

Geometría III

FACULTAD
DE
CIENCIAS
UNIVERSIDAD DE GRANADA



Los Del DGIIM, losdeldgiim.github.io

Doble Grado en Ingeniería Informática y Matemáticas
Universidad de Granada



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

Eres libre de compartir y redistribuir el contenido de esta obra en cualquier medio o formato, siempre y cuando des el crédito adecuado a los autores originales y no persigas fines comerciales.

Geometría III

Los Del DGIIM, losdeldgiim.github.io

Arturo Olivares Martos

Granada, 2023-2024

Índice general

1. El Espacio Afín	5
1.1. Subespacios afines	8
1.2. Sistemas de referencias afines	12
1.2.1. Cambio de sistema de referencia	16
1.3. Aplicaciones afines	16
1.3.1. Determinación de una aplicación afín	19
1.3.2. Aplicaciones afines notables	23
1.4. Relación de Ejercicios	29
2. Espacios euclídeos	31
2.1. Distancia entre subespacios	33
2.2. Isometrías	35
2.3. Clasificación de los movimientos	36
2.3.1. Movimientos en el plano \mathbb{E}^2	37
2.3.2. Movimientos en el espacio \mathbb{E}^3	40
2.4. Triángulos	44
2.4.1. Puntos Notables del Triángulo	45
2.5. Teorema de Thales	51
2.6. Teorema de Pappus	52
2.7. Convexidad	53
2.8. Relación de Ejercicios	53
3. Hipercuádricas afines	55
3.1. Cambio de sistema de referencia e hipercuádricas	56
3.2. Clasificación de hipercuádricas euclídeas	56
3.2.1. Clasificación de las cónicas	59
3.2.2. Clasificación de las cuádricas	62
3.3. Relación de Ejercicios	66
4. Espacio Proyectivo	67
4.1. Subespacios Proyectivos	67
4.2. Coordenadas Homogéneas	68
4.3. Proyectividades	69
5. Relaciones de Ejercicios	71
5.1. El Espacio Afín.	71
5.2. El Espacio Afín Euclídeo.	100
5.3. Hipercuádricas afines.	121

1. El Espacio Afín

Definición 1.1 (Espacio afín). Sea $\mathcal{A} \neq \emptyset$ un conjunto y $V(\mathbb{K})$ un espacio vectorial¹. Diremos que \mathcal{A} es un espacio afín si

$$\begin{aligned} \exists \quad \vec{\cdot} : \mathcal{A} \times \mathcal{A} &\longrightarrow V \\ (P, Q) &\longmapsto \overrightarrow{PQ} \end{aligned}$$

que cumple lo siguiente:

1. $\forall P, Q, R \in \mathcal{A}$, entonces $\overrightarrow{PQ} + \overrightarrow{QR} = \overrightarrow{PR}$
2. Fijado $P \in \mathcal{A}$, existe una biyección

$$\begin{aligned} \varphi_P : \mathcal{A} &\longrightarrow V \\ Q &\longmapsto \overrightarrow{PQ} \end{aligned}$$

Esta propiedad, por la definición de biyección tenemos que es:

- a) Inyectividad: $\overrightarrow{PQ} = \overrightarrow{PR} \implies Q = R$,
- b) Sobreyectividad: $\forall v \in V, \exists Q \mid \overrightarrow{PQ} = v$.

A los elementos de \mathcal{A} los llamaremos puntos, y a los elementos de V los llamaremos vectores. Al espacio vectorial V lo llamaremos espacio de direcciones de \mathcal{A} . Por ello, a veces notaremos $V = \vec{\mathcal{A}}$.

Ejemplo. Algunos ejemplos de espacios afines son:

1. En \mathbb{R}^3 , tenemos que la aplicación $\vec{\cdot}$ es:

$$\begin{aligned} \vec{\cdot} : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 &\longrightarrow \mathbb{R}^3 \\ (P, Q) &\longmapsto \overrightarrow{PQ} = Q - P \end{aligned}$$

2. Para cualquier espacio vectorial $V(\mathbb{K})$, tenemos que la aplicación $\vec{\cdot}$ es:

$$\begin{aligned} \vec{\cdot} : V \times V &\longrightarrow V \\ (u, v) &\longmapsto \overrightarrow{uv} = v - u \end{aligned}$$

Veamos las dos propiedades:

¹Por norma general, usaremos $\mathbb{K} = \mathbb{R}$. De forma excepcional, podremos usar $\mathbb{K} = \mathbb{C}$.

a) $\forall u, v, w \in V$, se tiene que:

$$\overrightarrow{uv} + \overrightarrow{vw} = v - u + w - v = w - u = \overrightarrow{uw}$$

b) Fijado $v \in V$, tenemos la siguiente biyección:

$$\begin{aligned} \varphi_v : V &\longrightarrow V \\ w &\longmapsto w - v \end{aligned}$$

Por este ejemplo, tenemos que todo espacio vectorial se puede ver como espacio afín, y decimos que es su estructura afín canónica.

Algunas consecuencias de la definición de espacio afín son:

$$1. \overrightarrow{PQ} = \overrightarrow{0} \iff Q = P$$

Suponemos $Q = P$. Entonces,

$$\overrightarrow{PQ} + \overrightarrow{QP} = \overrightarrow{PP} + \overrightarrow{PP} = \overrightarrow{PP} \implies \overrightarrow{PP} = \overrightarrow{0}$$

Como tenemos que φ_P es inyectiva, tenemos que ese punto es único, por lo que se da la doble implicación.

$$2. \overrightarrow{PQ} = -\overrightarrow{QP}$$

$$\overrightarrow{PQ} + \overrightarrow{QP} = \overrightarrow{PP} = \overrightarrow{0}$$

3. Sean los puntos P_1, \dots, P_k . Entonces:

$$\sum_{i=1}^{k-1} \overrightarrow{P_i P_{i+1}} = \overrightarrow{P_1 P_k}$$

Se demuestra fácilmente por inducción sobre k .

$$4. \text{Igualdad del paralelogramo: } \overrightarrow{P_1 P_2} = \overrightarrow{Q_1 Q_2} \implies \overrightarrow{P_1 Q_1} = \overrightarrow{P_2 Q_2}$$

$$\overrightarrow{P_1 Q_1} = \overrightarrow{P_1 P_2} + \overrightarrow{P_2 Q_1} = \overrightarrow{P_2 Q_1} + \overrightarrow{Q_1 Q_2} = \overrightarrow{P_2 Q_2}$$

Cabe destacar que podemos operar entre puntos y vectores considerando la inversa de la biyección descrita para el espacio afín:

$$\begin{aligned} \varphi_p^{-1} : \overrightarrow{\mathcal{A}} &\longrightarrow \mathcal{A} \\ v &\longmapsto \varphi_p^{-1}(v) = Q \end{aligned}$$

donde tenemos que $\varphi_p^{-1}(v) = Q \iff \overrightarrow{PQ} = v$. De tal forma, notamos $Q = P + v$ o, equivalentemente, $v = Q - P$. De esta notación, deducimos las siguientes propiedades:

1. $\forall P \in \mathcal{A}$, tenemos que $P + \overrightarrow{0} = P$.

$$P + \overrightarrow{0} = P + \overrightarrow{QQ} = P + Q - Q = P \quad \forall Q \in \mathcal{A}$$

2. $\forall P \in \mathcal{A}, u, v \in \vec{\mathcal{A}}$, se tiene que $P + (u + v) = (P + u) + v = R \in \mathcal{A}$.

3. Sea $P, Q, R \in \mathcal{A}, u, v \in \vec{\mathcal{A}}$. Se tiene lo siguiente:

$$\left. \begin{array}{l} P + u = Q \\ P + v = R \end{array} \right\} \implies \overrightarrow{QR} = v - u$$

$$\overrightarrow{QR} = R - Q = P + v - P - u = v - u$$

Definición 1.2 (Traslación). Dado un vector $v \in \vec{\mathcal{A}}$, definimos la traslación según v de la siguiente forma:

$$\begin{array}{ccc} t_v : \mathcal{A} & \longrightarrow & \mathcal{A} \\ p & \longmapsto & p + v \end{array}$$

Se tiene el siguiente resultado:

Proposición 1.1. *Las traslaciones son movimientos biyectivos.*

Demostración. Sea t_v la traslación a considerar.

Demostremos en primer lugar que es inyectiva. Sean $P, Q \in \mathcal{A}$ tal que se cumple que $t_v(P) = t_v(Q)$. Entonces, $P + v = Q + v$, por lo que $P = Q$ y se tiene que es inyectiva.

Veamos ahora que es sobreyectiva. $\forall Q \in \mathcal{A}, \exists P \in \mathcal{A}$ tal que $P + v = Q$ definiendo P como $Q - v$. \square

Algunas propiedades que se deducen directamente de la definición son:

1. $t_{\vec{0}} = Id_{\mathcal{A}}$.
2. $t_v \circ t_w = t_w \circ t_v = t_{v+w}$.
3. $t_v \circ t_{-v} = Id_{\mathcal{A}}$
4. $\{t_v\}_{v \in \vec{\mathcal{A}}}$ es un grupo abeliano.

Definición 1.3 (Centro de Gravedad). Sea \mathcal{A} un espacio afín con $\vec{\mathcal{A}}$. Sea una familia de puntos $P_1, \dots, P_k \in \mathcal{A}$, con $k \in \mathbb{N}$. Definimos el centro de gravedad $G \in \mathcal{A}$ como

$$G = O + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \overrightarrow{OP_i}, \quad \forall O \in \mathcal{A}$$

Veamos que la definición no depende del punto O escogido. Escogemos ahora $O' \in \mathcal{A}$ en vez de O . Entonces:

$$\begin{aligned} G &= O' + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \overrightarrow{O'P_i} = O' + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (\overrightarrow{O'O} + \overrightarrow{OP_i}) = O' + \overrightarrow{O'O} + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \overrightarrow{OP_i} \\ &= O' + O - O' + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \overrightarrow{OP_i} = O + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \overrightarrow{OP_i} \end{aligned}$$

1.1. Subespacios afines

Definición 1.4 (Subespacios afines). Sea \mathcal{A} un espacio afín con $\vec{\mathcal{A}}$ espacio de direcciones. Un subconjunto $S \subseteq \mathcal{A}$ diremos que es un subespacio afín de \mathcal{A} si $\exists p \in \mathcal{A}$ y subespacio vectorial $\vec{F} \subseteq \vec{\mathcal{A}}$ tal que

$$S = p + \vec{F} = \{p + v \mid v \in \vec{F}\}$$

Algunas propiedades de los subespacios afines son:

$$1. \vec{F} = \{\overrightarrow{PQ} \mid Q \in S\}.$$

\subset) Si $v \in \vec{F}$, entonces definimos $Q := P + v \in S$. Por tanto, $v = Q - P = \overrightarrow{PQ}$, con $Q \in S$.

\supset) Dado $Q \in S$, tenemos que $Q = P + \overrightarrow{PQ} \in S$, por lo que $\overrightarrow{PQ} \in \vec{F}$.

$$2. \vec{F} = \{\overrightarrow{P_1P_2} \mid P_1, P_2 \in S\}$$

$$\overrightarrow{P_1P_2} = \overrightarrow{P_1P} + \overrightarrow{PP_2} \in \vec{F}$$

3. Consideramos F', F'' subespacios vectoriales de \vec{F} . Entonces,

$$Q + F' = P + F'' = S \implies F' = F''$$

de ahí, que denotemos $\vec{F} = \vec{S}$ y, por tanto,

$$S = p + \vec{S}$$

Definición 1.5. La dimensión de un espacio afín \mathcal{A} es la dimensión de su variedad de direcciones

$$\dim \mathcal{A} := \dim \vec{\mathcal{A}}$$

A veces, lo notaremos como \mathcal{A}^n , con $n = \dim \mathcal{A}$.

Algunos subespacios afines $S \subset \mathcal{A}$ con determinadas dimensiones tienen nombre concreto, que son:

- $\dim S = 0$: Punto.
- $\dim S = 1$: Recta.
- $\dim S = 2$: Plano.
- $\dim S = \dim \mathcal{A} - 1$: Hiperplano.

Proposición 1.2. Dados $P, Q \in \mathcal{A}$, $P \neq Q$, tenemos que \exists_1 recta r tal que $P, Q \in r$.

Demostración. El espacio de direcciones es $\vec{r} = \mathcal{L}(\overrightarrow{PQ})$. Por tanto, tenemos que existe una recta $r = P + \mathcal{L}(\overrightarrow{PQ})$.

Supongamos que existe otra recta $r' = P + \mathcal{L}(v)$. Como $\overrightarrow{PQ} \in \vec{r}$, entonces podemos tomar $\mathcal{L}(v) = \mathcal{L}(\overrightarrow{PQ})$, por lo que tienen la misma variedad de direcciones y, por tanto, es la misma recta. \square

Operaciones con subespacios afines

Proposición 1.3 (Intersección). *Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos $\{S_i\}_{i \in I}$ una familia de subespacios afines de \mathcal{A} . Si $\bigcap_{i \in I} S_i \neq \emptyset$, se tiene que $\bigcap_{i \in I} S_i$ es un subespacio afín con variedad de direcciones*

$$\overrightarrow{\bigcap_{i \in I} S_i} = \bigcap_{i \in I} \overrightarrow{S_i}$$

Demostración. Demostremos que $\bigcap_{i \in I} S_i = p + \bigcap_{i \in I} \overrightarrow{S_i}$.

⊂) Tomamos $q \in \bigcap_{i \in I} S_i$, por lo que $\overrightarrow{pq} \in \bigcap_{i \in I} \overrightarrow{S_i}$. Por tanto, queda demostrada esta inclusión.

⊃) Sea $q \in p + \bigcap_{i \in I} \overrightarrow{S_i}$. Entonces, $q = p + v$ con $v \in \bigcap_{i \in I} \overrightarrow{S_i}$. Por tanto, $q \in S_i$, $\forall i \in I$ y, por consiguiente, $q \in \bigcap_{i \in I} S_i$.

□

Definición 1.6 (Suma afín). *Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos S, T subespacios afines.*

Llamamos suma afín de S y T (o subespacio afín generado por S y T), denotado por $S \vee T$, al subespacio afín más pequeño que contiene a S y T .

De la propia definición se deduce la forma de calcularla:

$$\Gamma = \{F \subset \mathcal{A} \mid F \text{ subespacio afín de } \mathcal{A} \wedge (S \cup T) \subset F\}$$

$$\bigcap_{F \in \Gamma} F = S \vee T$$

Además, $S \vee T$ es un espacio afín ya que es una intersección no vacía, ya que $(S \cup T) \subset (S \vee T)$.

Proposición 1.4. *Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos S, T subespacios afines dados por $S = p + \overrightarrow{S}$, $T = q + \overrightarrow{T}$. Tenemos que*

$$S \vee T = p + \left[\mathcal{L}(\overrightarrow{pq}) + \overrightarrow{S} + \overrightarrow{T} \right]$$

Demostración. Definimos previamente $X := p + \left[\mathcal{L}(\overrightarrow{pq}) + \overrightarrow{S} + \overrightarrow{T} \right] = p + \overrightarrow{X}$. Veamos que $S \vee T = X$.

⊂) Como $\overrightarrow{S} \subset \mathcal{L}(\overrightarrow{pq}) + \overrightarrow{S} + \overrightarrow{T} = \overrightarrow{X}$ y $p \in S$ (y por tanto en X), tenemos que:

$$S = p + \overrightarrow{S} \subset p + \overrightarrow{X} = X$$

Como $\overrightarrow{T} \subset \mathcal{L}(\overrightarrow{pq}) + \overrightarrow{S} + \overrightarrow{T} = \overrightarrow{X}$ y $q \in T$ (y por tanto en X), tenemos que:

$$T = q + \overrightarrow{T} \subset q + \overrightarrow{X} = p + \overrightarrow{X} = X$$

Como $S, T \subset X$, entonces $S \vee T \subset X$.

⊃) Veamos que $\overrightarrow{X} \subset \overrightarrow{S \vee T}$.

Como $S, T \subset S \vee T$, entonces $\overrightarrow{S}, \overrightarrow{T} \subset \overrightarrow{S \vee T}$, por lo que $\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T} \subset \overrightarrow{S \vee T}$.

Además, como $p, q \in S \cup T \subset S \vee T$, tenemos que $\overrightarrow{pq} \in \overrightarrow{S \vee T}$, por lo que $\mathcal{L}\{\overrightarrow{pq}\} \subset \overrightarrow{S \vee T}$.

Por tanto, $\overrightarrow{X} \subset \overrightarrow{S \vee T}$. Además, como $p \in S$, tenemos que $p \in S \vee T$. Por tanto, se tiene que $X \subset S \vee T$.

□

Notación. Sea \mathcal{A} un espacio afín, y consideramos $q_0, \dots, q_k \in \mathcal{A}$. Definimos el subespacio afín generado por los puntos $\{q_i\}$ como:

$$\bigvee_{i=0}^k \{q_i\} = \langle q_0, \dots, q_k \rangle$$

Proposición 1.5. Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos S, T subespacios afines dados por $S = p + \overrightarrow{S}$, $T = q + \overrightarrow{T}$. Tenemos que

$$S \cap T \neq \emptyset \iff \overrightarrow{pq} \in (\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T})$$

Demostración.

\implies) Sea $p_0 \in S \cap T$. Entonces, $\overrightarrow{p_0 p} \in \overrightarrow{S}$ y $\overrightarrow{p_0 q} \in \overrightarrow{T}$. Por tanto,

$$\overrightarrow{pq} = \overrightarrow{p_0 p} + \overrightarrow{p_0 q} \in (\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T})$$

\impliedby) Como $\overrightarrow{pq} \in (\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T})$, considerando $u \in \overrightarrow{S}$ y $v \in \overrightarrow{T}$ tenemos que $\overrightarrow{pq} = u + v$. Entonces, $q = p + \overrightarrow{pq} = p + u + v$. Entonces, $q - v \in T$ y $p + u \in S$, por lo que $q - v = p + u \in S \cap T$.

□

Corolario 1.5.1. Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos S, T subespacios afines. Se tiene que

$$\overrightarrow{S \vee T} = \overrightarrow{S} + \overrightarrow{T} \iff S \cap T \neq \emptyset$$

Teorema 1.6 (Dimensiones). Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos S, T subespacios afines de \mathcal{A} de dimensión finita. Entonces, tenemos que:

- Si $S \cap T \neq \emptyset$, entonces,

$$\dim(S \vee T) + \dim(S \cap T) = \dim S + \dim T$$

- Si $S \cap T = \emptyset$, entonces,

$$\dim(S \vee T) + \dim(\overrightarrow{S} \cap \overrightarrow{T}) = \dim S + \dim T + 1$$

Demostración. Distinguimos para cada caso:

- Si $S \cap T \neq \emptyset$, entonces como $S \cap T \neq \emptyset$, tenemos que es un subespacio afín. Además,

$$\begin{aligned} \dim(S \cap T) &= \dim(\overrightarrow{S \cap T}) = \dim(\overrightarrow{S} \cap \overrightarrow{T}) = \dim \overrightarrow{S} + \dim \overrightarrow{T} - \dim(\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T}) \\ &= \dim S + \dim T - \dim(\overrightarrow{S \vee T}) = \dim S + \dim T - \dim(S \vee T) \end{aligned}$$

- Si $S \cap T = \emptyset$, entonces por la definición de $S \vee T$, tenemos que:

$$\begin{aligned} \dim(S \vee T) &= \dim(\overrightarrow{S \vee T}) = \dim(\mathcal{L}(\overrightarrow{pq}) + \overrightarrow{S} + \overrightarrow{T}) = \\ &= 1 + \dim(\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T}) - \dim[\mathcal{L}(\overrightarrow{pq}) \cap (\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T})] \\ &= 1 + \dim \overrightarrow{S} + \dim \overrightarrow{T} - \dim(\overrightarrow{S} \cap \overrightarrow{T}) \\ &= 1 + \dim S + \dim T - \dim(\overrightarrow{S} \cap \overrightarrow{T}) \end{aligned}$$

donde hemos aplicado que $\mathcal{L}(\overrightarrow{pq}) \cap (\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T}) = \{0\}$ por la Proposición 1.5.

□

Definición 1.7. Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos S, T subespacios afines. Decimos que S y T son secantes si tienen intersección no nula:

$$S \text{ y } T \text{ son secantes} \iff S \cap T \neq \emptyset$$

Definición 1.8 (Paralelismo). Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos S, T subespacios afines. Decimos que

$$S \text{ es paralelo a } T \iff \overrightarrow{S} \subset \overrightarrow{T}$$

Por doble inclusión, diremos que son S y T son paralelos, notado como $S \parallel T$, si y solo si $\overrightarrow{S} = \overrightarrow{T}$:

$$S \parallel T \iff \overrightarrow{S} = \overrightarrow{T}$$

Notemos que si S paralelo a T y son secantes ($S \cap T \neq \emptyset$), entonces $S \subset T$. Además, supuesto $S \cap T \neq \emptyset$, se tiene que $S \parallel T \iff S = T$.

Definición 1.9. Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos S, T subespacios afines. Decimos que S y T se cruzan si se dan a la vez las siguientes condiciones:

1. S no es paralelo a T ,
2. T no es paralelo a S ,
3. No son secantes ($S \cap T = \emptyset$).

Definición 1.10. Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos S, T subespacios afines. Decimos que S y T son complementarios si y solo si

$$\overrightarrow{\mathcal{A}} = \overrightarrow{S} \oplus \overrightarrow{T}$$

Proposición 1.7. Sea \mathcal{A} espacio afín. Consideramos S, T subespacios afines dados por $S = p + \vec{S}$, $T = q + \vec{T}$. Si S y T son complementarios, entonces:

$$S \vee T = \mathcal{A} \quad \wedge \quad S \cap T = \{p\}, \quad p \in \mathcal{A}$$

Demostración. Calculamos en primer lugar la variedad de direcciones de la suma afín:

$$\overrightarrow{S \vee T} = \mathcal{L}(\overrightarrow{pq}) + \vec{S} + \vec{T} = \mathcal{L}(\overrightarrow{pq}) + \vec{\mathcal{A}} = \vec{\mathcal{A}}$$

Por tanto, $S \vee T = p + \vec{\mathcal{A}} = \mathcal{A}$. Veamos ahora el valor de la intersección.

Como $\vec{\mathcal{A}} = \vec{S} + \vec{T}$, la Proposición 1.5 nos asegura que $S \cap T \neq \emptyset$. Por la fórmula de dimensiones, tenemos que:

$$\begin{aligned} \dim(S \cap T) &= \dim S + \dim T - \dim(S \vee T) = \dim S + \dim T - \dim \mathcal{A} = \\ &= \dim \vec{S} + \dim \vec{T} - \dim \vec{\mathcal{A}} = \dim \vec{S} + \dim \vec{T} - \dim(\vec{S} + \vec{T}) = \\ &= \dim \vec{S} + \dim \vec{T} - \dim \vec{S} - \dim \vec{T} + \dim(\vec{S} \cap \vec{T}) = 0 \end{aligned}$$

donde he aplicado que $\dim(\vec{S} \cap \vec{T}) = 0$ por ser $\vec{\mathcal{A}} = \vec{S} \oplus \vec{T}$. Por tanto, como $\dim(S \cap T) = 0$, tenemos que la intersección es un punto. \square

1.2. Sistemas de referencias afines

Definición 1.11. Sea \mathcal{A} espacio afín, y consideramos $k \in \mathbb{N}$. Diremos que los puntos $\{p_0, \dots, p_k\}$, con $p_i \in \mathcal{A}$, son afínmente independientes si y solo si $p_0 \vee p_1 \vee \dots \vee p_k$ es un subespacio afín de dimensión k .

Proposición 1.8. Sea \mathcal{A} espacio afín, y consideramos $k \in \mathbb{N}$. Los puntos $\{p_0, \dots, p_k\}$, con $p_i \in \mathcal{A}$, son afínmente independientes si y solo si se tiene que el conjunto $\{\overrightarrow{p_0 p_1}, \dots, \overrightarrow{p_0 p_k}\}$ es linealmente independiente.

Notemos que no es relevante el orden para ser considerados afínmente independientes.

Definición 1.12. Sea \mathcal{A} espacio afín. Si $\mathcal{R} = \{p_0, \dots, p_n\}$ es un conjunto de puntos afínmente independientes, diremos que \mathcal{R} es un sistema de referencia afín.

Por la Proposición 1.8, dar un sistema de referencia afín es equivalente a dar un punto p_0 y una base $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$ de $\vec{\mathcal{A}}$, de forma que

$$\mathcal{R} = \{p_0, p_0 + v_1, p_0 + v_2, \dots, p_0 + v_n\} = \{p_0, \mathcal{B}_{\mathcal{R}} = \{v_1, \dots, v_n\}\}$$

Diremos que p_0 es el origen del sistema de referencia, y $\mathcal{B}_{\mathcal{R}}$ es la base asociada al sistema de referencia.

Fijado $\mathcal{R} = \{p_0, p_1, \dots, p_n\}$, tenemos que existe una biyección

$$\begin{aligned} f_{\mathcal{R}} : \mathcal{A} &\longrightarrow \mathbb{R}^n \\ q &\longmapsto q_{\mathcal{R}} = (x_1, \dots, x_n) \end{aligned}$$

tal que $\overrightarrow{p_0 q} = x_1 v_1 + \dots + x_n v_n = x_1 \overrightarrow{p_0 p_1} + \dots + x_n \overrightarrow{p_0 p_n}$. Equivalentemente, esto será si y solo si $q = p_0 + x_1 v_1 + \dots + x_n v_n$.

Diremos que (x_1, \dots, x_n) son las coordenadas de q en \mathcal{R} , y lo notaremos de la forma $p_{\mathcal{R}} = (x_1, \dots, x_n)$.

Definición 1.13. Sea \mathbb{R}^n . Notamos como sistema de referencia usual de \mathbb{R}^n a:

$$\mathcal{R}_0 = \{(0, \dots, 0), \mathcal{B}_u\}$$

donde \mathcal{B}_u denota la base usual.

Tenemos que, dado $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n$, tenemos que:

$$\overrightarrow{0x} = x = (x_1, \dots, x_n) = x_1 e_1 + \dots x_n e_n$$

por tanto, las componentes de un punto de \mathbb{R}^n coinciden con sus coordenadas en el sistema de referencia usual.

Lema 1.9. Sea \mathcal{R} un sistema de referencia en un espacio afín \mathcal{A} , con base asociada \mathcal{B} . Entonces,

1. $(p + v)_{\mathcal{R}} = p_{\mathcal{R}} + v_{\mathcal{B}}, \quad \forall p \in \mathcal{A}, v \in \overrightarrow{\mathcal{A}}.$
2. $(\overrightarrow{pq})_{\mathcal{B}} = q_{\mathcal{R}} - p_{\mathcal{R}}, \quad \forall p, q \in \mathcal{A}.$

Demostración. Sea $\mathcal{B} = \{v_1, \dots, v_n\}$ base asociada a \mathcal{R} , y tomamos a_0 como el origen del sistema.

