $\mathcal{P}(x, y, z)$ , mitjançant les relacions següents:

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \quad (8a)$$

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (8b)$$

$$\varphi = \arctan \frac{y}{x} \quad (8c)$$

Els vectors directores de les coordenades cartesianes  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$  i  $\mathbf{e}_z$  en un punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , s'obtenen a partir dels vectors directores de les coordenades esfèriques  $\mathbf{e}_r$ ,  $\mathbf{e}_\theta$  i  $\mathbf{e}_\varphi$  en el mateix punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ ,

mitjançant les relacions:

$$\mathbf{e}_x = \sin \theta \cos \varphi \mathbf{e}_r + \cos \theta \cos \varphi \mathbf{e}_\theta - \sin \varphi \mathbf{e}_\varphi \quad (9a)$$

$$\mathbf{e}_y = \sin \theta \sin \varphi \mathbf{e}_r + \cos \theta \sin \varphi \mathbf{e}_\theta + \cos \varphi \mathbf{e}_\varphi \quad (9b)$$

$$\mathbf{e}_z = \cos \theta \mathbf{e}_r - \sin \theta \mathbf{e}_\theta \quad (9c)$$

Els vectors directores de les coordenades esfèriques  $\mathbf{e}_r$ ,  $\mathbf{e}_\theta$  i  $\mathbf{e}_\varphi$  en un punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , s'obtenen a partir dels vectors directores de les coordenades cartesianes  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$  i  $\mathbf{e}_z$  en el mateix punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , mitjançant les relacions:

$$\mathbf{e}_r = \sin \theta \cos \varphi \mathbf{e}_x + \sin \theta \sin \varphi \mathbf{e}_y + \cos \theta \mathbf{e}_z \quad (10a)$$

$$\mathbf{e}_\theta = \cos \theta \cos \varphi \mathbf{e}_x + \cos \theta \sin \varphi \mathbf{e}_y - \sin \theta \mathbf{e}_z \quad (10b)$$

$$\mathbf{e}_\varphi = -\sin \varphi \mathbf{e}_x + \cos \varphi \mathbf{e}_y \quad (10c)$$

Les components d'un vector en coordenades cartesianes  $\mathbf{A}(A_x, A_y, A_z)$  amb origen al punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , s'obtenen a partir de les seves components en coordenades esfèriques  $\mathbf{A}(A_r, A_\theta, A_\varphi)$  amb origen al mateix punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , mitjançant les relacions següents:

$$A_x = A_r \sin \theta \cos \varphi + A_\theta \cos \theta \cos \varphi - A_\varphi \sin \varphi \quad (11a)$$

$$A_y = A_r \sin \theta \sin \varphi + A_\theta \cos \theta \sin \varphi + A_\varphi \cos \varphi \quad (11b)$$

$$A_z = A_r \cos \theta - A_\theta \sin \theta \quad (11c)$$

Les components d'un vector en coordenades esfèriques  $\mathbf{A}(A_r, A_\theta, A_\varphi)$  amb origen al punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , s'obtenen a partir de les seves components en coordenades cartesianes  $\mathbf{A}(A_x, A_y, A_z)$  amb origen al mateix punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , mitjançant les relacions següents:

$$A_r = A_x \sin \theta \cos \varphi + A_y \sin \theta \sin \varphi + A_z \cos \theta \quad (12a)$$

$$A_\theta = A_x \cos \theta \cos \varphi + A_y \cos \theta \sin \varphi - A_z \sin \theta \quad (12b)$$

$$A_\varphi = -A_x \sin \varphi + A_y \cos \varphi \quad (12c)$$

### 3.3 Relacions entre les coordenades cilíndriques i esfèriques

Les coordenades cilíndriques d'un punt  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$  s'obtenen a partir de les seves coordenades esfèriques  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , mitjançant les relacions següents:

$$\rho = r \sin \theta \quad (13a)$$

$$\varphi = \varphi \quad (13b)$$

$$z = r \cos \theta \quad (13c)$$

Les coordenades esfèriques d'un punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$  s'obtenen a partir de les seves coordenades cilíndriques  $\mathcal{P}(\rho, \varphi, z)$ , mitjançant les relacions següents:

