

Álgebra Multilineal y Geometría Proyectiva

Contenidos

0 Formas Cuadráticas

0.1 Definición, matriz de una forma cuadrática y bases

Definición 0.1.1

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -e.v. Diremos que una aplicación

$$\begin{aligned}\phi: \mathbb{E} \times \mathbb{E} &\rightarrow \mathbf{k} \\ (u, v) &\mapsto \phi(u, v)\end{aligned}$$

es una forma bilineal simétrica si

- $\phi(u_1 + u_2, v) = \phi(u_1, v) + \phi(u_2, v)$
- $\phi(\lambda u, v) = \lambda \phi(u, v)$
- $\phi(u, v) = \phi(v, u)$

$\forall u, v, u_1, u_2 \in \mathbb{E}$ y $\forall \lambda \in \mathbf{k}$.

Definición 0.1.2

Sea ϕ una forma bilineal simétrica sobre un \mathbf{k} -e.v. \mathbb{E} . Diremos que la aplicación

$$\begin{aligned}q: \mathbb{E} &\rightarrow \mathbf{k} \\ u &\mapsto q(u) = \phi(u, u)\end{aligned}$$

es la forma cuadrática asociada a ϕ .

Observación 0.1.3 Se cumple que $q(\lambda u) = \lambda^2 q(u)$

Lema 0.1.4 Sea ϕ una forma bilineal simétrica sobre un \mathbf{k} -e.v. \mathbb{E} con $\text{car } \mathbb{E} \neq 2$ y sea q la forma cuadrática asociada a ϕ , entonces

$$\phi(u, v) = \frac{1}{2}(q(u + v) - q(u) - q(v))$$

Demostración

$$\begin{aligned} q(u+v) - q(u) - q(v) &= \phi(u+v, u+v) - \phi(u, u) - \phi(v, v) = \\ &= \phi(u, u) + \phi(u, v) + \phi(v, u) + \phi(v, v) - \phi(u, u) - \phi(v, v) = 2\phi(u, v) \end{aligned}$$

Definición 0.1.5

Sea ϕ una forma bilineal simétrica/cuadrática sobre un \mathbf{k} -e.v. \mathbb{E} y sea $B = \{u_1, \dots, u_n\}$ una base. La matriz de ϕ en base B es

$$M_B(\phi) = (a_{ij}) = (\phi(u_i, u_j))$$

Observación 0.1.6 La matriz $M_B(\phi)$ es simétrica

Definición 0.1.7

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -e.v. y sea $\phi: \mathbb{E} \times \mathbb{E} \rightarrow \mathbf{k}$ una forma bilineal simétrica.

- Diremos que ϕ es definida positiva si

$$\phi(x, x) > 0, \quad \forall x \in \mathbb{E} \quad x \neq \vec{0}$$

- Diremos que ϕ es definida negativa si

$$\phi(x, x) < 0, \quad \forall x \in \mathbb{E} \quad x \neq \vec{0}$$

- Diremos que ϕ es no definida en cualquier otro caso.

Observación 0.1.8 Si ϕ es una forma bilineal simétrica y definida positiva entonces define un producto escalar sobre \mathbb{E} .

Definición 0.1.9

Dada una matriz cuadrada A ($\dim n$) definimos

$$A_k = (a_{ij}), \quad 1 \leq i, j \leq k \quad \text{y} \quad \delta_k(A) = |A_k|$$

Teorema de Sylvester (0.1.10)

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -e.v. de dimension n y sea $\phi: \mathbb{E} \times \mathbb{E} \rightarrow \mathbf{k}$ una forma bilineal simétrica, entonces

$$\phi \text{ es definida positiva} \iff \delta_k(M_B(\phi)) > 0 \quad \forall 1 \leq k \leq n \quad \forall B \text{ base de } \mathbb{E}$$

Demostración

\implies

Como ϕ es definida positiva, define un producto escalar sobre \mathbb{E} . Si tomamos una base B cualquiera, mediante Gramm-Schmidt podemos construir una base ortogonal $B_2 = \{v_1, \dots, v_n\}$. Por tanto

$$i \neq j \implies \phi(v_i, v_j) = 0, \quad \phi(v_i, v_i) > 0 \quad 1 \leq i, j \leq n$$

Llamamos $\phi(v_i, v_i) = \lambda_i > 0$. Por tanto

$$M_{B_2}(\phi) = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_n \end{pmatrix} \implies |M_{B_2}(\phi)| = \prod_{i=1}^n \lambda_i > 0$$

Entonces, como $M_B(\phi) = S_{B,B_2}^T M_{B_2}(\phi) S_{B_2,B}$

$$|M_B(\phi)| = |S_{B_2,B}|^2 |M_{B_2}(\phi)| > 0$$

Por lo tanto, la matriz de un producto escalar tiene determinante positivo independientemente de la base tomada. Observamos que ϕ también define un producto escalar en el subespacio vectorial $\langle v_1, \dots, v_k \rangle$ cuando lo restringimos a este. Por lo que hemos visto antes se tiene que

$$|M_B(\phi)_k| = \delta_k(M_B(\phi)) > 0 \quad \forall 1 \leq k \leq n.$$

\Leftarrow

Tenemos que $\delta_k(M_B(\phi)) > 0 \quad \forall 1 \leq k \leq n$. Aplicamos la siguiente variación de Gram-Schmidt. Tomamos la base $B = \{u_1, \dots, u_n\}$ Y hacemos la siguiente construcción:

$$\begin{cases} v_1 = u_1 \\ v_2 = \alpha_{2,1}u_1 + u_2 \\ v_3 = \alpha_{3,1}u_1 + \alpha_{3,2}u_2 + u_3 \\ \vdots \\ v_n = \alpha_{n,1}u_1 + \cdots + \alpha_{n,n-1}u_{n-1} + u_n \end{cases} \quad \alpha_{i,j} \text{ son tales que } \phi(v_k, u_i) = 0 \quad \begin{matrix} 2 \leq k \leq n \\ 1 \leq i \leq k-1 \end{matrix}$$

Propiedades de $\{v_1, \dots, v_n\}$

- $\forall k, \langle v_1, \dots, v_k \rangle = \langle u_1, \dots, u_k \rangle$ En particular, $B_2 = \{v_1, \dots, v_n\}$ es base de \mathbb{E} .
- $\phi(v_k, v_i) = 0 \quad \forall 1 \leq i \leq k-1$ porque $v_i \in \langle u_1, \dots, u_i \rangle$ y hemos tomado los α de manera que $\phi(v_k, u_i) = 0 \implies B_2$ es base ortogonal
- La matriz S_{B_2B}

$$S_{B_2B} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha_{2,1} & \cdots & \alpha_{n,1} \\ 0 & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \alpha_{n,n-1} \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{pmatrix} \implies |S_{B_2B}| = 1 \text{ y } \delta_k(S_{B_2B}) = 1$$

Finalmente, tenemos

$$M_B(\phi) = S_{B,B_2}^T M_{B_2}(\phi) S_{B,B_2}$$

$$\left(\begin{array}{c|c} k & \updownarrow \\ \hline \leftrightarrow & \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} k & \updownarrow \\ \hline \leftrightarrow & \end{array} \right) \left(\begin{array}{ccc|ccc} \phi(v_1, v_1) & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & \phi(v_k, v_k) & & & \\ \hline & & & \ddots & & \\ & & & & \phi(v_n, v_n) & \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|c} k & \updownarrow \\ \hline \leftrightarrow & \end{array} \right)$$

$$\begin{aligned}
&\implies \delta_k(M_B(\phi)) = \delta_k(S_{B,B_2}^t) \delta_k(M_{B_2}(\phi)) \delta_k(S_{B,B_2}) = \delta_k(M_{B_2}(\phi)) = \\
&= \prod_{i=1}^k \phi(v_i, v_i) > 0 \text{ (por hipótesis)} \implies \frac{\delta_k(M_B(\phi))}{\delta_{k-1}(M_B(\phi))} = \phi(v_k, v_k) > 0
\end{aligned}$$

Finalmente, $\forall x \in \mathbb{E}$

$$\phi(x, x) = \phi\left(\sum_{i=1}^k x_i v_i, \sum_{i=1}^k x_i v_i\right) = \sum_{i=1}^k x_i^2 \phi(v_i, v_i) > 0 \text{ si } x \neq \vec{0}$$

QED

Teorema Método convergencia-pivote (0.1.11)

Dada una forma bilineal simétrica ϕ , queremos encontrar una base de \mathbb{E} , B_2 , en la cual $M_{B_2}(\phi)$ sea una matriz diagonal. Partimos de una base B i de $M_B(\phi)$. El procesos es: operación con filas a las dos matrices y luego la misma operacion pero en la columnas de la primera matriz únicamente (véase ejemplo).

$$\begin{aligned}
(M_B(\phi)|Id) &\overset{\text{op. filas}}{\sim} (S_1 M_B(\phi)|S_1) \overset{\text{misma op. en columnas}}{\sim} (S_1 M_B(\phi) S_1^T | S_1) \sim \dots \sim \\
&\sim (S_r \dots S_1 M_B(\phi) S_1^T \dots S_r^T | S_r \dots S_1)
\end{aligned}$$

Donde la matriz de la izquierda es M_{B_2} y es diagonal.

Ejemplo 0.1.12

$$\begin{aligned}
q_\phi(x, y, z) &= 2x^2 + 2y^2 - 4xy - 2yz; \quad A = M_B(\phi) = \begin{pmatrix} 2 & -2 & 0 \\ -2 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} \\
&\left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & -2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & 2 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow[\text{(1)+(2)}]{\text{fila}} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & -2 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow[\text{(1)+(2)}]{\text{columna}} \\
&\xrightarrow[\text{(1)+(2)}]{\text{columna}} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow[\text{(2)+(3)}]{\text{fila}} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow[\text{(2)+(3)}]{\text{columna}} \\
&\xrightarrow[\text{(2)+(3)}]{\text{columna}} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \xrightarrow[\text{(3)-}\frac{1}{2}\text{(2)}]{\text{fila}} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{1}{2} \end{array} \right) \xrightarrow[\text{(3)-}\frac{1}{2}\text{(2)}]{\text{columna}} \\
&\xrightarrow[\text{(3)-}\frac{1}{2}\text{(2)}]{\text{columna}} \left(\begin{array}{ccc|ccc} 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} & \frac{1}{2} \end{array} \right)
\end{aligned}$$

Entonces, en base B , los vectores de B_2 son:

- $v_1 = (1, 0, 0)$; $\phi(v_1, v_1) = 2$

- $v_2 = (1, 1, 1); \quad \phi(v_2, v_2) = -2$
- $v_3 = (\frac{-1}{2}, \frac{-1}{2}, \frac{1}{2}); \quad \phi(v_3, v_3) = \frac{1}{2}$

Y $\phi(v_i, v_j) = 0, i \neq j$.

Proposición 0.1.13

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -e.v. de dimension n , sea $\phi: \mathbb{E} \times \mathbb{E} \rightarrow \mathbf{k}$ una forma bilineal simétrica y sea q su forma cuadrática asociada. Consideremos $B = \{u_1, \dots, u_n\}$ una base q -ortogonal de \mathbb{E} . Sabemos que

$$D = M_B(\phi) = \begin{pmatrix} \alpha_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \alpha_n \end{pmatrix}.$$

Consideremos el subespacio vectorial $\mathbb{E}^\perp \subseteq \mathbb{E}$ definido por $\mathbb{E}^\perp = \{u \in \mathbb{E} \mid \phi(u, v) = 0 \ \forall v \in \mathbb{E}\}$. Tenemos que

i)

$$D = M_B(\phi) = \begin{pmatrix} \alpha_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & & \\ & & \alpha_m & \\ \vdots & & 0 & \vdots \\ & & & \ddots \\ 0 & \cdots & & 0 \end{pmatrix} \implies E^\perp = \langle u_{m+1}, \dots, u_n \rangle.$$

ii)

$$\text{rg } q + \dim \mathbb{E}^\perp = n \implies i_0(q) = \dim \mathbb{E}^\perp.$$

iii) Sean $\mathbf{k} = \mathbb{R}$, e $i_+(q)$ el número de elementos estrictamente positivos de la diagonal de $M_B(\phi)$. $i_+(q)$ no depende de la base q -ortogonal B elegida.

iv) Sea $\mathbf{k} = \mathbb{R}$ y sean $\delta_0 = 1, \delta_1, \dots, \delta_n \neq 0$. Entonces, $i_-(q)$ es igual al número de cambios de signo en la secuencia $\delta_0, \dots, \delta_n$.

Demostración

i) $u_i \in \{u_{m+1}, \dots, u_n\}$,

$$\phi(u_j, u_i) = (0 \ \cdots \ 1 \ \cdots \ 0) \begin{pmatrix} \alpha_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \alpha_m & \\ & & 0 & \ddots \\ & & & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} = 0 \quad \forall 1 \leq j \leq n \implies \langle u_{m+1}, \dots, u_n \rangle \subseteq \mathbb{E}^\perp.$$

Sea $u \in \mathbb{E}$ tal que $u \notin \langle u_{m+1}, \dots, u_n \rangle$. Se tiene que $\exists 1 \leq i \leq m$ t.q. $x_i \neq 0$. Entonces,

$$e_i^t M_B(\phi) u = (0 \ \cdots \ 1_i \ \cdots \ 0) \begin{pmatrix} \alpha_1 & & & & \\ & \ddots & & & \\ & & \alpha_m & & \\ & & & 0 & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vdots \\ x_i \\ \vdots \end{pmatrix} = \alpha_i x_i \neq 0 \implies u \notin \mathbb{E}^\perp.$$

Así pues, $\mathbb{E}^\perp = \langle u_{m+1}, \dots, u_n \rangle$.

iii) Sea $B' = \{u'_1, \dots, u'_n\}$ una base q -ortogonal de \mathbb{E} .

$$M_{B'}(\phi) = D' = \begin{pmatrix} \alpha'_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \alpha'_n \end{pmatrix}.$$

Tenemos que

$$m = i_+(q, B); \quad \mathbb{F}^+ = \langle u_1, \dots, u_m \rangle; \quad \mathbb{E} = \mathbb{F}^+ \oplus \langle u_{m+1}, \dots, u_n \rangle = \mathbb{F}^+ \oplus \mathbb{F}^{\leq 0}.$$

Análogamente,

$$m' = i_+(q, B'); \quad \mathbb{F}'^+ = \langle u'_1, \dots, u'_m \rangle; \quad \mathbb{E} = \mathbb{F}'^+ \oplus \langle u'_{m+1}, \dots, u'_n \rangle = \mathbb{F}'^+ \oplus \mathbb{F}'^{\leq 0}.$$

Consideremos la función que proyecta un vector de \mathbb{F}^+ sobre \mathbb{F}'^+ .

$$\begin{aligned} f: \mathbb{F}^+ &\rightarrow \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{F}'^+ \\ v &\longmapsto f(v). \end{aligned}$$

Sea $v \in \mathbb{F}^+$ y sean v_1 y v_2 las proyecciones de v sobre \mathbb{F}'^+ y $\mathbb{F}'^{\leq 0}$ respectivamente. Tenemos que $f(v) = v_1$. Entonces,

$$f(v) = 0 \implies v_1 = 0 \implies v = v_2.$$

Además, $0 \leq \phi(v, v)$ y $\phi(v_2, v_2) = \phi(v, v) \leq 0$, de modo que $v = 0$ y f es inyectiva. Considerando la función que proyecta un vector de \mathbb{F}'^+ sobre \mathbb{F}^+ .

$$\begin{aligned} g: \mathbb{F}'^+ &\rightarrow \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{F}^+ \\ v &\longmapsto g(v). \end{aligned}$$

y siguiendo un razonamiento análogo, obtenemos que g es inyectiva, de modo que $m = m'$.

0.2 Clasificación afín y proyectiva

Definición 0.2.1

Sean \mathbb{E} y \mathbb{F} \mathbf{k} -espacios vectoriales. Sean

$$\phi: \mathbb{E} \times \mathbb{E} \rightarrow \mathbf{k},$$

$$\psi: \mathbb{F} \times \mathbb{F} \rightarrow \mathbf{k}$$

formas bilineales simétricas. Diremos que ϕ y ψ son afínmente equivalentes, y escribiremos $\phi \sim \psi$, si existe un isomorfismo $f: \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{F}$ tal que

$$\phi(u, v) = \psi(f(u), f(v)) \quad \forall u, v \in \mathbb{E},$$

$$\phi(f^{-1}(u'), f^{-1}(v')) = \psi(u', v') \quad \forall u', v' \in \mathbb{F}.$$

Teorema de Sylvester (0.2.2)

i) $\mathbf{k} = \mathbb{R}$

$$\phi \sim \psi \iff \text{rg } \phi = \text{rg } \psi \text{ y } i_+(\phi) = i_+(\psi).$$

ii) $\mathbf{k} = \mathbb{C}$

$$\phi \sim \psi \iff \text{rg } \phi = \text{rg } \psi.$$

1 Álgebra multilineal

1.1 Espacio dual

Definición 1.1.1

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. Definimos el espacio Dual de \mathbb{E} como $\mathbb{E}^* = \{\phi: \mathbb{E} \rightarrow \mathbf{k} \text{ lineales}\}$ (también es un \mathbf{k} -espacio vectorial)

Observación 1.1.2 Para definir \mathbb{E}^* tenemos que usar bases de \mathbb{E} .