1. Por definición de coordenadas en un sistema de referencia, se tiene que:

$$\begin{aligned} p_{\mathcal{R}} = (x_1, \dots, x_n) &\iff p = a_0 + x_1 v_1 + \dots + x_n v_n \\ (p + v)_{\mathcal{R}} = (z_1, \dots, z_n) &\iff p + v = a_0 + z_1 v_1 + \dots + z_n v_n \end{aligned}$$

Por definición de las coordenadas en un espacio vectorial, tenemos que:

$$v_{\mathcal{B}} = (y_1, \dots, y_n) \iff v = y_1 v_1 + \dots + y_n v_n$$

Por la igualdad triangular, tenemos que:

$$\overrightarrow{a_0(p+v)} = \overrightarrow{a_0 p} + \overrightarrow{p(p+v)} = \overrightarrow{a_0 p} + (p+v) - p = \overrightarrow{a_0 p} + v$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{a_0(p+v)} &= \overrightarrow{a_0(a_0 + z_1 v_1 + \dots + z_n v_n)} = z_1 v_1 + \dots + z_n v_n \\ \overrightarrow{a_0 p} + v &= \overrightarrow{a_0(a_0 + x_1 v_1 + \dots + x_n v_n)} + (y_1 v_1 + \dots + y_n v_n) = \\ &= (x_1 v_1 + \dots + x_n v_n) + (y_1 v_1 + \dots + y_n v_n) = \\ &= (x_1 + y_1) v_1 + \dots + (x_n + y_n) v_n \end{aligned}$$

Como $\overrightarrow{a_0(p+v)} = \overrightarrow{a_0 p} + v$, por la unicidad de coordenadas de un vector en la misma base, tenemos que ambos resultados son iguales. Por tanto, sumando el origen,

$$a_0 + z_1 v_1 + \dots + z_n v_n = a_0 + (x_1 + y_1) v_1 + \dots + (x_n + y_n) v_n \implies (p+v)_{\mathcal{R}} = p_{\mathcal{R}} + v_{\mathcal{B}}$$

2. Por definición de coordenadas en un sistema de referencia, se tiene que:

$$\begin{aligned} p_{\mathcal{R}} &= (x_1, \dots, x_n) \iff p = a_0 + x_1 v_1 + \dots + x_n v_n \\ q_{\mathcal{R}} &= (y_1, \dots, y_n) \iff q = a_0 + y_1 v_1 + \dots + y_n v_n \end{aligned}$$

Por definición de las coordenadas en un espacio vectorial, tenemos que:

$$(\vec{pq})_{\mathcal{B}} = (z_1, \dots, z_n) \iff \vec{pq} = z_1 v_1 + \dots + z_n v_n$$

Por la igualdad triangular, tenemos que:

$$q - p = \vec{pq} = \vec{pa_0} + \vec{a_0q}$$

Entonces:

$$\begin{aligned} \vec{pq} &= z_1 v_1 + \dots + z_n v_n \\ \vec{pa_0} + \vec{a_0q} &= \overrightarrow{(a_0 + x_1 v_1 + \dots + x_n v_n) a_0} + \overrightarrow{a_0 (a_0 + y_1 v_1 + \dots + y_n v_n)} = \\ &= -(x_1 v_1 + \dots + x_n v_n) + (y_1 v_1 + \dots + y_n v_n) = \\ &= (y_1 - x_1) v_1 + \dots + (y_n - x_n) v_n \end{aligned}$$

Como $\vec{pq} = \vec{pa_0} + \vec{a_0q}$, por la unicidad de coordenadas de un vector en la misma base, tenemos que ambos resultados son iguales. Por tanto,

$$z_1 v_1 + \dots + z_n v_n = (a_0 - a_0) + (y_1 - x_1) v_1 + \dots + (y_n - x_n) v_n \implies (\vec{pq})_{\mathcal{B}} = q_{\mathcal{R}} - p_{\mathcal{R}}$$

□

Veamos ahora cómo calcular las ecuaciones de un subespacio afín en un sistema de referencia dado.

Sea \mathcal{A}^n un espacio afín, y sea S un subespacio afín de \mathcal{A} , con $\mathcal{B}_{\vec{S}} = \{w_1, \dots, w_k\}$ base de \vec{S} , y elegimos $p_0 \in S$. Consideramos también \mathcal{R} un sistema de referencia de \mathcal{A} . Tenemos que cualquier punto $p \in S$ es de la forma:

$$\begin{aligned} p &= p_0 + \lambda_1 w_1 + \dots + \lambda_k w_k \\ p_{\mathcal{R}} &= p_{0\mathcal{R}} + \lambda_1 w_{1\mathcal{B}_{\mathcal{R}}} + \dots + \lambda_k w_{k\mathcal{B}_{\mathcal{R}}} \end{aligned}$$

Consideramos las coordenadas de $p_{0\mathcal{R}} = (c_1, \dots, c_n)$ y los vectores de $\mathcal{B}_{\vec{S}}$ en la base $\mathcal{B}_{\mathcal{R}}$ como $(w_i)_{\mathcal{B}_{\mathcal{R}}} = (d_{1i}, \dots, d_{ni})$ para $i = 1, \dots, k$.

Entonces, si escribo las coordenadas de $p_{\mathcal{R}}$ como $p_{\mathcal{R}} = (x_1, \dots, x_n)$, se obtienen las llamadas Ecuaciones paramétricas de S en el sistema de referencia \mathcal{R} :

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{pmatrix} + \lambda_1 \begin{pmatrix} d_{11} \\ \vdots \\ d_{n1} \end{pmatrix} + \dots + \lambda_k \begin{pmatrix} d_{1k} \\ \vdots \\ d_{nk} \end{pmatrix}$$

Despejando los parámetros y sustituyendo en el resto de ecuaciones, obtenemos las ecuaciones implícitas (o cartesianas) de S en \mathcal{R} :

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n = r_1 \\ \vdots \\ a_{(n-k)1}x_1 + \dots + a_{(n-k)n}x_n = r_{n-k} \end{cases}$$

Es importante notar que habrá $n - k$ ecuaciones.

Ejemplo. Sea \mathcal{R} un sistema de referencia en \mathbb{R}^2 con origen en $a_0 = (1, 0)$ y base $\mathcal{B} = \{(1, 1), (-2, 2)\}$.

Calculamos las ecuaciones de la recta afín que pasa por el punto $(1, 1)$ y tiene vector director el $(1, 0)$.

Si $p \in S$ es un punto arbitrario de la recta, sean sus coordenadas $p_{\mathcal{R}} = (x, y)$. Entonces $p = (1, 1) + \lambda(1, 0)$, por lo que:

$$p_{\mathcal{R}} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}_{\mathcal{R}} + \lambda \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}_{\mathcal{B}}$$

Calculamos las coordenadas que me faltan. Sea $(1, 1)_{\mathcal{R}} = (c_1, c_2)$. Entonces:

$$(1, 1) = (1, 0) + c_1(1, 1) + c_2(-2, 2) \implies \begin{cases} 0 = c_1 - 2c_2 \implies c_1 = \frac{1}{2} \\ 1 = c_1 + 2c_2 \implies c_2 = \frac{1}{4} \end{cases}$$

Entonces, $(1, 1)_{\mathcal{R}} = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{4}\right)$. Sea $(1, 0)_{\mathcal{B}} = (d_{11}, d_{12})$. Entonces:

$$(1, 0) = d_{11}(1, 1) + d_{12}(-2, 2) \implies \begin{cases} 1 = d_{11} - 2d_{12} \implies d_{12} = -\frac{1}{4} \\ 0 = d_{11} + 2d_{12} \implies d_{11} = \frac{1}{2} \end{cases}$$

Entonces, $(1, 0)_{\mathcal{B}} = \left(-\frac{1}{4}, \frac{1}{2}\right)$, por lo que sus ecuaciones paramétricas son:

$$p_{\mathcal{R}} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/2 \\ 1/4 \end{pmatrix} + \lambda \begin{pmatrix} -1/4 \\ 1/2 \end{pmatrix}$$

Para obtener las ecuaciones cartesianas, tenemos que:

$$\begin{aligned} x &= \frac{1}{2} - \lambda \cdot \frac{1}{4} \implies \lambda = -4x + 2 \\ y &= \frac{1}{4} + \lambda \cdot \frac{1}{2} \implies \lambda = 2y - \frac{1}{2} \end{aligned}$$

Igualando los valores de λ , obtenemos la ecuación implícita:

$$-4x + 2 = 2y - \frac{1}{2} \implies 2y + 4x = \frac{5}{2}$$

1.2.1. Cambio de sistema de referencia

Consideramos dos sistemas de referencia, $\mathcal{R} = \{a_0, \mathcal{B}\}$ y $\mathcal{R}' = \{a'_0, \mathcal{B}'\}$ en un espacio afín \mathcal{A}^n . Entonces, si $p \in \mathcal{A}$, podemos considerar

$$\begin{cases} p_{\mathcal{R}} &= (x_1, \dots, x_n) \\ p_{\mathcal{R}'} &= (y_1, \dots, y_n) \end{cases}$$

Si $p = a_0 + \overrightarrow{a_0 p}$, tenemos que $p_{\mathcal{R}'} = a_{0\mathcal{R}'} + (\overrightarrow{a_0 p})_{\mathcal{B}'}$.

Sea la matriz de cambio de base de \mathcal{B} a \mathcal{B}' la siguiente:

$$A = M(\mathcal{B}, \mathcal{B}') = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Entonces, si llamamos $a_{0\mathcal{R}'} = (b_1, \dots, b_n)$, entonces,

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Equivalentemente, podemos expresarlo como:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ b_1 & a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_n & a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

1.3. Aplicaciones afines

Definición 1.14. Sean $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ dos espacios afines. Diremos que $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ es una aplicación afín si $\exists a \in \mathcal{A}$ tal que

$$\begin{aligned} \vec{f}_a : \vec{\mathcal{A}} &\longrightarrow \vec{\mathcal{A}'} \\ \overrightarrow{a q} &\longmapsto \overrightarrow{f(a) f(q)} \end{aligned}$$

es una aplicación lineal.

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{A} & \xrightarrow{f} & \mathcal{A}' \\ \varphi_a \downarrow & & \downarrow \varphi_{f(a)} \\ \vec{\mathcal{A}} & \xrightarrow{\vec{f}} & \vec{\mathcal{A}'} \end{array}$$

Figura 1.1: Diagrama conmutativo de una aplicación lineal.

Veamos que la aplicación lineal asociada a una aplicación afín no depende del punto $a \in \mathcal{A}$ dado:

Lema 1.10. Sean $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ dos espacios afines, y sea $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ una aplicación afín. Entonces:

$$\vec{f}_a = \vec{f}_b \quad \forall b \in \mathcal{A}$$

Demostración. Supongamos que $\exists a \in \mathcal{A}$ tal que

$$\begin{aligned} \vec{f}_a : \vec{\mathcal{A}} &\longrightarrow \vec{\mathcal{A}'} \\ \vec{a}\vec{q} &\longmapsto \overrightarrow{f(a)f(q)} \end{aligned}$$

es una aplicación lineal. Entonces, $\forall b \in \mathcal{A}$,

$$\vec{f}_b(\vec{bx}) = \overrightarrow{f(b)f(x)} = \overrightarrow{f(b)f(a)} + \overrightarrow{f(a)f(x)} = -\vec{f}_a(\vec{ab}) + \vec{f}_a(\vec{ax}) = \vec{f}_a(\vec{ax} - \vec{ab}) = \vec{f}_a(\vec{bx})$$

□

Como el resultado anterior es cierto para todo $b \in \mathcal{A}$, tenemos que $\vec{f} = \vec{f}_a = \vec{f}_b$. Notamos entonces \vec{f} como la aplicación lineal asociada a f .

Corolario 1.10.1. Sean $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ dos espacios afines, y sea $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ una aplicación afín. Entonces, se tienen:

$$\begin{cases} \vec{f}(\vec{xy}) &= \overrightarrow{f(x)f(y)} \\ f(p+v) &= f(p) + \vec{f}(v) \end{cases}$$

Ejemplo. Algunos ejemplos de aplicaciones afines son:

1. $Id_{\mathcal{A}}$, con aplicación lineal asociada $Id_{\vec{\mathcal{A}}}$
2. Sea S un subespacio afín de \mathcal{A} . Entonces, $i_S : S \rightarrow \mathcal{A}$ aplicación inclusión es afín, con $\vec{i}_S = i_{\vec{S}}$, monomorfismo inclusión.
3. Las aplicaciones constantes $f_q : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$, donde $f_q(p) = q$ para todo $p \in \mathcal{A}$. Tenemos que $\vec{f}_q = 0$ aplicación lineal nula (constante en 0). Esto se ve debido a que:

$$\vec{f}(\vec{p_1p_2}) = \overrightarrow{f(p_1)f(p_2)} = \vec{qq} = \vec{0}$$

4. Sean V, V' son espacios vectoriales (que por consiguiente también tienen estructura de espacio afín). Si $f : V \rightarrow V'$ es una aplicación lineal, entonces es afín con $\vec{f} = f$.

5. φ_p es una aplicación afín, con $\vec{\varphi}_p = Id_{\vec{\mathcal{A}}}$. Veámoslo:

$$\vec{\varphi}_p(\vec{pq}) = \overrightarrow{\varphi_p(p)\varphi_p(q)} = \overrightarrow{\vec{0}p\vec{q}} = \vec{pq} - \vec{0} = \vec{pq} = Id_{\vec{\mathcal{A}}}(\vec{pq})$$

6. Fijado $v_0 \in \vec{\mathcal{A}}$, tenemos que la traslación t_{v_0} es una aplicación afín.

Su aplicación lineal asociada es la identidad en $\vec{\mathcal{A}}$, ya que:

$$\vec{t}_{v_0}(\vec{pq}) = \overrightarrow{(p+v_0)(q+v_0)} = \vec{pq} = Id_{\vec{\mathcal{A}}}(\vec{pq})$$

Teorema 1.11. Sean $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ dos espacios afines, y consideramos $f, g : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ aplicaciones afines. Entonces:

$$f = g \iff \vec{f} = \vec{g} \quad \wedge \quad \exists a \in \mathcal{A} \mid f(a) = g(a)$$

Demostración.

\implies) Trivialmente por ser $f = g$.

\impliedby) Sea $a \in \mathcal{A}$ el punto en el que $f(a) = g(a)$. Consideramos el punto $q \in \mathcal{A}$ tal que $q = a + \vec{a}\vec{q}$. Entonces:

$$f(q) = f(a) + \vec{f}(\vec{a}\vec{q}) = g(a) + \vec{g}(\vec{a}\vec{q}) = g(q)$$

□

Respecto a la figura 1.1, se puede ampliar con las aplicaciones inversas de φ , ya que por definición esta es biyectiva.

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{A} & \xrightarrow{f} & \mathcal{A}' \\ \uparrow (\varphi_a)^{-1} & & \uparrow (\varphi_{f(a)})^{-1} \\ \varphi_a \downarrow & & \varphi_{f(a)} \downarrow \\ \vec{\mathcal{A}} & \xrightarrow{\vec{f}} & \vec{\mathcal{A}}' \end{array}$$

Figura 1.2: Diagrama conmutativo de una aplicación lineal con inversas.

Tenemos por tanto el siguiente resultado, directo de la definición de aplicación afín:

Proposición 1.12. Sean $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ dos espacios afines, y consideramos $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ aplicación afín. Entonces:

$$f \text{ inyectiva (sobreyectiva, biyectiva)} \iff \vec{f} \text{ inyectiva (sobreyectiva, biyectiva)}.$$

Demostración. En la figura 1.2 vemos claro que $f = (\varphi_{f(a)})^{-1} \circ \vec{f} \circ \varphi_a$, con ambas $\varphi_a, (\varphi_{f(a)})^{-1}$ biyectivas. Entonces, tenemos directamente el resultado. □

Entonces, tenemos el siguiente corolario:

Proposición 1.13. Sean $\mathcal{A}, \mathcal{A}', \mathcal{A}''$ tres espacios afines, y consideramos las aplicaciones afines $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}', g : \mathcal{A}' \rightarrow \mathcal{A}''$.

Entonces, $g \circ f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}''$ es una aplicación afín con $\overrightarrow{g \circ f} = \vec{g} \circ \vec{f}$.

$$\begin{array}{ccccc} \mathcal{A} & \xrightarrow{f} & \mathcal{A}' & \xrightarrow{g} & \mathcal{A}'' \\ \downarrow \varphi_a & & \downarrow \varphi_{f(a)} & & \downarrow \varphi_{(g \circ f)(a)} \\ \vec{\mathcal{A}} & \xrightarrow{\vec{f}} & \vec{\mathcal{A}}' & \xrightarrow{\vec{g}} & \vec{\mathcal{A}}'' \end{array}$$

Figura 1.3: Diagrama conmutativo de la composición de aplicaciones lineales.

Corolario 1.13.1. Sean $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ espacios afines, y consideramos S subespacio afín de \mathcal{A} . Sea $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ aplicación afín.

Entonces, $f(S)$ es un subespacio afín de \mathcal{A}' , con $\overrightarrow{f(S)} = \overrightarrow{f}(\overrightarrow{S})$.

Demostración. Esto se debe a que $f(S) = f|_S = f \circ i_S$, con ambas aplicaciones afines. Entonces, como la composición de aplicaciones afines es afín, tenemos que

$$\overrightarrow{f(S)} = \overrightarrow{f \circ i_S} = \overrightarrow{f} \circ \overrightarrow{i_S} = \overrightarrow{f} \circ i_{\overrightarrow{S}} = \overrightarrow{f}|_{\overrightarrow{S}} = \overrightarrow{f}(\overrightarrow{S})$$

□

Corolario 1.13.2. Sean $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ espacios afines, y consideramos S' subespacio afín de \mathcal{A}' . Sea $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ aplicación afín.

Si $f^{-1}(S') \neq \emptyset$, entonces, $f^{-1}(S')$ es un subespacio afín de \mathcal{A} , con

$$\overrightarrow{f^{-1}(S')} = \overrightarrow{f}^{-1}(\overrightarrow{S'})$$

1.3.1. Determinación de una aplicación afín

Veamos en primer lugar que una aplicación afín la podemos definir mediante las imágenes de los puntos que forman un sistema de referencia:

Teorema 1.14 (Fundamental de la Geometría Afín). Sean $\mathcal{A}^n, \mathcal{A}'$ espacios afines. Dado $\mathcal{R} = \{p_0, \dots, p_n\}$ sistema de referencia en \mathcal{A} y $\{q_0, \dots, q_n\}$ puntos de \mathcal{A}' , tenemos que $\exists_1 f$ aplicación afín tal que:

$$\begin{aligned} f : \mathcal{A} &\longrightarrow \mathcal{A}' \\ p_i &\longmapsto q_i \quad \forall i = 0, \dots, n \end{aligned}$$

Demostración. Como $\mathcal{B} = \{\overrightarrow{p_0 p_1}, \dots, \overrightarrow{p_0 p_n}\}$ es una base de $\overrightarrow{\mathcal{A}}$, y sabemos que una aplicación lineal viene determinada por las imágenes de los elementos de la base, tenemos que:

$$\begin{aligned} \exists_1 \overrightarrow{f} : \overrightarrow{\mathcal{A}} &\longrightarrow \overrightarrow{\mathcal{A}'} \\ \overrightarrow{p_0 p_i} &\longmapsto \overrightarrow{q_0 q_i} \quad \forall i = 0, \dots, n \end{aligned}$$

Definimos la aplicación f tal que $f(p) = q_0 + \overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0 p})$. Veamos que cumple la condición pedida:

- Para $i = 0$, tenemos que $f(p_0) = q_0 + \overrightarrow{f}(\overrightarrow{0}) = q_0 + \overrightarrow{0}' = q_0$.
- Para $i = 1, \dots, n$, tenemos que $f(p_i) = q_0 + \overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0 p_i}) = q_0 + \overrightarrow{q_0 q_i} = q_i$.

Veamos ahora que f es afín, con aplicación lineal asociada \overrightarrow{f} . Como \overrightarrow{f} es una aplicación lineal, tan solo falta demostrar que $\overrightarrow{f}(\overrightarrow{pq}) = \overrightarrow{f(p)f(q)}$

$$\overrightarrow{f(p)f(q)} = f(q) - f(p) = q_0 + \overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0 q}) - q_0 - \overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0 p}) \stackrel{(*)}{=} \overrightarrow{f}(\overrightarrow{p_0 q} - \overrightarrow{p_0 p}) = \overrightarrow{f}(\overrightarrow{pq})$$

donde en $(*)$ he aplicado que \overrightarrow{f} es una aplicación lineal. Por tanto, la existencia está demostrada.

Demostremos ahora la unicidad. Sea $g : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ otra aplicación afín que cumple la misma condición. Entonces, comprobemos que las imágenes de \vec{f} y \vec{g} coinciden para los elementos de la base \mathcal{B} :

$$\vec{g}(\overrightarrow{p_0 p_i}) = \overrightarrow{g(p_0)g(p_i)} = \overrightarrow{q_0 q_i} = \vec{f}(\overrightarrow{p_0 p_i}) \quad \forall i = 1, \dots, n$$

Por tanto, como coinciden las imágenes para los elementos de la base, tenemos que $\vec{g} = \vec{f}$. Además, $\forall i = 0, \dots, n$ se tiene que $f(p_i) = q_i = g(p_i)$. Entonces, por el teorema 1.11, tenemos que $f = g$, y queda demostrada la unicidad. \square

Veamos ahora cómo podemos expresar una aplicación afín en función de los sistemas de referencia. Sean $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ dos espacios afines con sistemas de referencia dados por $\mathcal{R} = \{p_0, \dots, p_n\} = \{p_0, \mathcal{B}\}$, $\mathcal{R}' = \{q_0, \dots, q_m\} = \{q_0, \mathcal{B}'\}$ respectivamente. Entonces, dado $q = p_0 + \overrightarrow{p_0 q} \in \mathcal{A}$, se tiene que $f(q) = f(p_0) + \vec{f}(\overrightarrow{p_0 q})$. Entonces, en los sistemas de referencia, tenemos:

$$f(q)_{\mathcal{R}'} = f(p_0)_{\mathcal{R}'} + \vec{f}(\overrightarrow{p_0 q})_{\mathcal{B}'} = f(p_0)_{\mathcal{R}'} + M(\vec{f}, \mathcal{B}, \mathcal{B}')(\overrightarrow{p_0 q})_{\mathcal{B}} = f(p_0)_{\mathcal{R}'} + M(\vec{f}, \mathcal{B}, \mathcal{B}') q_{\mathcal{R}}$$

Matricialmente, se tendría que:

$$\left(\frac{1}{f(q)_{\mathcal{R}'}} \right) = \left(\frac{1}{f(p_0)_{\mathcal{R}'}} \mid M(\vec{f}, \mathcal{B}, \mathcal{B}') \right) \left(\frac{1}{q_{\mathcal{R}}} \right)$$

Sean $f(q)_{\mathcal{R}'} = (y_1, \dots, y_m)$, $f(p_0)_{\mathcal{R}'} = (b_1, \dots, b_m)$, $q_{\mathcal{R}} = (x_1, \dots, x_n)$ y, por último, sean $\vec{f}(v_i)_{\mathcal{B}'} = \vec{f}(\overrightarrow{q_0 q_i})_{\mathcal{B}'} = (a_{1i}, \dots, a_{mi})$. Entonces, tenemos que la ecuación anterior se expresa matricialmente como:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Equivalentemente, podemos expresarlo como:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ b_1 & a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_m & a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

Notamos $M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}')$ a dicha matriz:

$$M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ b_1 & a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_m & a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

Con esa notación, tenemos el siguiente resultado:

Teorema 1.15. Sean $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ y $g : \mathcal{A}' \rightarrow \mathcal{A}''$ dos aplicaciones afines, y sean $\mathcal{R}, \mathcal{R}', \mathcal{R}''$ tres sistemas de referencia en $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ y \mathcal{A}'' , respectivamente. Se tiene que:

$$M(g \circ f, \mathcal{R}, \mathcal{R}'') = M(g, \mathcal{R}', \mathcal{R}'') \cdot M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}')$$

Demostración. Sean las matrices implicadas en el teorema las siguientes:

$$M(g, \mathcal{R}', \mathcal{R}'') = \left(\frac{1}{g(p_0)_{\mathcal{R}''}} \middle| \frac{0}{M(\vec{g}, \mathcal{B}', \mathcal{B}'')} \right) \quad M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}') = \left(\frac{1}{f(p_0)_{\mathcal{R}'}} \middle| \frac{0}{M(\vec{f}, \mathcal{B}, \mathcal{B}')} \right)$$

Entonces:

$$\begin{aligned} M(g, \mathcal{R}', \mathcal{R}'') \cdot M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}') &= \\ &= \left(\frac{1}{g(p'_0)_{\mathcal{R}''} + M(\vec{g}, \mathcal{B}', \mathcal{B}'')f(p_0)_{\mathcal{R}'}} \middle| \frac{0}{M(\vec{g}, \mathcal{B}', \mathcal{B}'') \cdot M(\vec{f}, \mathcal{B}, \mathcal{B}')} \right) = \\ &= \left(\frac{1}{g(p'_0)_{\mathcal{R}''} + M(\vec{g}, \mathcal{B}', \mathcal{B}'')f(p_0)_{\mathcal{R}'}} \middle| \frac{0}{M(\vec{g} \circ \vec{f}, \mathcal{B}, \mathcal{B}'')} \right) \end{aligned}$$

Veamos la caja inferior izquierda, que es la que difiere de la matriz buscada:

$$\begin{aligned} g(p'_0)_{\mathcal{R}''} + M(\vec{g}, \mathcal{B}', \mathcal{B}'')f(p_0)_{\mathcal{R}'} &= g(p'_0)_{\mathcal{R}''} + M(\vec{g}, \mathcal{B}', \mathcal{B}'')\overrightarrow{p'_0 f(p_0)}_{\mathcal{B}'} = \\ &= g(p'_0)_{\mathcal{R}''} + \overrightarrow{(g(p'_0)g(f(p_0)))}_{\mathcal{B}''} = \overrightarrow{g(p'_0)}_{\mathcal{R}''} + (g \circ f)(p_0)_{\mathcal{R}''} - \overrightarrow{g(p'_0)}_{\mathcal{R}''} = (g \circ f)(p_0)_{\mathcal{R}''} \end{aligned}$$

Por tanto:

$$M(g, \mathcal{R}', \mathcal{R}'') \cdot M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}') = \left(\frac{1}{(g \circ f)(p_0)_{\mathcal{R}''}} \middle| \frac{0}{M(\vec{g} \circ \vec{f}, \mathcal{B}, \mathcal{B}'')} \right) := M(g \circ f, \mathcal{R}, \mathcal{R}'')$$

Por tanto, se tiene lo pedido. \square

Lema 1.16. Sea \mathcal{A}^n un espacio afín, y consideramos la identidad en \mathcal{A} . Sea también \mathcal{R} un sistema de referencia en \mathcal{A} . Entonces,

$$M(Id_{\mathcal{A}}, \mathcal{R}, \mathcal{R}) = Id_{n+1}$$

Demostración. Tenemos que $M(Id_{\vec{\mathcal{A}}}, \mathcal{B}) = Id_n$. Además, tenemos que $f(p_0) = p_0 \equiv 0_{\mathcal{R}}$. Por tanto,

$$M(Id_{\mathcal{A}}, \mathcal{R}, \mathcal{R}) = \left(\frac{1}{0} \middle| \frac{0}{I_n} \right) = Id_{n+1}$$

\square

Corolario 1.16.1. Sea $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ una aplicación afín, y sea \mathcal{R} y \mathcal{R}' dos sistemas de referencia en \mathcal{A} y \mathcal{A}' , respectivamente. Se tiene que:

$$M(f^{-1}, \mathcal{R}', \mathcal{R}) = M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}')^{-1}$$

Demostración. Por lo visto hasta el momento, tenemos que:

$$M(f^{-1}, \mathcal{R}', \mathcal{R}) \cdot M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}') = M(f^{-1} \circ f, \mathcal{R}, \mathcal{R}) = M(\text{Id}_{\mathcal{A}}, \mathcal{R}, \mathcal{R}) = \text{Id}_{n+1}$$

Por tanto, como el resultado de la multiplicación es la identidad, tenemos que:

$$M(f^{-1}, \mathcal{R}', \mathcal{R}) = M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}')^{-1}$$

□

Corolario 1.16.2. Sea $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ una aplicación afín, y sean $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ dos sistemas de referencia en \mathcal{A} y $\mathcal{R}'_1, \mathcal{R}'_2$ dos sistemas de referencia en \mathcal{A}' . Se tiene que:

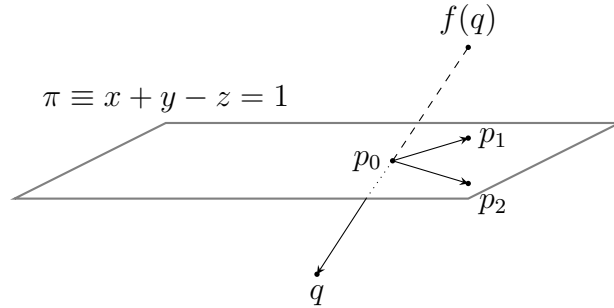
$$M(f, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}'_2) = M(\text{Id}_{\mathcal{A}'}, \mathcal{R}'_1, \mathcal{R}'_2) \cdot M(f, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}'_1) \cdot M(\text{Id}_{\mathcal{A}}, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}_1)$$

Demostración. Usando el teorema anterior, tenemos que:

$$\begin{aligned} M(\text{Id}_{\mathcal{A}'}, \mathcal{R}'_1, \mathcal{R}'_2) \cdot M(f, \mathcal{R}_1, \mathcal{R}'_1) \cdot M(\text{Id}_{\mathcal{A}}, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}_1) &= \\ &= M(\text{Id}_{\mathcal{A}'}, \mathcal{R}'_1, \mathcal{R}'_2) \cdot M(f \circ \text{Id}_{\mathcal{A}}, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}'_1) = M(\text{Id}_{\mathcal{A}'}, \mathcal{R}'_1, \mathcal{R}'_2) \cdot M(f, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}'_1) = \\ &= M(\text{Id}_{\mathcal{A}'} \circ f, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}'_2) = M(f, \mathcal{R}_2, \mathcal{R}'_2) \end{aligned}$$

□

Ejemplo. Sea el espacio afín \mathbb{R}^3 , y consideramos el plano afín dado por la ecuación $\pi \equiv x + y - z = 1$. Hallar la aplicación afín $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ tal que $f(0, 0, 0) = (1, 1, 0)$ y $f(p) = p$, $\forall p \in \pi$.