$$r = \sqrt{\rho^2 + z^2} \quad (14a)$$

$$\theta = \arctan \frac{\rho}{z} \quad (14b)$$

$$\varphi = \varphi \quad (14c)$$

Els vectors directores de les coordenades cilíndriques  $\mathbf{e}_\rho, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_z$  en un punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , s'obtenen a partir dels vectors directores de les coordenades esfèriques  $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta$  i  $\mathbf{e}_\varphi$  en el mateix punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , mitjançant les relacions:

$$\mathbf{e}_\rho = \sin \theta \mathbf{e}_r + \cos \theta \mathbf{e}_\theta \quad (15a)$$

$$\mathbf{e}_\varphi = \mathbf{e}_\varphi \quad (15b)$$

$$\mathbf{e}_z = \cos \theta \mathbf{e}_r - \sin \theta \mathbf{e}_\theta \quad (15c)$$

Els vectors directores de les coordenades esfèriques  $\mathbf{e}_r, \mathbf{e}_\theta$  i  $\mathbf{e}_\varphi$  en un punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , s'obtenen a partir dels vectors directores de les coordenades cilíndriques  $\mathbf{e}_\rho, \mathbf{e}_\varphi, \mathbf{e}_z$  en el mateix punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , mitjançant les relacions:

$$\mathbf{e}_r = \sin \theta \mathbf{e}_\rho + \cos \theta \mathbf{e}_z \quad (16a)$$

$$\mathbf{e}_\theta = \cos \theta \mathbf{e}_\rho - \sin \theta \mathbf{e}_z \quad (16b)$$

$$\mathbf{e}_\varphi = \mathbf{e}_\varphi \quad (16c)$$

Les components d'un vector en coordenades cilíndriques  $\mathbf{A}(A_\rho, A_\varphi, A_z)$  amb origen al punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , s'obtenen a partir de les seves components en coordenades esfèriques  $\mathbf{A}(A_r, A_\theta, A_\varphi)$  amb origen al mateix punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , mitjançant les relacions següents:

$$A_\rho = A_r \sin \theta + A_\theta \cos \theta \quad (17a)$$

$$A_\varphi = A_\varphi \quad (17b)$$

$$A_z = A_r \cos \theta - A_\theta \sin \theta \quad (17c)$$

Les components d'un vector en coordenades esfèriques  $\mathbf{A}(A_r, A_\theta, A_\varphi)$  amb origen al punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , s'obtenen a partir de les seves components en coordenades cilíndriques  $\mathbf{A}(A_\rho, A_\varphi, A_z)$  amb origen al mateix punt  $\mathcal{P}(r, \theta, \varphi)$ , mitjançant les relacions següents:

$$A_r = A_\rho \sin \theta + A_z \cos \theta \quad (18a)$$

$$A_\theta = A_\rho \cos \theta - A_z \sin \theta \quad (18b)$$

$$A_\varphi = A_\varphi \quad (18c)$$

## 4 Operacions Bàsiques

A partir dels vectors  $\mathbf{A}(A_u, A_v, A_w)$ ,  $\mathbf{B}(B_u, B_v, B_w)$  i  $\mathbf{C}(C_u, C_v, C_w)$ , expressats en un sistema de coordenades qualssevol, tenim:

### 4.1 Mòdul

$$|\mathbf{A}| = \sqrt{A_u^2 + A_v^2 + A_w^2} \quad (19)$$

### 4.2 Addició i subtracció

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = (A_u + B_u) \mathbf{e}_u + (A_v + B_v) \mathbf{e}_v + (A_w + B_w) \mathbf{e}_w \quad (20a)$$

$$\mathbf{A} - \mathbf{B} = (A_u - B_u) \mathbf{e}_u + (A_v - B_v) \mathbf{e}_v + (A_w - B_w) \mathbf{e}_w \quad (20b)$$

### 4.3 Producte escalar

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = A_u B_u + A_v B_v + A_w B_w \quad (21)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = |\mathbf{A}| |\mathbf{B}| \cos \alpha \quad (22)$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \quad (23)$$

$$\mathbf{A} \cdot (\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{B} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{C} \quad (24)$$

El producte escalar de dos vectors perpendiculars és nul.