Definición 1.1.3

Si $B = \{u_1, \dots, u_n\}$ es una base de \mathbb{E} (\mathbf{k} -ev.) definimos

$$\begin{aligned} u_i^*: \mathbb{E} &\rightarrow \mathbf{k} \\ u_j &\mapsto u_i^*(u_j) = \delta_{ij} \end{aligned}$$

Y llamaremos base dual de B a $B^* = \{u_1^*, \dots, u_n^*\}$ (que efectivamente es una base de \mathbb{E}^*).

Observación 1.1.4 En particular si $w \in \mathbb{E}^*$ y $w = \sum_{i=1}^n a_i u_i^*$, se cumple que:

$$w(u_j) = \sum_{i=1}^n a_i u_i^*(u_j) = a_j \implies w = \sum_{i=1}^n w(u_i) u_i^*$$

Proposición 1.1.5 (cambios de base)

Sean B_1 y B_2 bases de \mathbb{E} (\mathbf{k} -ev. de $\dim \mathbb{E} = n$) y sean B_1^* y B_2^* las bases duales de B_1 y B_2 . Si $S_{B_1 B_2}$ es la matriz de cambio de base de B_1 a B_2 , entonces:

$$S_{B_1^* B_2^*} = (S_{B_1 B_2}^{-1})^T = (S_{B_2 B_1})^T$$

Proposición 1.1.6 (aplicaciones lineales)

Sean \mathbb{E} y \mathbb{F} \mathbf{k} -ev. y sea $\phi: \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{F}$ una aplicación lineal, entonces ϕ induce la aplicación lineal siguiente:

$$\begin{aligned} \phi^*: \mathbb{F}^* &\rightarrow \mathbb{E}^* \\ w &\mapsto \phi^*(w) = w \circ \phi \end{aligned}$$

Observación 1.1.7 Si \mathbb{E} y \mathbb{F} son de dimensión finita, ϕ admite expresión matricial (en coordenadas). En particular:

$$\left. \begin{array}{l} B_1 \text{ base de } \mathbb{E} \\ B_2 \text{ base de } \mathbb{F} \end{array} \right\} \implies \phi \text{ viene dada por } M_{B_1, B_2}(\phi)$$

$$\left. \begin{array}{l} B_1^* \text{ base de } \mathbb{E}^* \\ B_2^* \text{ base de } \mathbb{F}^* \end{array} \right\} \implies \phi^* \text{ viene dada por } M_{B_2^*, B_1^*}(\phi^*) = (M_{B_1, B_2}(\phi))^T$$

Proposición 1.1.8 (espacio bidual)

Dado \mathbb{E} \mathbf{k} -ev. podemos definir $\mathbb{E}^*, \mathbb{E}^{**}, \dots$. En particular tenemos que \mathbb{E}^{**} es canónicamente isomorfo a \mathbb{E} mediante el isomorfismo

$$\begin{aligned} \phi: \mathbb{E} &\rightarrow \mathbb{E}^{**} \\ u &\mapsto \phi(u) \end{aligned}$$

donde

$$\begin{aligned} \phi(u): \mathbb{E}^* &\rightarrow \mathbf{k} \\ w &\mapsto (\phi(u))(w) = w(u) \end{aligned}$$

Observación 1.1.9 Como este isomorfismo es canónico (no depende de las bases), $\mathbb{E} \cong \mathbb{E}^{**}$ y no distinguimos entre \mathbb{E} y \mathbb{E}^{**}

1.2 Tensores

Definición 1.2.1

Sean $\mathbb{E}_1, \dots, \mathbb{E}_r$ \mathbf{k} -ev. Diremos que $f: \mathbb{E}_1 \times \dots \times \mathbb{E}_r \rightarrow \mathbf{k}$ es un tensor (o una aplicación multilineal) si $\forall i = 1, \dots, r$ y $\forall v_j \in \mathbb{E}_j$ ($i \neq j$) se cumple que

$$\begin{aligned} \phi_i: \mathbb{E}_i &\rightarrow \mathbf{k} \\ v &\mapsto \phi(u) = f(v_1, \dots, v_{i-1}, v, v_{i+1}, \dots, v_r) \end{aligned}$$

es una aplicación lineal.

Definición 1.2.2

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. Llamaremos tensor de tipo (p, q) (o tensor p veces covariante y q veces contravariante) (o tensor p -covariante y q -contravariante) a un tensor

$$f: \overbrace{\mathbb{E} \times \cdots \times \mathbb{E}}^p \times \overbrace{\mathbb{E}^* \times \cdots \times \mathbb{E}^*}^q \rightarrow \mathbf{k}$$

$$(v_1, \dots, v_p, w_1, \dots, w_q) \mapsto f(v_1, \dots, v_p, w_1, \dots, w_q)$$

Observación 1.2.3 Al conjunto de tensores de este tipo se le denota como $T_p^q(\mathbb{E})$.

Observación 1.2.4 Por convenio $T_0(\mathbb{E}) = T^0(\mathbb{E}) = T_0^0(\mathbb{E}) = \mathbf{k}$.

Ejemplo 1.2.5

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev.

- $T_1(\mathbb{E}) = T_1^0(\mathbb{E}) = \mathbb{E}^*$
- $T^1(\mathbb{E}) = T_0^1 = \mathbb{E}^{**} (\cong \mathbb{E})$
- $T_2(\mathbb{E}) = T_2^0(\mathbb{E}) = \{\text{formas bilineales de } \mathbb{E} \text{ en } \mathbf{k}\}$

Proposición 1.2.6

$T_p^q(\mathbb{E}) = T_q^p(\mathbb{E}^*)$ (cambiando el orden)

Proposición 1.2.7

$T_p^q(\mathbb{E})$ tiene estructura de \mathbf{k} -espacio vectorial. Si $f, g \in T_p^q(\mathbb{E})$ y $\alpha, \beta \in \mathbf{k}$

$$\alpha f + \beta g: \overbrace{\mathbb{E} \times \cdots \times \mathbb{E}}^p \times \overbrace{\mathbb{E}^* \times \cdots \times \mathbb{E}^*}^q \rightarrow \mathbf{k}$$

$$(v_1, \dots, v_p, w_1, \dots, w_q) \mapsto (\alpha f + \beta g)(v_1, \dots, v_p, w_1, \dots, w_q)$$

donde

$$(\alpha f + \beta g)(v_1, \dots, v_p, w_1, \dots, w_q) = \alpha f(v_1, \dots, v_p, w_1, \dots, w_q) + \beta g(v_1, \dots, v_p, w_1, \dots, w_q).$$

Definición 1.2.8 (producto tensorial)

Dados $f \in T_p^q(\mathbb{E})$ y $g \in T_{p'}^{q'}(\mathbb{E})$, definimos el producto tensorial de f y g como

$$f \otimes g: \overbrace{\mathbb{E} \times \cdots \times \mathbb{E}}^{p+p'} \times \overbrace{\mathbb{E}^* \times \cdots \times \mathbb{E}^*}^{q+q'} \rightarrow \mathbf{k}$$

$$(v_1, \dots, v_p, \overline{v_1}, \dots, \overline{v_{p'}}, w_1, \dots, w_q, \overline{w_1}, \dots, \overline{w_{q'}}) \mapsto f(v_1, \dots, v_p, w_1, \dots, w_q) * g(\overline{v_1}, \dots, \overline{v_{p'}}, \overline{w_1}, \dots, \overline{w_{q'}})$$

Observación 1.2.9 Si f y g son tensores, entonces $f \otimes g$ también lo es. Además $f \otimes g \in T_{p+p'}^{q+q'}(\mathbb{E})$.

Proposición 1.2.10

Sean $f \in T_p^q(\mathbb{E})$, $g \in T_{p'}^{q'}$ y $h \in T_{p''}^{q''}(\mathbb{E})$.

- \otimes NO es abeliano. En general $f \otimes g \neq g \otimes f$.
- \otimes es asociativo. $(f \otimes g) \otimes h = f \otimes (g \otimes h)$. Denotado por $f \otimes g \otimes h$
- $\vec{0} \otimes f = f \otimes \vec{0} = \vec{0}$
- $f \otimes (g + h) = f \otimes g + f \otimes h$ $((f + g) \otimes h = f \otimes h + g \otimes h)$
- $\alpha \in k$. $(\alpha f) \otimes g = \alpha(f \otimes g) = f \otimes (\alpha g)$

Ejemplo 1.2.11

Sea $\mathbb{E} = \mathbb{R}^3$, $B = \{e_1, e_2, e_3\}$, $B^* = \{e_1^*, e_2^*, e_3^*\}$. Y consideramos el producto tensorial de los tensores e_1^* y e_2^* sobre los vectores $v_1 = (x_1, y_1, z_1)$ y $v_2 = (x_2, y_2, z_2)$.

$$\left. \begin{aligned} (e_1^* \otimes e_2^*)(v_1, v_2) &= e_1^*(v_1)e_2^*(v_2) = x_1y_2 \\ (e_2^* \otimes e_1^*)(v_1, v_2) &= e_2^*(v_1)e_1^*(v_2) = y_1x_2 \end{aligned} \right\} \implies e_1^* \otimes e_2^* \neq e_2^* \otimes e_1^*$$

Ejemplo 1.2.12

Sea $\mathbb{E} = \mathbb{R}^2$, $B = \{e_1, e_2\}$, $B^* = \{e_1^*, e_2^*\}$, entonces

$$e_1 \otimes e_2 \in T^2(\mathbb{E}) \quad \left\{ \begin{aligned} (e_1 \otimes e_2) &= (e_1^{**} \otimes e_2^{**})(e_1^*, e_1^*) = e_1(e_1)e_2(e_1) = 0 \\ (e_1 \otimes e_2)(e_1^*, e_2^*) &= 1 \\ (e_1 \otimes e_2)(e_2^*, e_1^*) &= 0 \\ (e_1 \otimes e_2)(e_2^*, e_2^*) &= 0 \end{aligned} \right.$$

Observación 1.2.13 Si \mathbb{E} es un \mathbf{k} -ev de dimensión n y $B = \{e_1, \dots, e_n\}$

$$\underbrace{(e_{i_1}^* \otimes \dots \otimes e_{i_p}^*)}_{I=\{i_1, \dots, i_p\}} \otimes \underbrace{(e_{j_1} \otimes \dots \otimes e_{j_q})}_{J=\{j_1, \dots, j_q\}} \underbrace{(e_{l_1}, \dots, e_{l_p})}_{L=\{l_1, \dots, l_p\}} \underbrace{(e_{m_1}^*, \dots, e_{m_q}^*)}_{M=\{m_1, \dots, m_q\}} = \begin{cases} 1 & \text{Si } I = L \text{ y } J = M \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Observación 1.2.14 Sean $f, g \in T_p^q(\mathbb{E})$ entonces

$$f = g \iff \begin{matrix} \forall e_{i_1}, \dots, e_{i_p} \in B \\ \forall e_{j_1}^*, \dots, e_{j_q}^* \in B^* \end{matrix} \quad f(e_{i_1}, \dots, e_{i_p}, e_{j_1}^*, \dots, e_{j_q}^*) = g(e_{i_1}, \dots, e_{i_p}, e_{j_1}^*, \dots, e_{j_q}^*)$$

1.3 Dimensión y bases de $T_p^q(\mathbb{E})$

Recordemos que $T_p^q(\mathbb{E})$ es un \mathbf{k} -ev.

Teorema (base de $T_p^q(\mathbb{E})$) (1.3.1)

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. de dimensión n y sea $B = \{e_1, \dots, e_n\}$, entonces

i) $\dim_{\mathbf{k}} T_p^q(\mathbb{E}) = n^{p+q}$

ii) Una base de $T_p^q(\mathbb{E})$ es

$$B_p^q = \left\{ e_{i_1}^* \otimes \dots \otimes e_{i_p}^* \otimes e_{j_1} \otimes \dots \otimes e_{j_q} \mid \begin{matrix} i_1, \dots, i_p \in \{1, \dots, n\} \\ j_1, \dots, j_q \in \{1, \dots, n\} \end{matrix} \right\}$$

iii) Si $f \in T_p^q(\mathbb{E})$, las coordenadas de f en la base B_p^q son

$$f_{B_p^q} = (f(e_{i_1}, \dots, e_{i_p}, e_{j_1}^*, \dots, e_{j_q}^*))$$

Demostración

- i) Es consecuencia directa de ii
- ii) Primero veamos que B_p^q es li. Sea

$$w = \sum \alpha_{IJ} (e_{i_1}^* \otimes \dots \otimes e_{i_p}^* \otimes e_{j_1} \otimes \dots \otimes e_{j_q}) = 0$$

Sean I_0, J_0 dos conjuntos de índices cualesquiera, entonces

$$0 = w(e_{i_1}, \dots, e_{i_p}, e_{j_1}^*, \dots, e_{j_q}^*) = \alpha_{I_0 J_0}$$

(Por la 1.2.13). Veamos ahora que B_p^q es generadora. Sea $f \in T_p^q(\mathbb{E})$, definimos $g \in T_p^q(\mathbb{E})$ como

$$g = \sum_{\forall I, J} (f(e_{i_1}, \dots, e_{i_p}, e_{j_1}^*, \dots, e_{j_q}^*) (e_{i_1}^* \otimes \dots \otimes e_{i_p}^* \otimes e_{j_1} \otimes \dots \otimes e_{j_q}))$$

Demostrando ahora que $f = g$ quedan provados ii y iii. Tenemos ahora que

$$g(e_{i_1^0}, \dots, e_{i_p^0}, e_{j_1^0}^*, \dots, e_{j_q^0}^*) = f(e_{i_1^0}, \dots, e_{i_p^0}, e_{j_1^0}^*, \dots, e_{j_q^0}^*)$$

Por la 1.2.13 y queda demostrado el teorema.

Ejemplo 1.3.2

Sea $\mathbb{E} = \mathbb{R}^n$, $B = \{e_1, \dots, e_n\}$ y $B^* = \{e_1^* \dots e_n^*\}$

- Sea $u \in \mathbb{R}^n$

$$u = u(e_1^*) + \dots + u(e_n^*) \quad (B_0^1 = B)$$

- Sea $w \in T_1^0(\mathbb{E}) (= \mathbb{E}^*)$

$$w = w(e_1)e_1^* + \dots + w(e_n)e_n^* \quad (B_1^0 = B^*)$$

- Sea $n = 3$ y sea $f \in T_2(\mathbb{E})$

$$B_2^0 = \{e_1^* \otimes e_1^*, e_1^* \otimes e_2^*, \dots, e_3^* \otimes e_3^*\}$$

$$f = f(e_1, e_1)e_1^* \otimes e_1^* + f(e_1, e_2)e_1^* \otimes e_2^* + \dots + f(e_3, e_3)e_3^* \otimes e_3^*$$

Proposición 1.3.3 (cambio de base)

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. de dimensión n y sean $B = \{e_1, \dots, e_n\}$ y $\overline{B} = \{u_1, \dots, u_n\}$. Sea $S = (s_j^i)$ la matriz de cambio de base de \overline{B} a B y sea $T = (t_j^i)$ su inversa. De manera que tenemos esta relación:

$$\begin{array}{ccc} & S & \\ B & \xleftarrow{\quad} & \overline{B} \\ & T & \end{array} \quad \begin{array}{ccc} & S^t & \\ B^* & \xrightarrow{\quad} & \overline{B}^* \\ & T^t & \end{array}$$

Sea $f \in T_p^q(\mathbb{E})$ y sean

$$f_B = (\alpha_{IJ})_{I,J} = \left(f(e_{i_1}, \dots, e_{i_p}, e_{j_1}^*, \dots, e_{j_q}^*) \right)_{I,J}$$

$$f_{\bar{B}} = (\bar{\alpha}_{IJ})_{I,J} = \left(f(u_{i_1}, \dots, u_{i_p}, u_{j_1}^*, \dots, u_{j_q}^*) \right)_{I,J}$$

Entonces, $\forall I, J$

$$\bar{\alpha}_{IJ} = f(u_{i_1}, \dots, u_{i_p}, u_{j_1}^*, \dots, u_{j_q}^*) = \sum_{\forall L, M} s_{i_1}^{l_1} \dots s_{i_p}^{l_p} t_{m_1}^{j_1} \dots t_{m_q}^{j_q} f(e_{i_1}, \dots, e_{i_p}, e_{j_1}^*, \dots, e_{j_q}^*)$$

Ejemplo 1.3.4

- $f \in T^1(\mathbb{E}) = \mathbb{E}^{**} = \mathbb{E}$ por lo tanto $f = u$ y $\begin{smallmatrix} u_B = (x_1, \dots, u_n) \\ u_{\bar{B}} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n) \end{smallmatrix}$, entonces

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \vdots \\ \bar{x}_n \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

- $f \in T_1(\mathbb{E}) = \mathbb{E}^*$ por lo tanto $f = w$ y $\begin{smallmatrix} w_B = (x_1, \dots, u_n) \\ w_{\bar{B}} = (\bar{x}_1, \dots, \bar{x}_n) \end{smallmatrix}$, entonces

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_1 \\ \vdots \\ \bar{x}_n \end{pmatrix} = S^t \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

- $f \in T_2(\mathbb{E})$ por lo tanto f es una forma bilineal y $\begin{smallmatrix} f_B = A \in M_{n,n}(k) \\ f_{\bar{B}} = \bar{A} \in M_{n,n}(k) \end{smallmatrix}$, entonces

$$\bar{A} = S^t A S$$

1.4 Recordatorio de permutaciones

- Denotaremos como $x_n = \{1, \dots, n\}$
- Denotaremos como $\mathcal{S}_n = \{\sigma: x_n \rightarrow x_n \text{ bilineales}\}$
- $\#\mathcal{S}_n = n!$
- \mathcal{S}_n es un grupo por composición. Además denotaremos $s_1 s_2 = s_1 \circ s_2$
- Fijada $s_0 \in \mathcal{S}_n$, la aplicación

$$\begin{aligned} \phi: \mathcal{S}_n &\rightarrow \mathcal{S}_n \\ s &\mapsto s_0 s \end{aligned}$$

es biyectiva.