Tenemos que $\vec{\pi} \equiv x + y - z = 0$. Tomemos como los dos primeros vectores del sistema de referencia dos vectores linealmente independientes del plano:

$$v_1 = (1, -1, 0) \quad v_2 = (1, 0, 1)$$

Para obtener una base, tenemos que nos falta un vector. Notemos $q = (0, 0, 0)$, y sea $p_0 = (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0) \in \pi$, y tenemos que $v_3 = \overrightarrow{p_0 q} = q - p_0 = (-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}, 0)$. Entonces, tomando el sistema de coordenadas $\mathcal{R} = \{p_0, p_1, p_2, q\} = \{p_0, \mathcal{B} = \{v_1, v_2, v_3\}\}$, se tiene que $p_{0\mathcal{R}} = (0, 0, 0)$. Además, tenemos que:

$$\vec{f}(v_i) = \vec{f}(\overrightarrow{p_0 p_i}) = \overrightarrow{f(p_0) f(p_i)} \stackrel{(*)}{=} \overrightarrow{p_0 p_i} = v_i \quad \forall i = 1, 2$$

donde en $(*)$ he aplicado que $v_1, v_2 \in \vec{\pi}$, por lo que $p_0, p_1, p_2 \in \pi$. Además,

$$\vec{f}(v_3) = \vec{f}(\overrightarrow{p_0 q}) = \overrightarrow{f(p_0) f(q)} = \overrightarrow{p_0 f(q)} = f(q) - p_0 = (1, 1, 0) - \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\right) = \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0\right) = -v_3$$

Por tanto, tenemos que la matriz que describe \vec{f} es:

$$M(\vec{f}, \mathcal{B}, \mathcal{B}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Como $f(p_0) = p_0$, tenemos que $f(p_0)_{\mathcal{R}} = (0, 0, 0)$. Por tanto,

$$M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

Buscamos ahora expresarlo en el sistema de referencia canónico \mathcal{R}_0 . Tenemos que $f(0, 0, 0) = (1, 1, 0)$. Buscamos ahora $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u, \mathcal{B}_u)$. Esta es:

$$\begin{aligned} M(\vec{f}, \mathcal{B}_u, \mathcal{B}_u) &= M(\mathcal{B}, \mathcal{B}_u) \cdot M(\vec{f}, \mathcal{B}, \mathcal{B}) \cdot M(\mathcal{B}_u, \mathcal{B}) = \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1/2 \\ -1 & 0 & -1/2 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1/2 \\ -1 & 0 & -1/2 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} = \\ &= \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Por tanto,

$$M(f, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

1.3.2. Aplicaciones afines notables

Estas son las traslaciones, homotecias, proyecciones y simetrías. Para clasificarlas, se emplea la noción de punto fijo, descrita a continuación.

Definición 1.15 (Punto fijo). Sea \mathcal{A} un espacio afín, y consideramos $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ una aplicación afín. Decimos que $p \in \mathcal{A}$ es un punto fijo de f si y solo si $f(p) = p$.

También decimos que f deja invariante a p .

Denotamos por \mathcal{P}_f al conjunto de puntos fijos de f :

$$\mathcal{P}_f = \{p \in \mathcal{A} \mid f(p) = p\} \subset \mathcal{A}$$

Traslaciones

Recordamos que están descritas en la Definición 1.2.

Veamos este teorema, que es la generalización de un resultado de gran utilidad que veremos más adelante.

Teorema 1.17. Sean $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ espacios afines, y consideramos $f, g : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ aplicaciones afines. Entonces:

$$\exists v_0 \in \overrightarrow{\mathcal{A}'} \mid f = t_{v_0} \circ g \iff \overrightarrow{f} = \overrightarrow{g}$$

Además, en ese caso $v_0 = \overrightarrow{g(p)f(p)} \in \overrightarrow{\mathcal{A}'}$ para todo $p \in \mathcal{A}$ (el vector v no depende de $p \in \mathcal{A}$).

Demostración.

\Leftarrow) Sea $v_0 = \overrightarrow{g(p)f(p)} \forall p \in \mathcal{A}'$. Veamos que no depende del valor de p :

$$\begin{aligned} \overrightarrow{g(p)f(p)} = \overrightarrow{g(p')f(p')} &\iff f(p) - g(p) = f(p') - g(p') \iff \\ &\iff \overrightarrow{f(p')f(p)} = \overrightarrow{g(p')g(p)} \iff \overrightarrow{f}(p'p) = \overrightarrow{g}(p'p) \stackrel{(*)}{\implies} p'p = p'p \end{aligned}$$

lo cual es cierto para todo $p, p' \in \mathcal{A}$. Además, en $(*)$ he aplicado que $\overrightarrow{f} = \overrightarrow{g}$. Por tanto, tenemos que $v_0 \in \overrightarrow{\mathcal{A}'}$ no depende del valor de p escogido.

Veamos que $f = t_{v_0} \circ g$:

$$(t_{v_0} \circ g)(p) = t_{v_0}(g(p)) = g(p) + v_0 = g(p) + \overrightarrow{g(p)f(p)} = f(p) \quad \forall p \in \mathcal{A}$$

\implies) Se tiene que:

$$\overrightarrow{f} = \overrightarrow{t_{v_0} \circ g} = \overrightarrow{t_{v_0}} \circ \overrightarrow{g} = Id_{\overrightarrow{\mathcal{A}'}} \circ \overrightarrow{g} = \overrightarrow{g}$$

Veamos ahora el valor de v_0 . Tenemos que $f(p) = t_{v_0}(g(p)) = g(p) + v_0$, por lo que $v_0 = f(p) - g(p) = \overrightarrow{g(p)f(p)}$.

□

En el teorema anterior, tomando $g = Id_{\mathcal{A}}$, tenemos el siguiente resultado, que nos es de gran utilidad para caracterizar las traslaciones.

Corolario 1.17.1. Sea \mathcal{A} un espacio afín, y $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ una aplicación. Entonces:

$$\exists v_0 \in \overrightarrow{\mathcal{A}} \mid f = t_{v_0} \iff f \text{ es afín} \wedge \overrightarrow{f} = Id_{\overrightarrow{\mathcal{A}}}$$

Además, en ese caso $v_0 = \overrightarrow{pf(p)} \in \overrightarrow{\mathcal{A}}$ para todo $p \in \mathcal{A}$ (el vector v no depende de $p \in \mathcal{A}$).

Además, es importante notar que:

$$\mathcal{P}_{t_v} \neq \emptyset \iff v = \overrightarrow{0}.$$

Homotecias afines

Definición 1.16 (Homotecia afín). Sea \mathcal{A} un espacio afín. Definimos la homotecia afín de centro $o \in \mathcal{A}$ y razón (o radio) $k \in \mathbb{R}$, como:

$$\begin{aligned} H_{o,k} : \mathcal{A} &\longrightarrow \mathcal{A} \\ p &\longmapsto o + k \cdot \overrightarrow{op} \end{aligned}$$

Observación. A menudo, se establece la condición de que $k \neq 0, 1$, ya que son casos particulares.

- En el caso de $k = 1$, tenemos que $H_{o,1} = Id_{\mathcal{A}}$.
- En el caso de $k = 0$, tenemos que $H_{o,0} = o$ aplicación constante en o .

El siguiente resultado se estudia para valores de $k \neq 0, 1$, ya que como hemos visto, estos son casos particulares que ya conocemos.

Proposición 1.18. Sea \mathcal{A} un espacio afín, y $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ una aplicación. Entonces, dado $k \in \mathbb{R} \setminus \{0, 1\}$, tenemos:

$$\exists o \in \mathcal{A} \mid f = H_{o,k} \iff f \text{ es afín} \wedge \overrightarrow{f} = k Id_{\vec{\mathcal{A}}}$$

Además, el único punto fijo de f es su centro $o \in \mathcal{A}$, que cumple que

$$o = p + \frac{1}{1-k} \overrightarrow{pf(p)} \quad \forall p \in \mathcal{A}$$

Demostración.

\implies) En primer lugar, tenemos que:

$$H_{o,k}(o) = o + k \overrightarrow{oo} = o \quad \forall k \in \mathbb{R}$$

Veamos cuál es su aplicación lineal asociada:

$$\overrightarrow{H_{o,k}}(\overrightarrow{op}) = \overrightarrow{H_{o,k}(o)H_{o,k}(p)} = \overrightarrow{oH_{o,k}(p)} = \overrightarrow{o + k\overrightarrow{op} - o} = k\overrightarrow{op} = k Id_{\vec{\mathcal{A}}}(\overrightarrow{op})$$

Por tanto, tenemos que $H_{o,k}$ es una aplicación afín con aplicación afín asociada la identidad de razón k , $k Id_{\vec{\mathcal{A}}}$.

Veamos ahora que el centro cumple dicha expresión:

$$p + \frac{1}{1-k} \overrightarrow{pf(p)} = p + \frac{1}{1-k} [f(p) - p] = p + \frac{1}{1-k} [o + k\overrightarrow{op} - p] = p + \frac{1}{1-k} [(1-k)(o-p)] = o$$

\impliedby) Sea $o = p + \frac{1}{1-k} \overrightarrow{pf(p)} \in \mathcal{A} \quad \forall p \in \mathcal{A}$. Veamos que o no depende del valor de p dado. Sea $p' \in \mathcal{A}$. Entonces:

$$\begin{aligned}
p + \frac{1}{1-k} \cdot \overrightarrow{pf(p)} &= p' + \frac{1}{1-k} \cdot \overrightarrow{p'f(p')} \iff \\
\iff p - p' &= \frac{\overrightarrow{p'f(p')} - \overrightarrow{pf(p)}}{1-k} = \frac{f(p') - p' - f(p) + p}{1-k} = \frac{p - p' - \overrightarrow{f(p')f(p)}}{1-k} = \\
&\stackrel{(*)}{=} \frac{\overrightarrow{p'p} - \overrightarrow{f(p'p)}}{1-k} = \frac{\overrightarrow{p'p} - k \cdot \overrightarrow{p'p}}{1-k} = \overrightarrow{p'p} = p - p'
\end{aligned}$$

donde en $(*)$ he aplicado el valor de \overrightarrow{f} . Veamos que $f(o) = o$, es decir, que f es un punto fijo:

$$\begin{aligned}
f(o) &= f(p) + \frac{1}{1-k} \cdot \overrightarrow{f(pf(p))} = f(p) + \frac{1}{1-k} \cdot k \cdot \overrightarrow{pf(p)} = \frac{(1-k)f(p) + kf(p) - kp}{1-k} = \\
&= \frac{f(p) - kp}{1-k} = \frac{f(p) - kp + p - p}{1-k} = \frac{f(p) - p + (1-k)p}{1-k} = p + \frac{1}{1-k} \overrightarrow{pf(p)} = o
\end{aligned}$$

Veamos ahora que f es una homotecia. Sea $p \in \mathcal{A}$. Tenemos que $p = o + \overrightarrow{op}$.

$$f(p) = f(o) + \overrightarrow{f}(\overrightarrow{op}) = o + k\overrightarrow{op} = H_{o,k}(p) \quad \forall p \in \mathcal{A}$$

Por tanto, tenemos que $\exists o \in \mathcal{A}$ tal que $f = H_{o,k}$.

Veamos ahora que el único punto fijo es el centro:

$$f(p) = p \iff o + k\overrightarrow{op} = p \iff o + kp - ko = p \iff (1-k)o = (1-k)p \iff p = o$$

□

Por tanto, hemos demostrado que una homotecia de razón $k \neq 0, 1$ tan solo tiene un punto fijo, que es su centro.

Definición 1.17. Una aplicación afín se dice que es una dilatación si y solo si es una homotecia o una traslación.

Proyecciones y Simetrías

Notación. Antes de presentar las proyecciones y las simetrías en el espacio afín, recordamos cómo las notamos en el caso de espacios vectoriales.

Sea \overrightarrow{V} un espacio vectorial, y consideramos $\overrightarrow{U}, \overrightarrow{W} \subset \overrightarrow{V}$ subespacios vectoriales de \overrightarrow{V} tal que $\overrightarrow{V} = \overrightarrow{U} \oplus \overrightarrow{W}$. La proyección sobre \overrightarrow{U} se nota por $\pi_{\overrightarrow{U}}$, mientras que la simetría sobre \overrightarrow{U} se nota por $\sigma_{\overrightarrow{U}}$.

Definición 1.18 (Proyección). Sea \mathcal{A} un espacio afín, y sean S, T subespacios afines complementarios de \mathcal{A} . Entonces, por la Proposición 1.7, tenemos que $S \cap T = \{p_0\}$. Entonces, definimos la proyección afín en S paralela a T como:

$$\begin{aligned}
\pi_{S,T} : \mathcal{A} &\longrightarrow S \\
q &\longmapsto p_0 + \pi_{\overrightarrow{S}, \overrightarrow{T}}(\overrightarrow{p_0q})
\end{aligned}$$

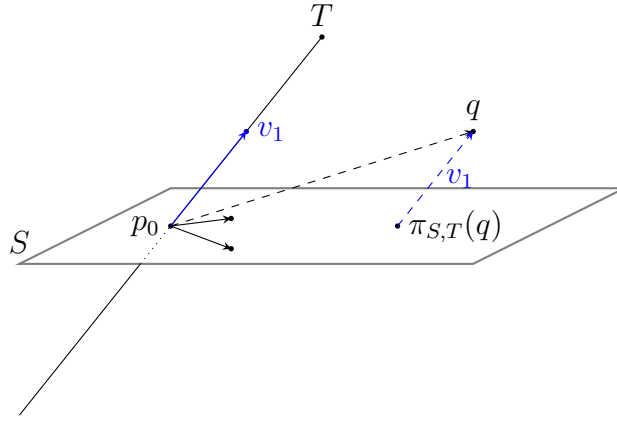


Figura 1.4: Representación gráfica de la proyección afín, donde se ve que el vector $\overrightarrow{p_0 \pi_{S,T}(q)} = \pi_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q})$ no contiene la componente en \vec{T} , por ser la proyección en \vec{S} .

Respecto a las proyecciones, tenemos los siguientes resultados:

Proposición 1.19. *Sea \mathcal{A} un espacio afín, y sean S, T subespacios afines complementarios de \mathcal{A} . Entonces:*

1. $\pi_{S,T} : \mathcal{A} \rightarrow S$ es una aplicación afín, con $\overrightarrow{\pi_{S,T}} = \pi_{\vec{S}, \vec{T}}$.
2. $\mathcal{P}_{\pi_{S,T}} = \text{Im}(\pi_{S,T}) = S$.
3. $\pi_{S,T} \circ \pi_{S,T} = \pi_{S,T}$ (idempotencia).

Demostración. Demostramos cada resultado por separado:

1. Veamos que la dada es la aplicación lineal asociada:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\pi_{S,T}}(\overrightarrow{p_0 q}) &= \overrightarrow{\pi_{S,T}(p) \pi_{S,T}(q)} = \overrightarrow{(p_0 + \pi_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 p})) (p_0 + \pi_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}))} = \\ &= \pi_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}) - \pi_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 p}) = \pi_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}) \end{aligned}$$

donde he empleado que las proyecciones vectoriales son aplicaciones lineales.

2. Veamos los puntos fijos de las proyecciones:

$$\pi_{S,T}(q) = q \iff p_0 + \pi_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}) = q \iff \pi_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}) = \overrightarrow{p_0 q} \iff \overrightarrow{p_0 q} \in \vec{S} \iff q \in S$$

donde he aplicado que los vectores propios de $\pi_{\vec{S}, \vec{T}}$ con valor propio 1 son los vectores de \vec{S} .

3. Tenemos que $\pi_{S,T}(q) \in S$ para todo $q \in \mathcal{A}$. Por tanto, es un punto fijo, por lo que:

$$(\pi_{S,T} \circ \pi_{S,T})(q) = \pi_{S,T}(\pi_{S,T}(q)) = \pi_{S,T}(q) \quad \forall q \in \mathcal{A}$$

□

Definición 1.19 (Simetría afín). Sean S, T subespacios afines complementarios de \mathcal{A} . Entonces, por la Proposición 1.7, tenemos que $S \cap T = \{p_0\}$. Entonces, definimos la simetría (o reflexión) afín en S paralela a T como:

$$\begin{aligned}\sigma_{S,T} : \mathcal{A} &\longrightarrow \mathcal{A} \\ q &\longmapsto p_0 + \sigma_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}) = p_0 + \pi_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}) - \pi_{\vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q})\end{aligned}$$

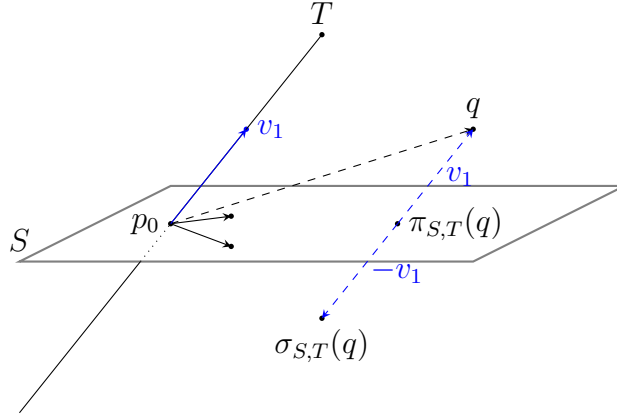


Figura 1.5: Representación gráfica de la simetría afín.

Respecto a las simetrías, tenemos los siguientes resultados:

Proposición 1.20. Sea \mathcal{A} un espacio afín, y sean S, T subespacios afines complementarios de \mathcal{A} . Entonces:

1. $\sigma_{S,T} : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ es una aplicación afín, con $\overrightarrow{\sigma_{S,T}} = \sigma_{\vec{S}, \vec{T}}$.
2. $\mathcal{P}_{\sigma_{S,T}} = S$.
3. $\sigma_{S,T} \circ \sigma_{S,T} = Id_{\mathcal{A}}$ (involución).

Demostración. Demostramos cada resultado por separado:

1. Veamos que la dada es la aplicación lineal asociada:

$$\overrightarrow{\sigma_{S,T}}(\overrightarrow{pq}) = \overrightarrow{\sigma_{S,T}(p)\sigma_{S,T}(q)} = \overrightarrow{(p_0 + \sigma_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 p}))(p_0 + \sigma_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}))} = \sigma_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}) - \sigma_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 p}) = \sigma_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{pq}),$$

donde he empleado que las simetrías vectoriales son aplicaciones lineales.

2. Veamos los puntos fijos de las simetrías:

$$\sigma_{S,T}(q) = q \iff p_0 + \sigma_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}) = q \iff \sigma_{\vec{S}, \vec{T}}(\overrightarrow{p_0 q}) = \overrightarrow{p_0 q} \iff \overrightarrow{p_0 q} \in \vec{S} \iff q \in S$$

donde he aplicado que los vectores propios de $\sigma_{\vec{S}, \vec{T}}$ con valor propio 1 son los vectores de \vec{S} .

3. En primer lugar, tenemos que $\overrightarrow{\sigma_{S,T} \circ \sigma_{S,T}} = \sigma_{\vec{S}, \vec{T}} \circ \sigma_{\vec{S}, \vec{T}} = Id_{\vec{\mathcal{A}}}$.

Además, $\exists a \in \mathcal{A}$ tal que $\sigma_{S,T}(a) = Id_{\mathcal{A}}(a) = a$, ya que $\sigma_{S,T}$ tiene puntos fijos.

Por tanto, por el Teorema 1.11, se tiene.

□

1.4. Relación de Ejercicios

Para ver ejercicios relacionados con este tema, consultar la sección 5.1.

2. Espacios euclídeos

Definición 2.1 (Espacios euclídeos). Diremos que un espacio afín \mathbb{E} es euclídeo si $\vec{\mathbb{E}}$ está dotado de la estructura euclídea. Es decir, $(\vec{\mathbb{E}}, \langle, \rangle)$.

Definición 2.2 (Distancia). Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Definimos la aplicación distancia en $\mathbb{E} \times \mathbb{E}$ como:

$$\begin{aligned} d : \mathbb{E} \times \mathbb{E} &\longrightarrow \mathbb{R} \\ (p, q) &\longmapsto d(p, q) = \|\vec{pq}\| = \sqrt{\langle \vec{pq}, \vec{pq} \rangle} \end{aligned}$$

Tenemos que la aplicación anterior es, efectivamente, una distancia, ya que:

1. $d(p, q) \geq 0 \quad \forall p, q \in \mathbb{E}$. Además, $d(p, q) = 0 \iff p = q$.
2. $d(p, q) = d(q, p) \quad \forall p, q \in \mathbb{E}$.
3. $d(p, q) \leq d(p, r) + d(r, q) \quad \forall p, q, r \in \mathbb{E}$.

Definición 2.3. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Un sistema de referencia $\mathcal{R} = \{p_o, \mathcal{B}\}$ de \mathbb{E} diremos que es euclídeo, rectangular o ortonormal, si \mathcal{B} es una base ortonormal.

Definición 2.4. Sean S, T dos subespacios afines de \mathbb{E} espacio euclídeo. Entonces, definimos que S y T son perpendiculares, notado por $S \perp T$, si y solo si:

$$S \perp T \iff \vec{S} \perp \vec{T}$$

Teorema 2.1. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo, y sea S un subespacio afín de \mathbb{E} . Entonces, $\forall q \in \mathbb{E}, \exists_1 T$ subespacio afín de \mathbb{E} verificando:

1. $q \in T$,
2. $T \perp S$,
3. $\dim T + \dim S = n = \dim \mathbb{E}$.

Demostración. Demostramos en primer lugar la existencia.

Como $\dim \vec{T} + \dim \vec{S} = \dim \vec{\mathbb{E}}$, y se tiene que $\vec{T} \perp \vec{S}$, se tiene que $\vec{T} = \vec{S}^\perp$. Como además se tiene que $q \in T$, entonces:

$$T = q + \vec{S}^\perp$$

Tenemos por tanto demostrada la existencia. La unicidad se tiene de forma directa, ya que \vec{S}^\perp es único. Por tanto, para cada $q \in \mathbb{E}$, tenemos que T es único. \square

Definición 2.5 (Ángulo entre dos rectas). Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Consideramos dos rectas secantes $r_1 = p_1 + \mathcal{L}\{v_1\}$, $r_2 = p_2 + \mathcal{L}\{v_2\}$. Definimos el ángulo entre dos secantes como:

$$\angle(r_1, r_2) := \min\{\angle(v_1, v_2), \angle(v_1, -v_2)\}$$

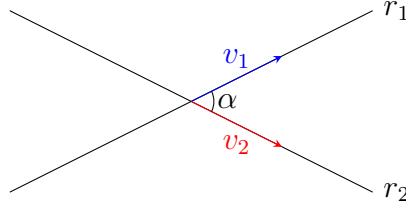


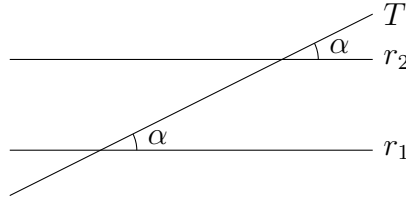
Figura 2.1: Vista gráfica del ángulo α entre dos rectas.

Notemos que la definición con el mínimo se debe a que dos rectas secantes generan dos ángulos, y buscamos el menor ángulo entre ellas.

De esta definición se deduce directamente el siguiente resultado:

Proposición 2.2. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Consideramos dos rectas paralelas $r_1 = p_1 + \mathcal{L}\{v\}$, $r_2 = p_2 + \mathcal{L}\{v\}$, y $T = p_T + \mathcal{L}\{v_T\}$ secante a ambas. Entonces:

$$\angle(T, r_2) = \angle(T, r_1)$$



Demostración. Tenemos que:

$$\angle(T, r_2) = \min\{\angle(v, v_T), \angle(v, -v_T)\} = \angle(T, r_1)$$

□

A continuación, recordaremos el concepto de ángulo orientado, introducido en Geometría II. Como podemos ver en la Figura 2.2, tenemos que $\cos \alpha = \cos \alpha'$, por lo que la definición de ángulo no orientado no basta para diferenciar ambos ángulos. Por ello, introducimos el concepto de orientación:

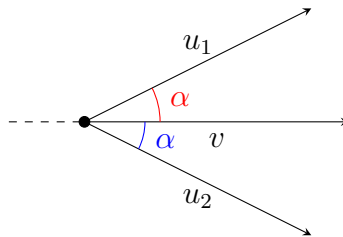


Figura 2.2: Representación del problema de los ángulos no orientados.

Definición 2.6. Dado V un espacio vectorial, diremos que fijamos una orientación en él al fijar una base \mathcal{B} , y diremos que V es orientado. Dada otra base \mathcal{B}' , diremos que:

1. Tienen la misma orientación (o es positivamente orientada) si $|M(\mathcal{B}', \mathcal{B})| > 0$.
2. Tienen orientación contraria (o es negativamente orientada) si $|M(\mathcal{B}', \mathcal{B})| < 0$.

Teorema 2.3. Sea V un plano euclídeo orientado. Entonces, $\forall u \in V, \exists_1 Ju \in V$ tal que $u \perp Ju$, $\|u\| = \|Ju\|$ y la base $\{u, Ju\}$ es positivamente orientada.

Definición 2.7. Dados $u, v \in V$ espacio vectorial euclídeo orientado, definimos el ángulo orientado de u a v , notado por $\angle_o(u, v)$, por el único real $\theta \in [0, 2\pi[$ tal que:

$$\frac{v}{\|v\|} = \cos \theta \frac{u}{\|u\|} + \sin \theta \frac{Ju}{\|Ju\|}$$

Algunas propiedades que se deducen del ángulo orientado son, $\forall u, v, w \in V, \lambda, \mu \in \mathbb{R}$:

1. $\angle_o(u, v) = -\angle_o(v, u)$,
2. $\angle_o(u, -u) = \pi$,
3. $\angle_o(u, v) = \angle_o(-u - v)$,
4. $\angle_o(u, v) = \angle_o(\lambda u, \mu v)$,
5. $\angle_o(u, v) = \angle_o(u, w) + \angle_o(w, v)$.

Una vez recordados los conceptos de ángulo orientado para espacios vectoriales euclídeos, retomamos los espacios afines euclídeos.

Definición 2.8. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Decimos que \mathbb{E} es orientado si $\overrightarrow{\mathbb{E}}$ tiene fijada una orientación.

2.1. Distancia entre subespacios

Definición 2.9. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo, y sean S, T dos subespacios euclídeos de \mathbb{E} . Entonces, se define la distancia entre S y T como:

$$d(S, T) = \inf\{d(p, q) \mid p \in S, q \in T\}$$

Veamos los siguientes dos teoremas, que nos facilitan el cálculo de la distancia entre dos subespacios afines:

Teorema 2.4. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo, y sean $S = p + \overrightarrow{S}$ y $T = q + \overrightarrow{T}$ dos subespacios euclídeos de \mathbb{E} .

Entonces, $\exists p_0 \in S, q_0 \in T$ tal que $\overrightarrow{p_0 q_0} \in \overrightarrow{S}^\perp \cap \overrightarrow{T}^\perp = (\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T})^\perp$.

Además, se tiene que p_0, q_0 son únicos si, y solo si, $\overrightarrow{S} \cap \overrightarrow{T} = \{0\}$.

Demostración. Consideramos $\overrightarrow{pq} \in \overrightarrow{\mathbb{E}}$. Tenemos que $\overrightarrow{\mathbb{E}} = (\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T}) \oplus (\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T})^\perp$. Por tanto, tenemos que $\overrightarrow{pq} = u + v + w$, con $u \in \overrightarrow{S}$, $v \in \overrightarrow{T}$, $w \in (\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T})^\perp$. Definimos $q_0 = q - v \in T$, $p_0 = p + u \in S$, y tenemos que:

$$w = \overrightarrow{pq} - u - v = q - p - u - v = q_0 - p_0 = \overrightarrow{p_0q_0} \in (\overrightarrow{S} + \overrightarrow{T})^\perp = \overrightarrow{S}^\perp \cap \overrightarrow{T}^\perp$$

Respecto a la unicidad, tenemos que p_0, q_0 son únicos si u, v son únicos. Esto se da si y solo si $\overrightarrow{S} \oplus \overrightarrow{T}$, y esto se da si y solo si $\overrightarrow{S} \cap \overrightarrow{T} = \{0\}$. \square

Corolario 2.4.1. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo, y sean $S = p + \overrightarrow{S}$ y $T = q + \overrightarrow{T}$ dos subespacios euclídeos de \mathbb{E} .