### 4.4 Producte vectorial

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = (A_v B_w - A_w B_v) \mathbf{e}_u + (A_w B_u - A_u B_w) \mathbf{e}_v + (A_u B_v - A_v B_u) \mathbf{e}_w \quad (25)$$

$$|\mathbf{A} \times \mathbf{B}| = |\mathbf{A}| |\mathbf{B}| \sin \alpha \quad (26)$$

$$\mathbf{A} \times \mathbf{B} = -(\mathbf{B} \times \mathbf{A}) \quad (27)$$

$$\mathbf{A} \times (\mathbf{B} + \mathbf{C}) = \mathbf{A} \times \mathbf{B} + \mathbf{A} \times \mathbf{C} \quad (28)$$

El producte vectorial de dos vectors paral·lels és nul.

El producte vectorial de dos vectors és un altre vector, el sentit del qual és definit per la regla del caragol: és el sentit d'avanç que té un caragol, amb el seu eix perpendicular al pla format pels vectors  $\mathbf{A}$  i  $\mathbf{B}$ , quan gira en el sentit que portaria el primer vector  $\mathbf{A}$  a trobar el segon vector  $\mathbf{B}$ , utilitzant el menor angle possible.

### 4.5 Derivada temporal

$$\frac{d\mathbf{A}}{dt} = \frac{dA_u}{dt} \mathbf{e}_u + \frac{dA_v}{dt} \mathbf{e}_v + \frac{dA_w}{dt} \mathbf{e}_w \quad (29)$$

## 5 Càlcul Diferencial

### 5.1 Coordenades cartesianes

Es donen a continuació les derivades parcials dels vectors directores  $\mathbf{e}_x$ ,  $\mathbf{e}_y$  i  $\mathbf{e}_z$ , respecte  $x$ ,  $y$  i  $z$ :

$$\frac{\partial \mathbf{e}_x}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_x}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_x}{\partial z} = 0 \quad (30a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_y}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_y}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_y}{\partial z} = 0 \quad (30b)$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_z}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_z}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_z}{\partial z} = 0 \quad (30c)$$

En les equacions següents,  $(F_x, F_y, F_z)$  són les components de la funció vectorial  $\mathbf{F}$  en un sistema de coordenades cartesianes. En aquestes coordenades tenim:

$$d\mathbf{l} = dx \mathbf{e}_x + dy \mathbf{e}_y + dz \mathbf{e}_z \quad (31)$$

$$d\mathbf{a} = dx dy \mathbf{e}_z \quad (\text{en un pla paral·lel al X-Y}) \quad (32)$$

$$d\mathbf{a} = dx dz \mathbf{e}_y \quad (\text{en un pla paral·lel al X-Z}) \quad (33)$$

$$d\mathbf{a} = dy dz \mathbf{e}_x \quad (\text{en un pla paral·lel al Y-Z}) \quad (34)$$

$$d\tau = dx dy dz \quad (35)$$

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x} \mathbf{e}_x + \frac{\partial f}{\partial y} \mathbf{e}_y + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{e}_z \quad (36)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (37)$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \left[ \frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z} \right] \mathbf{e}_x + \left[ \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x} \right] \mathbf{e}_y + \left[ \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y} \right] \mathbf{e}_z \quad (38)$$

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad (39)$$

## 5.2 Coordenades cilíndriques

Es donen a continuació les derivades parcials dels vectors directors  $\mathbf{e}_\rho$ ,  $\mathbf{e}_\varphi$  i  $\mathbf{e}_z$ , respecte  $\rho$ ,  $\varphi$  i  $z$ :

$$\frac{\partial \mathbf{e}_\rho}{\partial \rho} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_\rho}{\partial \varphi} = \mathbf{e}_\varphi \quad \frac{\partial \mathbf{e}_\rho}{\partial z} = 0 \quad (40a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_\varphi}{\partial \rho} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_\varphi}{\partial \varphi} = -\mathbf{e}_\rho \quad \frac{\partial \mathbf{e}_\varphi}{\partial z} = 0 \quad (40b)$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_z}{\partial \rho} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_z}{\partial \varphi} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_z}{\partial z} = 0 \quad (40c)$$