- Sea $s \in \mathcal{S}_n$, denotaremos s de las siguientes maneras

$$- s = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdots & n \\ s(1) & s(2) & \cdots & s(n) \end{pmatrix}$$

- Si s es cíclica la denotaremos como $s = (1, 3, 7, 5)$. En este caso, $s(1) = 3$, $s(3) = 7$, $s(7) = 5$ y $s(5) = 1$, para el resto de valores $s(i) = i$.

- Llamaremos trasposición a una permutación del tipo $s = (i, j)$ con $i \neq j$
- $\forall s \in \mathcal{S}_n$, s se puede expresar como composición (o producto) de trasposiciones. Además, la paridad del número de trasposiciones se mantiene, es decir

$$s = t_1 \cdots t_p = l_1 \cdots l_q \implies p \equiv q \pmod{2}$$

- Sea $s \in \mathcal{S}_n$ y sea $s = t_1 \cdots t_p$ una descomposición de s en trasposiciones. Entonces, definimos el signo de s como $\varepsilon(s) = (-1)^p$.

1.5 Tensores simétricos y antisimétricos

Definición 1.5.1

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. de dimensión n , sea $f \in T_p(\mathbb{E})$ y $s \in \mathcal{S}_p$, entonces, definimos $(\underline{s}f) \in T_p(\mathbb{E})$ como

$$(\underline{s}f)(v_1, \dots, v_p) = f(v_{s(1)}, \dots, v_{s(p)})$$

Ejemplo 1.5.2

Sea $\mathbb{E} = \mathbb{R}^4$, $B = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$, $f = e_1^* \otimes e_2^* \otimes e_3^* \in T_3(\mathbb{E})$ y $s = (1, 2, 3) \in \mathcal{S}_3$, entonces

$$(\underline{s}f)(v_1, v_2, v_3) = f(v_2, v_3, v_1)$$

Proposición 1.5.3

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. de dimensión n , sean $w_1, \dots, w_p \in T_1(\mathbb{E}) = \mathbb{E}^*$, y $s \in \mathcal{S}_p$ ($t = s^{-1}$). Entonces

$$\underline{s}(w_1 \otimes \cdots \otimes w_p) = w_{t(1)} \otimes \cdots \otimes w_{t(p)}$$

Demostración

Sean $u_1, \dots, u_n \in \mathbb{E}$ (obsérvese que $w_1 \otimes \cdots \otimes w_p \in T_p(\mathbb{E})$)

$$\underline{s}(w_1 \otimes \cdots \otimes w_p)(u_1, \dots, u_p) = (w_1 \otimes \cdots \otimes w_p)(u_{s(1)}, \dots, u_{s(p)}) = w_1(u_{s(1)}) \cdot w_2(u_{s(2)}) \cdots w_p(u_{s(p)})$$

Dado que $s(i) = j \iff i = t(j)$, $w_i(u_{s_i}) = w_i(u_j) = w_{t(j)}(u_j)$. Con lo que podemos reordenar el último producto como

$$w_{t(1)}(u_1) \cdot w_{t(2)}(u_2) \cdots w_{t(p)}(u_p) = w_{t(1)} \otimes \cdots \otimes w_{t(p)}(u_1, \dots, u_p)$$

Ejemplo 1.5.4

Sea $\mathbb{E} = \mathbb{R}^3$, $B = \{e_1, e_2, e_3\}$, $B^* = \{e_1^*, e_2^*, e_3^*\}$ para los dos siguientes ejemplos.

En el primero fijamos $(1, 2) = s \in \mathcal{S}_2$. Entonces $s = (1, 2) = s^{-1} = t$ y para los siguientes elementos de $T_2(\mathbb{E})$ se cumple:

$$f_1 = e_1^* \otimes e_2^* \quad \underline{s}f_1 = e_2^* \otimes e_1^*$$

$$f_2 = e_1^* \otimes e_1^* \quad \underline{s}f_2 = e_1^* \otimes e_1^*$$

$$f_3 = e_2^* \otimes e_3^* \quad \underline{s}f_3 = e_3^* \otimes e_2^*$$

En el segundo fijamos $(1, 2, 3) = s \in (S)_3$. Entonces $t = s^{-1} = (1, 3, 2)$, es decir, que $t(1) = 3, t(2) = 1, t(3) = 2$, y para el siguiente elemento de $T_3(\mathbb{E})$ se cumple:

$$f = e_1^* \otimes e_2^* \otimes e_3^* \quad \underline{s}f = e_3^* \otimes e_1^* \otimes e_2^*$$

Observación 1.5.5 Sea $f_i \in T_p(\mathbb{E})$. Entonces $\underline{s}(\sum \alpha_i f_i) = \sum \alpha_i (\underline{s}f_i)$. Por tanto, la proposición anterior sirve para $\forall f \in T_p(\mathbb{E})$.

Ejemplo 1.5.6

Con las mismas hipótesis que en el primer caso del ejemplo 1.5.4 se cumple:

$$f = 3e_1^* \otimes e_2^* + 5e_1^* \otimes e_1^* + 5e_2^* \otimes e_3^* \quad \underline{s}f = 3e_2^* \otimes e_1^* + 5e_1^* \otimes e_1^* + 5e_3^* \otimes e_2^*$$

Definición 1.5.7

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. de dim n . Sea $f \in T_p(\mathbb{E})$.

1. f es simétrica $\iff \forall s \in \mathcal{S}_p \quad \underline{s}f = f$
2. f es antisimétrica $\iff \forall s \in \mathcal{S}_p \quad \underline{s}f = \varepsilon(s)f$
3. $S_p(\mathbb{E}) = \{f \in T_p(\mathbb{E}) \mid f \text{ simétrica}\} \subseteq T_p(\mathbb{E})$
 $A_p(\mathbb{E}) = \{f \in T_p(\mathbb{E}) \mid f \text{ antisimétrica}\} \subseteq T_p(\mathbb{E})$

Observación 1.5.8 $S_p(\mathbb{E}), A_p(\mathbb{E}) \subseteq T_p(\mathbb{E})$ son s.e.v. (ver observación 1.5.5).

Ejemplo 1.5.9

Para los dos ejemplos, sea $\mathbb{E} = \mathbb{R}^3$, sean B y B^* bases de \mathbb{E} y de \mathbb{E}^* correspondientemente.

1. Definimos $f = e_1^* \otimes e_2^* \in T_2(\mathbb{E})$ y $s = (1, 2) \in (S)_2$. Entonces $\mathcal{S}_2 = \{\text{Id}, s\}$ y $\varepsilon(\text{Id}) = 1$, $\varepsilon(s) = -1$.

$$\left. \begin{array}{l} \underline{\text{Id}}(f) = f = \varepsilon(\text{Id}) \cdot f \\ \underline{s}(f) = e_2^* \otimes e_1^* \neq f, \underline{s}(f) \neq -f \end{array} \right\} \implies \begin{array}{l} f \notin S_2(\mathbb{E}) \\ f \notin A_2(\mathbb{E}) \end{array}$$

2. Como anteriormente, $\mathcal{S}_2 = \{\text{Id}, s = (1, 2)\}$.

- Para $f = e_1^* \otimes e_2^* + e_2^* \otimes e_1^*$,

$$\left. \begin{array}{l} \underline{\text{Id}}(f) = f \\ \underline{s}(f) = e_2^* \otimes e_1^* + e_1^* \otimes e_2^* = f \end{array} \right\} \implies f \in S_2(\mathbb{E})$$

- Para $f = e_1^* \otimes e_2^* - e_2^* \otimes e_1^*$,

$$\left. \begin{aligned} \text{Id}(f) &= f = \varepsilon(\text{Id})f \\ \underline{s}(f) &= e_2^* \otimes e_1^* - e_1^* \otimes e_2^* = -f = \varepsilon(s)f \end{aligned} \right\} \implies f \in A_2(\mathbb{E})$$

Observación 1.5.10

- $\varepsilon(s) = (-1)^n$ si $\varepsilon(s) = t_1, \dots, t_n$, donde t_1, \dots, t_n son transposiciones.
- $\varepsilon(s_1 s_2) = \varepsilon(s_1) \varepsilon(s_2)$.
- $s \in \mathcal{S}_p$. Definimos $A \in \mathbb{R}^{p \times p}$, donde $A_{i,j} = 1$ si $i = s(j)$ y $A_{i,j} = 0$ en otro caso. Entonces $\det A = \varepsilon(s)$.

Proposición 1.5.11

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -e.v. de dimensión n , sea $f \in T_p(\mathbb{E})$.

1. Podemos caracterizar los tensores simétricos como:

$$f \text{ simétrica} \iff \forall u_1, \dots, u_p \in \mathbb{E}, \forall i, j \quad f(u_1, \dots, u_i, \dots, u_j, \dots, u_p) = f(u_1, \dots, u_j, \dots, u_i, \dots, u_p)$$

2. Podemos caracterizar los tensores antisimétricos como:

$$\begin{aligned} f \text{ antisimétrica} &\iff \forall u_1, \dots, u_p \in \mathbb{E}, \forall i < j \quad f(u_1, \dots, u_i, \dots, u_j, \dots, u_p) = \\ &\quad - f(u_1, \dots, u_j, \dots, u_i, \dots, u_p) \\ &\iff \forall u_1, \dots, u_p \in \mathbb{E}, \forall i < j \text{ si } u_i = u_j \text{ entonces } f(u_1, \dots, u_p) = 0. \end{aligned}$$

Demostración

1. La implicación directa es una consecuencia de la definición de simetría.

En el caso de la implicación converso se cumple:

$$\begin{aligned} \forall t \text{ transposición } \underline{t}f = f &\implies \forall t_1, \dots, t_m \text{ transposiciones } \underline{t_1, \dots, t_m}f = \\ &\quad \underline{t_1}(\underline{t_2}(\dots(\underline{t_m}f)\dots)) = f \end{aligned}$$

Finalmente,

$$\forall s \in \mathcal{S}_p \quad s = t_1 \cdots t_m \implies \forall s \in \mathcal{S}_p \quad \underline{s}f = f \implies f \text{ es simétrica.}$$

2. Veamos primero que la tercera condición implica la segunda.

$$\begin{aligned} \forall u_1, \dots, u_p \in E, \forall i < j \quad 0 &= f(u_1, \dots, u_i + u_j, \dots, u_i + u_j, \dots, u_p) = \\ &f(u_1, \dots, u_i, \dots, u_i, \dots, u_p) + f(u_1, \dots, u_i, \dots, u_j, \dots, u_p) + \\ &f(u_1, \dots, u_j, \dots, u_i, \dots, u_p) + f(u_1, \dots, u_j, \dots, u_j, \dots, u_p) = \\ &f(u_1, \dots, u_i, \dots, u_j, \dots, u_p) + f(u_1, \dots, u_j, \dots, u_i, \dots, u_p) \implies \\ &f(u_1, \dots, u_i, \dots, u_j, \dots, u_p) = -f(u_1, \dots, u_j, \dots, u_i, \dots, u_p) \end{aligned}$$

Veamos ahora que la segunda condición implica la primera. Suponiendo cierta la segunda condición se cumple:

$$\underline{t}f = -f \implies \underline{t_1 \cdots t_m}f = (-1)^m f = \varepsilon(t_1 \cdots t_m)f$$

Y entonces:

$$\forall s \in \mathcal{S}_p \quad s = t_1 \cdots t_m \text{ y } \varepsilon(s) = (-1)^m \implies \forall s \in \mathcal{S}_p \quad \underline{s}f = \varepsilon(s)f \implies f \in A_p(E)$$

Y, finalmente, que la primera implica la tercera. Por ser f antisimétrica,

$$\forall u_1, \dots, u_p \in E, \forall i < j \quad f(u_1, \dots, u_i, \dots, u_j, \dots, u_p) = -f(u_1, \dots, u_j, \dots, u_i, \dots, u_p)$$

Si $u_i = u_j$, entonces $f(u_1, \dots, u_p) = 0$.

Proposición 1.5.12

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. con $\text{car } \mathbf{k} \neq 2$ y sea $f \in T_p(\mathbb{E})$, entonces $\forall v_i, v_j \in \mathbb{E}$

$$f(\cdots, v_i, \cdots, v_j, \cdots) = -f(\cdots, v_j, \cdots, v_i, \cdots) \iff f(\cdots, w, \cdots, w, \cdots) = 0$$

Demostración

\implies

$$\begin{aligned} f(\cdots, w, \cdots, w, \cdots) &= -f(\cdots, w, \cdots, w, \cdots) \implies \\ 2f(\cdots, w, \cdots, w, \cdots) &= 0 \implies f(\cdots, w, \cdots, w, \cdots) = 0 \end{aligned}$$

\longleftarrow

$$\begin{aligned} f(\cdots, v_i + v_j, \cdots, v_i + v_j, \cdots) &= 0 \implies \\ f(\cdots, v_i, \cdots, v_i, \cdots) + f(\cdots, v_j, \cdots, v_j, \cdots) + f(\cdots, v_i, \cdots, v_j, \cdots) + f(\cdots, v_j, \cdots, v_i, \cdots) &= 0 \\ \implies f(\cdots, v_i, \cdots, v_j, \cdots) &= -f(\cdots, v_j, \cdots, v_i, \cdots) \end{aligned}$$

Ejemplo 1.5.13

Sea $f \in T_2(\mathbb{E})$ (formas bilineales) y sea $B = \{e_1, \dots, e_n\}$ una base, Llamamos $M_B(f) = A = (f(e_i, e_j))$ y sea $\mathcal{S}_2 = \{\text{Id}, s = (1, 2)\}$. Entonces

$$\underline{\text{Id}}f = f \quad M_b(\underline{s}f) = (\underline{s}f(e_i, e_j)) = (f(e_j, e_i)) = A^t$$

Es decir, f es simétrico si y solo si $A^t = A \iff A$ simétrica y f es antisimétrico si y solo si $A = -A^t \iff A$ antisimétrica

Ejemplo 1.5.14

Sea $\dim \mathbb{E} = n$ y $\{e_1, \dots, e_n\}$ una base de \mathbb{E} , entonces

$$\begin{aligned} f: \overbrace{E \times \cdots \times E}^n &\rightarrow \mathbf{k} \\ (u_1, \dots, u_n) &\mapsto \det_B(u_1, \dots, u_n) \end{aligned}$$

Como f es multilineal ($\implies f \in T_n(\mathbb{E})$), f es antisimétrico por la proposición 1.5.11.