Se tiene que $\exists p_0 \in S, q_0 \in T$ tal que $\overrightarrow{p_0q_0} \in \overrightarrow{S}^\perp \cap \overrightarrow{T}^\perp$ cumpliendo que:

$$d(S, T) = d(p_0, q_0)$$

Demostración. La demostración de la existencia se ha visto en el teorema anterior. Una vez demostrada la existencia, veamos que cumplen la relación de las distancias. Sean $a \in S, b \in T$. Veamos que $d(p_0, q_0) \leq d(a, b)$:

$$\begin{aligned} d^2(a, b) &= \|\overrightarrow{ab}\|^2 = \langle \overrightarrow{ab}, \overrightarrow{ab} \rangle = \langle \overrightarrow{ap_0} + \overrightarrow{p_0q_0} + \overrightarrow{q_0b}, \overrightarrow{ap_0} + \overrightarrow{p_0q_0} + \overrightarrow{q_0b} \rangle = \\ &= \|\overrightarrow{ap_0} + \overrightarrow{q_0b}\|^2 + \|\overrightarrow{p_0q_0}\|^2 + 2\langle \overrightarrow{ap_0} + \overrightarrow{q_0b}, \overrightarrow{p_0q_0} \rangle \geq \|\overrightarrow{p_0q_0}\|^2 = d^2(p_0, q_0) \end{aligned}$$

donde $\langle \overrightarrow{ap_0} + \overrightarrow{q_0b}, \overrightarrow{p_0q_0} \rangle = 0$, ya que $\overrightarrow{ap_0} \in \overrightarrow{S}$, $\overrightarrow{q_0b} \in \overrightarrow{T}$, y $\overrightarrow{p_0q_0} \in \overrightarrow{S}^\perp, \overrightarrow{T}^\perp$.

Por tanto,

$$d(p_0, q_0) \leq d(a, b) \quad \forall a \in S, b \in T$$

Por tanto, tenemos que $d(p_0, q_0)$ es un minorante de $\{d(p, q) \mid p \in S, q \in T\}$. Además, como $p_0 \in S, q_0 \in T$, tenemos que pertenece al conjunto. Por tanto, no solo es minorante sino que también es el mínimo, por lo que $d(p_0, q_0)$ es el mínimo y, por consecuente, es el ínfimo. \square

Corolario 2.4.2. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo, y sean S, T dos subespacios afines de \mathbb{E} . Entonces, tenemos que:

$$d(S, T) = 0 \iff S \cap T \neq \emptyset$$

Demostración.

\implies) Tenemos que $\exists p_0 \in S, q_0 \in T$ tal que $\overrightarrow{p_0q_0} \in \overrightarrow{S}^\perp \cap \overrightarrow{T}^\perp$ cumpliendo que:

$$d(S, T) = d(p_0, q_0)$$

Entonces, si $d(S, T) = d(p_0, q_0) = 0$, entonces $p_0 = q_0$, por lo que $S \cap T \neq \emptyset$.

\impliedby) Tenemos que $d(S, T) = \inf\{d(p, q) \mid p \in S, q \in T\}$. Entonces, sea $p_0 \in S \cap T$. Entonces, $d(p_0, p_0) = 0 = d(S, T)$. \square

Ejemplo. Sea \mathbb{R}^3 espacio euclídeo, y consideramos

$$S = (1, 0, 1) + \mathcal{L}\{(1, 1, 0)\} \quad T = (1, 1, 0) + \mathcal{L}\{(-1, 1, 0)\}$$

rectas euclídeas.

Un punto arbitrario de la recta S es $p = (1 + \alpha, \alpha, 1)$, y uno de la recta T es $q = (1 - \beta, 1 + \beta, 0)$ para ciertos $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$. Por tanto, $\overrightarrow{qp} = (\alpha + \beta, \alpha - \beta - 1, 1)$.

Como $\overrightarrow{qp} \in \overrightarrow{S}^\perp$, entonces:

$$\langle (\alpha + \beta, \alpha - \beta - 1, 1), (1, 1, 0) \rangle = 0 = 2\alpha - 1 \implies \alpha = \frac{1}{2}$$

Como $\overrightarrow{qp} \in \overrightarrow{T}^\perp$, entonces:

$$\langle (\alpha + \beta, \alpha - \beta - 1, 1), (-1, 1, 0) \rangle = 0 = -2\beta - 1 \implies \beta = -\frac{1}{2}$$

Por tanto, $p = (3/2, 1/2, 1)$, $q = (3/2, 1/2, 0)$. Entonces,

$$d(S, T) = d(p, q) = \|q - p\| = \|(0, 0, -1)\| = 1$$

2.2. Isometrías

Definición 2.10 (Isometrías). Sea $f : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{E}'$ aplicación afín entre espacios euclídeos. Decimos que f es una isometría afín o un movimiento rígido si

$$d(p, q) = d(f(p), f(q)) \quad \forall p, q \in \mathbb{E}$$

Ejemplo. Sea \mathbb{E} en espacio euclídeo, y sea $v \in \overrightarrow{\mathbb{E}}$. Entonces, t_v es una isometría. Veámoslo:

$$d(t_v(p), t_v(q)) = d(p + v, q + v) = \|q - p\| = \|\overrightarrow{pq}\| = d(p, q)$$

Es directo pensar que las isometrías afines están relacionadas con las isometrías vectoriales. Veámoslo:

Teorema 2.5. Sea $f : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{E}'$ aplicación afín entre espacios euclídeos con \overrightarrow{f} aplicación lineal asociada. Entonces:

$$f \text{ isometría afín} \iff \overrightarrow{f} \text{ isometría vectorial}$$

Demostración.

\implies) Supongamos que f es una isometría afín. Entonces,

$$d(p, q) = d(f(p), f(q)) \quad \forall p, q \in \mathbb{E}$$

Como, por definición, $d(p, q) = \langle \overrightarrow{pq}, \overrightarrow{pq} \rangle$, tenemos:

$$\langle \overrightarrow{pq}, \overrightarrow{pq} \rangle = \langle \overrightarrow{f(p)f(q)}, \overrightarrow{f(p)f(q)} \rangle \quad \forall p, q \in \mathbb{E}$$

Por ser f una aplicación afín, tenemos que:

$$\langle \overrightarrow{pq}, \overrightarrow{pq} \rangle = \langle \overrightarrow{f}(\overrightarrow{pq}), \overrightarrow{f}(\overrightarrow{pq}) \rangle \quad \forall p, q \in \mathbb{E}$$

Por tanto, queda demostrado que \overrightarrow{f} es una isometría.

\Leftarrow) Suponemos que \vec{f} es una isometría vectorial. Por tanto,

$$\langle u, v \rangle = \langle \vec{f}(u), \vec{f}(v) \rangle \quad \forall u, v \in \vec{\mathbb{E}}$$

Como, fijado $p_0 \in \mathbb{E}$, todo vector $v \in \vec{\mathbb{E}}$ se puede poner como $v = \overrightarrow{p_0 p}$, con $p \in \mathbb{E}$, entonces:

$$\langle \overrightarrow{p_0 p}, \overrightarrow{p_0 q} \rangle = \langle \vec{f}(\overrightarrow{p_0 p}), \vec{f}(\overrightarrow{p_0 q}) \rangle \quad \forall p, q \in \mathbb{E}$$

Por ser \vec{f} la aplicación lineal asociada a f , tenemos que:

$$\langle \overrightarrow{p_0 p}, \overrightarrow{p_0 q} \rangle = \langle \overrightarrow{f(p_0)f(p)}, \overrightarrow{f(p_0)f(q)} \rangle \quad \forall p, q \in \mathbb{E}$$

Usando la norma en $\vec{\mathbb{E}}$, tenemos:

$$\|\overrightarrow{p_0 q} - \overrightarrow{p_0 p}\|^2 = \|\overrightarrow{f(p_0)f(q)} - \overrightarrow{f(p_0)f(p)}\|^2 \quad \forall p, q \in \mathbb{E}$$

Usando la igualdad triangular, tenemos:

$$\|\overrightarrow{p_0 q}\|^2 = \|\overrightarrow{f(p_0)f(q)}\|^2 \implies d(p, q) = d(f(p), f(q)) \quad \forall p, q \in \mathbb{E}$$

Por tanto, tenemos que f es una isometría afín.

□

Recordemos el siguiente lema, tratado en Geometría II:

Lema 2.6. Sea $\varphi : V^n \rightarrow V'^m$ una isometría entre espacios vectoriales. Entonces, φ es inyectiva y lineal.

Corolario 2.6.1. Sean \mathbb{E}, \mathbb{E}' dos espacios euclídeos. Consideramos $f : \mathbb{E} \rightarrow \mathbb{E}'$ una isometría afín. Entonces, tenemos que f es inyectiva, afín y \vec{f} es una isometría vectorial.

2.3. Clasificación de los movimientos

Sea $f : \mathbb{E}^n \rightarrow \mathbb{E}^n$ un movimiento. Tenemos los siguientes tipos de movimientos:

- Directo: Conserva la orientación. $|\vec{f}| = 1$.
- Inverso: Invierte la orientación. $|\vec{f}| = -1$.

Para clasificarlas, partimos de la clasificación de las isometrías vectoriales, vista en Geometría III. Recordemos que una aplicación afín viene determinada por su aplicación lineal asociada y la imagen del origen. Es debido a que, dados dos espacios afines $\mathcal{A}, \mathcal{A}'$ y sus respectivos sistemas de referencia $\mathcal{R} = \{p_0, \mathcal{B}\}, \mathcal{R}' = \{p'_0, \mathcal{B}'\}$, entonces:

$$f(p)_{\mathcal{R}'} = f(p_0)_{\mathcal{R}'} + \vec{f}(\overrightarrow{p_0 p})_{\mathcal{B}'} \quad \forall p \in \mathcal{A}$$

Es decir, una vez tengamos determinado \vec{f} , sería necesario obtener un punto de \mathcal{A} que fuese $f(p_0)$.

2.3.1. Movimientos en el plano \mathbb{E}^2

Trabajamos con las isometrías $f : \mathbb{E}^2 \rightarrow \mathbb{E}^2$, y sea $\mathcal{R} = \{p_0, \mathcal{B}\}$ un sistema de referencia ortonormal de \mathbb{E} .

Movimientos directos

Tenemos que \vec{f} puede ser $Id_{\mathbb{E}}$, $-Id_{\mathbb{E}}$, o un giro de ángulo $\theta \neq \{0, \pi\}$.

1. $\vec{f} = Id_{\mathbb{E}}$:

Entonces es una traslación según el vector $v = \overrightarrow{pf(p)}$ para cualquier $p \in \mathcal{A}$. Su matriz asociada es:

$$M(f = t_v, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ u_1 & 1 & 0 \\ u_2 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

donde $(u_1, u_2) = f(p_0)_{\mathcal{R}}$. Por tanto, $(u_1, u_2) = v \in \overrightarrow{\mathbb{E}^2}$.

Por ser una traslación, tenemos los puntos fijos dependen de v .

$$\mathcal{P}_f = \begin{cases} \emptyset & \text{si } v \neq \vec{0} \\ \mathbb{E}^2 & \text{si } v = \vec{0} \end{cases}$$

En el caso de $v = 0$, tenemos que $f = Id_{\mathbb{E}}$.

2. $\vec{f} = -Id_{\mathbb{E}}$:

Tenemos que $\exists o \in \mathbb{E}$ tal que $f = H_{o,-1}$. A esta homotecia se le denomina también simetría central respecto del punto $o \in \mathbb{E}$.

Además, sabemos que solo tiene un punto fijo,

$$\mathcal{P}_f = \{o\}$$

Su matriz asociada es:

$$M(f = t_v, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ u_1 & -1 & 0 \\ u_2 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

donde $(u_1, u_2) = f(p_0)_{\mathcal{R}}$.

3. $\vec{f} = G_{\theta}$ giro de ángulo $\theta \neq \{0, \pi\}$:

Su matriz asociada es:

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ b_1 & \cos \theta & -\sin \theta \\ b_2 & \sin \theta & \cos \theta \end{array} \right)$$

donde $(b_1, b_2) = f(p_0)_{\mathcal{R}}$.

Veamos cuántos puntos fijos tiene. El sistema a resolver es:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ b_1 & \cos \theta & -\sin \theta \\ b_2 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \end{pmatrix}$$

Equivalentemente,

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \cos \theta - 1 & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

Veamos si este sistema es SCD; es decir, si es de Cramer:

$$-\begin{vmatrix} \cos \theta - 1 & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta - 1 \end{vmatrix} = -[(\cos \theta - 1)^2 + \sin^2 \theta] = -[1 + 1 - 2 \cos \theta] = 0 \iff \\ \iff \cos \theta = 1 \iff \theta = 0$$

No obstante, $\theta \neq 0$, por lo que el determinante no es nulo y, por tanto, tan solo tiene un punto fijo $q \in \mathbb{E}$.

$$\mathcal{P}_f = \{q\}$$

Esta isometría se denomina giro de centro $q \in \mathbb{E}$ y ángulo θ . Si no hacemos hincapié en la orientación; como la traza de una matriz es invariante para matrices equivalentes, tenemos que:

$$2 \cos \theta = \text{tr}(M(\vec{f}, \mathcal{B}'')) \quad \forall \mathcal{B}'' \text{ base de } \mathbb{E}^2$$

Observación. Notemos que el giro de centro q y ángulo $\theta = \pi$ se puede ver como una simetría central respecto del punto $q \in \mathbb{E}$.

Movimientos inversos

Tenemos que $\vec{f} = \sigma_{\vec{L}}$ reflexión axial sobre la recta vectorial $\vec{L} = \mathcal{L}\{v_1\}$.

Su matriz asociada, siendo $\mathcal{R}' = \{p'_0, \mathcal{B}' = \{v_1, v_2\}\}$ el sistema de referencia con $p'_0 \in L$ es:

$$M(f, \mathcal{R}') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ b_1 & 1 & 0 \\ b_2 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

donde $(b_1, b_2) = f(p'_0)_{\mathcal{R}'}$.

Diferenciamos según los puntos fijos:

1. Si f tiene algún punto fijo:

Sea $p \in \mathbb{E}$ un punto fijo. Entonces, sea el sistema de referencia $\mathcal{R}'' = \{p, \mathcal{B}'\}$.

En ese sistema de referencia, su matriz asociada es:

$$M(f, \mathcal{R}'') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Tenemos que, dado $q = p + \vec{pq} \in \mathbb{E}^2$, entonces $f(q) = p + \sigma_{\vec{L}}(\vec{pq})$, por lo que f es la reflexión sobre la recta afín $L = p + \vec{L}$. Por tanto,

$$\mathcal{P}_f = L$$

2. Si f no tiene ningún punto fijo:

Sea $p \in \mathbb{E}^2$ arbitrario, y sea $\mathcal{R}'' = \{p, \mathcal{B}\}$. Entonces, siendo $(b_1, b_2) = p_{\mathcal{R}''}$, tenemos:

$$M(f, \mathcal{R}'') = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ b_1 & 1 & 0 \\ b_2 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

Calculemos los puntos fijos (x, y) asociados a la matriz dada:

$$\left(\begin{array}{c} 1 \\ x \\ y \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ b_1 & 1 & 0 \\ b_2 & 0 & -1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} 1 \\ x \\ y \end{array} \right)$$

Equivalentemente,

$$\left(\begin{array}{c} b_1 \\ b_2 \end{array} \right) = - \left(\begin{array}{cc} 0 & 0 \\ 0 & -2 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} x \\ y \end{array} \right)$$

Por tanto, tenemos que f tiene puntos fijos si $b_1 = 0$ e $y = \frac{b_2}{2}$; por lo que $b_1 \neq 0$, y tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}'') = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ b_1 & 1 & 0 \\ b_2 & 0 & -1 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ b_1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ b_2 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

La primera matriz que se aplica vemos que es un movimiento inverso y $b_1 = 0$; por lo que acabamos de ver que tiene una recta de puntos fijos. Por tanto, se trata de una simetría respecto de la recta $y = \frac{b_2}{2}$.

La segunda matriz vemos que se trata de la traslación según el vector:

$$\overrightarrow{(0,0)(b_1,0)} = (b_1, 0)_{\mathcal{B}'} = b_1 v_1$$

Por tanto, se trata de una simetría axial con deslizamiento. Como $b_1 \neq 0$, entonces f no tiene puntos fijos.

Tenemos por tanto la siguiente tabla:

$\mathcal{P}_f \setminus f $	1	-1
\mathbb{E}^2	Identidad	\times
Recta	\times	Reflexión axial
Punto	Giro Reflexión central	\times
\emptyset	Traslación	Reflexión axial con deslizamiento

2.3.2. Movimientos en el espacio \mathbb{E}^3

Movimientos directos

Tenemos que \vec{f} puede ser $Id_{\vec{\mathbb{E}}}$, $\sigma_{\vec{L}}$ reflexión axial, o un giro sin simetría de ángulo $\theta \neq \{0, \pi\}$.

1. $\vec{f} = Id_{\vec{\mathbb{E}}}$:

Entonces es una traslación según el vector $v = \overrightarrow{pf(p)}$ para cualquier $p \in \mathcal{A}$. Su matriz asociada es:

$$M(f = t_v, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ u_1 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & 1 & 0 \\ u_3 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

donde $(u_1, u_2, u_3) = f(p_0)_{\mathcal{R}}$. Por tanto, $(u_1, u_2, u_3) = v \in \vec{\mathbb{E}^3}$.

Por ser una traslación, tenemos los puntos fijos dependen de v .

$$\mathcal{P}_f = \begin{cases} \emptyset & \text{si } v \neq \vec{0} \\ \mathbb{E}^3 & \text{si } v = \vec{0} \end{cases}$$

En el caso de $v = 0$, tenemos que $f = Id_{\mathbb{E}}$.

2. $\vec{f} = \sigma_{\vec{L}}$:

Sea $\vec{L} = \mathcal{L}\{v_1\}$, y consideramos $\mathcal{B}' = \{v_1, v_2, v_3\}$ base ortonormal de $\vec{\mathbb{E}^3}$. Diferenciamos según el número de puntos fijos:

- a) Si f tiene algún punto fijo:

Sea $p \in \mathbb{E}$ un punto fijo, y fijamos el sistema de referencia en $\mathcal{R}' = \{p, \mathcal{B}'\}$.

En este sistema de referencia, su matriz asociada es:

$$M(f, \mathcal{R}') = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

Por tanto, f es la reflexión sobre el eje $L = +\vec{L}$. Por tanto, tenemos que:

$$\mathcal{P}_f = L$$

- b) Si f no tiene ningún punto fijo:

Su matriz asociada es:

$$M(f, \mathcal{R}') = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ u_1 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & -1 & 0 \\ u_3 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

donde $(u_1, u_2, u_3) = f(p'_0)_{\mathcal{R}'}$. Por tanto, $(u_1, u_2, u_3) = v \in \overrightarrow{\mathbb{E}^3}$.

Veamos cuántos puntos fijos tiene. El sistema a resolver es:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ u_1 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & -1 & 0 \\ u_3 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Equivalentemente,

$$\begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -2 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

Tenemos por tanto que f tiene puntos fijos si $u_1 = 0$ e $y = \frac{u_2}{2}$, $z = \frac{u_3}{2}$. Como f no tiene puntos fijos, $u_1 \neq 0$.

Por tanto, tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ u_1 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & -1 & 0 \\ u_3 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ u_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & -1 & 0 \\ u_3 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Tenemos por tanto que f es una composición de una simetría axial con eje

$$L \equiv \begin{cases} y = u_2/2 \\ z = u_3/2 \end{cases} \text{ junto con la traslación según el vector } (u_1, 0, 0) \in \overrightarrow{\mathbb{E}^3}.$$

Por tanto, se trata de una reflexión axial con deslizamiento.

$$3. \quad \overrightarrow{f} = G_{\overrightarrow{L}, \theta}, \theta \neq \{0, \pi\}.$$

Sea $\overrightarrow{L} = \mathcal{L}\{v_1\}$, y consideramos $\mathcal{B}' = \{v_1, v_2, v_3\}$ base ortonormal de $\overrightarrow{\mathbb{E}^3}$. Diferenciamos según el número de puntos fijos:

a) Si f tiene algún punto fijo:

Sea $p \in \mathbb{E}$ un punto fijo, y fijamos el sistema de referencia en $\mathcal{R}' = \{p, \mathcal{B}'\}$.

En este sistema de referencia, su matriz asociada es:

$$M(f, \mathcal{R}') = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

Tenemos que f es un giro con respecto a la recta $L = p + \mathcal{L}\{v_1\}$. Calculamos sus puntos fijos. Esto es equivalente a:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta - 1 & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Por tanto, vemos que hay una recta de puntos fijos; el eje $L = p + \mathcal{L}\{v_1\}$. Si no hacemos hincapié en la orientación; como la traza de una matriz es invariante para matrices equivalentes, tenemos que:

$$2 \cos \theta + 1 = \text{tr}(M(\overrightarrow{f}, \mathcal{B}'')) \quad \forall \mathcal{B}'' \text{ base de } \overrightarrow{\mathbb{E}^2}$$

b) Si f no tiene ningún punto fijo:

Sea $p \in \mathbb{E}$ un punto arbitrario, y fijamos el sistema de referencia en $\mathcal{R}' = \{p, \mathcal{B}'\}$. En este sistema de referencia, su matriz asociada es:

$$M(f, \mathcal{R}') = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline u_1 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ u_3 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{array} \right)$$

donde $f(p) = (u_1, u_2, u_3)_{\mathcal{R}'}$.

Calculemos sus puntos fijos. Esto es equivalente a:

$$- \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta - 1 & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Por tanto, para que haya puntos fijos se ha de cumplir que $u_1 = 0$. Por tanto, tenemos:

$$\left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline u_1 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ u_3 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline u_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ u_3 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{array} \right)$$

Vemos que f se trata de la composición de un giro (ya que tiene puntos fijos) junto con una traslación; por lo que se trata de un giro con deslizamiento. Este movimiento se conoce como movimiento helicoidal. El hecho de que haya deslizamiento se debe a que $u_1 \neq 0$.

Observación. Notemos que una simetría axial se puede ver como un giro de ángulo π ; por lo que en muchas bibliografías no se trata como un caso aparte.

Movimientos indirectos

Tenemos que \vec{f} puede ser una reflexión especular vectorial, $\sigma_{\vec{\pi}}$, $-Id_{\mathbb{E}^3}$ o un giro con simetría $\sigma_{\vec{L}^\perp} \circ G_{\theta, \vec{L}}$.

1. $\vec{f} = \sigma_{\vec{\pi}}$:

Sea $\vec{\pi} = \mathcal{L}\{v_1, v_2\}$. Entonces, consideramos $\mathcal{B} = \{v_1, v_2, v_3\}$ base ortonormal.

Diferenciamos según f tenga o no puntos fijos:

a) Si f tiene puntos fijos:

Sea $p \in \mathbb{E}$ el punto fijo. Entonces, su matriz asociada en $\mathcal{R} = \{p, \mathcal{B}\}$ es:

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

Tenemos que f es la simetría especular sobre π , por lo que:

$$\mathcal{P}_f = \pi$$

b) Si f no tiene puntos fijos:

Sea $p \in \mathbb{E}$ un punto arbitrario. Entonces, su matriz asociada en $\mathcal{R} = \{p, \mathcal{B}\}$ es:

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline u_1 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & 1 & 0 \\ u_3 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

donde $f(p) = (u_1, u_2, u_3)_{\mathcal{R}}$.

Veamos los puntos fijos de f resolviendo el siguiente sistema:

$$- \left(\begin{array}{ccc} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{array} \right) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Por tanto; si $u_1 = u_2 = 0$, tendríamos que hay un plano de puntos fijos $z = \frac{u_3}{2}$. Por tanto, $(u_1, u_2, 0) \neq 0$. Tenemos entonces que:

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline u_1 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & 1 & 0 \\ u_3 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline u_1 & 1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ u_3 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

Es decir, f es una composición de una simetría especular respecto del plano $\pi \equiv z = \frac{u_3}{2}$ junto con una traslación respecto del vector $(u_1, u_2, 0) \neq 0$. Es decir, es una simetría especular con deslizamiento. El hecho de que no haya puntos fijos se debe a que el vector de desplazamiento no es nulo.

2. $\vec{f} = -Id_{\vec{\mathbb{E}^3}}$

Tenemos que $\exists o \in \mathbb{E}$ tal que $f = H_{o, -1}$; es decir f es una homotecia de centro o y razón -1 . Análogamente, podemos decir que f es una simetría central respecto del punto o . Tenemos que:

$$\mathcal{P}_f = \{o\}$$

En el sistema de referencia $\mathcal{R} = \{o, \mathcal{B}\}$, tenemos:

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

3. $\vec{f} = \sigma_{\vec{L}^\perp} \circ G_{\theta, \vec{L}}, \theta \neq \{0, \pi\}$:

Sea $\vec{L} = \mathcal{L}\{v_1\}$, y ampliamos a una base ortonormal $\mathcal{B} = \{v_1, v_2, v_3\}$. Dado un sistema de referencia $\mathcal{R} = \{p, \mathcal{B}\}$, tenemos:

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline u_1 & -1 & 0 & 0 \\ u_2 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ u_3 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{array} \right)$$

donde $f(p) = (u_1, u_2, u_3)_{\mathcal{R}}$. Veamos si tiene puntos fijos. Esto equivale a resolver el siguiente sistema:

$$-\begin{pmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta - 1 & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{pmatrix}$$

Tenemos que el determinante de la matriz de coeficientes es:

$$\begin{vmatrix} -2 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta - 1 & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta - 1 \end{vmatrix} = -2 \begin{vmatrix} \cos \theta - 1 & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta - 1 \end{vmatrix} = \\ = -2(\cos \theta - 1)^2 \sin \theta = 0 \iff \theta = 0$$

No obstante, $\theta \neq 0$, por lo que el determinante no se anula y tenemos que el sistema es de Cramer o SCD, por lo que tan solo tiene un punto fijo. Sea $p_0 \in \mathbb{E}$ dicho punto fijo, $\mathcal{P}_f = \{p_0\}$. Entonces, en el sistema de referencia $\mathcal{R}' = \{p_0, \mathcal{B}\}$, tenemos:

$$M(f, \mathcal{R}') = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{array} \right)$$

Es decir, f es la composición de un giro sobre la recta $L = p + \mathcal{L}\{v_1\}$ compuesto con la reflexión especular sobre el plano $\pi = p + \mathcal{L}\{v_2, v_3\} = L_p^\perp$. Este movimiento se denomina un giro con simetría.

Observación. Notemos que el caso de la reflexión central es un caso concreto de giro con simetría de ángulo π .

Tenemos por tanto el siguiente resumen de las isometrías en el espacio:

$P_f \setminus f $	1	-1
\mathbb{E}^3	Identidad	\times
Plano	\times	Reflexión especular
Recta	Giro	\times
Punto	\times	Reflexión central Giro con simetría
\emptyset	Traslación Helicoidal	Reflexión especular con deslizamiento

2.4. Triángulos

Comencemos por la definición formal de un triángulo:

Definición 2.11 (Triángulo). Un triángulo en un espacio afín \mathcal{A} son tres puntos $\{a, b, c\} \subset \mathcal{A}$ afínmente independientes, que se suelen llamar vértices.

Normalmente, se suele hablar de triángulos $\{a, b, c\}$ en planos afines, ya que sus propiedades se pueden circunscribir al plano $\pi = \langle \{a, b, c\} \rangle \subset \mathcal{A}$ que lo contiene.

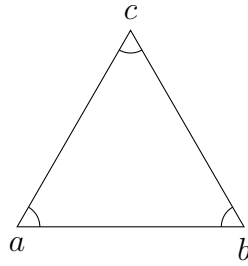
Definición 2.12. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Dado un triángulo $\{a, b, c\} \subset \mathbb{E}$, se definen los ángulos interiores $\hat{A}, \hat{B}, \hat{C}$ en los vértices a, b, c respectivamente como los ángulos orientados siguientes:

$$\hat{A} = \angle_o(\vec{ab}, \vec{ac}) \quad \hat{B} = \angle_o(\vec{bc}, \vec{ba}) \quad \hat{C} = \angle_o(\vec{ca}, \vec{cb})$$

La orientación es la fijada por la base $\mathcal{B} = \{\vec{ab}, \vec{bc}\}$ del plano afín π que contiene al triángulo.