En les equacions següents,  $(F_\rho, F_\varphi, F_z)$  són les components de la funció vectorial  $\mathbf{F}$  en un sistema de coordenades cilíndriques. En aquestes coordenades tenim:

$$d\mathbf{l} = d\rho \mathbf{e}_\rho + \rho d\varphi \mathbf{e}_\varphi + dz \mathbf{e}_z \quad (41)$$

$$d\mathbf{a} = \rho d\varphi dz \mathbf{e}_\rho \quad (\text{en una superfície cilíndrica}) \quad (42)$$

$$d\tau = \rho d\rho d\varphi dz \quad (43)$$

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial \rho} \mathbf{e}_\rho + \frac{1}{\rho} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi + \frac{\partial f}{\partial z} \mathbf{e}_z \quad (44)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho}(\rho F_\rho) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \quad (45)$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \left[ \frac{1}{\rho} \frac{\partial F_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial F_\varphi}{\partial z} \right] \mathbf{e}_\rho + \left[ \frac{\partial F_\rho}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial \rho} \right] \mathbf{e}_\varphi + \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial \rho}(\rho F_\varphi) - \frac{\partial F_\rho}{\partial \varphi} \right] \mathbf{e}_z \quad (46)$$

$$\nabla^2 f = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial f}{\partial \rho} \right) + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \quad (47)$$



### 5.3 Coordenades esfèriques

Es donen a continuació les derivades parcials dels vectors directors  $\mathbf{e}_r$ ,  $\mathbf{e}_\theta$  i  $\mathbf{e}_\varphi$ , respecte  $r$ ,  $\theta$  i  $\varphi$ :

$$\frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial \theta} = \mathbf{e}_\theta \quad \frac{\partial \mathbf{e}_r}{\partial \varphi} = \sin \theta \mathbf{e}_\varphi \quad (48a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_\theta}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_\theta}{\partial \theta} = -\mathbf{e}_r \quad \frac{\partial \mathbf{e}_\theta}{\partial \varphi} = \cos \theta \mathbf{e}_\varphi \quad (48b)$$

$$\frac{\partial \mathbf{e}_\varphi}{\partial r} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_\varphi}{\partial \theta} = 0 \quad \frac{\partial \mathbf{e}_\varphi}{\partial \varphi} = -\sin \theta \mathbf{e}_r - \cos \theta \mathbf{e}_\theta \quad (48c)$$

En les equacions següents,  $(F_r, F_\theta, F_\varphi)$  són les components de la funció vectorial  $\mathbf{F}$  en un sistema de coordenades esfèriques. En aquestes coordenades tenim:

$$d\mathbf{l} = dr \mathbf{e}_r + r d\theta \mathbf{e}_\theta + r \sin \theta d\varphi \mathbf{e}_\varphi \quad (49)$$

$$d\mathbf{a} = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi \mathbf{e}_r \quad (\text{en una superfície esfèrica}) \quad (50)$$

$$d\tau = r^2 \sin \theta dr d\theta d\varphi \quad (51)$$

$$\nabla f = \frac{\partial f}{\partial r} \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial \theta} \mathbf{e}_\theta + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial f}{\partial \varphi} \mathbf{e}_\varphi \quad (52)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{F} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 F_r) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (F_\theta \sin \theta) + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial F_\varphi}{\partial \varphi} \quad (53)$$

$$\nabla \times \mathbf{F} = \frac{1}{r \sin \theta} \left[ \frac{\partial}{\partial \theta} (F_\varphi \sin \theta) - \frac{\partial F_\theta}{\partial \varphi} \right] \mathbf{e}_r + \frac{1}{r} \left[ \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial F_r}{\partial \varphi} - \frac{\partial}{\partial r} (r F_\varphi) \right] \mathbf{e}_\theta + \frac{1}{r} \left[ \frac{\partial}{\partial r} (r F_\theta) - \frac{\partial F_r}{\partial \theta} \right] \mathbf{e}_\varphi \quad (54)$$

$$\nabla^2 f = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial f}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial f}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 f}{\partial \varphi^2} \quad (55)$$