Definición 1.5.15

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. con $\text{car } \mathbf{k} = 0$ y $f \in T_p(\mathbb{E})$. Llamamos simetrizado de f a

$$S(f) = \frac{1}{p!} \sum_{s \in \mathcal{S}_p} \underline{s}f$$

y antisimetrizado de f a

$$A(f) = \frac{1}{p!} \sum_{s \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(s) \underline{s}f$$

Ejemplo 1.5.16

Sea $\mathbb{E} = \mathbb{R}^3$ y $B = \{e_1, e_2, e_3\}$ base de \mathbb{E}

- Sea $f = e_1^* \otimes e_2^* \in T_2(\mathbb{E})$ y $\mathcal{S}_p = \{\text{Id}, s = (1, 2)\}$, entonces

$$S(f) = \frac{1}{2}(e_1^* \otimes e_2^* + e_2^* \otimes e_1^*)$$

$$A(f) = \frac{1}{2}(e_1^* \otimes e_2^* - e_2^* \otimes e_1^*)$$

- Sea $g = e_1^* \otimes e_2^* \otimes e_3^*$ y $\mathcal{S}_p = \{\text{Id}, (1, 2), (1, 3), (2, 3), (1, 2, 3), (1, 3, 2)\}$, entonces

$$S(g) = \frac{1}{6}(e_1^* \otimes e_2^* \otimes e_3^* + e_2^* \otimes e_1^* \otimes e_3^* + e_3^* \otimes e_2^* \otimes e_1^* + e_1^* \otimes e_3^* \otimes e_2^* + e_3^* \otimes e_1^* \otimes e_2^* + e_2^* \otimes e_3^* \otimes e_1^*)$$

Observación 1.5.17 $s^{-1} \in \mathcal{S}_p$, por lo tanto no hace falta calcular s^{-1}

Ejemplo 1.5.18

Sea $f \in T_2(\mathbb{E})$ (formas bilineales) y sea $M_B(f) = A = (f(e_i, e_j))$, entonces

$$M_B(S(f)) = \frac{1}{2} (M_B(f) + M_B(f)^t) = \frac{1}{2}(A + A^t)$$

$$M_B(A(f)) = \frac{1}{2} (M_B(f) - M_B(f)^t) = \frac{1}{2}(A - A^t)$$

Observación 1.5.19 Si $f \in T_2(\mathbb{E}) \implies f = S(f) + A(f)$

Proposición 1.5.20

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. Consideramos $A, S: T_p(\mathbb{E}) \rightarrow T_p(\mathbb{E})$, entonces

- i) A, S son lineales
- ii) $f \in S_p(\mathbb{E}) \implies S(f) = f$ y $f \in A_p(\mathbb{E}) \implies A(f) = f$
- iii) $\text{Im}(S) = S_p(\mathbb{E})$ y $\text{Im}(A) = A_p(\mathbb{E})$

Demostración i) Queda como ejercicio. (pista: Consideramos $S(f + g)$)

ii) $f \in S_p(\mathbb{E}) \implies S(f) = f$ queda como ejercicio. Suponemos que $f \in A_p(\mathbb{E})$, entonces

$$A(f) = \frac{1}{p!} \left(\sum_{s \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(s) \underline{s}f \right) = \frac{1}{p!} \sum_{s \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(s) (\varepsilon(s)f) = \frac{p!f}{p!} = f$$

iii) $Im(S) = S_p(\mathbb{E})$ queda como ejercicio. Demostraremos que $Im(A) = A_p(\mathbb{E})$. Por ii sabemos que $A_p(\mathbb{E}) \subseteq Im(A)$, por lo tanto, resta ver que $g = A(h) \in A_p(\mathbb{E})$, sea $s \in \mathcal{S}_p$

$$\begin{aligned} \underline{s}h &= \underline{s} \left(\frac{1}{p!} \sum_{r \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(r) \underline{r}f \right) = \frac{1}{p!} \left(\sum_{r \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(r) \underline{s}(\underline{r}f) \right) = \\ &= \varepsilon(s) \frac{1}{p!} \left(\sum_{r \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(sr) \underline{sr}f \right) \stackrel{1.4}{=} \varepsilon(s) \frac{1}{p!} \left(\sum_{t \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(t) \underline{t}h \right) = \varepsilon(s)g \end{aligned}$$

Observación 1.5.21 Las mismas construcciones funcionan para tensores $(0, q)$, $T^q(\mathbb{E}) = T_q(\mathbb{E}^*)$, pero no funcionan para tensores (p, q) donde $p, q \neq 0$ porque las construcciones implican permutaciones.

1.6 Producto exterior

Observación 1.6.1 $S_p(\mathbb{E}) \subseteq T_p(\mathbb{E})$, $A_p(\mathbb{E}) \subseteq T_p(\mathbb{E})$ y S_p, A_p s.e.v..

- $f \in S_p(\mathbb{E})$, $g \in S_p(\mathbb{E})$ en general $f \otimes g \notin S_{p+p'}(\mathbb{E})$
- $f \in A_p(\mathbb{E})$, $g \in A_p(\mathbb{E})$ en general $f \otimes g \notin A_{p+p'}(\mathbb{E})$

Ejemplo 1.6.2

Sean $\omega_1, \omega_2 \in T_1(\mathbb{E})$:

- $T_1(\mathbb{E}) = \mathbb{E}^* = S_1(\mathbb{E}) = A_1(\mathbb{E})$, porque $S_1 = \{Id\}$.
- $\omega_1 \otimes \omega_2 \notin S_2(\mathbb{E}), A_2(\mathbb{E})$.

Observación 1.6.3 El producto exterior (que definiremos) manda tensores antisimétricos a antisimétricos.

Observación 1.6.4 Lo haremos en $T_p(\mathbb{E})$, análogamente se hará en $T^q(\mathbb{E})$.

Definición 1.6.5 (producto exterior de orden 1)

Sea \mathbb{E} un k-e.v.; $\omega_1, \dots, \omega_p \in T_1(\mathbb{E}) = \mathbb{E}$, el producto exterior de orden 1 es:

$$\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p = p!A(\omega_1 \otimes \dots \otimes \omega_p)$$

Observación 1.6.6

$$\begin{aligned} \omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p &= p! \left(\frac{1}{p!} \sum_{s \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(s) \underline{s}(\omega_1 \otimes \dots \otimes \omega_p) \right) = \\ &= \sum_{s \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(s) (\omega_{s^{-1}(1)} \otimes \dots \otimes \omega_{s^{-1}(p)}) \stackrel{\varepsilon(s)=\varepsilon(s^{-1})}{=} \sum_{r \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(r) (\omega_{r(1)} \otimes \dots \otimes \omega_{r(p)}) \end{aligned}$$

Ejemplo 1.6.7

Sea $\mathbb{E} = \mathbb{R}^3$, $B = \{e_1, e_2, e_3\}$, $B^* = \{e_1^*, e_2^*, e_3^*\}$.

- $e_1^* \wedge e_2^* = e_1^* \otimes e_2^* - e_2^* \otimes e_1^*$
- $e_2^* \wedge e_1^* = \dots = -e_1^* \wedge e_2^*$
- $e_1^* \wedge e_1^* = e_1^* \otimes e_1^* - e_1^* \otimes e_1^* = 0$

Proposición 1.6.8

Sean $\omega_1, \dots, \omega_p \in T_1(\mathbb{E}) = \mathbb{E}^*$

- i) $\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p \in A_p(\mathbb{E})$
- ii) $\omega_1 \wedge \dots \wedge (\alpha_i \overline{\omega_i} + \beta_i \overline{\omega_i}) \wedge \dots \wedge \omega_p = \alpha_i (\omega_1 \wedge \dots \wedge \overline{\omega_i} \wedge \dots \wedge \omega_p) + \beta_i (\omega_1 \wedge \dots \wedge \overline{\omega_i} \wedge \dots \wedge \omega_p)$
- iii) Sea $s \in \mathcal{S}_p$, $t = s^{-1}$, $\omega_{s(1)} \wedge \dots \wedge \omega_{s(p)} = \underline{t}(\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p) = \varepsilon(s)(\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p)$
- iv) Si $u_1, \dots, u_p \in \mathbb{E}$, $(\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p)(u_1, \dots, u_p) = \det(\omega_j(u_i))$
- v) Si $\omega_i = \omega_j, (i \neq j) \implies \omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p = 0$
- vi) $\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p \neq 0 \iff \{\omega_1, \dots, \omega_p\}$ son l.i.

Demostración

- i) $\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p = p! A(\omega_1 \otimes \dots \otimes \omega_p) \implies \omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p \in \text{Im}(A) \stackrel{\text{visto}}{=} A_p(\mathbb{E})$
- ii) Ejercicio (misma proposición que \otimes)
- iii) $\omega_{s(1)} \wedge \dots \wedge \omega_{s(p)} = \underline{t}(\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p)$ (Ejercicio, misma proposición que \otimes)

$$\begin{aligned} \omega_{s(1)} \wedge \dots \wedge \omega_{s(p)} &\stackrel{1.6.5+1.6.6}{=} \sum_{r \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(r) (\omega_{rs(1)} \otimes \dots \otimes \omega_{rs(p)}) = \\ &\stackrel{\varepsilon^2(s)=1}{=} \varepsilon(s) \sum_{r \in \mathcal{S}_p} \overbrace{\varepsilon(r) \varepsilon(s)}^{\varepsilon(rs)} (\omega_{rs(1)} \otimes \dots \otimes \omega_{rs(p)}) \stackrel{rs=m \in \mathcal{S}_p}{=} \varepsilon(s) \sum \varepsilon(m) (\omega_{m(1)} \otimes \dots \otimes \omega_{m(p)}) = \\ &= \varepsilon(s) (\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p) \end{aligned}$$

iv)

$$\begin{aligned} \overbrace{(\omega_1 \wedge \dots \wedge \omega_p)}^{T_p(\mathbb{E})}(u_1, \dots, u_p) &= \sum_{r \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(r) (\omega_{r(1)} \otimes \dots \otimes \omega_{r(p)})(u_1, \dots, u_p) = \\ &= \sum_{r \in \mathcal{S}_p} \varepsilon(r) (\omega_{r(1)}(u_1) \dots \omega_{r(p)}(u_p)) \stackrel{\text{def det}}{=} \det(\omega_j(u_i))_{i,j} \end{aligned}$$

v)

$$\begin{aligned} \omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_i \wedge \cdots \wedge \omega_i \wedge \cdots \wedge \omega_p &\stackrel{iii}{=} (-1) \omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_i \wedge \cdots \wedge \omega_i \wedge \cdots \wedge \omega_p \implies \\ \implies 2(\omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_p) &= 0 \stackrel{\text{car } \mathbf{k} \neq 2}{\implies} \omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_p = 0 \end{aligned}$$

vi) \implies

Suponemos que son l.d. y que $\omega_p = \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_j \omega_j$:

$$\omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_p = \omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_{p-1} \wedge \left(\sum_{j=1}^{p-1} \alpha_j \omega_j \right) \stackrel{ii}{=} \sum_{j=1}^{p-1} \alpha_j (\omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_{p-1} \wedge \omega_j) \stackrel{v}{=} 0 !!$$

\Longleftarrow

Sea $B = \{u_1, \dots, u_n\}$, $B^* = \{\omega_1, \dots, \omega_p, \overbrace{\omega_{p+1}, \dots, \omega_n}^{\text{Steinitz}}\}$ la base dual de B , tenemos que:

$$(\omega_1 \wedge \cdots \wedge \omega_p)(u_1, \dots, u_p) \stackrel{iv}{=} \det(\omega_j(u_i)) = \begin{vmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1 \neq 0$$

Observación 1.6.9 En el caso particular de $B = \{e_1, \dots, e_n\}$ base de \mathbb{E} ,

$$\begin{aligned} I &= \{i_1, \dots, i_p\}, \quad 1 \leq i_1 < \cdots < i_p \leq n; \\ J &= \{j_1, \dots, j_p\}, \quad 1 \leq j_1 < \cdots < j_p \leq n. \end{aligned}$$

$$\epsilon_{IJ} = \left(e_{i_1}^* \wedge \cdots \wedge e_{i_p}^* \right) (e_{j_1}, \dots, e_{j_p}) = \begin{cases} 1 & \text{si } I = J \\ 0 & \text{en el caso contrario} \end{cases}$$

En efecto, si $\exists j_k \in J$, $j_k \notin I$, entonces en virtud del cálculo dado por iv (1.6.8), en la posición k hay una fila de ceros.

Por otro lado, si $I = J$ entonces tenemos el determinante de la matriz identidad.

Observemos también que si $I = J$ pero no están ordenadas crecientemente, $\epsilon_{IJ} = \pm 1$ en función de las permutaciones que ordenan estos conjuntos.

Teorema (1.6.10)

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -e.v. de dim n , sea $B = \{e_1, \dots, e_n\}$ y sea $p \leq n$.

i) $\dim A_p(\mathbb{E}) = \binom{n}{p}$.

ii) Una base de A_p es $\tilde{B} = \{e_{i_1}^* \wedge \cdots \wedge e_{i_p}^*\}$, $i \leq i_1 < \cdots < i_p \leq n$.

iii) Si $w \in A_p(\mathbb{E})$, las coordenadas de w en la base anterior son:

$$(w(e_{i_1}, \dots, e_{i_p}))_{1 \leq i_1 < \cdots < i_p \leq n}$$

Demostración

i) $ii \implies i$ trivialmente.

ii) L.I.: Sea

$$w = \sum_{\substack{I=\{i_1, \dots, i_p\} \\ 1 \leq i_1 < \dots < i_p \leq n}} \alpha_I e_{i_1}^* \wedge \dots \wedge e_{i_p}^* = 0.$$

Sea $I_0 = \{i_1^0, \dots, i_p^0\}$ con $1 \leq i_1^0 < \dots < i_p^0 \leq n$ cualesquiera. Entonces,

$$0 = w(e_{i_1^0}, \dots, e_{i_p^0}) = \sum_{\substack{I=\{i_1, \dots, i_p\} \\ 1 \leq i_1 < \dots < i_p \leq n}} \alpha_I e_{i_1}^* \wedge \dots \wedge e_{i_p}^* (e_{i_1^0}, \dots, e_{i_p^0}) \stackrel{1.6.9}{=} \alpha_{I_0}.$$

Generadores:

$$A_p(\mathbb{E}) = A(T_p(\mathbb{E})) = A_p([e_{i_1} \otimes \dots \otimes e_{i_p}]_I) = [\{e_{i_1} \wedge \dots \wedge e_{i_p}\}_I] \stackrel{ii}{=} [\{e_{i_1} \wedge \dots \wedge e_{i_p}\}_{I \text{ ordenado}}].$$

iii) Sea $w \in A_p(\mathbb{E})$. Consideremos

$$\tilde{w} = \sum_{\substack{I=\{i_1, \dots, i_p\} \\ 1 \leq i_1 < \dots < i_p \leq n}} (w(e_{i_1}, \dots, e_{i_p})) e_{i_1}^* \wedge \dots \wedge e_{i_p}^*.$$

Veremos que $\tilde{w} = w$. Como tensores, basta ver que coinciden sobre vectores $(e_{j_1}, \dots, e_{j_p})$. Como ambos son alternados, podemos suponer $1 \leq j_1 < \dots < j_p \leq n$. Entonces,

$$\tilde{w}(e_{j_1}, \dots, e_{j_p}) = w(e_{j_1}, \dots, e_{j_p}).$$

Ejemplo 1.6.11

Sea $\mathbb{E} = \mathbb{R}^3$ y $B = \{e_1, e_2, e_3\}$

Espacio	dim	base	coordenadas
$A_1(\mathbb{E}) = T_1(\mathbb{E}) (= \mathbb{E}^*)$	3	$\{e_1^*, e_2^*, e_3^*\}$	$w = (a_1, b_1, c_1)$
$A_2(\mathbb{E}) \subseteq T_2(\mathbb{E})$	3	$\{e_1^* \wedge e_2^*, e_1^* \wedge e_3^*, e_2^* \wedge e_3^*\}$	$w_1 \wedge w_2 = (w_1 \wedge w_2)(e_1, e_2)e_1^* \wedge e_2^* +$ $(w_1 \wedge w_2)(e_1, e_3)e_1^* \wedge e_3^* +$ $(w_1 \wedge w_2)(e_2, e_3)e_2^* \wedge e_3^*$
$A_3(\mathbb{E}) \subseteq T_3(\mathbb{E})$	1	$\{e_1^* \wedge e_2^* \wedge e_3^*\}$	$t = (w_1 \wedge w_2 \wedge w_3) = (t(e_1, e_2, e_3))$

Además, si $w_1 = (a_1, b_1, c_1)_{B^*}$, $w_2 = (a_2, b_2, c_2)_{B^*}$ y $w_3 = (a_3, b_3, c_3)_{B^*}$

$$w_1 \wedge w_2 = \begin{vmatrix} w_1(e_1) & w_1(e_2) \\ w_2(e_1) & w_2(e_2) \end{vmatrix} (e_1^* \wedge e_2^*) + \begin{vmatrix} w_1(e_1) & w_1(e_3) \\ w_2(e_1) & w_2(e_3) \end{vmatrix} (e_1^* \wedge e_3^*) + \begin{vmatrix} w_1(e_2) & w_1(e_3) \\ w_2(e_2) & w_2(e_3) \end{vmatrix} (e_2^* \wedge e_3^*) =$$

$$\begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{vmatrix} (e_1^* \wedge e_2^*) + \begin{vmatrix} a_1 & b_1 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} (e_1^* \wedge e_3^*) + \begin{vmatrix} a_2 & b_2 \\ a_3 & b_3 \end{vmatrix} (e_2^* \wedge e_3^*)$$

$$w_1 \wedge w_2 \wedge w_3 = (w_1 \wedge w_2 \wedge w_3)(e_1, e_2, e_3)(e_1^* \wedge e_2^* \wedge e_3^*) = \begin{vmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{vmatrix} (e_1^* \wedge e_2^* \wedge e_3^*)$$

Observación 1.6.12 De forma análoga, podemos hacer el producto exterior de tensores 1-contravariantes ($T^1(\mathbb{E}) = \mathbb{E}$) y obtendremos $A^p(\mathbb{E})$ con dimensión $\binom{n}{p}$ y base $\{e_{i_1} \wedge \cdots \wedge e_{i_p}\}_{1 \leq i_1 < \cdots < i_p \leq n}$ si $B = \{e_1, \dots, e_n\}$ es base de \mathbb{E} .