Teorema 2.7. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo orientado. Dado un triángulo $\{a, b, c\} \subset \mathbb{E}$, se tiene que la suma de sus ángulos interiores es π :

$$\hat{A} + \hat{B} + \hat{C} = \pi$$



Demostración. Usando las propiedades de los ángulos orientados, tenemos que:

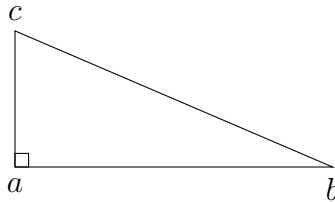
$$\begin{aligned} \hat{A} + \hat{B} + \hat{C} &= \angle_o(\vec{ab}, \vec{ac}) + \angle_o(\vec{ca}, \vec{cb}) + \angle_o(\vec{bc}, \vec{ba}) = \angle_o(\vec{ab}, \vec{ac}) + \angle_o(-\vec{ca}, -\vec{cb}) + \angle_o(\vec{bc}, \vec{ba}) = \\ &= \angle_o(\vec{ab}, \vec{ac}) + \angle_o(\vec{ac}, \vec{cb}) + \angle_o(\vec{bc}, \vec{ba}) = \angle_o(\vec{ab}, \vec{ba}) = \pi \end{aligned}$$

□

Recordemos el Teorema de Pitágoras, demostrado en Geometría II.

Teorema 2.8 (de Pitágoras). Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Dados $a, b, c \in \mathbb{E}$, se tiene que:

$$\|\vec{ac}\|^2 + \|\vec{ab}\|^2 = \|\vec{cb}\|^2 \iff \vec{ac} \perp \vec{ab}$$



2.4.1. Puntos Notables del Triángulo

En esta sección vamos a ver el baricentro, el circuncentro, el ortocentro y el incentro. No obstante, previamente son necesarias algunas definiciones.

Definición 2.13 (Segmento). Sea \mathcal{A} un espacio afín. Entonces, dados dos puntos $p, q \in \mathcal{A}$, se define el segmento entre los puntos p, q como:

$$[p, q] = \{p + t\vec{pq} \mid t \in [0, 1]\} = \{q + t\vec{qp} \mid t \in [0, 1]\}$$

Definición 2.14 (Punto medio). Sea \mathcal{A} un espacio afín. Entonces, dados dos puntos $p, q \in \mathcal{A}$, se define el punto medio del segmento $[p, q]$ como:

$$m_{pq} = p + \frac{1}{2}\vec{pq} = q + \frac{1}{2}\vec{qp}$$

Notemos que, en el caso de que \mathcal{A} sea un espacio euclídeo, esta definición concuerda con la idea intuitiva de punto medio, ya que $d(p, m_{pq}) = d(q, m_{pq})$.

El punto medio también se puede calcular como:

$$m_{pq} = a + \frac{1}{2}(\vec{ap} + \vec{aq}) \quad \forall a \in \mathcal{A}$$

Definición 2.15 (Mediana). Sea \mathcal{A} un espacio afín. Dado un triángulo $\{a, b, c\} \subset \mathcal{A}$, se define la mediana asociada al vértice a como la recta $M_a = \langle a, m_{bc} \rangle$ que pasa por el punto a y el punto medio del segmento $[b, c]$.

Análogamente, se definen las medianas M_b, M_c asociadas a los vértices b, c respectivamente.

Veamos ahora el primer punto notable de los triángulos.

Teorema 2.9 (Baricentro). Sea \mathcal{A} un espacio afín. Dado un triángulo $\{a, b, c\} \subset \mathcal{A}$. Entonces, las tres medianas se cortan en un único punto, $B \in \mathcal{A}$, llamado baricentro o centro de masas.

$$\{B\} = M_a \cap M_b \cap M_c$$

Este cumple la siguiente relación, que no depende del valor de $q \in \mathcal{A}$:

$$B = q + \frac{1}{3}(\vec{qa} + \vec{qb} + \vec{qc})$$

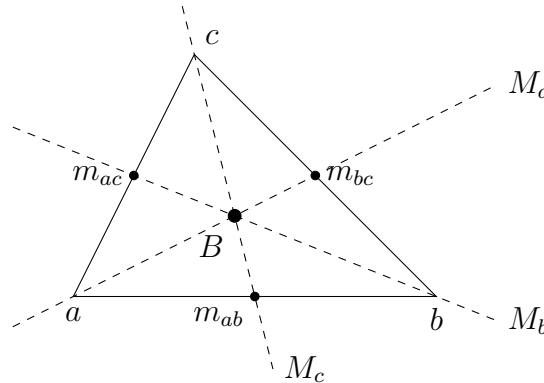


Figura 2.3: Baricentro B de un triángulo $\{a, b, c\}$.

Demostración. Veamos en primer lugar que B no depende de q :

$$\begin{aligned} q + \frac{1}{3}(\vec{qa} + \vec{qb} + \vec{qc}) &= q' + \frac{1}{3}(\vec{q'a} + \vec{q'b} + \vec{q'c}) \iff \\ \iff \vec{q'q} &= \frac{1}{3}(a + b + c - 3q' - a - b - c + 3a) \iff \vec{q'q} = \frac{1}{3}(-3q' + 3q) \iff \\ &\iff \vec{q'q} = -q' + q = \vec{q'q} \end{aligned}$$

Veamos que $B \in M_a$. Tenemos que $M_a = a + \mathcal{L}\{\vec{am}_{bc}\}$. Por tanto, busquemos $\lambda \in \mathbb{R}$ tal que:

$$\vec{aB} = \lambda \vec{am}_{bc}$$

De la definición de punto medio, tenemos:

$$\vec{am}_{bc} = m_{bc} - a = q + \frac{1}{2}(\vec{qb} + \vec{qc}) - a = \vec{aq} + \frac{1}{2}(\vec{qb} + \vec{qc}) \quad \forall q \in \mathcal{A}$$

De la definición de baricentro, tenemos:

$$\vec{aB} = B - a = \vec{aq} + \frac{1}{3}(\vec{qa} + \vec{qb} + \vec{qc}) = \frac{2}{3}\vec{aq} + \frac{1}{3}(\vec{qb} + \vec{qc})$$

Por tanto, vemos claramente que $\vec{aB} = \frac{2}{3}\vec{am}_{bc}$. Por tanto, $B \in M_a$. Análogamente, se demuestra que $B \in M_c, M_b$, por lo que $B \in M_a \cap M_b \cap M_c$.

Por la fórmula de las dimensiones, deducimos que

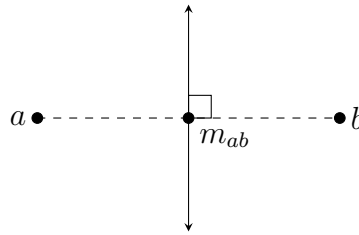
$$\{B\} = M_a \cap M_b \cap M_c.$$

□

Definición 2.16 (Mediatriz). Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Dado $a, b \in \mathbb{E}$, definimos la mediatriz del segmento $[a, b]$ como el único subespacio afín perpendicular a la recta $\langle\{a, b\}\rangle$ que pasa por el punto medio. Es decir,

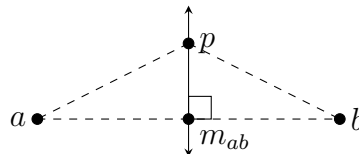
$$L = r_{m_{ab}}^\perp = m_{ab} + \vec{r}^\perp$$

donde r es la recta que une a, b , es decir, $r = a + \mathcal{L}\{\vec{ab}\}$.



Proposición 2.10. Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Dado $a, b \in \mathbb{E}$, y dado $p \in \mathbb{E}$, se caracteriza la mediatriz de $a, b \in \mathbb{E}$ como:

$$p \in r_{m_{ab}}^\perp \iff d(a, p) = d(b, p)$$



Demostración.

\implies) Si $p \in r_{m_{ab}}^\perp$, entonces $\overrightarrow{m_{ab}p} \perp \overrightarrow{ab}$. Los triángulos $\{p, a, m_{ab}\}$ y $\{p, b, m_{ab}\}$ son rectángulos. Por tanto, por el Teorema de Pitágoras,

$$d^2(a, p) = d^2(a, m_{ab}) + d^2(p, m_{ab}) = d^2(b, m_{ab}) + d^2(p, m_{ab}) = d^2(b, p)$$

Por tanto, $d(a, p) = d(b, p)$.

\Leftarrow) Supongamos que $p \notin r_{m_{ab}}^\perp$, y lleguemos a una contradicción.

Como $p \notin r_{m_{ab}}^\perp$, tenemos que $\overrightarrow{m_{ab}p} \notin \overrightarrow{r}^\perp$. Por tanto, $\exists v \in \mathcal{L}\{\overrightarrow{ab}\}$ tal que $\langle v, \overrightarrow{m_{ab}p} \rangle \neq 0$. Como $v \in \mathcal{L}\{\overrightarrow{ab}\}$, tenemos que $v = k \cdot \frac{1}{2}\overrightarrow{ab}$ para cierto $k \in \mathbb{R}^*$. Por tanto,

$$0 \neq \langle v, \overrightarrow{m_{ab}p} \rangle = \left\langle k \cdot \frac{1}{2}\overrightarrow{ab}, \overrightarrow{m_{ab}p} \right\rangle = k \left\langle \frac{1}{2}\overrightarrow{ab}, \overrightarrow{m_{ab}p} \right\rangle = k \left\langle \overrightarrow{m_{ab}b}, \overrightarrow{m_{ab}p} \right\rangle = -k \langle \overrightarrow{m_{ab}a}, \overrightarrow{m_{ab}p} \rangle$$

Por tanto, tenemos que $\overrightarrow{m_{ab}p} \not\perp \overrightarrow{m_{ab}a}, \overrightarrow{m_{ab}b}$. Por el Teorema de Pitágoras, tenemos que:

$$\|\overrightarrow{pa}\|^2 \neq \|\overrightarrow{m_{ab}p}\|^2 + \|\overrightarrow{m_{ab}a}\|^2 \stackrel{(*)}{=} \|\overrightarrow{m_{ab}p}\|^2 + \|\overrightarrow{m_{ab}b}\|^2 \neq \|\overrightarrow{pb}\|^2$$

donde en $(*)$ he aplicado que $\|\overrightarrow{m_{ab}a}\| = \|\overrightarrow{m_{ab}b}\|$. Por tanto, tenemos que $\|\overrightarrow{pa}\| \neq \|\overrightarrow{pb}\|$, por lo que:

$$d(a, p) = \|a - p\| = \|\overrightarrow{pa}\| \neq \|\overrightarrow{pb}\| = \|b - p\| = d(b, p)$$

llegando entonces a una contradicción. Por tanto, $p \in r_{m_{ab}}^\perp$.

□

Teorema 2.11 (Circuncentro). *Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Dado un triángulo $\{a, b, c\} \subset \mathbb{E}$. Notemos R_a a la mediatriz del segmento $[b, c]$, y análogamente a R_b, R_c .*

Entonces, las tres mediatrices se cortan en un único punto, $C \in \mathbb{E}$, llamado circuncentro.

$$\{C\} = R_a \cap R_b \cap R_c$$

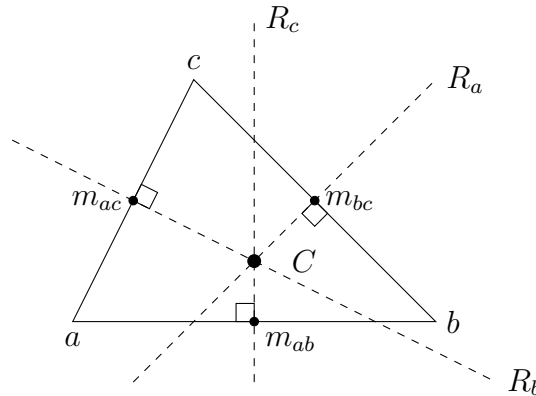


Figura 2.4: Circuncentro C de un triángulo $\{a, b, c\}$.

Demostración. Veamos en primer lugar que $R_a \nparallel R_b$. Si fuesen paralelas, entonces $\vec{R}_a = \vec{R}_b$. Es decir, $\mathcal{L}\{\vec{bc}\}^\perp = \mathcal{L}\{\vec{ac}\}^\perp$. Por tanto, tendríamos que ambas rectas vectoriales serían iguales, por lo que sus vectores directores serían linealmente dependientes, algo que no es posible ya que los tres vértices de un triángulo son afínmente independientes. Por tanto, las mediatrices no son paralelas dos a dos.

Por tanto, $\exists C \in R_a \cap R_b$. Es decir, C es un único punto y como $C \in R_a$, entonces $d(C, b) = d(C, c)$. Además, como $C \in R_b$, entonces $d(C, a) = d(C, c)$. Por tanto, el punto es equidistante de los tres vértices. Como $d(C, a) = d(C, c) = d(C, b)$, tenemos que $C \in R_c$. Por tanto,

$$C \in R_a \cap R_b \cap R_c$$

Por la fórmula de las dimensiones, deducimos que

$$\{C\} = R_a \cap R_b \cap R_c.$$

□

Notemos que el nombre del circuncentro se debe a que es el centro de una circunferencia que pasa por a, b y c .

Definición 2.17 (Altura). Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Dado un triángulo $\{a, b, c\} \subset \mathbb{E}$, se define la altura H_a del vértice a como la recta que pasa por a y es ortogonal al lado opuesto $[b, c]$:

$$H_a = a + \mathcal{L}\{\vec{bc}\}^\perp$$

Análogamente se definen las alturas asociadas a los vértices b y c .

Teorema 2.12 (Ortocentro). Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Dado un triángulo $\{a, b, c\} \subset \mathbb{E}$, existe un único punto $O \in \mathbb{E}$ llamado ortocentro tal que:

$$\{O\} = H_a \cap H_b \cap H_c$$

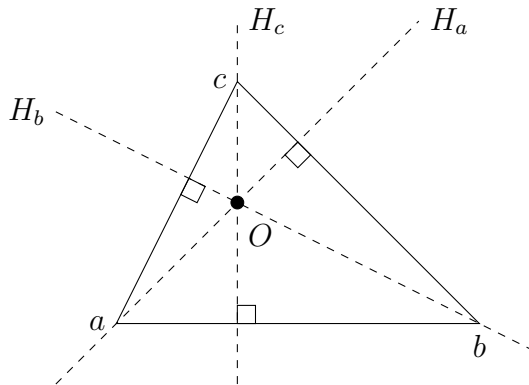


Figura 2.5: Ortocentro O de un triángulo $\{a, b, c\}$.

Demostración. Veamos en primer lugar que $H_a \nparallel H_b$. Si fuesen paralelas, entonces $\mathcal{L}\{\vec{bc}\}^\perp = \mathcal{L}\{\vec{ac}\}^\perp$. Por tanto, tendríamos que ambas rectas vectoriales serían iguales, por lo que sus vectores directores serían linealmente dependientes, algo que no es posible ya que los tres vértices de un triángulo son afínmente independientes. Por tanto, las alturas no son paralelas dos a dos.

Como H_a y H_b son secantes, entonces se cortan en un punto $O \in \mathbb{E}$:

$$O \in H_a \cap H_b$$

Veamos ahora que $O \in H_c$. Para ello, vemos que $\vec{Oc} \perp ab$:

$$\begin{aligned} \langle \vec{Oc}, \vec{ab} \rangle &= \langle \vec{Oa} + \vec{ac}, \vec{aO} + \vec{Ob} \rangle = \langle \vec{Oa}, \vec{aO} + \vec{Ob} \rangle + \langle \vec{ac}, \vec{aO} \rangle + \langle \vec{ac}, \vec{Ob} \rangle = \\ &= \langle \vec{Oa}, \vec{aO} + \vec{Ob} \rangle - \langle \vec{Oa}, \vec{ac} \rangle + \langle \vec{ac}, \vec{Ob} \rangle = \langle \vec{Oa}, \vec{aO} + \vec{Ob} - \vec{ac} \rangle + \langle \vec{ac}, \vec{Ob} \rangle = \\ &= \langle \vec{Oa}, \vec{ca} + \vec{aO} + \vec{Ob} \rangle + \langle \vec{ac}, \vec{Ob} \rangle = \langle \vec{Oa}, \vec{cb} \rangle + \langle \vec{ac}, \vec{Ob} \rangle = 0 \end{aligned}$$

donde he usado la igualdad triangular, las propiedades de la métrica \langle, \rangle y que $\langle \vec{Oa}, \vec{cb} \rangle = \langle \vec{ac}, \vec{Ob} \rangle = 0$ por ser $O \in H_a \cap H_b$.

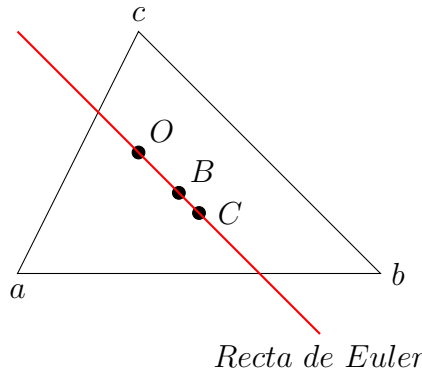
Por tanto, $O \in H_a \cap H_b \cap H_c$. Por la fórmula de las dimensiones, deducimos que

$$\{O\} = H_a \cap H_b \cap H_c.$$

□

Teorema 2.13 (De Euler). *Sea \mathbb{E} un espacio euclídeo. Dado un triángulo $\{a, b, c\} \subset \mathbb{E}$, el baricentro B , el circuncentro C y el ortocentro O están alineados.*

Si $\{B, C, O\}$ contiene al menos dos puntos distintos, la recta pasando por B, C y O se denomina Recta de Euler.



Demostración. Consideramos la homotecia de razón $k = -\frac{1}{2}$ y centro el baricentro B . Veamos que $H_{B, -1/2}$ lleva cada vértice en el punto medio del segmento opuesto:

$$\begin{aligned} H_{B, -1/2}(a) &= B - \frac{1}{2}\vec{Ba} = B + \frac{1}{2}\vec{aB} = \left(a + \frac{1}{3}(\vec{ab} + \vec{ac})\right) + \frac{1}{2}\left[\left(a + \frac{1}{3}(\vec{ab} + \vec{ac})\right) - a\right] = \\ &= \left(a + \frac{1}{3}(\vec{ab} + \vec{ac})\right) + \frac{1}{6}(\vec{ab} + \vec{ac}) = a + \frac{1}{2}(\vec{ab} + \vec{ac}) = m_{bc} \end{aligned}$$

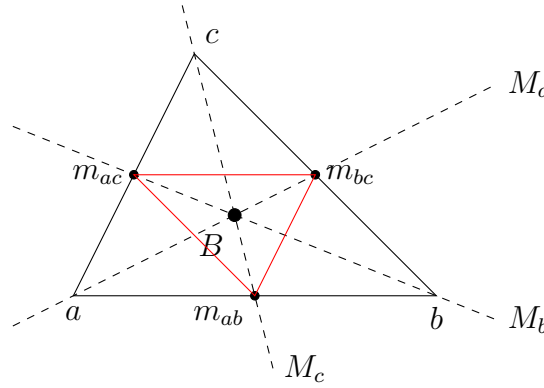


Figura 2.6: Baricentro B de un triángulo $\{a, b, c\}$, junto con el triángulo formado por $H_{B,-1/2}$.

Análogamente se demuestra para b, c , por lo que se tiene que $H_{B,-1/2}$ lleva cada vértice en el punto medio del segmento opuesto. Veamos ahora que h lleva las alturas de $\{a, b, c\}$ en las mediatrices de $\{a, b, c\}$:

$$\begin{aligned} H_{B,-1/2}(H_a) &= H_{B,-1/2}\left(a + \mathcal{L}\{\vec{bc}\}^\perp\right) = H_{B,-1/2}(a) - \frac{1}{2}Id_{\mathbb{E}}\left(\mathcal{L}\{\vec{bc}\}^\perp\right) = \\ &= m_{bc} + \mathcal{L}\{\vec{bc}\}^\perp = R_a \end{aligned}$$

Análogamente, se demuestra para H_b, H_c , por lo que:

$$H_{B,-1/2}(O) = H_{B,-1/2}(H_a) \cap H_{B,-1/2}(H_b) = H_{B,-1/2}(H_c) = R_a \cap R_b \cap R_c = C$$

No obstante, se tiene que un punto, su imagen mediante una homotecia de centro o , y el mismo centro o están alineados. Por tanto, $O, C = H_{B,-1/2}(O)$ y B están alineados, como queríamos demostrar. \square

Observación. Todos los resultados vistos en esta sección se pueden ver de forma interactiva en el siguiente applet de Geogebra: <https://www.geogebra.org/m/k4mcmpsw>.

2.5. Teorema de Thales

Concluiremos el tema de espacios afines euclídeos demostrando el Teorema de Thales (o Tales) (siglo VII A.C.).

Teorema 2.14 (Thales). *Sea \mathbb{E} un espacio afín euclídeo de dimensión $n \geq 2$. Sean Π_1, Π_2 y Π_3 tres hiperplanos distintos en \mathbb{E} y distintos dos a dos. Sean R y S dos rectas distintas en \mathbb{E} no paralelas a los hiperplanos, y llamemos $\{r_i\} = \Pi_i \cap R$, $\{s_i\} = \Pi_i \cap S$, $i = 1, 2, 3$ a los correspondientes puntos de corte entre las rectas y los planos. Entonces:*

$$\frac{d(s_1, s_2)}{d(s_1, s_3)} = \frac{d(r_1, r_2)}{d(r_1, r_3)}$$

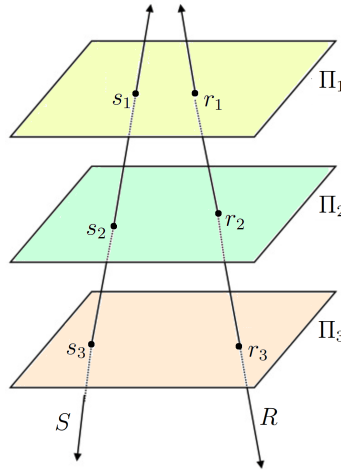


Figura 2.7: Teorema de Thales.

Demostración. Consideramos π_{S,Π_i} la proyección afín sobre S paralela a Π_i para $i = 1, 2, 3$. Tenemos que:

$$\pi_{S,\Pi_i}(r_j) = s_i + \pi_{\vec{S},\vec{\Pi}}(\overrightarrow{s_i r_j}) = s_i + \overrightarrow{s_i s_j} = s_j \quad \forall i, j = 1, 2, 3$$

Como r_1, r_2 y r_3 están alineados, $\exists \lambda \in \mathbb{R}^*$ tal que $\overrightarrow{r_1 r_3} = \lambda \overrightarrow{r_1 r_2}$. Por tanto,

$$d(r_1, r_3) = \|\overrightarrow{r_1 r_3}\| = |\lambda| \|\overrightarrow{r_1 r_2}\| = |\lambda| d(r_1, r_2).$$

Como π_{S,Π_i} es afín y $\pi_{S,\Pi_i}(r_j) = s_j$ para $i, j = 1, 2, 3$, tenemos:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{\pi_{S,\Pi_i}(r_1 r_3)} &= \overrightarrow{\pi_{S,\Pi_i}(r_1) \pi_{S,\Pi_i}(r_3)} = \overrightarrow{s_1 s_3} & \forall i = 1, 2, 3 \\ \overrightarrow{\pi_{S,\Pi_i}(r_1 r_2)} &= \overrightarrow{\pi_{S,\Pi_i}(r_1) \pi_{S,\Pi_i}(r_2)} = \overrightarrow{s_1 s_2} & \forall i = 1, 2, 3 \end{aligned}$$

Además, como $\overrightarrow{\pi_{S,\Pi_i}}$ es lineal, tenemos que:

$$\overrightarrow{\pi_{S,\Pi_i}(r_1 r_3)} = \overrightarrow{\pi_{S,\Pi_i}(\lambda \overrightarrow{r_1 r_2})} = \lambda \overrightarrow{\pi_{S,\Pi_i}(r_1 r_2)} \implies \overrightarrow{s_1 s_3} = \lambda \overrightarrow{s_1 s_2} \quad \forall i = 1, 2, 3$$

Por tanto,

$$d(s_1, s_3) = \|\overrightarrow{s_1 s_3}\| = |\lambda| \|\overrightarrow{s_1 s_2}\| = |\lambda| d(s_1, s_2).$$

Por tanto, tenemos que:

$$\frac{1}{|\lambda|} = \frac{d(s_1, s_2)}{d(s_1, s_3)} = \frac{d(r_1, r_2)}{d(r_1, r_3)}.$$

□

2.6. Teorema de Pappus

TERMINAR

2.7. Convexidad

Definición 2.18. Sea A un conjunto, y $B \subset A$. Decimos que B es convexo si:

$$[p, q] \subset B \quad \forall p, q \in B$$

Notemos que la unión de dos convexos no tiene por qué ser convexa.

Proposición 2.15. *Intersección de convexos es convexa.*

Proposición 2.16. *Si la intersección no es vacía, unión de convexos es convexa.*

Proposición 2.17. *Todo subespacio afín es convexo.*

Proposición 2.18. Sea $f : \mathcal{A}^n \rightarrow \mathcal{A}^n$ una aplicación afín. Tenemos que:

1. $f([p, q]) = [f(p), f(q)]$
2. B convexo implica $f(B)$ convexo.
3. B' convexo, $f^{-1}(B') \neq \emptyset$, entonces $f^{-1}(B')$ convexo.

Definición 2.19. Sea $B \subset \mathcal{A}^n$. Definimos la envolvente convexa de B como el menor subconjunto convexo que contiene a B . Es decir,

$$\varphi(B) = \bigcap \{X \supset B \mid X \text{ es convexo}\}$$

Ejemplo de envolvente convexa de dos puntos \implies segmento.

Ejemplo de envolvente convexa de tres puntos \implies triángulo.

Propiedades:

1. $\varphi(\varphi(B)) = \varphi(B)$
2. $X \subset Y \implies \varphi(X) \subset \varphi(Y)$
3. $\varphi(X \cup Y) \subset \varphi(X) \cup \varphi(Y)$.

2.8. Relación de Ejercicios

Para ver ejercicios relacionados con este tema, consultar la sección 5.2.

3. Hipercuádricas afines

Definición 3.1. Sea \mathcal{A}^n un espacio afín, y \mathcal{R} un sistema de referencia. Definimos una hipercuádrica afín real H como:

$$H = \left\{ p \in \mathcal{A} : (1, p_{\mathcal{R}}^t) \cdot \widehat{C} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ p_{\mathcal{R}} \end{pmatrix} = 0 \right\}$$

donde $\widehat{C} = \left(\frac{a}{z} \middle| \frac{z^t}{C} \right) \in \mathcal{S}_{n+1}(\mathbb{R})$, donde $a \in \mathbb{R}$, $z \in \mathbb{R}^n$ y $C \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) \setminus \{0\}$.

A la matriz \widehat{C} la llamaremos la matriz asociada a H en \mathcal{R} .

Sea ahora $p_{\mathcal{R}} = (x_1, \dots, x_n)^t$, $z = (z_1, \dots, z_n)^t$ y $C = (c_{ij})_{i,j=1,\dots,n}$, con $c_{ij} = c_{ji}$ por ser $C \in \mathcal{S}_n(\mathbb{R}) \setminus \{0\}$. Veamos en primer lugar que H está muy relacionado con las formas cuadráticas vistas en Geometría II:

$$\begin{aligned} 0 &= (1, p_{\mathcal{R}}^t) \left(\frac{a}{z} \middle| \frac{z^t}{C} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ p_{\mathcal{R}} \end{pmatrix} = (a + p_{\mathcal{R}}^t z, z^t + p_{\mathcal{R}}^t C) \begin{pmatrix} 1 \\ p_{\mathcal{R}} \end{pmatrix} = \\ &= a + p_{\mathcal{R}}^t z + z^t p_{\mathcal{R}} + p_{\mathcal{R}}^t C p_{\mathcal{R}} = a + 2p_{\mathcal{R}}^t z + p_{\mathcal{R}}^t C p_{\mathcal{R}} \end{aligned}$$

donde tenemos que $p_{\mathcal{R}}^t C p_{\mathcal{R}}$ era la forma cuadrática asociada a la métrica definida por la matriz C en la base \mathcal{B} .