## 6 Relacions

### 6.1 Operadors

Els operadors  $\nabla$  i  $\nabla^2$  es defineixen en coordenades cartesianes, segons les relacions següents:

$$\nabla \equiv \mathbf{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{e}_y \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{e}_z \frac{\partial}{\partial z} \quad (56)$$

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (57)$$

## 6.2 Identitats

Es compleixen les identitats següents:

$$\nabla^2 f = \nabla \cdot (\nabla f) \quad (58)$$

$$\nabla^2 \mathbf{F} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{F}) - \nabla \times (\nabla \times \mathbf{F}) \quad (59)$$

$$\nabla \times (\nabla f) = 0 \quad (60)$$

$$\nabla \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) = 0 \quad (61)$$

## 6.3 Gradient

El gradient compleix les relacions següents:

$$\nabla(f + g) = \nabla f + \nabla g \quad (62)$$

$$\nabla(fg) = f\nabla g + g\nabla f \quad (63)$$

$$\nabla(\mathbf{F} \cdot \mathbf{G}) = \mathbf{F} \times (\nabla \times \mathbf{G}) + \mathbf{G} \times (\nabla \times \mathbf{F}) + (\mathbf{F} \cdot \nabla)\mathbf{G} + (\mathbf{G} \cdot \nabla)\mathbf{F} \quad (64)$$

## 6.4 Divergència

La divergència compleix les relacions següents:

$$\nabla \cdot (\mathbf{A} + \mathbf{B}) = (\nabla \cdot \mathbf{A}) + (\nabla \cdot \mathbf{B}) \quad (65)$$

$$\nabla \cdot (f\mathbf{F}) = (\nabla f) \cdot \mathbf{F} + f(\nabla \cdot \mathbf{F}) \quad (66)$$

$$\nabla \cdot (\mathbf{F} \times \mathbf{G}) = \mathbf{G} \cdot (\nabla \times \mathbf{F}) - \mathbf{F} \cdot (\nabla \times \mathbf{G}) \quad (67)$$

## 6.5 Rotacional

El rotacional compleix les relacions següents:

$$\nabla \times (\mathbf{A} + \mathbf{B}) = (\nabla \times \mathbf{A}) + (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (68)$$

$$\nabla \times (f\mathbf{F}) = (\nabla f) \times \mathbf{F} + f(\nabla \times \mathbf{F}) \quad (69)$$

$$\nabla \times (\mathbf{F} \times \mathbf{G}) = (\mathbf{G} \cdot \nabla)\mathbf{F} - (\mathbf{F} \cdot \nabla)\mathbf{G} + \mathbf{F}(\nabla \cdot \mathbf{G}) - \mathbf{G}(\nabla \cdot \mathbf{F}) \quad (70)$$

## 7 Teoremes Vectorials

La funció escalar  $f$  i la funció vectorial  $\mathbf{F}$  que apareixen en els teoremes següents han de ser contínues, diferenciables i les seves derivades primeres han de ser funcions contínues.