Definición 1.6.13

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. y sean $f \in A_p(\mathbb{E})$ y $g \in A_q(\mathbb{E})$. Definimos el producto exterior de f y g como

$$f \wedge g = \frac{(p+q)!}{p!q!} A(f \otimes g)$$

Proposición 1.6.14

Sea \mathbb{E} un \mathbf{k} -ev. y sean $f \in A_p(\mathbb{E})$, $g \in A_q(\mathbb{E})$ y $h \in A_r(\mathbb{E})$.

- i) $(f \wedge g) \wedge h = f \wedge (g \wedge h) = f \wedge g \wedge h$
- ii) $f \wedge g = (-1)^{pq} g \wedge f$
- iii) \wedge es lineal en cada factor.

Observación 1.6.15 $w_1 \wedge w_2 \wedge \cdots \wedge w_r = w_1 \wedge (w_2 \wedge (\cdots w_{r-1} \wedge (w_r)))$

Ejemplo 1.6.16

Sea $\mathbb{E} = \mathbb{R}^4$, $B = \{e_1, e_2, e_3, e_4\}$ y $f, g \in A_2(\mathbb{E})$

- $f = e_1^* \wedge e_2^* + e_2^* \wedge e_3^* + e_3^* \wedge e_4^*$
- $g = e_1^* \wedge e_2^* + e_1^* \wedge e_3^*$

$$\begin{aligned} f \wedge g &= (e_1^* \wedge e_2^* + e_2^* \wedge e_3^* + e_3^* \wedge e_4^*) \wedge (e_1^* \wedge e_2^* + e_1^* \wedge e_3^*) = \\ &= \cancel{e_1^* \wedge e_2^* \wedge e_1^* \wedge e_2^*} \xrightarrow{0} + \cancel{e_1^* \wedge e_2^* \wedge e_1^* \wedge e_3^*} \xrightarrow{0} + \cancel{e_2^* \wedge e_3^* \wedge e_1^* \wedge e_2^*} \xrightarrow{0} + \cancel{e_2^* \wedge e_3^* \wedge e_1^* \wedge e_3^*} \xrightarrow{0} + \\ &\quad + \cancel{e_3^* \wedge e_4^* \wedge e_1^* \wedge e_2^*} \xrightarrow{0} + \cancel{e_3^* \wedge e_4^* \wedge e_1^* \wedge e_3^*} \xrightarrow{0} = e_3^* \wedge e_4^* \wedge e_1^* \wedge e_2^* \end{aligned}$$

2 Geometría Proyectiva

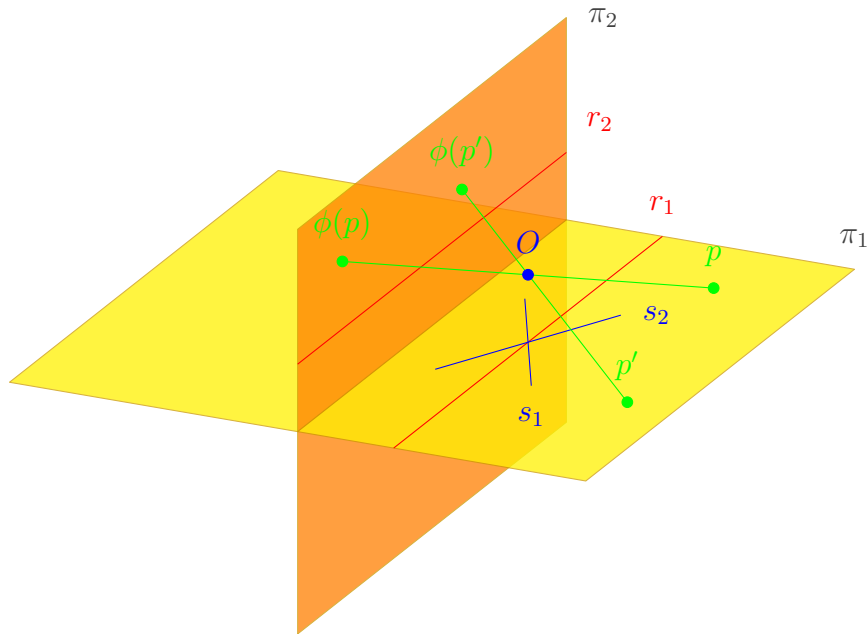
2.1 Contexto e idea

Segun el programa de Erlegen, una geometría se basa en el estudio de invariantes al aplicar unas ciertas transformaciones. Así tenemos que las geometrías estan "incluidas" en las superiores.

Así, la geometría euclidea, que estudia las transformaciones ortogonales, estaría "incluída" en la geometría afín, que estudia las tansformaciones lineales. Aquí se muestra una tabla con las distintas geometrías en la cual cada una esta "incluída" en la anterior

Geometría	Transformaciones de estudio
G. euclídea	transformaciones ortogonales
G. afín	transformaciones lineales
G. proyectiva	proyectividades
G. Algebraica	transformaciones por polinomios
G. Analítica	transformaciones por funciones analíticas
G. Diferencial	transformaciones por funciones de clase \mathcal{C}^∞
Topología	transformaciones por funciones de clase \mathcal{C}^0

2.1.1 Problema matemático



La idea básica del problema es enviar los puntos de π_1 a π_2 mediante la siguiente aplicación

$$\begin{aligned}\phi: \pi_1 &\rightarrow \pi_2 \\ p &\mapsto \overline{pO} \cap \pi_2\end{aligned}$$

Observación 2.1.1

- i) ϕ manda rectas a rectas
- ii) ϕ no está definida en r_1
- iii) r_2 no está en la imagen de ϕ

- iv) $\phi(s_1)$ y $\phi(s_2)$ son paralelas, por lo tanto, ϕ no mantiene el paralelismo
- v) ϕ no mantiene el tipo de cónica afín

Veremos que la solución para [ii](#) y [iii](#) consistirá en añadir puntos en el ∞ .

2.2 Definición y caracterizaciones del espacio proyectivo

Definición 2.2.1

Sea \mathbf{k} un cuerpo, \mathbb{E} un \mathbf{k} -e.v. de dim $n + 1$. El espacio proyectivo asociado a \mathbb{E} es

$$\mathbb{P}(\mathbb{E}) = \{\text{s.e.v. de dim 1 de } \mathbb{E}\}$$

Diremos que $\mathbb{P}(\mathbb{E})$ tiene dimensión n .

Observación 2.2.2 Se cumple $\mathbb{P}(\mathbb{E}) = (\mathbb{E} \setminus \{0\}) / \sim$, donde $v \sim v' \iff \exists \lambda \neq 0, v' = \lambda v$ para $v, v' \in \mathbb{E} \setminus \{0\}$.

Definición 2.2.3

Tenemos la siguiente aplicación π dada por el paso al cociente.

$$\begin{aligned} \pi: \mathbb{E} \setminus \{0\} &\rightarrow \mathbb{P}(\mathbb{E}) \\ v &\mapsto \pi(v) = [v] \\ \{\text{s.e.v. de dim 1 de } \mathbb{E}\} &\leftrightarrow [v] \end{aligned}$$

Definición 2.2.4

A los elementos de $\mathbb{P}(\mathbb{E})$ los llamaremos puntos de $\mathbb{P}(\mathbb{E})$.

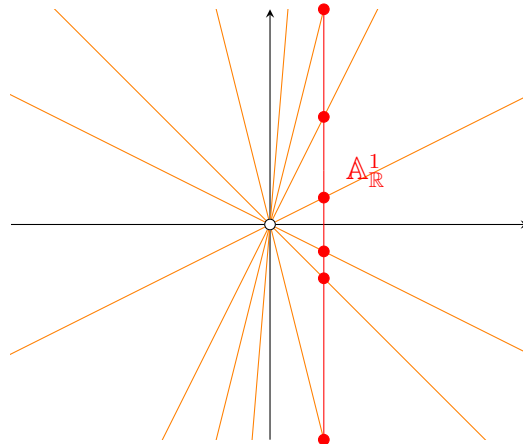
$$p = \pi(v) = [v]$$

Observación 2.2.5

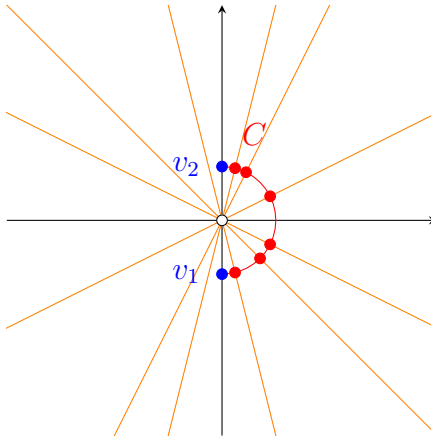
- Si \mathbb{E} no es relevante, $\mathbb{P}^n = \mathbb{P}(\mathbb{E})$.
- Si queremos remarcar \mathbf{k} , $\mathbb{P}_{\mathbf{k}}^n = \mathbb{P}(\mathbb{E})$.
- Normalmente $\mathbb{P}^n + \mathbf{k}^n = \mathbb{P}(\mathbf{k}^{n+1}) = (\mathbf{k}^{n+1} \setminus 0) / \sim$.

Ejemplo 2.2.6

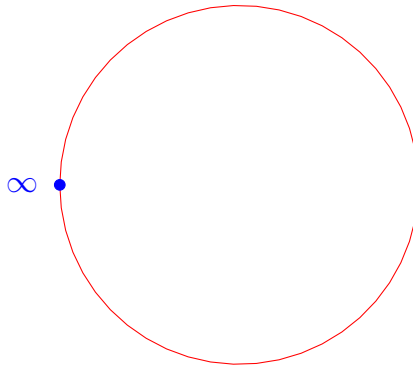
1. $\mathbb{P}_{\mathbb{R}}^1$.



Cada objeto de $\mathbb{P}_{\mathbb{R}}^1$ (rectas en naranja) tiene su equivalente en $\mathbb{A}_{\mathbb{R}}^1$ (puntos en rojo), a excepción de la recta $x = 0$. Para solucionar este problema, podemos usar la siguiente representación



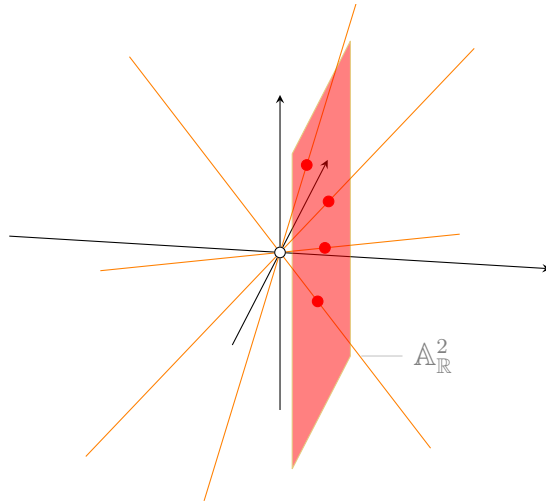
Pero el problema ahora viene por que v_1 y v_2 corresponden al mismo elemento de $\mathbb{P}_{\mathbb{R}}^1$. Lo podemos solucionar de la siguiente forma:



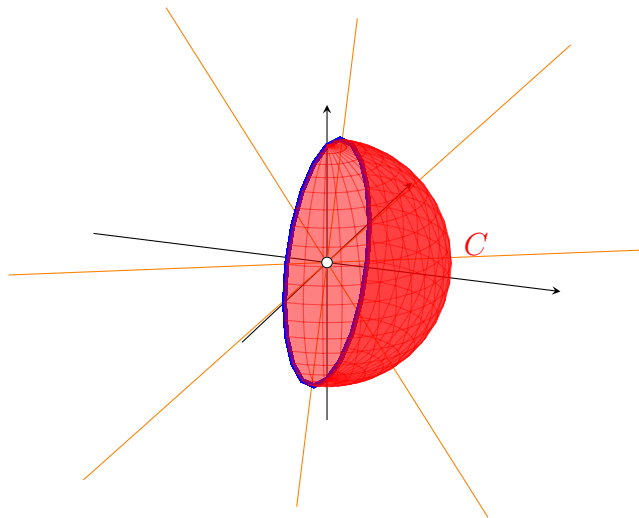
De tal forma que

$$\mathbb{A}_{\mathbb{R}}^1 \cup \{\infty\} = \mathbb{P}_{\mathbb{R}}^1 = C/(v_1 \sim v_2)$$

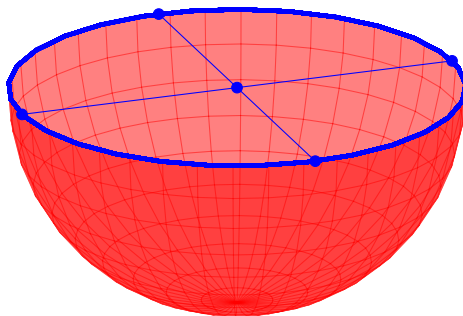
2. $\mathbb{P}_{\mathbb{R}}^2$.



Cada objeto de $\mathbb{P}^2_{\mathbb{R}}$ (rectas en naranja) tiene su equivalente en $\mathbb{A}^2_{\mathbb{R}}$ (puntos en rojo), a excepción de las rectas del plano $x = 0$. Para solucionar este problema, procedemos de manera análoga a [1](#)

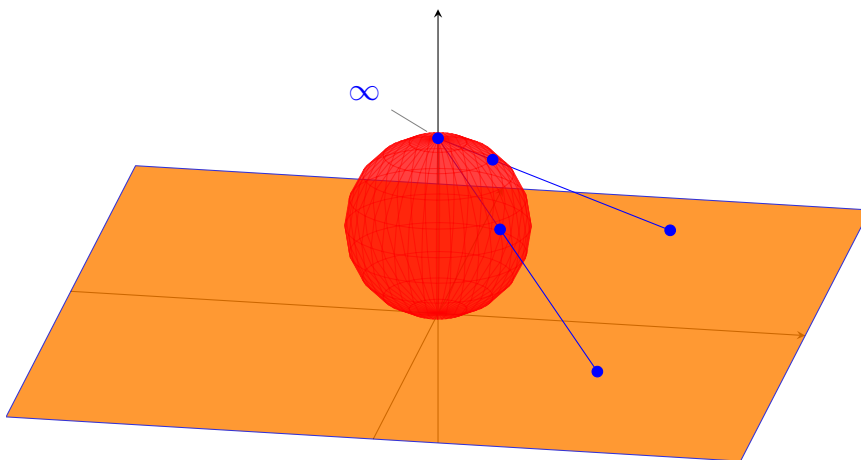


De nuevo, nos encontramos con el problema de que hay elementos de C (en azul) que se corresponden con el mismo elemento de $\mathbb{P}^2_{\mathbb{R}}$. No obstante, podemos visualizarlo como



Y unir los puntos azules antipolares. Aunque, si lo tratamos de imaginar, este objeto, no cabe en \mathbb{R}^3 .

3. $\mathbb{P}_{\mathbb{C}}^1 = (\mathbb{C}^2 \setminus 0) / \sim = \mathbb{C} \cup \{\infty\} = S^2$. Las igualdades por el momento son por analogía o intuición, más adelante se demostrarán. Aunque nos podemos hacer una idea basandonos en la proyección estereográfica



4. $\mathbb{P}_{\mathbb{Z}/2}^2$ contiene 7 puntos pues las rectas de \mathbb{Z}^3 solo contienen el 0 y un punto.

Observación 2.2.7 Hemos enunciado la definición algebraica de $\mathbb{P}_{\mathbb{R}}^n$. Existe una definición axiomática que no es igual en algunos casos patológicos.