Análogamente, tenemos que H se corresponde con una ecuación cuadrática¹, que resulta menos abstracto:

$$\begin{aligned} 0 &= a + 2p_{\mathcal{R}}^t z + p_{\mathcal{R}}^t C p_{\mathcal{R}} = \\ &= a + 2(x_1, \dots, x_n) \begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix} + (x_1, \dots, x_n) \begin{pmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ c_{1n} & \cdots & c_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \\ &= a + 2 \sum_{i=1}^n z_i x_i + \sum_{i,j=1}^n c_{ij} x_i x_j \end{aligned}$$

Ejemplo. Sea \mathcal{A}^n un espacio afín, y \mathcal{R} un sistema de referencia. Encontrar la ecuación cuadrática de la hipercuádrica H , cuya matriz asociada en \mathcal{R} es la siguiente:

$$A = \left(\frac{1}{1} \middle| \frac{1}{0} \frac{2}{1} \right)$$

Tenemos que $H = \{(x, y)_{\mathcal{R}} \in \mathcal{A} \mid y^2 + 2xy + 2x + 4y + 1 = 0\}$.

¹Recordemos que una ecuación cuadrática es, simplemente, un polinomio de grado 2.

3.1. Cambio de sistema de referencia e hipercuádricas

Como hemos visto, las hipercuádricas se han definido según un sistema de referencia \mathcal{R} ; por lo que es lógico preguntarse cómo se ven modificados si dicho sistema de referencia cambia.

Además del sistema de referencia $\mathcal{R} = \{p_0, \mathcal{B}\}$ que se ha considerado para definir una hipercuádrica, sea $\mathcal{R}' = \{p'_0, \mathcal{B}'\}$ otro sistema de referencia tal que:

$$M(Id_{\mathcal{A}}, \mathcal{R}', \mathcal{R}) = \left(\frac{1}{b} \middle| \frac{0}{A} \right), \quad A = M(\mathcal{B}', \mathcal{B})$$

Entonces, tenemos que:

$$\begin{aligned} 0 &= (1, p_{\mathcal{R}}^t) \left(\frac{a}{z} \middle| \frac{z^t}{C} \right) \left(\frac{1}{p_{\mathcal{R}}} \right) = \\ &= (1, p_{\mathcal{R}'}^t) \left(\frac{1}{0} \middle| \frac{b^t}{A^t} \right) \left(\frac{a}{z} \middle| \frac{z^t}{C} \right) \left(\frac{1}{b} \middle| \frac{0}{A} \right) \left(\frac{1}{p_{\mathcal{R}'}} \right) = \\ &= (1, p_{\mathcal{R}'}^t) \left(\frac{a + b^t z}{A^t z} \middle| \frac{z^t + b^t C}{A^t C} \right) \left(\frac{1}{b} \middle| \frac{0}{A} \right) \left(\frac{1}{p_{\mathcal{R}'}} \right) = \\ &= (1, p_{\mathcal{R}'}^t) \left(\frac{a + b^t z + z^t b + b^t C b}{A^t z + A^t C b} \middle| \frac{z^t A + b^t C A}{A^t C A} \right) \left(\frac{1}{p_{\mathcal{R}'}} \right) = \\ &= (1, p_{\mathcal{R}'}^t) \left(\frac{\tilde{a}}{\tilde{z}} \middle| \frac{\tilde{z}^t}{A^t C A} \right) \left(\frac{1}{p_{\mathcal{R}'}} \right) \end{aligned}$$

Por tanto, se tiene que:

$$\begin{cases} \tilde{a} = a + b^t z + z^t b + b^t C b \\ \tilde{z} = A^t (C b + z) \end{cases}$$

3.2. Clasificación de hipercuádricas euclídeas

Dada una hipercuádrica euclídea, nuestro objetivo es encontrar un sistema de referencia en el que la ecuación cuadrática sea fácil de identificar, pudiendo entonces clasificarla.

Por el Teorema de Sylvester visto en Geometría II, como C es simétrica, tenemos que $\exists \mathcal{B}'$ base ortonormal de $\vec{\mathcal{A}}$ tal que $A^t C A = D$, con D diagonal:

$$D = A^t C A = \left(\begin{array}{ccc|ccc|ccc} r_1 & & & & & & & & \\ & \ddots & & & & & & & \\ & & r_{n_1} & & & & & & \\ \hline & & & -r_{n_1+1} & & & & & \\ & & & & \ddots & & & & \\ & & & & & -r_{n_1+n_2} & & & \\ \hline & & & & & & 0 & & \\ & & & & & & & \ddots & \\ & & & & & & & & 0 \end{array} \right)$$

donde $r_k > 0$ para todo $k = 1, \dots, n_1 + n_2$. Además, veamos que se puede elegir b de la forma que \tilde{z} (que también define la hipercuádrica) tenga sus primeras $n_1 + n_2$ coordenadas nulas.

Por tanto, hay un sistema de referencia ortonormal \mathcal{R}' tal que H viene dada por:

$$0 = (1, p_{\mathcal{R}'}^t) \left(\begin{array}{c|c|c|c} \tilde{a} & 0 & 0 & \tilde{z}_{n_1+n_2+1} \cdots \tilde{z}_n \\ \hline 0 & r_1 & & \\ & \ddots & & \\ & & r_{n_1} & \\ \hline 0 & & -r_{n_1+1} & \\ & & \ddots & \\ & & & -r_{n_1+n_2} \\ \hline \tilde{z}_{n_1+n_2+1} & & & 0 \\ \vdots & & & \\ \tilde{z}_n & & & 0 \end{array} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ p_{\mathcal{R}'} \end{pmatrix}$$

donde $r_k > 0$ para todo $k = 1, \dots, n_1 + n_2$. Distinguiamos ahora en función de si \tilde{z} es nulo o no:

1. El vector columna \tilde{z} es nulo, $\tilde{z} = \vec{0}$:

En este caso, si $p_{\mathcal{R}'}^t = (s_1, \dots, s_n)$, los puntos de H cumplen:

$$r_1 s_1^2 + \cdots + r_{n_1} s_{n_1}^2 - r_{n_1+1} s_{n_1+1}^2 - r_{n_1+n_2} s_{n_1+n_2}^2 = -\tilde{a}$$

donde $r_k > 0$ para todo $k = 1, \dots, n_1 + n_2$. Además, podemos suponer que el número de coeficientes positivos es mayor o igual que el número de valores negativos, cambiando de signo la igualdad si hiciese falta. Además, si $\tilde{a} \neq 0$, podemos dividir entre \tilde{a} de forma que esté igualado a ± 1 . Por tanto, haciendo esos cambios tenemos que:

$$R_1 s_1^2 + \cdots + R_m s_m^2 - R_{m+1} s_{m+1}^2 - R_l s_l^2 = \varepsilon$$

donde los R_i son números positivos, $m \geq l/2$ y $\varepsilon \in \{-1, 0, 1\}$.

Por último, veamos que si $\varepsilon = 0$, podemos dividir entre R_l de manera que el coeficiente de s_l^2 sea 1.

2. El vector columna \tilde{z} no es nulo, $\tilde{z} \neq \vec{0}$:

Ya que $\tilde{w}^t = (\tilde{z}_{n_1+n_2+1}, \dots, \tilde{z}_n)_{\mathcal{B}'}$ $\neq \vec{0}$, ampliamos a una base ortonormal de $\mathbb{R}^{n-(n_1+n_2)}$ dada por $\mathcal{B}''_{\tilde{w}} = \{e_{n_1+n_2+1}, \dots, e_n\}$, con $e_n = \frac{\tilde{w}}{\|\tilde{w}\|}$. Por tanto, consideramos el sistema de referencia \mathcal{R}'' tal que:

$$M(\text{Id}_A, \mathcal{R}'', \mathcal{R}') = \left(\begin{array}{c|c|c} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & I_{n_1+n_2} & 0 \\ \hline 0 & 0 & B \end{array} \right)$$

donde $B = M(\mathcal{B}''_{\tilde{w}}, \mathcal{B}'_{\tilde{w}})$ y $\mathcal{B}'_{\tilde{w}}$ son los $n - (n_1 + n_2)$ últimos vectores de \mathcal{B}' .

Como en este caso $\tilde{b} = 0$, tenemos que $\tilde{\tilde{z}} = B^t \tilde{w} = (0, \dots, 0, \|w\|)^t$. Por tanto, en \mathcal{R}'' tenemos que H viene dada por:

$$0 = (1, p_{\mathcal{R}''}^t) \left(\begin{array}{c|cc|cc} \tilde{\tilde{a}} & 0 & & 0 & 0 & \cdots & \|w\| \\ \hline 0 & r_1 & & & & & \\ & & \ddots & & & & \\ & & & r_{n_1} & & & \\ \hline 0 & & & & -r_{n_1+1} & & \\ & & & & & \ddots & \\ & & & & & & -r_{n_1+n_2} \\ \hline 0 & & & & & & 0 \\ \vdots & & & & & & \\ \|w\| & & & & & & 0 \end{array} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ p_{\mathcal{R}''} \end{pmatrix}$$

Por último, veamos que hay un cambio de origen del sistema de referencia de manera de manera que la matriz es idéntica a excepción de que $\tilde{\tilde{a}} = 0$.

Sea el sistema de referencia \mathcal{R}''' tal que:

$$M(Id_A, \mathcal{R}''', \mathcal{R}'') = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & I_{n-2} & 0 \\ b_n & 0 & 1 \end{array} \right)$$

Tenemos que $\tilde{\tilde{z}} = \tilde{z}$, pero $\tilde{\tilde{a}} \neq \tilde{a}$. Veamos su nuevo valor:

$$\begin{aligned} \tilde{\tilde{a}} &= \tilde{a} + (0, \dots, b_n) \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ \|w\| \end{pmatrix} + (0, \dots, \|w\|) \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} + (0, \dots, b_n) \cancel{\begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix}} = \\ &= \tilde{a} + 2b_n\|w\| = 0 \iff b_n = \frac{-\tilde{a}}{2\|w\|} \end{aligned}$$

Por tanto, si $p_{\mathcal{R}'''}^t = (t_1, \dots, t_n)$, los puntos de H cumplen:

$$r_1 t_1^2 + \dots + r_{n_1} t_{n_1}^2 - r_{n_1+1} t_{n_1+1}^2 - r_{n_1+n_2} t_{n_1+n_2}^2 + 2\|w\| t_n = 0$$

donde $r_k > 0$ para todo $k = 1, \dots, n_1 + n_2$. Además, podemos suponer que el número de coeficientes positivos es mayor o igual que el número de valores negativos, cambiando de signo la igualdad si hiciese falta.

Por último, pasamos el término $\pm 2\|w\| t_n$ al término de la derecha, y dividimos entre $\mp\|w\|$. De tal forma, tenemos que queda:

$$R_1 t_1^2 + \dots + R_m t_m^2 - R_{m+1} t_{m+1}^2 - R_l t_l^2 = 2t_n$$

donde los R_i son números positivos, $m \geq l/2$ y $l < n$.

Por tanto, de toda la discusión en esta sección tenemos el siguiente teorema:

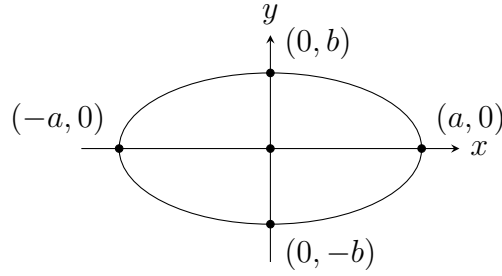


Figura 3.1: Elipse.

Teorema 3.1. *Sea H una hipercuádrlica de un espacio afín euclídeo \mathbb{E}^n . Entonces existe un sistema de referencia euclídeo en el cual la ecuación cuadrática que define a H en ese sistema de referencia es de una de las siguientes formas:*

1. $R_1x_1^2 + \cdots + R_mx_m^2 - R_{m+1}x_{m+1}^2 - R_lx_l^2 = \varepsilon$, donde $R_i > 0 \forall i$, $m \geq l/2$ y $\varepsilon \in \{-1, 0, 1\}$. Además, si $\varepsilon = 0$ se tiene que $R_l = 1$.
2. $R_1x_1^2 + \cdots + R_mx_m^2 - R_{m+1}x_{m+1}^2 - R_lx_l^2 = 2x_n$, donde $R_i > 0 \forall i$, $m \geq l/2$ y $l < n$.

3.2.1. Clasificación de las cónicas

En esta sección, vamos a clasificar las hipercuádrlicas en el plano euclídeo, también llamadas **cónicas**. Estas son las conocidas elipses, hipérbolas, etc².

Usando el Teorema 3.1, podemos hacer la distinción de los posibles casos. Notemos que, como $R_i > 0$ para todo i , y $f: \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ dada por $f(x) = \frac{1}{x^2}$ es biyectiva, notemos que es indiferente poner R_i que $\frac{1}{(R'_i)^2}$. Por tanto, los distintos casos son:

1. $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = -1$.

Tenemos que no es posible, por lo que $H = \emptyset$.

2. $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$.

Se trata de una elipse con semiejes a y b . Tenemos que sus puntos de corte con los ejes son:

$$\begin{cases} x = 0 \implies y = \pm b \\ y = 0 \implies x = \pm a \end{cases}$$

Su representación se puede ver en la Figura 3.1.

3. $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 0$.

Tenemos que es un único punto, el origen: $H = \{(0, 0)\}$.

²El lector posiblemente las conozca de dibujo técnico, etc. No obstante, estas figuras del plano matemáticamente simplemente se definen como los puntos del plano que cumplen cada ecuación. Más adelante veremos que existen determinados elementos de importancia, como puede ser los focos, ejes, etc; aunque posiblemente el lector ya conozca de su existencia.

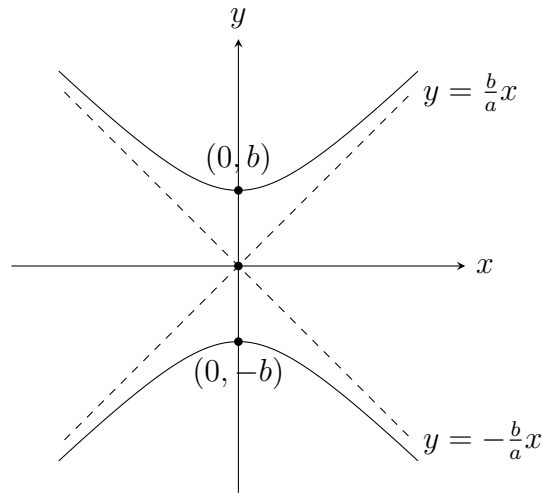


Figura 3.2: Hipérbola que corta al eje Y.

4. $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = -1.$

Se trata de una hipérbola. Calculemos sus puntos de corte:

$$\begin{cases} x = 0 \implies y = \pm b \\ y = 0 \implies \nexists \end{cases}$$

Por tanto, tan solo corta al eje Y. Calculemos sus asíntotas oblicuas³. Tenemos que $y = f(x) = \pm b\sqrt{1 + \frac{x^2}{a^2}}$. Si la asíntota oblicua es $y = mx + n$, calculamos m, n :

$$\begin{aligned} m &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{f(x)}{x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\pm b\sqrt{1 + \frac{x^2}{a^2}}}{x} = \lim_{x \rightarrow \infty} \pm b\sqrt{\frac{1}{x^2} + \frac{1}{a^2}} = \pm \frac{b}{a} \\ n &= \lim_{x \rightarrow \infty} f(x) - mx = \lim_{x \rightarrow \infty} \pm b\sqrt{1 + \frac{x^2}{a^2}} \mp \frac{bx}{a} = \lim_{x \rightarrow \infty} \pm b \left[\sqrt{1 + \frac{x^2}{a^2}} - \frac{x}{a} \right] = \\ &= \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\pm b \left[1 + \frac{x^2}{a^2} - \frac{x^2}{a^2} \right]}{\sqrt{1 + \frac{x^2}{a^2}} + \frac{x}{a}} = 0 \end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que tiene dos asíntotas oblicuas, $y = \pm \frac{b}{a}x$. Está representada en la Figura 3.2.

5. $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1.$

Se trata también de una hipérbola. Calculemos sus puntos de corte:

$$\begin{cases} x = 0 \implies \nexists \\ y = 0 \implies x = \pm a \end{cases}$$

³Aunque este concepto no se haya introducido en la carrera de Matemáticas, se da por conocido de Bachillerato solo con el objeto de hacer ver que se trata de una hipérbola

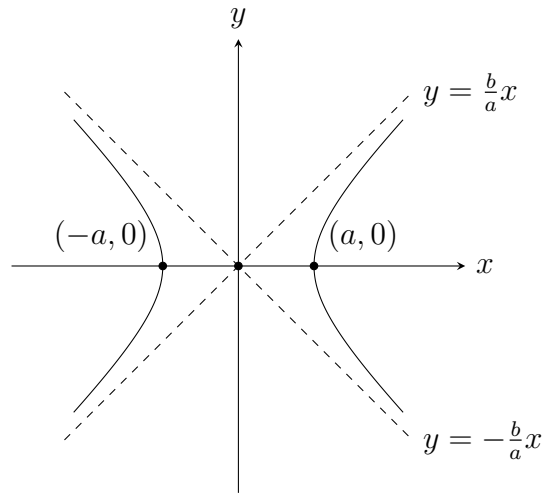
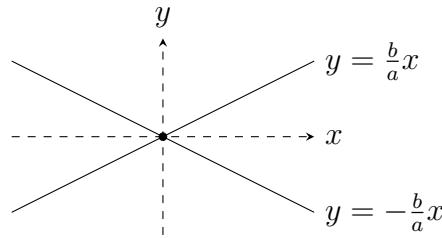
Figura 3.3: Hipérbola que corta al eje X .

Figura 3.4: Par de rectas secantes.

Por tanto, tan solo corta al eje X . Además, tiene las dos mismas dos asíntotas oblicuas, $y = \pm \frac{b}{a}x$. Está representada en la Figura 3.3.

6. $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 0$.

Tenemos que:

$$0 = \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = \left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right) \left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right)$$

Por tanto, se trata de un par de rectas secantes; representadas en la Figura 3.4.

7. $\frac{x^2}{a^2} = -1$.

Tenemos que no es posible, por lo que $H = \emptyset$.

8. $\frac{x^2}{a^2} = 1$

Tenemos que:

$$x^2 = a^2 \implies x = \pm a$$

Por tanto, se trata de un par de rectas paralelas; representadas en la Figura 3.5.

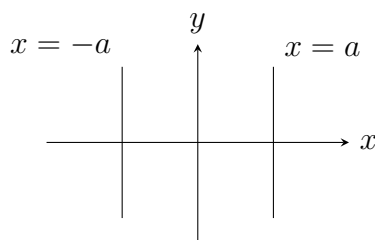


Figura 3.5: Par de rectas paralelas.

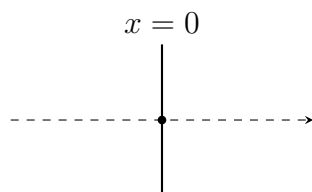


Figura 3.6: Recta (doble).

9. $\frac{x^2}{a^2} = 0$.

Tenemos que:

$$x^2 = 0 \implies x = 0$$

Por tanto, se trata de una recta (doble); representada en la Figura 3.6.

10. $\frac{x^2}{a^2} = 2y$.

Tenemos que:

$$y = \frac{x^2}{2a^2}$$

Por tanto, se trata de una parábola; representada en la Figura 3.7.

3.2.2. Clasificación de las cuádricas

En esta sección, vamos a clasificar las hipercuádricas en el espacio euclídeo, también llamadas **cuádricas**⁴.

⁴Estas posiblemente serán menos conocidas para el lector, pero son las equivalentes en el espacio.

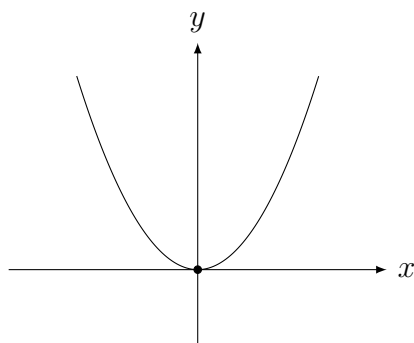


Figura 3.7: Parábola.

Usando el Teorema 3.1, podemos hacer la distinción de los posibles casos. Notemos que, como $R_i > 0$ para todo i , y $f : \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ dada por $f(x) = \frac{1}{x^2}$ es biyectiva, notemos que es indiferente poner R_i que $\frac{1}{(R'_i)^2}$. Por tanto, los distintos casos son:

$$1. \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 0.$$

Se trata de un punto, el origen. $H = \{(0, 0, 0)\}$.

$$2. \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

Se trata de un elipsoide de semiejes a, b y c .

Vemos fácilmente que los cortes con cada plano son elipses.

$$3. \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = -1.$$

No es posible, por lo que $H = \emptyset$.

$$4. \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 0.$$

Se trata de un cono elíptico. Tenemos que:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = \frac{z^2}{c^2}$$

Por tanto, para cada valor de z , tenemos una elipse que crece de tamaño conforme lo hace $|z|$. Además, para $z = 0$ tenemos un único punto, el origen.

Veamos ahora los cortes con los planos $x = 0$ e $y = 0$:

$$x = 0 \implies \frac{y^2}{b^2} = \frac{z^2}{c^2} \implies \begin{cases} y = \pm \frac{b}{c}z \\ x = 0 \end{cases}$$

$$y = 0 \implies \frac{x^2}{a^2} = \frac{z^2}{c^2} \implies \begin{cases} x = \pm \frac{a}{c}z \\ y = 0 \end{cases}$$

Por tanto, tenemos que son dos rectas en cada caso.

$$5. \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1.$$

Se trata de un hiperboloide reglado o de una hoja. Tenemos que:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 + \frac{z^2}{c^2}$$

Por tanto, para cada valor de z , tenemos una elipse que crece de tamaño conforme lo hace $|z|$. Además, para $z = 0$ también tenemos una elipse.

Veamos ahora los cortes con los planos $x = 0$ e $y = 0$:

$$x = 0 \implies \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$$

$$y = 0 \implies \frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1$$

Por tanto, tenemos que en cada caso es una hipérbola que no corta al eje Z .

Veamos ahora por qué se llama “reglado”. Tenemos que:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = 1 - \frac{y^2}{b^2} \implies \left(\frac{x}{a} + \frac{z}{c}\right) \left(\frac{x}{a} - \frac{z}{c}\right) = \left(1 + \frac{y}{b}\right) \left(1 - \frac{y}{b}\right) \implies \frac{\left(\frac{x}{a} - \frac{z}{c}\right)}{\left(1 - \frac{y}{b}\right)} = \frac{\left(1 + \frac{y}{b}\right)}{\left(\frac{x}{a} + \frac{z}{c}\right)} := \mu$$

Por tanto, tenemos la siguiente familia de rectas:

$$r_\lambda \equiv \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{x}{a} - \frac{z}{c}\right) = \mu \left(1 - \frac{y}{b}\right) \\ \left(1 + \frac{y}{b}\right) = \mu \left(\frac{x}{a} + \frac{z}{c}\right) \end{array} \right.$$

Por ello, se llama hiperboloide reglado, ya que está formado por una familia de rectas.

$$6. \quad \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1.$$

Se trata de un hiperboloide elíptico o de dos hojas. Tenemos que:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = -1 + \frac{z^2}{c^2}$$

Por tanto, para cada valor de z tal que $|z| > c$, tenemos una elipse que crece de tamaño conforme lo hace $|z|$. Además, para $z = \pm c$, tenemos un único punto. Para $z \in]-c, c[$, tenemos que no existe ningún punto de la cuádrlica.

Veamos ahora los cortes con los planos $x = 0$ e $y = 0$:

$$\begin{aligned} x = 0 &\implies \frac{y^2}{b^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1 \\ y = 0 &\implies \frac{x^2}{a^2} - \frac{z^2}{c^2} = -1 \end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que en cada caso es una hipérbola que corta al eje Z y no corta a los otros ejes.

$$7. \quad \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 0.$$

Tenemos que $H \equiv x = y = 0$, por lo que se trata de una recta.

$$8. \quad \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Para cada valor de z tenemos la misma elipse, por lo que se trata de un cilindro elíptico.

$$9. \quad \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = -1.$$

No es posible⁵, por lo que $H = \emptyset$.

⁵Esta cuádrlica también se denomina cilindro imaginario

$$10. \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 0.$$

Tenemos que:

$$\left(\frac{x}{a} - \frac{y}{b}\right) \left(\frac{x}{a} + \frac{y}{b}\right) = 0 \implies x = \pm \frac{a}{b}y$$

Por tanto, tenemos que son dos planos. Además, su intersección es la recta $x = y = 0$; es decir, el eje Z .

Por tanto, son dos planos secantes.

$$11. \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Por tanto, para cada valor de z , tenemos la misma parábola que no corta al eje Y .

Se denomina cilindro hiperbólico.

$$12. \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = -1.$$

Por tanto, para cada valor de z , tenemos la misma parábola que no corta al eje X .

En este caso también se denomina cilindro hiperbólico.

$$13. \frac{x^2}{a^2} = 0.$$

En este caso tengo $x = 0$; por lo que es un plano (doble).

$$14. \frac{x^2}{a^2} = 1.$$

En este caso tengo $x = \pm a$; por lo que es un par de planos paralelos.

$$15. \frac{x^2}{a^2} = -1.$$

No es posible, por lo que $H = \emptyset$.

$$16. \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 2z.$$

Se trata de un paraboloide elíptico.

Para cada valor de $z > 0$, tenemos una elipse que crece de tamaño conforme lo hace z . Para $z = 0$ tenemos un único punto, el origen; y para $z < 0$ tenemos que no es posible.

Veamos ahora los cortes con los planos $x = 0$ e $y = 0$:

$$x = 0 \implies \frac{y^2}{b^2} = 2z \implies z = \frac{y^2}{2b^2}$$

$$y = 0 \implies \frac{x^2}{a^2} = 2z \implies z = \frac{x^2}{2a^2}$$

Por tanto, tenemos que son dos parábolas en cada caso.

17. $\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 2z.$

Se trata de un paraboloide hiperbólico.

Para cada valor de $z > 0$, tenemos una hipérbola que corta al plano $y = 0$ que con valores de los semiejes distintos.

Para $z = 0$, tenemos dos rectas secantes, $r \equiv \begin{cases} z = 0 \\ y = \pm \frac{b}{a}x \end{cases}$

Para cada valor de $z < 0$, tenemos una hipérbola que corta al plano $x = 0$ que con valores de los semiejes distintos.

Veamos ahora los cortes con los planos $x = 0$ e $y = 0$:

$$x = 0 \implies \frac{y^2}{b^2} = -2z \implies z = -\frac{y^2}{2b^2}$$

$$y = 0 \implies \frac{x^2}{a^2} = 2z \implies z = \frac{x^2}{2a^2}$$

Por tanto, tenemos que son dos parábolas en cada caso, una cóncava hacia arriba y otra cóncava hacia abajo.

18. $\frac{x^2}{a^2} = 2z.$

Para cualquier y , se tiene que:

$$z = \frac{x^2}{2a^2}$$

Es decir, tenemos que es siempre la misma parábola. Se denomina cilindro parabólico.

3.3. Relación de Ejercicios

Para ver ejercicios relacionados con este tema, consultar la sección 5.3.

4. Espacio Proyectivo

Sea $V^{n+1}(\mathbb{R})$ un espacio vectorial, y consideramos $V^* = V \setminus \{0\}$.

En V^* definimos la siguiente relación de equivalencia:

$$v_1 \sim v_2 \iff v_2 = \lambda v_1 \quad \lambda \in \mathbb{R}^*$$

Definimos el espacio proyectivo de dimensión n como el espacio vectorial cociente mediante dicha relación de equivalencia \sim :

$$V^* / \sim = \{[v] \mid v \in V^*\}$$

Notamos dicho espacio cociente como $P(V)$. En el caso particular de $V = \mathbb{R}^{n+1}$, tenemos que se denota de la siguiente forma:

$$(\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}) / \sim = P(\mathbb{R}^{n+1}) = \mathbb{P}^n$$

Idea también de la Esfera. Pedirla o mirar de topo

4.1. Subespacios Proyectivos

Consideramos la proyección según dicha clase de equivalencia:

$$\begin{aligned} \pi : V^* &\longrightarrow P(V) \\ v &\longmapsto [v] \end{aligned}$$

Definición 4.1. Dado el espacio proyectivo $P(V)$, y un subconjunto $X \subset P(V)$, diremos que X es un subespacio proyectivo si $\pi^{-1}(X) \cup \{0\} = \tilde{X}$ es un subespacio vectorial.