## 7.1 Teorema fonamental del gradient

Estableix que la integral sobre una corba  $\mathcal{C}$  de la funció  $\nabla f$  només depèn dels punts inicial i final sobre la corba,  $\mathcal{P}$  i  $\mathcal{Q}$ , i no de la forma que tingui la corba.

$$\int_{\mathcal{C}_{\mathcal{P} \rightarrow \mathcal{Q}}} \nabla f \cdot d\mathbf{l} = f(\mathcal{Q}) - f(\mathcal{P}) \quad (71)$$

Evidentment, la integral anterior és nul·la quan la corba d'integració és tancada ( $\mathcal{P} \equiv \mathcal{Q}$ ).

$$\oint_{\mathcal{C}} \nabla f \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (72)$$

## 7.2 Teorema fonamental de la divergència (també anomenat de Gauss o de Green)

Estableix la relació entre la integral sobre un volum  $\mathcal{V}$  de la funció  $\nabla \cdot \mathbf{F}$  i la integral sobre una superfície  $\mathcal{S}$  de la funció  $\mathbf{F}$ , on  $\mathcal{S}$  és la superfície tancada que limita  $\mathcal{V}$ .

$$\iiint_{\mathcal{V}} (\nabla \cdot \mathbf{F}) d\tau = \oiint_{\mathcal{S}} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{a} \quad (73)$$

El vector  $d\mathbf{a}$  apunta sempre cap a fora del volum  $\mathcal{V}$ .

## 7.3 Teorema fonamental del rotacional (també anomenat de Stokes)

Estableix la relació entre la integral sobre una superfície  $\mathcal{S}$  de la funció  $\nabla \times \mathbf{F}$  i la integral sobre una corba  $\mathcal{C}$  de la funció  $\mathbf{F}$ , on  $\mathcal{C}$  és la corba tancada que limita  $\mathcal{S}$ .

$$\iint_{\mathcal{S}} (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot d\mathbf{a} = \oint_{\mathcal{C}} \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} \quad (74)$$

D'aquesta relació es desprèn que la integral de  $\nabla \times \mathbf{F}$  sobre qualsevol superfície  $\mathcal{S}$  limitada per la mateixa corba  $\mathcal{C}$ , té el mateix valor.

Evidentment, la integral anterior és nul·la quan la superfície d'integració és tancada.

$$\oiint_{\mathcal{S}} (\nabla \times \mathbf{F}) \cdot d\mathbf{a} = 0 \quad (75)$$

En la figura 2 s'il·lustra el conveni de signes dels vectors  $d\mathbf{l}$  i  $d\mathbf{a}$ .

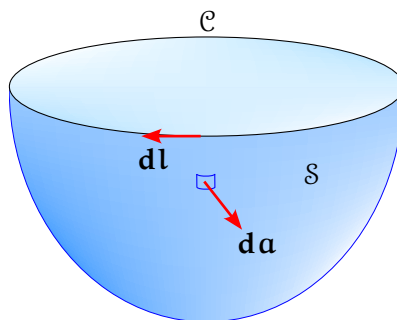


Figura 2 Conveni de signes del teorema de Stokes

## 7.4 Teorema del gradient

Estableix la relació entre la integral sobre un volum  $\mathcal{V}$  de la funció  $\nabla f$  i la integral sobre una superfície  $\mathcal{S}$  de la funció  $f$ , on  $\mathcal{S}$  és la superfície tancada que limita  $\mathcal{V}$ .

$$\iiint_{\mathcal{V}} \nabla f \, d\tau = \oint_{\mathcal{S}} f \, d\mathbf{a} \quad (76)$$

El vector  $d\mathbf{a}$  apunta sempre cap a fora del volum  $\mathcal{V}$ .

## 7.5 Teorema del rotacional

Estableix la relació entre la integral sobre un volum  $\mathcal{V}$  de la funció  $\nabla \times \mathbf{F}$  i la integral sobre una superfície  $\mathcal{S}$  de la funció  $\mathbf{F}$ , on  $\mathcal{S}$  és la superfície tancada que limita  $\mathcal{V}$ .

$$\iiint_{\mathcal{V}} (\nabla \times \mathbf{F}) \, d\tau = - \oint_{\mathcal{S}} \mathbf{F} \times d\mathbf{a} \quad (77)$$

El vector  $d\mathbf{a}$  apunta sempre cap a fora del volum  $\mathcal{V}$ .

## 8 Conversió de coordenades amb la calculadora HP Prime

Es donen a continuació una sèrie de programes per a la calculadora HP Prime, destinats a realitzar conversions entre els sistemes de coordenades rectangulars, cilíndriques i esfèriques.