2.3 Variedades lineales proyectivas

Definición 2.3.1

Sea \mathbb{E} un **k**-e.v. de dimensión $n + 1$, sea $\mathbb{P}^n = \mathbb{P}(\mathbb{E})$. Llamaremos variedad lineal (proyectiva) de dimensión r a cualquier conjunto de la forma:

$$V = \pi(H \setminus \{0\})$$

donde $H \subseteq \mathbb{E}$ es un subespacio vectorial de dimensión $r + 1$.

Por convención definimos la siguiente notación:

$$V = \pi(H \setminus \{0\}) = \pi(H)$$

Ejemplo 2.3.2

- $\mathbb{P}^n = \pi(\mathbb{E})$ es una variedad lineal de dimensión n .
- $p \in \mathbb{P}^n$, $p = \pi(v) = \pi([v])$ es una variedad lineal de dimensión 0.
- $\emptyset = \pi(\emptyset_{\mathbb{E}})$ es una variedad lineal de dimensión -1 .

Definición 2.3.3

- $\dim V = 1 \longrightarrow$ Recta
- $\dim V = 2 \longrightarrow$ Plano
- $\dim V = n - 1 \longrightarrow$ Hiperplano

Lema 2.3.4 $V = \pi(H \setminus \{0\}) \iff H \setminus \{0\} = \pi^{-1}(V)$

Ejercicio 2.3.5

Demostrar el lema anterior.

Observación 2.3.6 Hay una biyección

$$\{\text{s.e.v. de } \mathbb{E}\} \xrightleftharpoons[\pi^{-1}]{\pi} \{\text{variedades lineales de } \mathbb{P}(\mathbb{E})\}$$

- con dimension $r + 1 \leftrightarrow r$
- $H_1 \subseteq H_2 \iff V_1 \subseteq V_2$ con $V_i = \pi(H_i)$
- Las operaciones $+$ y \cap definidas para subespacios, se definen a través de esta biyección a variedades.

Proposición 2.3.7

Sean $V_1, V_2 \subseteq \mathbb{P}^n$ variedades lineales $\implies V_1 \cap V_2$ variedad lineal que verifica:

- $V_1 \cap V_2 \subseteq V_1, V_2$
- Si W variedad lineal, $W \subseteq V_1, V_2$ i $W \subseteq V_1 \cap V_2$

Demostración

Veamos que: $V_1 \cap V_2 = \pi(H_1 \cap H_2)$ si $V_i = \pi(H_i)$

\supseteq

$$\text{Si } v \in H_1 \cap H_2, p = [v] \in \pi(H_1), \pi(H_2) \implies p \in V_1 \cap V_2$$

\subseteq

$$\begin{aligned} \text{Sea } p \in V_1 \cap V_2, \left. \begin{array}{l} p = [v_1], v_1 \in H_1 \\ p = [v_2], v_2 \in H_2 \end{array} \right\} &\implies [v_1] = [v_2] \implies \exists \lambda \neq 0 \text{ t.q. } v_2 = \lambda v_1 \implies \\ &\implies v_2 \in H_1 \implies v_2 \in H_1 \cap H_2 \implies p = [v_2] \in \pi(H_1 \cap H_2) \end{aligned}$$

El resto sigue de lo que sabemos de s.e.v.s.

Definición 2.3.8

Sean $V_1, V_2 \subseteq \mathbb{P}^n$ variedades lineales, $V_i = \pi(H_i)$, definimos *join* o variedad lineal generada como:

$$V_1 \vee V_2 = \pi(H_1 + H_2)$$

Proposición 2.3.9

- $V_1, V_2 \subseteq V_1 \vee V_2$
- Sea W una variedad lineal, $V_1, V_2 \subseteq W \implies V_1 \vee V_2 \subseteq W$

Demostración

Propiedades de la suma de s.e.v.

Proposición 2.3.10

Sean $V_1, V_2 \subseteq \mathbb{P}^n$ variedades lineales:

- $V_1 \subseteq V_2 \implies \dim(V_1) \leq \dim(V_2)$
- Si $V_1 \subseteq V_2$ y $\dim(V_1) = \dim(V_2) \implies V_1 = V_2$

Proposición 2.3.11 Fórmula de Grassmann

$$\dim(V_1 \cap V_2) + \dim(V_1 \vee V_2) = \dim(V_1) + \dim(V_2)$$

Demostración

Propiedades s.e.v.

Ejemplo 2.3.12

1. \mathbb{P}^2 V_1, V_2 rectas, tenemos que $\dim(V_1 \cap V_2) + \dim(V_1 \vee V_2) = 2$ (Grassmann).

$\dim(V_1 \cap V_2)$	$1 \leq \dim(V_1 \vee V_2) \leq 2$	Posición relativa
0	2	Se cortan en un punto
1	1	Son la misma recta

Por tanto, dos rectas en un plano, o se cruzan o son la misma.

2. \mathbb{P}^3 V_1, V_2 rectas, tenemos que $\dim(V_1 \cap V_2) + \dim(V_1 \vee V_2) = 2$ (Grassmann).

$\dim(V_1 \cap V_2)$	$1 \leq \dim(V_1 \vee V_2) \leq 3$	Posición relativa
-1	3	Se cruzan
0	2	Se cortan en un punto ($V_1 \vee V_2 \cong \mathbb{P}^2$)
1	1	Son la misma recta

3. \mathbb{P}^3 V_1, V_2 planos, tenemos que $\dim(V_1 \cap V_2) + \dim(V_1 \vee V_2) = 4$ (Grassmann).

$\dim(V_1 \cap V_2)$	$2 \leq \dim(V_1 \vee V_2) \leq 3$	Posición relativa
1	3	Se cortan en una recta
2	2	Son el mismo plano

4. \mathbb{P}^3 V_1 plano, V_2 recta, tenemos que $\dim(V_1 \cap V_2) + \dim(V_1 \vee V_2) = 3$ (Grassmann).

$\dim(V_1 \cap V_2)$	$2 \leq \dim(V_1 \vee V_2) \leq 3$	Posición relativa
0	3	Se cortan en un punto
1	2	$V_2 \subseteq V_1$

Proposición 2.3.13

Sean $p \in \mathbb{P}^n, r, V, H \subseteq \mathbb{P}^n$ (recta, variedad lineal, hiperplano, respectivamente).

$$1. \dim(V \vee p) = \begin{cases} \dim V & (\iff p \in V) \\ \dim V + 1 & (\iff p \notin V) \end{cases}$$

$$2. \dim(r \vee H) = \begin{cases} 1 & (\iff r \subseteq H) \\ 0 & (\iff r \not\subseteq H) \end{cases}$$

Demostración

Fórmula de Grassmann.

Definición 2.3.14

Sean $V_1, V_2 \subseteq \mathbb{P}^n, (V_i = \pi(H_i))$ variedades lineales, V_1 y V_2 son suplementarias $\iff H_1$ y H_2 son complementarios.

Observación 2.3.15 V_1, V_2 suplementarias $\iff H_1 \oplus H_2 = \mathbb{E} \iff \left\{ \begin{array}{l} (1) \quad H_1 + H_2 = \mathbb{E} \\ (2) \quad H_1 \cap H_2 = \emptyset \end{array} \right\} \iff$

$$\left\{ \begin{array}{l} (1) \quad V_1 \vee V_2 = \mathbb{P}^n \\ (2) \quad V_1 \cap V_2 = \emptyset \end{array} \right.$$

Proposición 2.3.16

Sean $V_1, V_2 \subseteq \mathbb{P}^n$ variedades lineales:

1. V_1, V_2 son suplementarias $\implies \dim V_1 + \dim V_2 = n - 1$

2. Si $\dim V_1 + \dim V_2 = n - 1$

$$V_1, V_2 \text{ suplementarias} \iff V_1 \vee V_2 = \mathbb{P}^n \iff V_1 \cap V_2 = \emptyset$$

Demostración

1. V_1, V_2 suplementarias $\iff H_1, H_2$ complementarios $\implies \overbrace{\dim H_1}^{\dim V_1 + 1} + \overbrace{\dim H_2}^{\dim V_2 + 1} = \dim \mathbb{E} = n + 1$

2. Fórmula de Grassmann.

Definición 2.3.17

Sea $\mathbb{P}^n = \mathbb{P}(\mathbb{E})$, y sean $p_0, \dots, p_m \in \mathbb{P}^n$ tal que $p_i = [v_i], v_i \in \mathbb{E}$, decimos que p_0, \dots, p_m son linealmente independientes (l.i.) $\iff v_1, \dots, v_m \in \mathbb{E}$ son linealmente independientes.

Observación 2.3.18 La independencia lineal no depende de los representantes elegidos.

Ejemplo 2.3.19

$\mathbb{P}_{\mathbb{R}}^2 = \mathbb{P}(\mathbb{R}^3)$. Sean $p_0 = [(1, 1, 0)], p_1 = [(0, 1, 1)], p_2 = [(2, 3, 1)]$. Entonces p_0 y p_1 son l.i., pero p_0, p_1, p_2 son l.d..

Proposición 2.3.20

Sean $p_0, \dots, p_m \in \mathbb{P}^n$ puntos y $V \subseteq \mathbb{P}^n$ una variedad lineal:

1. $\dim(p_0 \vee \dots \vee p_m) \leq m$
2. $\dim(p_0 \vee \dots \vee p_m) = m \iff p_0, \dots, p_m$ son l.i.
3. $\dim V = m \iff \exists p_0, \dots, p_m \in V$ tal que $V = p_0 \vee \dots \vee p_m \iff \forall p_0, \dots, p_m \in V$ l.i., $V = p_0 \vee \dots \vee p_m$

Demostración

Inmediata a partir de propiedades de s.e.v..

Definición 2.3.21

$p_0, \dots, p_r \in \mathbb{P}^n (r \geq n)$ están en posición general $\iff n + 1$ puntos cualesquiera de ellos son l.i..

2.4 Sistemas de referencia proyectivos. Coordenadas proyectivas

Observación 2.4.1 $\mathbb{P}^n = \mathbb{P}(\mathbb{E})$. Sea $B = \{v_0, \dots, v_n\}$ base de \mathbb{E} :

$$p = [v] = [\lambda v] \quad (v)_B = \begin{pmatrix} x_0 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (\lambda v)_B = \begin{pmatrix} \lambda x_0 \\ \vdots \\ \lambda x_n \end{pmatrix}$$

Vemos que las coordenadas estarían definidas salvo por multiplicar por λ .

Definición 2.4.2 $\mathbb{P}^n = \mathbb{P}(\mathbb{E})$

1. Un sistema de referencia proyectivo en \mathbb{P}^n es:

$$R = \{p_0, \dots, p_n; \bar{p}\}$$

Donde p_0, \dots, p_n, \bar{p} estan en posición general.

- $\{p_0, \dots, p_n\}$ son los vertices de R
- \bar{p} es el punto unidad

2. Fijado un sistema de referencia R . Sea $B = \{u_0, \dots, u_n\}$ base de \mathbb{E} . Diremos que B esta adaptada a R si y solo si:

$$\begin{cases} p_i = [u_i], \forall i = 0, \dots, n \\ \bar{p} = [u_0 + \dots + u_n] \end{cases}$$

3. *Asignación de coordenadas proyectivas*

$\mathbb{P}^n = \mathbb{P}(\mathbb{E})$, Sea $R = \{p_0, \dots, p_n; \bar{p}\}$, y $B = \{u_0, \dots, u_n\}$ una base adaptada. Sea $q \in \mathbb{P}^n$, $q = [v]$, entonces $q_R = v_B$. (Cale ver que la definición es consistente)

Proposición 2.4.3

Sea R un sistema de referencia en \mathbb{P}^n . Sean $B_1 = \{u_0, \dots, u_n\}$, $B_2 = \{u'_0, \dots, u'_n\}$ bases adaptadas a R . Sea $q = [v] \in \mathbb{P}^n$, entonces $\exists \lambda \neq 0$ tal que $v_{B_2} = v_{B_1}$.

Demostración

$p_i = [u_i] = [u'_i], \forall i = 0, \dots, n$. Por tanto, $\exists \lambda \neq 0$ tal que $u'_i = \lambda_i u_i, \forall i = 1, \dots, n$. Por otro lado,

$$\begin{aligned} \bar{p} = [u_0 + \dots + u_n] &= [u'_0 + \dots + u'_n] \implies \exists \lambda \neq 0 \text{ tal que } u'_0 + \dots + u'_n = \\ &= \lambda_0 u_0 + \dots + \lambda_n u_n = \lambda(u_0 + \dots + u_n) \xrightarrow{B_1 \text{ base}} \lambda_i = \lambda \forall i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Observación 2.4.4 $R = \{p_0, \dots, p_n; \bar{p}\}$ en \mathbb{P}^n

1. $q \in \mathbb{P}^n$, $q_R = (a_0, \dots, a_n) = \lambda(a_0, \dots, a_n) \stackrel{\text{notación}}{=} (a_0 : \dots : a_n) \forall \lambda \neq 0$
2. Ejemplos:

$$(p_0)_R = (1 : 0 : \dots : 0)$$

$$\vdots$$

$$(p_n)_R = (0 : \dots : 0 : 1)$$
3. $q_R = (0 : \dots : 0)$ no existe.

4. Sea $\mathbb{P}_{\mathbb{R}}^2 = \mathbb{P}(\mathbb{R}^3)$, $R = \{p_0, p_1, p_2; \bar{p}\} = \{[(1, 1, 0)], [(1, 0, 1)], [(0, 1, 1)]; [(3, 3, 2)]\}$, entonces $B = \{[(1, 1, 0)], [(1, 0, 1)], [(0, 1, 1)]\}$ no es una base adaptada, para que lo sea, debemos multiplicar v_0, v_1, v_2 por $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$ tales que $\bar{p} = \lambda_0 p_0 + \lambda_1 p_1 + \lambda_2 p_2$. En este caso:

$$\begin{cases} \lambda_0 + \lambda_1 = 3 \\ \lambda_0 + \lambda_2 = 3 \\ \lambda_1 + \lambda_2 = 2 \end{cases} \iff \begin{cases} \lambda_0 = 2 \\ \lambda_1 = 1 \\ \lambda_2 = 1 \end{cases}$$

Y el sistema de referencia con la base B adaptada es:

$$R' = \{[(2, 2, 0)], [(1, 0, 1)], [(0, 1, 1)]; [(3, 3, 2)]\}$$

Proposición 2.4.5

Sean $H_0, \dots, H_m \subseteq \mathbb{P}^n$ hiperplanos, entonces

$$H_0, \dots, H_m \text{ l.i.} \iff \dim(H_0 \cap \dots \cap H_m) = n - m - 1$$

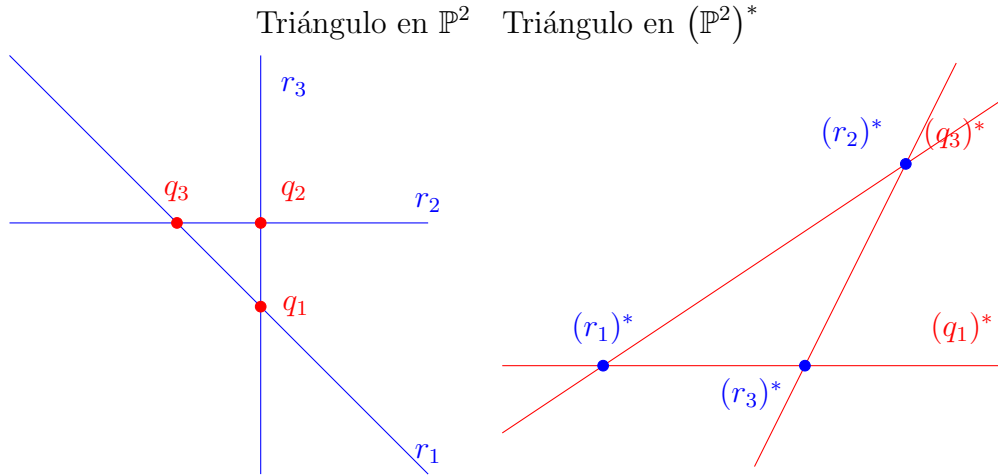
Demostración

$$H_0, \dots, H_m \text{ l.i.} \xLeftrightarrow{\text{def}} H_0^*, \dots, H_m^* \in (\mathbb{P}^n)^* \text{ son l.i.} \iff \dim(H_0^* \vee \dots \vee H_m^*) = m \iff \dim(H_0^* \vee \dots \vee H_m^*)^* = n - m - 1 = \dim(H_0 \cap \dots \cap H_m)$$

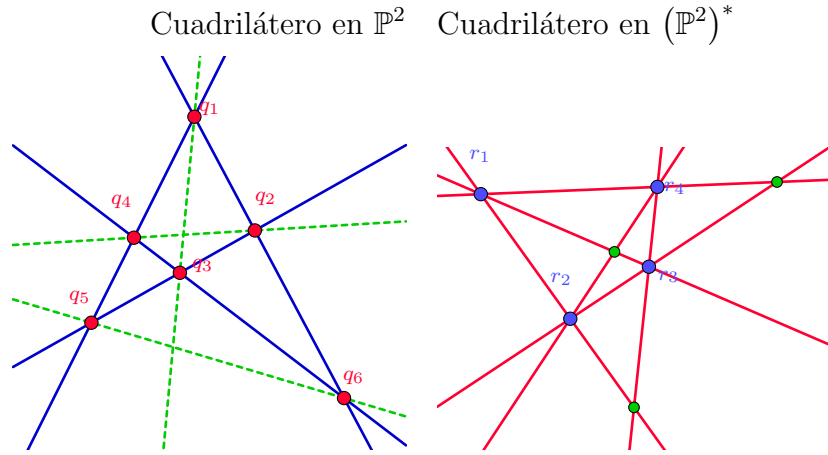
Definición 2.4.6

Una recta (o haz) de hiperplanos en \mathbb{P}^n es la colección de hiperplanos que contienen a una variedad fijada V de dimensión $n - 2$.