Además, $\dim X = \dim \tilde{X} - 1$.

Por convenio, diremos que \emptyset es un subespacio proyectivo de dimensión -1 .

Proposición 4.1. Sea V un espacio vectorial, y $U \subset V$ un subespacio vectorial. Entonces:

$$U = \pi^{-1}(\pi(U)) \cup \{0\}$$

Operaciones entre espacios proyectivos

Sea $P(V^{n+1})$ un espacio proyectivo, y sean X, Y dos subespacios proyectivos de forma que $X = \pi(\tilde{X} - \{0\})$, $Y = \pi(\tilde{Y} - \{0\})$.

Tenemos que:

$$X \cap Y = \pi(\tilde{X} - \{0\}) \cap \pi(\tilde{Y} - \{0\}) = \pi(\tilde{X} \cap \tilde{Y} \setminus \{0\})$$

Definición 4.2. Sea $X \subset P(V^{n+1})$. Llamamos subespacio proyectivo generado por C , notado por $\langle C \rangle$, al menor subespacio proyectivo que lo contenga. Es decir,

$$\bigcap \{X \supset C \mid X \text{ es un subespacio proyectivo}\}$$

A partir de esa definición, tenemos que:

$$X + Y = \langle X \cup Y \rangle = \pi(\tilde{X} + \tilde{Y})$$

Proposición 4.2. *Tenemos que:*

$$\dim(X + Y) = \dim X + \dim Y - \dim(X \cap Y)$$

Proposición 4.3. *En un plano proyectivo, dos rectas paralelas siempre se intersecan.*

Algunas propiedades que tenemos son:

1. Si $X \subset Y$ son subespacios proyectivos, entonces:

$$\dim X \leq \dim Y$$

Además, se da la igualdad si y solo si $X = Y$.

4.2. Coordenadas Homogéneas

Sea \mathcal{B} una base de V^{n+1} , y consideramos $v \in V^{n+1} \setminus \{0\}$. Sea $v = (x_0, \dots, x_n)_{\mathcal{B}}$. Definimos las coordenadas homogéneas de $[v] \in P(V^{n+1})$ como las coordenadas de dicho v :

$$[v] \equiv (x_0 : \dots : x_n)$$

Notemos que, como $[v] = [\lambda v]$, tenemos que dichas coordenadas son únicas salvo factores de proporcionalidad.

Las ecuaciones paramétricas o implícitas de X son las de \tilde{X} .

Ejemplo. Sea $p = (1 : 2 : 3), q = (0 : 1 : 2) \in \mathbb{P}^2$. Calcular la recta proyectiva que une ambos planos.

Tenemos que $p = [(1, 2, 3)], q = [(0, 1, 2)]$. Entonces:

$$p + q = \pi(\mathcal{L}\{(1, 2, 3), (0, 1, 2)\})$$

Por tanto, tenemos que:

$$(x : y : z) \in p + q \iff (x, y, z) = \alpha(1, 2, 3) + \beta(0, 1, 2)$$

La ecuación implícita es:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & x \\ 2 & 1 & y \\ 3 & 2 & z \end{vmatrix}$$

4.3. Proyectividades

$$\begin{array}{ccc} V_1 & \xrightarrow{\tilde{f}} & V_2 \\ \downarrow & & \downarrow \\ P(V_1) & \xrightarrow{f} & P(V_2) \end{array}$$

Definición 4.3 (Proyectividad). Diremos que una aplicación $f : P(V_1) \rightarrow P(V_2)$ es una proyectividad si y solo si existe $\tilde{f} : V_1 \rightarrow V_2$ lineal e inyectiva tal que

$$f([v]) = [\tilde{f}(v)]$$

Diremos que \tilde{f} es la lineal asociada a f .

Notemos que se pide que sea inyectiva para poder proyectar.

Notemos que esta es única salvo proporcionalidad:

Proposición 4.4. \tilde{f} y \tilde{g} son lineales asociadas a f si y solo si $\tilde{f} = \lambda \tilde{g}$.

Proposición 4.5. Las proyectividades conservan la dimensión. Es decir, si f es una proyectividad y X es un subespacio proyectivo, entonces $f(X)$ es un subespacio proyectivo. Además,

$$\dim f(X) = \dim X$$

Demostración. Tenemos que $f(X) = [\tilde{f}(\tilde{X})]$

□

Determinar f es equivalente a determinar \tilde{f} .

TERMINAR

5. Relaciones de Ejercicios

5.1. El Espacio Afín.

Ejercicio 5.1.1. Sea $\mathcal{A} = \{p\}$ un conjunto con un único elemento. Encuentra qué ha de cumplir un espacio vectorial V para que \mathcal{A} pueda dotarse de estructura de espacio afín de forma que V sea su espacio de direcciones.

Por la segunda condición de espacio afín, es necesario que exista una biyección $\varphi_p : \mathcal{A} \rightarrow V$. Por tanto, es necesario que $1 = |\mathcal{A}| = |V|$. Por tanto, se tiene que

$$\vec{A} = V = \{0\}.$$

Ejercicio 5.1.2. Sea V un espacio vectorial real. Se considera la siguiente aplicación $\Phi : V \times V \rightarrow V$ dada por $\Phi(u, v) = 2u - v$, que denotaremos por $\Phi(u, v) = \vec{uv}$. Estudiar si Φ induce o no una estructura de espacio afín en V .

Consideramos $u, v, w \in V$. Veamos que para dicha aplicación no se cumple la igualdad triangular:

$$\vec{uv} + \vec{vw} = 2u - v + 2v - w = 2u + v - w \neq 2u - w = \vec{uw}$$

Por tanto, no induce una estructura de espacio afín.

Ejercicio 5.1.3. En el espacio $\mathcal{P}_2(\mathbb{R})$ de polinomios de grado 2 con coeficientes reales, justifica si los siguientes subconjuntos son subespacios afines de $\mathcal{P}_2(\mathbb{R})$. En caso afirmativo, encuentra el subespacio afín paralelo que pasa por el polinomio $p_0(x) = 1 + x^2$.

1. $S = \{a_0^3 + a_1x - x^2 \mid a_0, a_1 \in \mathbb{R}\}.$

$$S = -x^2 + \{a_0^3 + a_1x \mid a_0, a_1 \in \mathbb{R}\} \stackrel{(*)}{=} -x^2 + \{b_0 + a_1x \mid b_0, a_1 \in \mathbb{R}\} = -x^2 + \mathcal{L}\{1, x\}$$

donde en $(*)$ he aplicado que $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ dada por $f(x) = x^3$ es una biyección, por lo que $\forall a_0^3 \in \mathbb{R}, \exists_1 b_0 \in \mathbb{R} \mid a_0^3 = b_0$.

Por tanto, sí es un plano afín con variedad de direcciones $\mathcal{L}\{1, x\}$.

El subespacio afín paralelo que pasa por el polinomio $p_0(x) = 1 + x^2$ es:

$$S' = p_0 + \mathcal{L}\{1, x\} = \{1 + x^2 + b_0 + a_1x \mid b_0, a_1 \in \mathbb{R}\}$$

$$2. T = \{p(x) \in P_2(\mathbb{R}) \mid p(1) = 2, p'(0) = 1\}.$$

Notando $p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$, se tiene que las ecuaciones cartesianas son:

$$\begin{aligned} p'(0) &= 1 = a_1 \\ p(1) &= 2 = a_0 + a_1 + a_2 \implies a_0 = 1 - a_2 \end{aligned}$$

Por tanto, $p(x) = 1 - a_2 + x + a_2x^2 = 1 + x + a_2(x^2 - 1)$, por lo que:

$$T = \{1 + x + a_2(x^2 - 1) \mid a_2 \in \mathbb{R}\} = 1 + x + \mathcal{L}\{x^2 - 1\}$$

Por tanto, se trata de una recta afín con variedad de direcciones $\mathcal{L}(x^2 - 1)$.

El subespacio afín paralelo que pasa por el polinomio $p_0(x) = 1 + x^2$ es:

$$T' = p_0 + \mathcal{L}\{x^2 - 1\} = \{1 + x^2 + a_2(x^2 - 1) \mid a_2 \in \mathbb{R}\}$$

Ejercicio 5.1.4. En el espacio $\mathcal{M}_2(\mathbb{C})$ de matrices cuadradas de orden 2 con coeficientes complejos, justifica si los siguientes subconjuntos son subespacios afines de $\mathcal{M}_2(\mathbb{C})$ y, en caso afirmativo, encuentra el subespacio afín paralelo que pasa por la matriz $\begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 0 \end{pmatrix}$.

$$1. S = \{A \in \mathcal{M}_2(\mathbb{C}) \mid \text{tr}(A) = 1 + i\},$$

Empezamos con el primer subconjunto. Tenemos que:

$$\begin{aligned} S &= \left\{ \begin{pmatrix} z_1 & z_2 \\ z_3 & z_4 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_2(\mathbb{C}) \mid z_1 + z_4 = 1 + i \right\} = \\ &= \left\{ \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} z_1 & z_2 \\ z_3 & -z_1 \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_2(\mathbb{C}) \mid z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{C} \right\} = \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{pmatrix} + \left\{ \begin{pmatrix} z_1 & z_2 \\ z_3 & -z_1 \end{pmatrix} \mid z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{C} \right\} \end{aligned}$$

Por tanto, sí es un subespacio afín. El subespacio afín paralelo pedido es:

$$S' = \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} + \left\{ \begin{pmatrix} z_1 & z_2 \\ z_3 & -z_1 \end{pmatrix} \mid z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{C} \right\}$$

$$2. T = \{A \in \mathcal{M}_2(\mathbb{C}) \mid \det(A) = 1\}.$$

Supongamos que sí lo es, y por consiguiente que es un espacio afín. Fijada

$A = \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \in T$, tenemos la siguiente biyección:

$$\begin{aligned} \varphi_A : T &\longrightarrow \overrightarrow{T} \\ B &\longmapsto \overrightarrow{AB} = B - A \end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que:

$$\varphi_A \left(\begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} \right) = \begin{pmatrix} 0 & i \\ i & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix}$$

Por tanto, $v = \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \in \vec{T}$; y como \vec{T} es un espacio vectorial, tiene que $7v \in \vec{T}$. Como φ_A es una biyección, tenemos que $\exists C \in T$ tal que $7v = C - A \implies C = 7v + A$. Veamos el valor de C :

$$C = 7v + A = \begin{pmatrix} 7 & 7i \\ 7i & 7 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 & 7i \\ 7i & 6 \end{pmatrix}$$

No obstante, $|C| = 36 - 49i^2 \neq 1$, por lo que $C \notin T$, llegando a una contradicción. Por tanto, no es un subespacio afín.

Ejercicio 5.1.5. Sean $a, b : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ funciones continuas. Definimos los siguientes conjuntos:

$$V = \{f \in C^1(\mathbb{R}) \mid f'(x) + a(x)f(x) = 0, \forall x \in \mathbb{R}\},$$

$$\mathcal{A} = \{f \in C^1(\mathbb{R}) \mid f'(x) + a(x)f(x) = b(x), \forall x \in \mathbb{R}\},$$

donde $C^1(\mathbb{R})$ es el espacio vectorial real de las funciones de clase C^1 sobre los reales. Se pide lo siguiente:

1. Demostrar que V es un espacio vectorial real.

Como tenemos que $C^1(\mathbb{R})$ es un espacio vectorial, comprobemos que V es un subespacio vectorial suyo. Sean $f, g \in V$:

a) Veamos si $f + g \in V$:

$$(f+g)'(x) + a(x)(f+g)(x) = f'(x) + g'(x) + a(x)f(x) + a(x)g(x) = 0 + 0 = 0$$

b) Veamos si, dado $c \in \mathbb{R}$, se tiene que $cf \in V$:

$$(cf)'(x) + a(x)(cf)'(x) = c[f'(x) + a(x)f(x)] = 0$$

Por tanto, V es un subespacio vectorial real, y por tanto es un espacio vectorial real.

2. Supongamos sabido que $\mathcal{A} \neq \emptyset$. Ver si \mathcal{A} es un espacio afín sobre V cuando, para cada par de funciones $f, g \in \mathcal{A}$, definimos $\vec{fg} = g(x)f(x)$.

En primer lugar, se ha de dar la igualdad triangular:

$$\vec{fg} + \vec{gh} = g(x)f(x) + g(x)h(x) \neq h(x)f(x) = \vec{fh}$$

Por tanto, como no se da la igualdad triangular, tenemos que no es un espacio afín sobre V . Para que lo fuese, tendría que ser $\vec{fg} = g(x) - f(x)$.

Ejercicio 5.1.6 (Producto de espacios afines). Sean \mathcal{A}_1 y \mathcal{A}_2 dos espacios afines sobre espacios vectoriales reales V_1 y V_2 . Se pide lo siguiente:

1. Demostrar que el producto cartesiano $\mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2$ es un espacio afín sobre $V_1 \times V_2$ cuando definimos:

$$\overrightarrow{(p_1, p_2)(q_1, q_2)} = (\overrightarrow{p_1 q_1}, \overrightarrow{p_2 q_2}).$$

Veamos que $\vec{\cdot}$ cumple las dos condiciones necesarias para que sea un espacio afín:

a) Comprobamos la igualdad triangular:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{(p_1, p_2)(q_1, q_2)} + \overrightarrow{(q_1, q_2)(t_1, t_2)} &= \overrightarrow{(p_1 q_1, p_2 q_2)} + \overrightarrow{(q_1 t_1, q_2 t_2)} = \\ &= \overrightarrow{(p_1 q_1 + q_1 t_1, p_2 q_2 + q_2 t_2)} \stackrel{(*)}{=} \overrightarrow{(p_1 t_1, p_2 t_2)} = \overrightarrow{(p_1, p_2)(t_1, t_2)} \end{aligned}$$

donde en $(*)$ he aplicado que V_1, V_2 son, en concreto, espacios afines.

b) Comprobamos ahora que, fijado $p_1 \in \mathcal{A}_1, p_2 \in \mathcal{A}_2$, se tiene que la siguiente aplicación es biyectiva:

$$\begin{aligned} \varphi_{p_1, p_2} : \mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2 &\longrightarrow V_1 \times V_2 \\ (q_1, q_2) &\longmapsto \overrightarrow{(p_1, p_2)(q_1, q_2)} \end{aligned}$$

Vemos ahora que, para $i = 1, 2$, la siguiente aplicación es biyectiva:

$$\begin{aligned} \varphi_{p_i} : \mathcal{A}_i &\longrightarrow V_i \\ q_i &\longmapsto \overrightarrow{p_i q_i} \end{aligned}$$

Tenemos además lo siguiente:

$$\overrightarrow{(p_1, p_2)(q_1, q_2)} = (q_1, q_2) - (p_1, p_2) = (q_1 - p_1, q_2 - p_2) = (\overrightarrow{p_1 q_1}, \overrightarrow{p_2 q_2})$$

Por tanto, tenemos que la función queda como:

$$\begin{aligned} \varphi_{p_1, p_2} : \mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2 &\longrightarrow V_1 \times V_2 \\ (q_1, q_2) &\longmapsto (\overrightarrow{p_1 q_1}, \overrightarrow{p_2 q_2}) \end{aligned}$$

Esta es claramente biyectiva, por serlo en cada una de las variables.

2. Supongamos que $\dim(\mathcal{A}_1) = m$ y $\dim(\mathcal{A}_2) = n$. Sea $\mathcal{R}_i = \{o_i, \mathcal{B}_i\}$ un sistema de referencia en \mathcal{A}_i , $i = 1, 2$. Pongamos $\mathcal{B}_1 = \{u_1, \dots, u_m\}$ y $\mathcal{B}_2 = \{v_1, \dots, v_n\}$. Demostrar que el par $\mathcal{R}_1 \times \mathcal{R}_2 = \{(o_1, o_2), \mathcal{B}_1 \times \mathcal{B}_2\}$, donde

$$\mathcal{B}_1 \times \mathcal{B}_2 = \{(u_1, 0), \dots, (u_m, 0), (0, v_1), \dots, (0, v_n)\},$$

es un sistema de referencia en $\mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2$. A partir de aquí concluir el siguiente resultado: $\dim(\mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2) = n + m$.

Para ver que es un sistema de referencia, hemos de ver dos aspectos. En primer lugar, es necesario que el origen $(o_1, o_2) \in \mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2$, lo cual es evidente ya que $o_i \in \mathcal{A}_i$ para $i = 1, 2$. Veamos ahora que $\mathcal{B}_1 \times \mathcal{B}_2$ es una base:

$$\begin{aligned} (0, 0) &= a_1(u_1, 0) + \dots + a_m(u_m, 0) + b_1(0, v_1) + \dots + b_n(0, v_n) = \\ &= (a_1 u_1 + \dots + a_m u_m, b_1 v_1 + \dots + b_n v_n) \quad a_i, b_i \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

Por tanto, como ambas son una base en el respectivo espacio vectorial, tenemos que $a_i, b_j = 0$, $\forall i, j$, es decir, $\mathcal{B}_1 \times \mathcal{B}_2$ es una base de $V_1 \times V_2$.

Por tanto, tenemos que $\mathcal{R}_1 \times \mathcal{R}_2$ es un sistema de referencia. Además, como la base asociada tiene $n + m$ vectores linealmente independientes, implica que $\dim \overrightarrow{\mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2} = n + m$ y, por tanto, $\dim \mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2 = n + m$.

3. Sea $(p_1, p_2) \in \mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2$. ¿Cómo se relacionan las coordenadas de (p_1, p_2) en $\mathcal{R}_1 \times \mathcal{R}_2$ con las coordenadas de p_i en \mathcal{R}_i , $i = 1, 2$?

Sea $p_{1\mathcal{R}_1} = (a_1, \dots, a_m)$ y $p_{2\mathcal{R}_2} = (b_1, \dots, b_n)$. Entonces, por definición de coordenadas tenemos que $p_1 = o_1 + a_1u_1 + \dots + a_mu_m$. Análogamente, tenemos que $p_2 = o_2 + b_1v_1 + \dots + b_nv_n$. Por tanto, tenemos que:

$$\begin{aligned}(p_1, p_2) &= (o_1 + a_1u_1 + \dots + a_mu_m, o_2 + b_1v_1 + \dots + b_nv_n) = \\ &= (o_1, o_2) + a_1(u_1, 0) + \dots + a_m(u_m, 0) + b_1(0, v_1) + \dots + b_n(0, v_n)\end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que $(p_1, p_2)_{\mathcal{R}_1 \times \mathcal{R}_2} = (a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_n)$. Como podemos ver, se concatenan las coordenadas.

Ejercicio 5.1.7. En \mathbb{R}^3 consideramos el conjunto $\mathcal{R} = \{a_0, a_1, a_2, a_3\}$ formado por los puntos:

$$a_0 = (1, 2, 1), \quad a_1 = (2, 1, 0), \quad a_2 = (0, 1, 0), \quad a_3 = (1, -1, 2).$$

Demostrar que \mathcal{R} es un sistema de referencia afín de \mathbb{R}^3 . Calcular las coordenadas afines del punto $p = (0, 0, 0)$ en este sistema de referencia.

Consideramos los siguientes vectores:

$$\overrightarrow{a_0a_1} = (1, -1, -1) \quad \overrightarrow{a_0a_2} = (-1, -1, -1) \quad \overrightarrow{a_0a_3} = (0, -3, 1)$$

Para ver que esos tres vectores son linealmente independientes, comprobamos que el siguiente determinante no es nulo:

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & -3 \\ -1 & -1 & 1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & -1 & -3 \\ 0 & 0 & 4 \end{vmatrix} = 4 \cdot (-1 - 1) = -8 \neq 0$$

Por tanto, tenemos que esos tres vectores son linealmente independientes, por lo que los puntos de \mathcal{R} son afínmente independientes, teniendo entonces efectivamente que forman un sistema de referencia, con origen a_0 y base asociada la siguiente: $\mathcal{B} = \{\overrightarrow{a_0a_1}, \overrightarrow{a_0a_2}, \overrightarrow{a_0a_3}\}$.

Veamos ahora las coordenadas de p en \mathcal{R} :

$$\begin{aligned}\overrightarrow{a_0(0,0,0)} &= (-1, -2, -1) = b_1\overrightarrow{a_0a_1} + b_2\overrightarrow{a_0a_2} + b_3\overrightarrow{a_0a_3} = \\ &= b_1(1, -1, -1) + b_2(-1, -1, -1) + b_3(0, -3, 1) = \\ &= (b_1 - b_2, -b_1 - b_2 - 3b_3, -b_1 - b_2 + b_3)\end{aligned}$$

Por tanto, quedan las siguientes ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{lcl} b_1 - b_2 & = & -1 \\ -b_1 - b_2 - 3b_3 & = & -2 \\ -b_1 - b_2 + b_3 & = & -1 \end{array} \right\} \implies \begin{array}{l} b_1 = 1/8 \\ b_2 = 9/8 \\ b_3 = 1/4 \end{array}$$

Por tanto, tenemos que $p_{\mathcal{R}} = \left(\frac{1}{8}, \frac{9}{8}, \frac{1}{4}\right)$.

Ejercicio 5.1.8. Consideremos el punto $p = (1, 2, 3) \in \mathbb{R}^3$. Encontrar un sistema de referencia \mathcal{R} de \mathbb{R}^3 de forma que $p_{\mathcal{R}} = (1, 0, 2)$. ¿Es el sistema de referencia anterior único?

Sea $p_0 \in \mathbb{R}^3$ y una base $\mathcal{B} = \{v_1, v_2, v_3\}$. Buscamos un sistema de referencia $\mathcal{R} = \{p_0, \mathcal{B}\}$ tal que $p_{\mathcal{R}} = (1, 0, 2)$. Tenemos que la fórmula de cambio de sistema de referencia es:

$$p_{\mathcal{R}} = (0)_{\mathcal{R}} + M(\mathcal{B}_u, \mathcal{B}) \cdot p_{\mathcal{R}_0}$$

Esto es:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Equivalentemente,

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ x & a_1 & b_1 & c_1 \\ y & a_2 & b_2 & c_2 \\ z & a_3 & b_3 & c_3 \end{array} \right) \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Por tanto, tengo 12 incógnitas y 3 ecuaciones linealmente independientes. Por tanto, el sistema de referencia no es único. Una posible solución es usar $\mathcal{B} = \mathcal{B}_u$, y calcular el nuevo origen:

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + Id_3 \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

De forma que obtenemos $x = 0, y = -2, z = -1$. El sistema de referencia pedido es:

$$\mathcal{R} = \{(0, -2, -1), \mathcal{B}_u\}$$

Otra posible solución es usar como matriz de cambio de base, $-Id_3$. De esta forma, si $\mathcal{B}_u = \{e_1, e_2, e_3\}$, tenemos que $\mathcal{B} = \{-e_1, -e_2, -e_3\}$. Así, se tiene que el nuevo origen tiene de coordenadas $(2, 2, 5)$, por lo que otro posible sistema de coordenadas que cumpla lo pedido es:

$$\mathcal{R} = \{(2, 2, 5), \{-e_1, -e_2, -e_3\}\}$$

Ejercicio 5.1.9. En \mathbb{R}^2 consideremos los conjuntos $\mathcal{R} = \{(1, 1), (1, -1), (2, 1)\}$ y $\mathcal{R}' = \{(1, 2), (2, 2), (2, 0)\}$.

1. Comprueba que son sistemas de referencia de \mathbb{R}^2 .

Para que \mathcal{R} sea un sistema de referencia, es necesario que $\{\overrightarrow{(1, 1)(1, -1)}, \overrightarrow{(1, 1)(2, 1)}\}$ sea una base:

$$\mathcal{B} = \{\overrightarrow{(1, 1)(1, -1)}, \overrightarrow{(1, 1)(2, 1)}\} = \{(0, -2), (1, 0)\}$$

Como \mathcal{B} es una base, tenemos que \mathcal{R} es un sistema de referencia.

Para \mathcal{R}' , es necesario que $\{\overrightarrow{(1, 2)(2, 2)}, \overrightarrow{(1, 2)(2, 0)}\}$ sea una base:

$$\mathcal{B}' = \{\overrightarrow{(1, 2)(2, 2)}, \overrightarrow{(1, 2)(2, 0)}\} = \{(1, 0), (1, -2)\}$$

Como \mathcal{B}' es una base, tenemos que \mathcal{R}' es un sistema de referencia.

2. Calcula las ecuaciones que representan el cambio de sistema de referencia de \mathcal{R} a \mathcal{R}' y las de \mathcal{R}' a \mathcal{R} .

Dado $p \in \mathcal{A}$, sean las coordenadas en ambos sistemas de referencia los siguientes:

$$p_{\mathcal{R}} = (x, y) \quad p_{\mathcal{R}'} = (s, t)$$

Entonces, por definición de sistema de referencia, tenemos que:

$$\begin{cases} p &= (1, 1) + x(0, -2) + y(1, 0) &= (1 + y, 1 - 2x) \\ p &= (1, 2) + s(1, 0) + t(1, -2) &= (1 + s + t, 2 - 2t) \end{cases}$$

Igualando componentes, tenemos que:

$$\begin{cases} 1 + y &= 1 + s + t \\ 1 - 2x &= 2 - 2t \end{cases}$$

Por tanto, tenemos que el cambio de variable de \mathcal{R}' a \mathcal{R} es:

$$\begin{cases} x &= \frac{1}{2}(-1 + 2t) \\ y &= s + t \end{cases}$$

Matricialmente, tenemos que el cambio de variable de \mathcal{R}' a \mathcal{R} es:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/2 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix}$$

El cambio de variable de \mathcal{R} a \mathcal{R}' es:

$$\begin{cases} s &= -\frac{1}{2} - x + y \\ t &= \frac{1}{2}(1 + 2x) \end{cases}$$

3. Calcula las coordenadas del punto $(0, 1)$ en los sistemas de referencia \mathcal{R} y \mathcal{R}' .

Sea $(0, 1)_{\mathcal{R}} = (x, y)$. Entonces, tenemos que:

$$(0, 1) = (1, 1) + x(0, -2) + y(1, 0) = (1 + y, 1 - 2x)$$

Por tanto, $x = 0, y = -1$. Es decir, $(0, 1)_{\mathcal{R}} = (0, -1)$.

Aplicando el cambio de sistema de referencia de \mathcal{R} a \mathcal{R}' , tenemos las coordenadas que nos faltan: $(0, 1)_{\mathcal{R}'} = (-\frac{3}{2}, \frac{1}{2})$

Ejercicio 5.1.10. Sea $C = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 + y^2 = 1\}$ la circunferencia unidad de \mathbb{R}^2 y el sistema de referencia $\mathcal{R} = \{(1, -1), (1, 0), (2, 0)\}$ de \mathbb{R}^2 . Calcula la ecuación de C en el sistema de referencia \mathcal{R} .