Utilitzarem les funcions de la calculadora `rectangular_coordinates` i `polar_coordinates`, pensades per fer conversions entre coordenades cartesianes i polars en dues dimensions.

La funció `Rec_a_Cil` pren com a paràmetre les coordenades cartesianes d'un punt en la forma  $[x, y, z]$ , i torna les coordenades cilíndriques corresponents en la forma  $[\rho, \varphi, z]$ .

### Llistat 1 Funció Rec\_a\_Cil

---

```
1 EXPORT Rec_a_Cil(rec)
2 BEGIN
3 LOCAL cil:=polar_coordinates(rec(1),rec(2));
4 RETURN [cil(1),cil(2),rec(3)];
5 END;
```

---

La funció `Cil_a_Rec` pren com a paràmetre les coordenades cilíndriques d'un punt en la forma  $[\rho, \varphi, z]$ , i torna les coordenades cartesianes corresponents en la forma  $[x, y, z]$ .

### Llistat 2 Funció Cil\_a\_Rec

---

```
1 EXPORT Cil_a_Rec(cil)
2 BEGIN
3 LOCAL rec:=rectangular_coordinates(cil(1),cil(2));
4 RETURN [rec(1),rec(2),cil(3)];
5 END;
```

---

La funció `Esf_a_Cil` pren com a paràmetre les coordenades esfèriques d'un punt en la forma  $[r, \theta, \varphi]$ , i torna les coordenades cilíndriques corresponents en la forma  $[\rho, \varphi, z]$ .

---

Llistat 3    Funció `Esf_a_Cil`

---

```
1 EXPORT Esf_a_Cil(esf)
2 BEGIN
3 LOCAL cil:=rectangular_coordinates(esf(1),esf(2));
4   RETURN [cil(2),esf(3),cil(1)];
5 END;
```

---

La funció `Cil_a_Esf` pren com a paràmetre les coordenades cilíndriques d'un punt en la forma  $[\rho, \varphi, z]$ , i torna les coordenades esfèriques corresponents en la forma  $[r, \theta, \varphi]$ .

---

Llistat 4    Funció `Cil_a_Esf`

---

```
1 EXPORT Cil_a_Esf(cil)
2 BEGIN
3 LOCAL esf:=polar_coordinates(cil(3),cil(1));
4   RETURN [esf(1),esf(2),cil(2)];
5 END;
```

---

La funció `Rec_a_Esf` pren com a paràmetre les coordenades rectangulars d'un punt en la forma  $[x, y, z]$ , i torna les coordenades esfèriques corresponents en la forma  $[r, \theta, \varphi]$ .

---

Llistat 5    Funció `Rec_a_Esf`

---

```
1 EXPORT Rec_a_Esf(rec)
2 BEGIN
3   RETURN Cil_a_Esf(Rec_a_Cil(rec));
4 END;
```

---

La funció `Esf_a_Rec` pren com a paràmetre les coordenades esfèriques d'un punt en la forma  $[r, \theta, \varphi]$ , i torna les coordenades rectangulars corresponents en la forma  $[x, y, z]$ .

---

Llistat 6    Funció `Esf_a_Rec`

---

```
1 EXPORT Esf_a_Rec(esf)
2 BEGIN
3   RETURN Cil_a_Rec(Esf_a_Cil(esf));
4 END;
```

---

Totes aquestes funcions treballen en el mode angular que estigui actiu en la calculadora en el moment de ser executades.

## 9 Bibliografia

H. M. SCHEY. *Div, grad curl and all that, an informal text on vector calculus*. W. W. Norton and Company, 3rd edition, 1997.

PAUL LORRAIN, DALE R. CORSON. *Electromagnetic fields and waves*. W. H. Freeman and Company, 1972.

DAVID J. GRIFFITHS, REED COLLEGE. *Introduction to electrodynamics*. Prentice-Hall, 3rd edition, 1999.

DANIEL FLEISCH. *A student's guide to Maxwell's equations*. Cambridge University Press, 2008.