Ejemplo 2.4.7 Dualización del triángulo



Ejemplo 2.4.8



Definición 2.4.9

Sea $\mathcal{R} = \{p_0, \dots, p_n; \bar{p}\}$ una referencia de \mathbb{P}^n , sea $B = \{u_0, \dots, u_n\}$ una base adaptada y sea $B^* = \{u_0^*, \dots, u_n^*\}$ su base dual. Entonces, llamamos referencia dual de \mathcal{R} a

$$\mathcal{R}^* = \{p'_0 = [u_0^*], \dots, p'_n = [u_n^*]; \bar{p}' = [u_0^* + \dots + u_n^*]\}$$

Observación 2.4.10 \mathcal{R}^* no depende de la base B escogida.

Ejemplo 2.4.11

En coordenadas, sea $p \in \mathbb{P}^n$ y sea $p_{\mathcal{R}} = (a_0, \dots, a_n)$, entonces p^* es un hiperplano de $(\mathbb{P}^n)^*$ y, en referencia \mathcal{R}^* se tiene

$$p^* \equiv a_0 x'_0 + \dots + a_n x'_n = 0$$

Y si $H \subseteq \mathbb{P}^n$ en referencia \mathcal{R}

$$\mathbb{P}^n \supseteq H \equiv b_0 x_0 + \dots + b_n x_n = 0$$

entonces $(H^*)_{\mathcal{R}^*} = (b_0, \dots, b_n)$

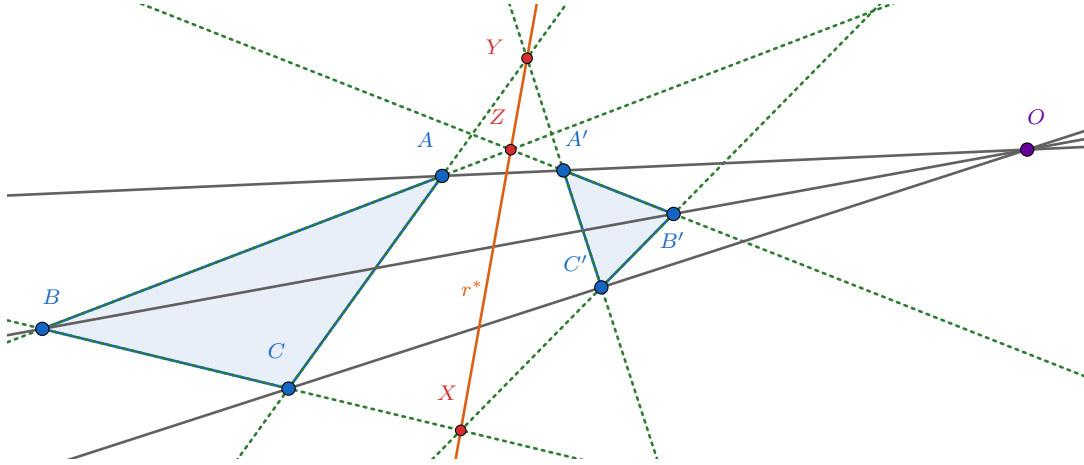
Observación 2.4.12 En general, si tenemos \mathcal{R} una referencia de \mathbb{P}^n y $\mathcal{R}^* = \{p'_0, \dots, p'_n; \bar{p}'\}$ una referencia de $(\mathbb{P}^n)^*$. Entonces $(p_i')^*$ es un hiperplano tal que $\pi \notin (p_i')^*$ y $p_j \in (p_i')^* \forall i \neq j$

2.5 Los teoremas de Desargues y Pappus

Teorema de Desargues (2.5.1)

Sean $ABC, A'B'C'$ dos triángulos en \mathbb{P}^2 (sin vértices ni lados en común). Entonces,

$$AA' \cap BB' \cap CC' \neq \emptyset \iff \begin{cases} AB \cap A'B' = Z \\ AC \cap A'C' = Y \\ BC \cap B'C' = X \end{cases} \text{ están alineados.}$$



Demostración

\implies Analítica

$R = \{A, B, C; O\}$, es un sistema de referencia porque todos los puntos son linealmente independientes.

- A, B, C linealmente independientes (ABC triangulo)
- A, B, O linealmente independientes (si no, $AB = A'B'$)
- B, C, O linealmente independientes (si no, $BC = B'C'$)
- C, A, O linealmente independientes (si no, $AC = A'C'$)

Tenemos que

- $A' \in AO : x_1 - x_2 = 0$ i $A \neq A' \implies A' = (a : 1 : 1)$
- $B' \in BO : x_0 - x_2 = 0$ i $B \neq B' \implies B' = (1 : b : 1)$
- $C' \in CO : x_0 - x_1 = 0$ i $C \neq C' \implies C' = (1 : 1 : c)$

$$Z : \left\{ \begin{array}{l} AB : x_2 = 0 \\ A'B' : 0 = \begin{vmatrix} a & 1 & x_0 \\ 1 & b & x_1 \\ 1 & 1 & x_2 \end{vmatrix} \end{array} \right\} x_0(1-b) - x_1(a-1) = x_0(1-b) + x_1(1-a) = 0 \implies \\ \implies Z = (a-1 : 1-b : 0).$$

Análogamente, $X = (0 : b-1 : 1-c)$, $Y = (a-1 : 0 : 1-c)$. Vemos que $Z - X = Z \implies X, Y, Z$ no son linealmente independientes $\iff X, Y, Z$ están alineados.

\implies Sintética

π plano en \mathbb{P}^3

$$\mathbb{P}^2 = \mathbb{P}(\mathbb{E}) \subset \mathbb{P}(\bar{\mathbb{E}}) = \mathbb{P}^3, \bar{\mathbb{E}} = \mathbb{E} \times \mathbf{k}$$

Sea r una recta en \mathbb{P}^3 , $r \not\subset \pi$, tal que $r \cap \pi = O$. Sean $p, p' \in r, p \neq p', p, p' \neq O$. r y AA' son coplanarias $\implies pA \cap p'A' = A_0$ (intersección de rectas en un plano). Análogamente,

$$\begin{cases} pB \cap p'B' = B_0 \\ pC \cap p'C' = C_0 \end{cases}.$$

Por construcción,

$$\begin{array}{lll} pA_0 \cap \pi = A, & pB_0 \cap \pi = B, & pC_0 \cap \pi = C \\ p'A_0 \cap \pi = A', & p'B_0 \cap \pi = B', & p'C_0 \cap \pi = C' \end{array}$$

A_0, B_0, C_0 son linealmente independientes (forman un triángulo). Si estuvieran alineados, $T = A_0 \vee B_0 \vee C_0 \implies A, B, C \in \pi \cap (p \vee t)$ estarían alineados.

Finalmente,

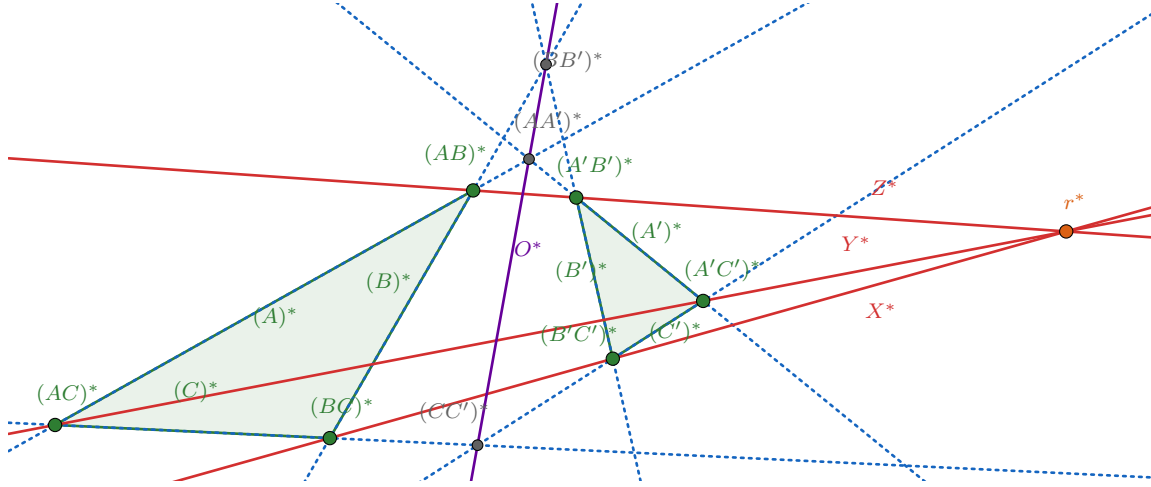
$$Z = AB \cap A'B' = \pi \cap ((A_0 \vee B_0 \vee p) \cap (A_0 \vee B_0 \vee p')) \stackrel{\text{intersección de planos distintos}}{=} \pi \cap (A_0 \vee B_0)$$

Análogamente, $Y = \pi \cap (A_0 \vee C_0)$ y $X = \pi \cap (B_0 \vee C_0)$. Entonces, $X, Y, Z \in \pi \cap (A_0 \vee B_0 \vee C_0)$ (que es una recta porque es la intersección de dos planos distintos).

\Leftarrow Dualidad

Hipótesis: X, Y, Z están alineados.

Consideramos el espacio proyectivo dual y dualizamos las hipótesis:



Queremos ver que, en efecto, $(AA')^*, (BB')^*, (CC')^*$ están alineados. Por la primera implicación, $\exists s \subset (\mathbb{P}^2)^*$ recta tal que:

$$\begin{aligned} s &= [((AB)^* \vee (AC)^*) \cap ((A'B')^* \vee (A'C')^*)] \vee [\dots] \vee [\dots] \\ &= [(AB \cap AC)^* \cap (A'B' \cap A'C')^*] \vee [\dots] \vee [\dots] \\ &= (A^* \cap (A')^*) \vee (B^* \cap (B')^*) \vee (C^* \cap (C')^*) \\ &= (AA')^* \vee (BB')^* \vee (CC')^* \end{aligned}$$

$$s = (AA' \cap BB' \cap CC')^* \implies AA' \cap BB' \cap CC' = s^* \text{ (un punto)}$$

Observación 2.5.2 El teorema de Desargues es su propio dual: $(\implies) \iff (\impliedby)$.

Observación 2.5.3 Definición axiomática de \mathbb{P}^2

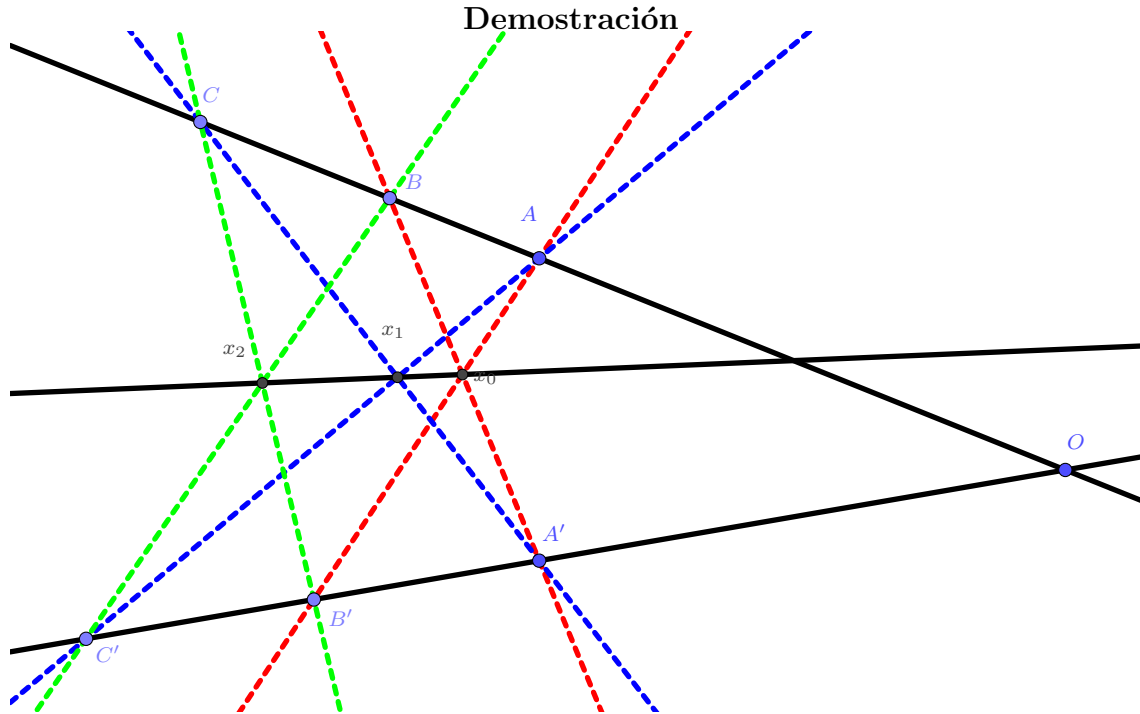
- $X \rightarrow$ puntos
- $Y \rightarrow$ rectas

Hay una relación de pertenencia entre puntos y rectas (los puntos pertenecen a rectas).
Axiomas:

- $\forall p_1, p_2, \exists! r$ tal que $p_1, p_2 \in r$
- $\forall r_1, r_2, \exists! p$ tal que $p \in r_1, r_2$
- $\exists 4$ puntos no alineados

Teorema de Pappus (2.5.4)

Sean $r, s \subseteq \mathbb{P}_k^2$ rectas diferentes ($r \neq s$), sean $A, B, C \in r$ tal que $A \neq B$, $B \neq C$ y $C \neq A$ y sean también $A', B', C' \in s$ tal que $A' \neq B'$, $B' \neq C'$ y $C' \neq A'$. Entonces $x_0 \equiv AB' \cap A'B$, $x_1 \equiv AC' \cap A'C$ y $x_2 \equiv BC' \cap B'C$ están alineados.



Tomamos la referencia $\mathcal{R} = \{A, B, A'; B'\}$. Entonces

$$\begin{aligned} A &= (1, 0, 0) & A' &= (0, 0, 1) \\ B &= (0, 1, 0) & B' &= (1, 1, 1) \\ C &= (1, a, 0) & C' &= (1, 1, b) \end{aligned}$$

con $a, b \neq 0$. Calculamos ahora x_0, x_1 y x_2 y vemos que

$$\begin{vmatrix} \text{---} & x_0 & \text{---} \\ \text{---} & x_1 & \text{---} \\ \text{---} & x_2 & \text{---} \end{vmatrix} = 0$$

2.6 Coordenadas absolutas. Razón doble

Definición 2.6.1

Sea $\mathcal{R} = \{p_0, p_1; \bar{p}\}$ un sistema de referencia de $\mathbb{P}_{\mathbf{k}}^1$ y sea $q \in \mathbb{P}_{\mathbf{k}}^1$ con $q_{\mathcal{R}} = (x_0, x_1)$ las coordenadas de q en la referencia \mathcal{R} . Definimos las coordenadas absolutas de q como

$$\alpha = \frac{x_0}{x_1} \in k \cup \{\infty\}$$

Observación 2.6.2 A diferencia de las coordenadas normales, **NO** está definido salvo constantes.

Observación 2.6.3 Al trabajar con coordenadas absolutas, trabajaremos con aritmética normal de $0/\infty$.

Observación 2.6.4

$$\begin{aligned} (p_0)_{\mathcal{R}} &= (1, 0) & \alpha_0 &= \infty \\ (p_1)_{\mathcal{R}} &= (0, 1) & \alpha_1 &= 0 \\ (p_2)_{\mathcal{R}} &= (1, 1) & \alpha_2 &= 1 \end{aligned}$$

Definición 2.6.5

Sean $q_1, q_2, q_3, q_4 \in \mathbb{P}_{\mathbf{k}}^1$ con al menos 3 de ellos diferentes. Sea \mathcal{R} un sistema de referencia y sean $(q_i)_{\mathcal{R}} = (x_i : y_i) \forall i = 1, 2, 3, 4$. Definimos la razón doble de q_1, q_2, q_3, q_4 como

$$(q_1, q_2, q_3, q_4) = \frac{\begin{vmatrix} x_3 & y_3 \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_3 & y_3 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} x_4 & y_4 \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_4 & y_4 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix}} \in k \cup \{\infty\}$$

Observación 2.6.6 La razón doble no depende del sistema de referencia ni del representante de cada punto. De hecho, sean \mathcal{R} y $\bar{\mathcal{R}}$ dos sistemas de referencia y $q_i = (x_i, y_i)_{\mathcal{R}} = (\bar{x}_i, \bar{y}_i)_{\bar{\mathcal{R}}}$, por lo tanto

$$\begin{pmatrix} \bar{x}_i \\ \bar{y}_i \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$$

y se tiene que

$$\frac{\begin{vmatrix} \bar{x}_3 & \bar{y}_3 \\ \bar{x}_1 & \bar{y}_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \bar{x}_3 & \bar{y}_3 \\ \bar{x}_2 & \bar{y}_2 \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} \bar{x}_4 & \bar{y}_4 \\ \bar{x}_1 & \bar{y}_1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \bar{x}_4 & \bar{y}_4 \\ \bar{x}_2 & \bar{y}_2 \end{vmatrix}} = \frac{\det S \begin{vmatrix} x_3 & y_3 \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix}}{\det S \begin{vmatrix} x_3 & y_3 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix}} : \frac{\det S \begin{vmatrix} x_4 & y_4 \\ x_1 & y_1 \end{vmatrix}}{\det S \begin{vmatrix} x_4 & y_4 \\ x_2 & y_2 \end{vmatrix}}$$

Observación 2.6.7 La razón doble es cociente de razones simples

Observación 2.6.8 En coordenadas absolutas, si

$$\begin{array}{lll} q_1 & \alpha_1 & (\alpha_1 : 1) \\ q_2 & \alpha_2 & (\alpha_2 : 1) \\ q_3 & \alpha_3 & (\alpha_3 : 1) \\ q_4 & \alpha_4 & (\alpha_4 : 1) \end{array}$$

teniendo en cuenta que $(\infty, 1) = (1, 0)$. entonces,

$$(q_1, q_2, q_3, q_4) = \frac{\begin{vmatrix} \alpha_3 & 1 \\ \alpha_1 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \alpha_3 & 1 \\ \alpha_2 & 1 \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} \alpha_4 & 1 \\ \alpha_1 & 1 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \alpha_4 & 1 \\ \alpha_2 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{\alpha_3 - \alpha_1}{\alpha_3 - \alpha_2} : \frac{\alpha_4 - \alpha_1}{\alpha_4 - \alpha_2}$$

Observación 2.6.9 Sean $q_1, q_2, q_3, q_4 \in \mathbb{P}_k^1$ tal que $\{q_1, q_2, q_3\}$ son diferentes dos a dos. Tomamos $\mathcal{R} = \{q_1, q_2, q_3\}$ como nuestro sistema de referencia y sean $(x, y)_{\mathcal{R}} = q_4$ las coordenadas de q_4 en el sistema de referencia \mathcal{R} , entonces

$$(q_1, q_2, q_3, q_4) = \frac{\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}} : \frac{\begin{vmatrix} x & y \\ 1 & 0 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x & y \\ 0 & 1 \end{vmatrix}} = \frac{-1}{1} : \frac{-y}{x} = \frac{x}{y}$$

es decir, la coordenada absoluta de q_4 en la referencia $\mathcal{R} = \{q_1, q_2, q_3\}$.

Observación 2.6.10 Sea $V \subseteq \mathbb{P}^n$ una variedad de dimensión $n - 2$, por lo tanto V^* es una recta de $(\mathbb{P}^n)^*$ y si $V \subseteq H_1, H_2, H_3, H_4 \subseteq \mathbb{P}^n$, la razón doble de H_1, H_2, H_3, H_4 queda definida considerando los hiperplanos como puntos del espacio dual, es decir,

$$(H_1, H_2, H_3, H_4) = (H_1^*, H_2^*, H_3^*, H_4^*)$$

Ejemplo 2.6.11

Consideramos $V \subseteq \mathbb{P}^4$, con

$$V : \begin{cases} x_0 = 0 \\ x_1 = 0 \end{cases}$$

Podemos identificar $V^* = \{H^* \in (\mathbb{P}^4)^* \mid \text{hiperplano} \mid V \subseteq H\}$. Tomamos ahora

$$\begin{aligned} H_1 &\rightarrow x_0 = 0 && \leftrightarrow (1, 0, 0, 0) \\ H_2 &\rightarrow x_1 = 0 && \leftrightarrow (0, 1, 0, 0) \\ \bar{\rho}w_1(u_2) + \rho w_2(u_1) &H_3 \rightarrow 2x_0 + x_1 = 0 && \leftrightarrow (2, 1, 0, 0) \\ H_4 &\rightarrow 3x_0 + 2x_1 = 0 && \leftrightarrow (3, 2, 0, 0) \end{aligned}$$

Para calcular la razón doble, aplicamos la observación 2.6.9, y tomamos el sistema de referencia $\mathcal{R} = \{H_1, H_2, H_3\}$ y $B = \{(2, 0, 0, 0), (0, 1, 0, 0)\}$ una base adaptada. Entonces se tiene que $(H_4)_{\mathcal{R}} = (\frac{3}{2}, 2) = (3, 4)$. Por lo tanto,

$$(H_1, H_2, H_3, H_4) = \frac{3}{4}$$

Proposición 2.6.12

Sean $q_1, q_2, q_3, q_4 \in \mathbb{P}^n$ y sea $\rho = (q_1, q_2, q_3, q_4)$. Si permutamos los cuatro puntos, (con $4! = 24$ posibilidades), obtendremos uno de los siguientes valores para la razón doble

$$\bar{\rho}w_1(u_2) + \rho w_2(u_1)A_p = \left\{ \rho, \frac{\rho}{1}, 1 - \rho, \frac{1}{1 - \rho}, \frac{\rho}{\rho - 1}, \frac{\rho - 1}{\rho} \right\}$$

Definición 2.6.13 Proyección y sección

Sean $V, r \subseteq \mathbb{P}^n$ dos variedades suplementarias con $\dim r = 1$ ($\implies \dim V = n-2$). Entonces, definimos la proyección desde V como

$$\begin{aligned}\Phi: r &\rightarrow V^* \\ p &\mapsto V \vee p\end{aligned}$$

De nuevo identificando los hiperplanos de \mathbb{P}^n con puntos de $(\mathbb{P}^n)^*$. Asimismo, definimos la sección con r como

$$\begin{aligned}\Psi: V^* &\rightarrow r \\ H &\mapsto H \cap r\end{aligned}$$

Observación 2.6.14 $p \notin V \implies V \vee p$ es un hiperplano que contiene a V .

Observación 2.6.15 Ψ está bien definido y $r \cap H$ es un punto. En efecto, si $r \cap H$ no es un punto, $r \subseteq H$, pero si nos miramos ahora $H \cong \mathbb{P}^{n-1}$, entonces V es un hiperplano de H , $\implies r \cap V \neq \emptyset$, lo cual es una contradicción ya que hemos supuesto que V y r son suplementarias.

Observación 2.6.16 $\Phi(\Psi(H)) = H$ y $\Psi(\Phi(p)) = p$, es decir, Φ y Ψ son inversas mutuas.

Teorema de la invariancia de razón doble (2.6.17)

Sean $V, r \subseteq \mathbb{P}^n$ dos variedades suplementarias con $\dim r = 1$ ($\implies \dim V = n-2$) y sean Φ y Ψ la proyección desde V y la sección con r respectivamente. Entonces,

i) $\forall p_1, p_2, p_3, p_4 \in r$ con p_1, p_2, p_3 distintos dos a dos

$$(p_1, p_2, p_3, p_4) = (\Phi(p_1), \Phi(p_2), \Phi(p_3), \Phi(p_4))$$

ii) $\forall H_1, H_2, H_3, H_4 \in V^*$ (identificando hiperplanos con elementos del dual) con H_1, H_2, H_3 distintos dos a dos. Entonces

$$(H_1, H_2, H_3, H_4) = (\Psi(H_1), \Psi(H_2), \Psi(H_3), \Psi(H_4))$$

Demostración

Primero vemos que $i \iff ii$ porque $\Psi^{-1} = \Phi$. Pasamos ahora a demostrar i . Sea $\rho = (p_1, p_2, p_3, p_4)$, entonces podemos elegir $u_1, u_2 \in \mathbb{E}$ tal que $p_1 = [u_1]$, $p_2 = [u_2]$ y $p_3 = [u_1 + u_2]$. Por lo tanto $p_4 = [\rho u_1 + u_2]$, de la misma forma, $\bar{\rho} = (H_1, H_2, H_3, H_4)$ y podemos escoger $w_1, w_2 \in \mathbb{E}^*$ tal que $H_1 = [w_1]$, $H_2 = [w_2]$ y $H_3 = [w_1 + w_2]$. Lo que implica que $H_4 = [\bar{\rho} w_1 + w_2]$. Ahora trabajamos con que $p_i \in H_i$. Entonces

$$\begin{cases} p_1 \in H_1 \implies w_1(u_1) = 0 \\ p_2 \in H_2 \implies w_2(u_2) = 0 \\ p_3 \in H_3 \implies (w_1 + w_2)(u_1 + u_2) = 0 \implies \overrightarrow{w_1(u_1)}^0 + w_1(u_2) + w_2(u_1) + \overrightarrow{w_2(u_2)}^0 = 0 \\ p_4 \in H_4 \implies (\bar{\rho} w_1 + w_2)(\rho u_1 + u_2) = 0 \implies \overrightarrow{\bar{\rho} w_1(u_1)}^0 + \bar{\rho} w_1(u_2) + \rho w_2(u_1) + \overrightarrow{w_2(u_2)}^0 = 0 \end{cases}$$

trabajando ahora con la cuarta ecuación

$$\bar{\rho}w_1(u_2) + \rho w_2(u_1) = w_1(u_2)(\bar{\rho} - \rho) = 0 \xrightarrow{(1)} \bar{\rho} = \rho$$

La cancelación en (1) ocurre ya que $w_1(u_2) \neq 0$. Y $w_1(u_2) \neq 0$ ya que, si lo fuera,

$$w_1(u_2) = 0 \implies p_2 \in H_1 \implies \{p_1, p_2\} \subseteq r \cap H_1 \implies r \subseteq H_1 \implies r \cap V \neq \emptyset$$

pero como sabemos $r \cap V = \emptyset$ ya que son variedades suplementarias.

2.7 Cuaternas armónicas

Observación 2.7.1 Sean $p_1, p_2, p_3, p_4 \in \mathbb{P}^n$ diferentes dos a dos. y sea

$$A_p = \left\{ \rho, \frac{1}{\rho}, 1 - \rho, \frac{1}{1 - \rho}, \frac{\rho}{\rho - 1}, \frac{\rho - 1}{\rho} \right\}$$

Entonces, los valores de A_p son diferentes, salvo el caso en que

$$A_p = \left\{ -1, \frac{1}{2}, 2 \right\} \quad \text{con } \mathbf{k} = \mathbb{R}$$

Definición 2.7.2

Sean $p_1, p_2, p_3, p_4 \in \mathbb{P}^n$ diferentes dos a dos. Entonces $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ forman una cuaterna armónica si y solo si

$$(p_1, p_2, p_3, p_4) = -1$$

Proposición 2.7.3

Sean $p_1, p_2, p_3, p_4 \in \mathbb{P}^n$ diferentes dos a dos. Entonces, son equivalentes

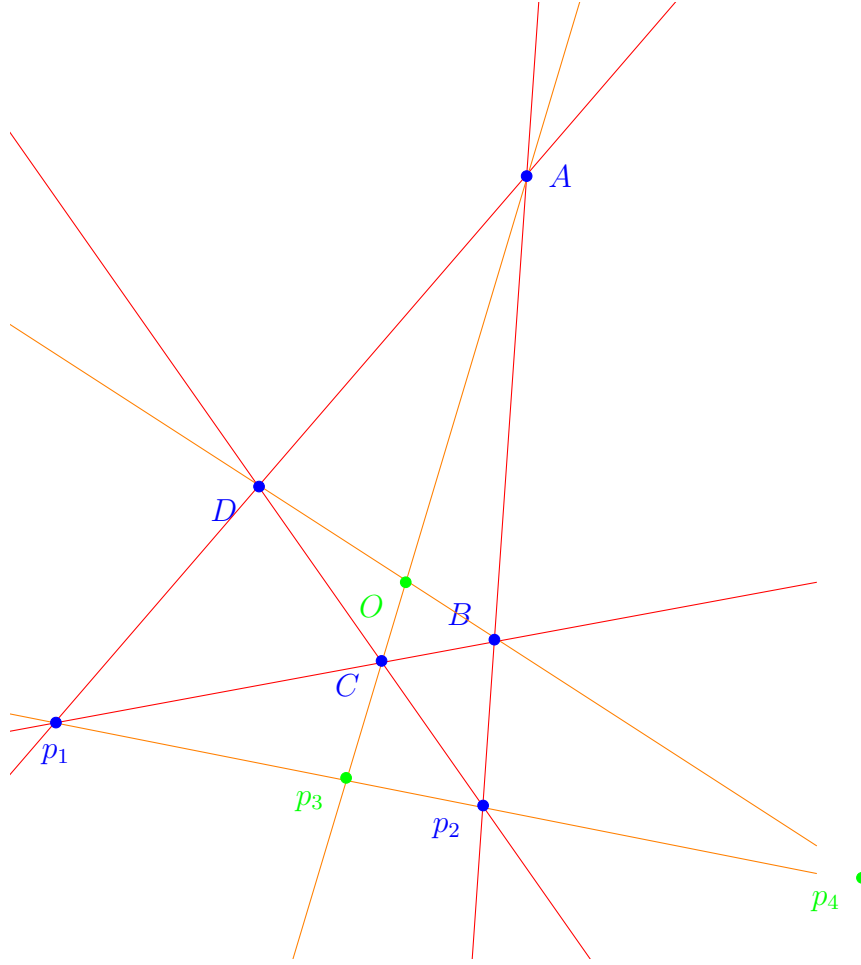
- i) $\rho = (p_1, p_2, p_3, p_4) = -1$
- ii) $(p_1, p_2, p_3, p_4) = (p_2, p_1, p_3, p_4)$
- iii) $(p_1, p_2, p_3, p_4) = (p_1, p_2, p_4, p_3)$
- iv) $(p_1, p_2, p_3, p_4) = (p_3, p_4, p_1, p_2)$

Demostración

La demostración se hará en clase de problemas

Teorema Cuaterna armónica en el cuadrilátero (2.7.4)

Sean $A, B, C, D, p_1, p_2 \in \mathbb{P}^2$ los vértices de un cuadrilátero, sea $p_1p_2 = r \subseteq \mathbb{P}^2$, $AC = s \subseteq \mathbb{P}^2$, $s \cap BD = O \in \mathbb{P}^2$, $s \cap r = p_3 \in \mathbb{P}^2$ y $DB \cap r = p_4 \in \mathbb{P}^2$. Entonces, $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ son una cuaterna armónica. Dicho de otra forma, en un cuadrilátero, la intersección de una diagonal con las otras dos y los vértices de la diagonal forman una cuaterna armónica.



Demostración

Podemos poner coordenadas y operar y nos saldrá el resultado. Aunque aquí detallamos una demostración sintética. Para esta demostración nos valdremos de las proyecciones y secciones definidas anteriormente, por ello, recordamos que si $h \subseteq \mathbb{P}^2$ es una recta, una variedad complementaria de h es un punto. Ahora definimos Φ_B la proyección desde B , Φ_D la proyección desde D y Ψ_s y Ψ_r la sección con r y con s respectivamente. entonces

$$\begin{array}{ccccc}
 r & \xrightarrow{\Psi_s \circ \Phi_B} & s & \xrightarrow{\Psi_r \circ \Phi_D} & r \\
 p_1 & \mapsto & C & \mapsto & p_2 \\
 p_2 & \mapsto & A & \mapsto & p_1 \\
 p_3 & \mapsto & p_3 & \mapsto & p_3 \\
 p_4 & \mapsto & O & \mapsto & p_4
 \end{array}$$

Por el teorema 2.6.17, tenemos que, si $f = \Psi_r \circ \Phi_D \circ \Psi_s \circ \Phi_B$,

$$(p_1, p_2, p_3, p_4) = (f(p_1), f(p_2), f(p_3), f(p_4)) = (p_2, p_1, p_3, p_4)$$

Y por la proposición 2.7.3, tenemos que $\{p_1, p_2, p_3, p_4\}$ es una cuaterna armónica.