Sea $p = (x, y) \in \mathbb{R}^2$, y consideramos sus coordenadas en \mathcal{R} , $p_{\mathcal{R}} = (s, t)$. Entonces,

$$p = (x, y) = (1, -1) + s\overrightarrow{(1, -1)(1, 0)} + t\overrightarrow{(1, -1)(2, 0)} = (1, -1) + s(0, 1) + t(1, 1)$$

Por tanto,

$$\begin{cases} x &= 1 + t \\ y &= -1 + s + t \end{cases}$$

Tenemos por tanto que:

$$p \in C \iff x^2 + y^2 = 1 \iff (1 + t)^2 + (-1 + s + t)^2 = 1$$

Es decir,

$$C = \{(s, t)_{\mathcal{R}} \in \mathbb{R}^2 \mid (1 + t)^2 + (-1 + s + t)^2 = 1\}$$

Ejercicio 5.1.11. En un plano afín \mathcal{A} se consideran dos puntos $a_1, a_2 \in \mathcal{A}$ y una base $\mathcal{B} = \{e_1, e_2\}$. Sea también $\mathcal{B}' = \{e_1 + e_2, e_1 - e_2\}$. Considérense los sistemas de referencia $\mathcal{R} = \{a_1, \mathcal{B}\}$ y $\mathcal{R}' = \{a_2, \mathcal{B}'\}$. Si el vector $(\overrightarrow{a_1 a_2})_{\mathcal{B}} = (1, 1)$, calcula:

1. Las ecuaciones de cambio de sistema de referencia de \mathcal{R} a \mathcal{R}' y de \mathcal{R}' a \mathcal{R} .

Como $(\overrightarrow{a_1 a_2})_{\mathcal{B}} = (1, 1)$, tenemos que $\overrightarrow{a_1 a_2} = a_2 - a_1 = e_1 + e_2$. Por tanto, tenemos que las coordenadas de a_1, a_2 en respectivos sistemas de referencia son::

$$\begin{aligned} a_2 &= a_1 + e_1 + e_2 \implies (a_2)_{\mathcal{R}} = (1, 1) \\ a_1 &= a_2 - e_1 - e_2 \implies (a_1)_{\mathcal{R}'} = (-1, 0) \end{aligned}$$

Además, las matrices de cambio de base son:

$$M(\mathcal{B}', \mathcal{B}) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad M(\mathcal{B}, \mathcal{B}') = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Por tanto, dado $p \in \mathcal{A}$, con $p_{\mathcal{R}} = (x, y)$, $p_{\mathcal{R}'} = (s, t)$, tenemos que las ecuaciones de cambio de sistema de referencia de \mathcal{R}' a \mathcal{R} son:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix}$$

Las ecuaciones de cambio de sistema de referencia de \mathcal{R} a \mathcal{R}' son:

$$\begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

2. Las coordenadas de a_1 y a_2 en cada sistema de referencia.

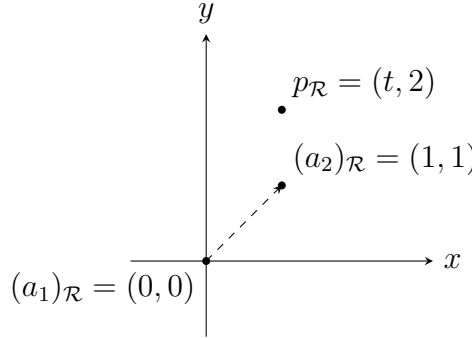
Como hemos visto antes, tenemos que $(a_2)_{\mathcal{R}} = (1, 1)$, $(a_1)_{\mathcal{R}'} = (-1, 0)$. Además, tenemos que $a_2 = a_2 + 0$ y $a_1 = a_1 + 0$, por lo que $(a_2)_{\mathcal{R}'} = (0, 0)$, $(a_1)_{\mathcal{R}} = (0, 0)$. Es decir,

$$\begin{aligned} (a_1)_{\mathcal{R}} &= (0, 0) & (a_2)_{\mathcal{R}} &= (1, 1) \\ (a_1)_{\mathcal{R}'} &= (-1, 0) & (a_2)_{\mathcal{R}'} &= (0, 0) \end{aligned}$$

3. El valor de $t \in \mathbb{R}$ para que el punto p de coordenadas $p_{\mathcal{R}} = (t, 2)$ esté alineado con a_1 y a_2 . ¿Cuáles son las coordenadas de este punto respecto de \mathcal{R}' ?

Tenemos que $p_{\mathcal{R}} - (a_1)_{\mathcal{R}} = (t, 2) = (\overrightarrow{a_1 p})_{\mathcal{B}}$. Además, $(\overrightarrow{a_1 a_2})_{\mathcal{B}} = (1, 1)$. Para que los tres puntos estén alineados, ambos vectores han de ser proporcionales, por lo que $t = 2$.

Usando las ecuaciones de cambio de sistema de referencia de \mathcal{R} a \mathcal{R}' , tenemos que $p_{\mathcal{R}'} = (1, 0)$.



Ejercicio 5.1.12. Sea \mathcal{R} un sistema de referencia de un espacio afín tridimensional \mathcal{A} . Demuestra que $\mathcal{R}' = \{a_0, a_1, a_2, a_3\}$ con

$$(a_0)_{\mathcal{R}} = (1, 0, 1), \quad (a_1)_{\mathcal{R}} = (-1, 0, 1), \quad (a_2)_{\mathcal{R}} = (1, 1, 1), \quad (a_3)_{\mathcal{R}} = (2, 1, 2),$$

es otro sistema de referencia. ¿Cuáles son las coordenadas del origen de \mathcal{R} en el sistema de referencia \mathcal{R}' ?

Notemos $\mathcal{R} = \{b_0, b_1, b_2, b_3\} = \{b_0, \mathcal{B}\}$, $\mathcal{R}' = \{a_0, \mathcal{B}'\}$.

Veamos los vectores de la base asociada a \mathcal{R}' , para saber si sus vectores son linealmente independientes. Tenemos que:

$$\begin{aligned} (a_1)_{\mathcal{R}} - (a_0)_{\mathcal{R}} &= (-2, 0, 0) = (\overrightarrow{a_0 a_1})_{\mathcal{B}} \\ (a_2)_{\mathcal{R}} - (a_0)_{\mathcal{R}} &= (0, 1, 0) = (\overrightarrow{a_0 a_2})_{\mathcal{B}} \\ (a_3)_{\mathcal{R}} - (a_0)_{\mathcal{R}} &= (1, 1, 1) = (\overrightarrow{a_0 a_3})_{\mathcal{B}} \end{aligned}$$

Como esos tres vectores son linealmente independientes, tenemos que \mathcal{R}' es un sistema de referencia. La ecuación de cambio de sistema de referencia de \mathcal{R} a \mathcal{R}' es:

$$\begin{aligned} p_{\mathcal{R}'} &= (b_0)_{\mathcal{R}'} + M(\mathcal{B}, \mathcal{B}')p_{\mathcal{R}} = (b_0)_{\mathcal{R}'} + M(\mathcal{B}', \mathcal{B})^{-1}p_{\mathcal{R}} = \\ &= (b_0)_{\mathcal{R}'} + \begin{pmatrix} -2 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} p_{\mathcal{R}} = (b_0)_{\mathcal{R}'} + \begin{pmatrix} -1/2 & 0 & 1/2 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} p_{\mathcal{R}} \end{aligned}$$

Usando $p = a_0$ (podríamos usar cualquier otro punto), tenemos:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = (b_0)_{\mathcal{R}'} + \begin{pmatrix} -1/2 & 0 & 1/2 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = (b_0)_{\mathcal{R}'} + \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Por tanto, $(b_0)_{\mathcal{R}'} = -(0, -1, 1) = (0, 1, -1)$.

Ejercicio 5.1.13. Demuestra que toda recta afín de \mathbb{R}^3 es la intersección de dos planos afines. ¿Es cierta esta afirmación en \mathbb{R}^n , para cualquier $n \geq 4$?

Sea la recta afín $r = p + \mathcal{L}\{u\}$. Extendemos la base de \vec{r} a una base del espacio; es decir, $\mathbb{R}^3 = \mathcal{L}\{u, v, w\}$, con los tres vectores linealmente independientes. Sean ahora los siguientes planos:

$$\pi_1 = p + \mathcal{L}\{u, v\} \quad \pi_2 = p + \mathcal{L}\{u, w\}$$

Entonces $\pi_1 \cap \pi_2 = p + \mathcal{L}\{u\}$, por lo que se tiene.

Este razonamiento también es válido para \mathbb{R}^n , con $n \geq 4$. Esto se debe a que, al extender a una base del espacio, tomamos $\mathbb{R}^n = \mathcal{L}\{u, v, w, e_4, \dots, e_n\}$, donde tan solo usaremos los tres primeros vectores para construir los dos planos descritos anteriormente.

Ejercicio 5.1.14. Sean \mathcal{R} un sistema de referencia de un espacio afín \mathcal{A} y $S \subset \mathcal{A}$ un subespacio afín. Si S está definido por las ecuaciones

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = b_1, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = b_m, \end{cases}$$

en el sistema de referencia \mathcal{R} , entonces demuestra que las ecuaciones de \vec{S} vienen dadas por

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n = 0, \\ \dots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n = 0, \end{cases}$$

en coordenadas respecto de la base asociada a \mathcal{R} .

Sea \mathcal{B} la base asociada a \mathcal{R} . Por ser S un espacio afín, tenemos que fijado un punto $p \in S$, existe una biyección $\varphi_p : S \rightarrow \vec{S}$ dada por $\varphi_p(q) = \vec{pq}$. Por tanto, dado $v \in \vec{S}$, se tiene que $\exists q \in S$ tal que $v = \vec{pq}$. Buscamos demostrar que, si $v_{\mathcal{B}} = (\vec{pq})_{\mathcal{B}} = (x_1, \dots, x_n)$, entonces cumple las ecuaciones cartesianas descritas.

Tenemos que $(x_1, \dots, x_n) = (\vec{pq})_{\mathcal{B}} = q_{\mathcal{R}} - p_{\mathcal{R}}$. Sean las coordenadas de $p, q \in S$ las siguientes: $q_{\mathcal{R}} = (c_1, \dots, c_n)$, $p_{\mathcal{R}} = (d_1, \dots, d_n)$. Entonces, como ambos puntos pertenecen a S , sus coordenadas en \mathcal{R} cumplen las ecuaciones cartesianas dadas:

$$\begin{aligned} q \in S, q_{\mathcal{R}} = (c_1, \dots, c_n) &\implies \begin{cases} a_{11}c_1 + a_{12}c_2 + \dots + a_{1n}c_n = b_1, \\ \dots \\ a_{m1}c_1 + a_{m2}c_2 + \dots + a_{mn}c_n = b_m, \end{cases} \\ p \in S, p_{\mathcal{R}} = (d_1, \dots, d_n) &\implies \begin{cases} a_{11}d_1 + a_{12}d_2 + \dots + a_{1n}d_n = b_1, \\ \dots \\ a_{m1}d_1 + a_{m2}d_2 + \dots + a_{mn}d_n = b_m, \end{cases} \end{aligned}$$

Igualando los valores de b_i para todo $i \in \{1, \dots, m\}$, tenemos:

$$\begin{cases} a_{11}c_1 + a_{12}c_2 + \dots + a_{1n}c_n = a_{11}d_1 + a_{12}d_2 + \dots + a_{1n}d_n, \\ \dots \\ a_{m1}c_1 + a_{m2}c_2 + \dots + a_{mn}c_n = a_{m1}d_1 + a_{m2}d_2 + \dots + a_{mn}d_n, \end{cases}$$

Llevando todo al término de la izquierda y sacando factor común, tenemos:

$$\begin{cases} a_{11}(c_1 - d_1) + a_{12}(c_2 - d_2) + \cdots + a_{1n}(c_n - d_n) = 0, \\ \vdots \\ a_{m1}(c_1 - d_1) + a_{m2}(c_2 - d_2) + \cdots + a_{mn}(c_n - d_n) = 0, \end{cases}$$

Precisamente, tenemos que

$$(x_1, \dots, x_n) = (\overrightarrow{pq})_{\mathcal{B}} = q_{\mathcal{R}} - p_{\mathcal{R}} = (c_1 - d_1, \dots, c_n - d_n)$$

Por tanto, se tiene demostrado que las ecuaciones dadas son las ecuaciones cartesianas de \overrightarrow{S} respecto a \mathcal{B} .

Ejercicio 5.1.15. Sea \mathcal{A} un espacio afín con sistema de referencia \mathcal{R} y S el conjunto de puntos $p \in \mathcal{A}$ tales que $p_{\mathcal{R}} = (x_1, \dots, x_n)$ es solución del sistema de ecuaciones lineales

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1, \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n = b_m, \end{cases}$$

Demuestra que S es un subespacio afín de \mathcal{A} .

Sea \mathcal{B} la base asociada a \mathcal{R} . Supongamos $S \neq \emptyset$ (no se puede probar por falta de información en el enunciado). Sea por tanto $p \in S$ con $p_{\mathcal{R}} = (d_1, \dots, d_n)$, que cumple las ecuaciones dadas. Consideramos $q \in S$. Entonces, tenemos que:

$$q_{\mathcal{R}} - p_{\mathcal{R}} = (\overrightarrow{pq})_{\mathcal{B}} \in \overrightarrow{\mathcal{A}}$$

Sean las coordenadas de \overrightarrow{pq} las siguientes:

$$(\overrightarrow{pq})_{\mathcal{B}} = (x'_1, \dots, x'_n) := (x_1, \dots, x_n) - (d_1, \dots, d_n)$$

Veamos ahora que $a_{i1}x'_1 + a_{i2}x'_2 + \cdots + a_{in}x'_n = 0$ para todo $i \in \{1, \dots, m\}$:

$$\begin{aligned} a_{i1}x'_1 + a_{i2}x'_2 + \cdots + a_{in}x'_n &= \\ &= a_{i1}(x_1 - d_1) + a_{i2}(x_2 - d_2) + \cdots + a_{in}(x_n - d_n) = \\ &= b_i - b_i = 0 \end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que:

$$\begin{aligned} S &= \left\{ (x_1, \dots, x_n) \left| \begin{array}{c} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n = b_1, \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n = b_m, \end{array} \right. \right\} = \\ &= (d_1, \dots, d_n) + \left\{ (x'_1, \dots, x'_n) \left| \begin{array}{c} a_{11}x'_1 + a_{12}x'_2 + \cdots + a_{1n}x'_n = 0, \\ \vdots \\ a_{m1}x'_1 + a_{m2}x'_2 + \cdots + a_{mn}x'_n = 0, \end{array} \right. \right\} \end{aligned}$$

Hemos deducido que S es un subespacio afín, y tenemos las ecuaciones cartesianas de \overrightarrow{S} .

Ejercicio 5.1.16. Calcula la suma e intersección de los siguientes subespacios afines de \mathbb{R}^3 :

1. $S_1 = (1, 2, -1) + \mathcal{L}\{(1, 0, -2)\}$ y $S_2 \equiv \begin{cases} 2x + z = 1, \\ 4x + y + 2z = 4. \end{cases}$

Calculamos en primer lugar un vector director de S_2 . Sea $\vec{S}_2 = \mathcal{L}\{(1, 0, -2)\}$. Además, $(1, 2, -1) \in S_2$, por lo que $S_2 = (1, 2, -1) + \mathcal{L}\{(1, 0, -2)\}$.

Por tanto, $S_1 = S_2$, y deducimos que:

$$S_1 \cap S_2 = S_1 = S_2 \quad S_1 \vee S_2 = S_1 = S_2$$

2. $S_1 \equiv 2x - y + 3z = 1$ y $S_2 = (1, 2, 0) + \mathcal{L}\{(-1, 1, 1)\}$.

Tenemos que $\vec{S}_1 = \mathcal{L}\{(-1, 1, 1), (1, 2, 0)\}$. Además, $(1, 2, 1) \in S_1$. Por tanto,

$$S_1 = (1, 2, 1) + \mathcal{L}\{(-1, 1, 1), (1, 2, 0)\}$$

Veamos si $\overrightarrow{(1, 2, 1)(1, 2, 0)} \in \vec{S}_1 + \vec{S}_2$. Tenemos que $\overrightarrow{(1, 2, 1)(1, 2, 0)} = (0, 0, -1)$, y $\vec{S}_1 + \vec{S}_2 = \vec{S}_1 = \mathcal{L}\{(-1, 1, 1), (1, 2, 0)\}$. Como los tres vectores son linealmente independientes, tenemos que $\overrightarrow{(1, 2, 1)(1, 2, 0)} \notin \vec{S}_1 + \vec{S}_2$, por lo que

$$S_1 \cap S_2 = \emptyset$$

Gráficamente, esto era esperable, ya que S_2 es paralelo a S_1 pero difieren en un punto $(1, 2, 0) \in S_2 \setminus S_1$, por lo que no se cortan.

Calculemos ahora la suma:

$$S_1 \vee S_2 = (1, 2, 0) + \mathcal{L}\{(0, 0, -1), (-1, 1, 1), (1, 2, 0)\} = (1, 2, 0) + \mathbb{R}^3 = \mathbb{R}^3$$

Por tanto,

$$S_1 \cap S_2 = \emptyset \quad S_1 \vee S_2 = \mathbb{R}^3$$

3. $S_1 = (-1, 0, 1) + \mathcal{L}\{(1, 1, 1)\}$ y $S_2 = (1, 1, 1) + \mathcal{L}\{(-1, -1, -1)\}$.

En primer lugar, notemos que $\vec{S}_1 = \vec{S}_2$, por lo que $S_1 \parallel S_2$.

Tenemos que $\overrightarrow{(-1, 0, 1)(1, 1, 1)} = (2, 1, 0) \notin \vec{S}_1 + \vec{S}_2 = \vec{S}_1$. Por tanto, $S_1 \cap S_2 = \emptyset$.

Calculemos ahora la suma:

$$S_1 \vee S_2 = (1, 1, 1) + \mathcal{L}\{(2, 1, 0), (1, 1, 1)\}$$

Por tanto,

$$S_1 \cap S_2 = \emptyset \quad S_1 \vee S_2 = (1, 1, 1) + \mathcal{L}\{(2, 1, 0), (1, 1, 1)\}$$

Gráficamente, estos resultados eran de esperar. Son dos rectas paralelas y no coincidentes, por lo que su intersección es nula y la suma es el plano que las contiene.

4. $S_1 \equiv 2x - y + z = 1$ y $S_2 = (1, 2, 3) + \mathcal{L}\{(1, 0, -1)\}$.

Calculamos unas ecuaciones cartesianas de S_2 en \mathcal{R}_0 . Sea $(x, y, z) \in S_2$ un punto arbitrario de la recta, por lo que:

$$(x, y, z) = (1, 2, 3) + \lambda(1, 0, -1) = (1 + \lambda, 2, 3 - \lambda) \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

Por tanto, tenemos que $S_2 \equiv \left\{ \begin{array}{l} x - 1 = 3 - z, \\ y = 2. \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} x + z = 4, \\ y = 2. \end{array} \right.$

Como estamos trabajando en el mismo sistema de referencia \mathcal{R}_0 , tenemos que:

$$S_1 \cap S_2 \equiv \left\{ \begin{array}{l} 2x - y + z = 1, \\ x + z = 4, \\ y = 2. \end{array} \right.$$

Resolviendo el sistema, llegamos a que $S_1 \cap S_2 = \{(-1, 2, 5)\}$.

Para calcular la suma, usamos la fórmula de las dimensiones, sabiendo que la intersección es no nula:

$$\dim(S_1 \vee S_2) = \dim S_1 + \dim S_2 - \dim(S_1 \cap S_2) = 2 + 1 - 0 = 3$$

Por tanto, $S_1 \vee S_2 = \mathbb{R}^3$.

5. $S_1 \equiv x + y + z = 1$ y $S_2 \equiv \left\{ \begin{array}{l} x + y + z = 2, \\ 2y - z = 3. \end{array} \right.$

Directamente de las ecuaciones cartesianas vemos que $\vec{S}_2 \subset \vec{S}_1$, pero no hay puntos comunes a los subespacios afines; es decir, $S_1 \cap S_2 = \emptyset$.

Aplicamos la fórmula de las dimensiones para calcular la suma:

$$\dim(S_1 \vee S_2) = \dim S_1 + \dim S_2 - \dim(\vec{S}_1 \cap \vec{S}_2) + 1 = 2 + 1 - 1 + 1 = 3$$

Por tanto, tenemos que:

$$S_1 \cap S_2 = \emptyset \quad S_1 \vee S_2 = \mathbb{R}^3$$

Ejercicio 5.1.17. Calcula las ecuaciones paramétricas y cartesianas de los siguientes subespacios afines de \mathbb{R}^3 :

1. La recta r_1 que pasa por los puntos $(1, 2, 1)$ y $(1, 0, 2)$.

Tenemos que el vector director es $\overrightarrow{(1, 2, 1)(1, 0, 2)} = (0, -2, 1)$. Por tanto, la recta es $r_1 = (1, 2, 1) + \mathcal{L}\{(0, -2, 1)\}$.

Las ecuaciones paramétricas son:

$$\left\{ \begin{array}{l} x = 1 \\ y = 2 - 2\lambda \\ z = 1 + \lambda \end{array} \right. \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

Despejando λ e igualando, tenemos que $\frac{y-2}{-2} = \frac{z-1}{1}$. Por tanto, las ecuaciones cartesianas son:

$$r_1 \equiv \begin{cases} x = 1 \\ \frac{y-2}{-2} = \frac{z-1}{1} \end{cases}$$

2. El plano π_1 que pasa por los puntos $(-1, -2, 1)$, $(0, 1, 1)$ y $(1, 0, 2)$.

Buscamos dos vectores linealmente independientes que pertenezcan al plano. Sean estos vectores los siguientes:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{(-1, -2, 1)(0, 1, 1)} &= (1, 3, 0) \\ \overrightarrow{(-1, -2, 1)(1, 0, 2)} &= (2, 2, 1) \end{aligned}$$

Por tanto, el plano es $\pi_1 : (0, 1, 1) + \mathcal{L}\{(1, 3, 0), (2, 2, 1)\}$.

Las ecuaciones paramétricas son:

$$\begin{cases} x = \alpha + 2\beta \\ y = 1 + 3\alpha + 2\beta \\ z = 1 + \beta \end{cases} \quad \alpha, \beta \in \mathbb{R}$$

Para obtener las ecuaciones cartesianas, hay dos opciones:

Opción 1 Despejamos en primer lugar α e igualamos, obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones equivalente:

$$\begin{cases} x - 2\beta = \frac{1}{3}(y - 1 - 2\beta) \\ z = 1 + \beta \end{cases} \quad \beta \in \mathbb{R}$$

Despejamos ahora β e igualamos, obteniendo entonces la ecuación cartesiana del plano:

$$\frac{1}{4}(3x - y + 1) = z - 1 \implies 3x - y + 1 = 4z - 4$$

Por tanto, la ecuación cartesiana del plano es $\pi_1 \equiv 3x - y - 4z + 5 = 0$.

Opción 2 Usando una manera similar a la que usábamos para obtener las ecuaciones cartesianas de un plano vectorial, usamos que cualquier tercer vector del plano $\overrightarrow{(0, 1, 1)(x, y, z)} = (x, y - 1, z - 1)$ ha de ser linealmente dependiente a los otros dos:

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & x \\ 3 & 2 & y - 1 \\ 0 & 1 & z - 1 \end{vmatrix} = 0 = 2(z - 1) + 3x - (y - 1) - 6(z - 1) = 3x - y - 4z + 5$$

Por tanto, la ecuación cartesiana del plano es $\pi_1 \equiv 3x - y - 4z + 5 = 0$.

Como podemos ver, esta forma es más cómoda, ya que solo hay que calcular un determinante.

3. El plano π_2 que pasa por el punto $(1, 2, 1)$ y contiene la recta $r_2 = (1, 1, 1) + \mathcal{L}\{(0, 1, 1)\}$.

Al contener a la recta, tenemos que $(1, 1, 1) \in \pi_2$ y $(0, 1, 1) \in \overrightarrow{\pi_2}$. El otro vector que buscamos es $\overrightarrow{(1, 1, 1)(1, 2, 1)} = (0, 1, 0)$. Por tanto, el plano es $\pi_2 = (1, 1, 1) + \mathcal{L}\{(0, 1, 1), (0, 1, 0)\}$.

Sus ecuaciones cartesianas son:

$$\begin{cases} x = 1 \\ y = 1 + \alpha + \beta \\ z = 1 + \alpha \end{cases} \quad \alpha, \beta \in \mathbb{R}$$

Para la ecuación cartesiana, aunque en este caso es fácil ver que es $\pi_2 \equiv y - z = 0$, calculamos el determinante:

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & x-1 \\ 1 & 1 & y-1 \\ 0 & 1 & z-1 \end{vmatrix} = 0 = x-1 \iff x=1$$

Como hemos visto, la ecuación cartesiana es $\pi_2 \equiv x = 1$.

4. La recta r_3 intersección entre los planos $\pi_3 = (1, 1, 1) + \mathcal{L}\{(-1, 0, 2), (-1, -2, 1)\}$ y $\pi_4 \equiv x + y + z = 1$.

En primer lugar, obtengo la ecuación cartesiana de π_3 :

$$\begin{vmatrix} -1 & -1 & x-1 \\ 0 & -2 & y-1 \\ 2 & 1 & z-1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -1 & -1 & x-1 \\ 0 & -2 & y-1 \\ 0 & -1 & 2x+z-3 \end{vmatrix} = 0 = \\ = 2(2x+z-3) - (y-1) = 4x+2z-y-5 = 0$$

Por tanto, tenemos que $\pi_3 \equiv 4x - y + 2z = 5$, por tanto, tenemos que la recta pedida es:

$$r_3 = \pi_3 \cap \pi_4 \equiv \begin{cases} x + y + z = 1 \\ 4x - y + 2z = 5 \end{cases}$$

Resolviendo el sistema, tenemos que un punto de la recta es $(0, -1, 2)$, y su vector director es $(3, 2, -5)$. Por tanto, tenemos que $r_3 = (0, -1, 2) + \mathcal{L}\{(3, 2, -5)\}$. Sus ecuaciones paramétricas son:

$$\begin{cases} x = 3\lambda \\ y = -1 + 2\lambda \\ z = 2 - 5\lambda \end{cases} \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

Ejercicio 5.1.18. Calcula las ecuaciones paramétricas e implícitas de los subespacios afines $S = \langle\{(1, 1, 0, 1), (1, -1, 1, 0)\}\rangle$ y $T = \langle\{(1, 1, 0, 1), (1, 0, 1, 0), (0, 1, 0, 1)\}\rangle$ de \mathbb{R}^4 . Calcula $S \cap T$ y $S \vee T$.

Tenemos que S es la recta que une ambos puntos. Su vector director es

$$\overrightarrow{(1, 1, 0, 1)(1, -1, 1, 0)} = (0, -2, 1, -1)$$

Entonces, $S = (1, 1, 0, 1) + \mathcal{L}\{(0, -2, 1, -1)\}$.

Las ecuaciones paramétricas de S son:

$$\begin{cases} x = 1 \\ y = 1 - 2\lambda \\ z = \lambda \\ t = 1 - \lambda \end{cases} \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

Sus ecuaciones cartesianas son:

$$S \equiv \left\{ \begin{array}{l} x = 1 \\ \frac{y-1}{-2} = \frac{z-0}{1} = \frac{t-1}{-1} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} x = 1 \\ \frac{1-y}{2} = z = 1-t \end{array} \right.$$

Trabajemos ahora con T . Tenemos que es el plano que contiene a los 3 puntos. Dos vectores de \vec{T} son:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{(1, 1, 0, 1)(1, 0, 1, 0)} &= (0, -1, 1, -1) \\ \overrightarrow{(1, 1, 0, 1)(0, 1, 0, 1)} &= (-1, 0, 0, 0) \end{aligned}$$

Por tanto, $T = (1, 1, 0, 1) + \mathcal{L}\{(0, -1, 1, -1), (-1, 0, 0, 0)\}$.

Las ecuaciones paramétricas de T son:

$$\begin{cases} x = 1 - \beta \\ y = 1 - \alpha \\ z = \alpha \\ t = 1 - \alpha \end{cases} \quad \alpha, \beta \in \mathbb{R}$$

Sus ecuaciones cartesianas son:

$$T \equiv 1 - y = z = 1 - t$$

Calculamos ahora la intersección, que sabemos que es no nula ya que el punto $(1, 1, 0, 1) \in S \cap T$. Las ecuaciones cartesianas de la intersección son:

$$S \cap T \equiv \left\{ \begin{array}{l} x = 1 \\ 1 - y = z = 1 - t = \frac{1-y}{2} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} x = 1 \\ z + y = 1 \\ z + t = 1 \\ 2z + y = 1 \end{array} \right\}$$

Veamos si esas 4 ecuaciones son linealmente independientes. Tenemos que el rango de la matriz de coeficientes es:

$$rg \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} = 4$$

Por tanto, las 4 son linealmente independientes y el sistema es de Cramer, es decir, SCD. Por tanto, tan solo hay un punto que cumple el sistema, por lo que

$$S \cap T = \{(1, 1, 0, 1)\}$$

Calculemos el valor de la suma:

$$\dim(S \vee T) = \dim S + \dim T - \dim(S \cap T) = 1 + 2 - 0 = 3$$

Tenemos que:

$$S \vee T = (1, 1, 0, 1) + \mathcal{L}\{(0, -2, 1, -1), (0, -1, 1, -1), (-1, 0, 0, 0)\}$$

Las ecuaciones paramétricas de $S \vee T$ son:

$$\begin{cases} x = 1 - \gamma \\ y = 1 - 2\alpha - \beta \\ z = \alpha + \beta \\ t = 1 - \alpha - \beta \end{cases} \quad \alpha, \beta, \gamma \in \mathbb{R}$$

Las ecuaciones de cartesianas de $S \vee T$ son:

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & -1 & x-1 \\ -2 & -1 & 0 & y-1 \\ 1 & 1 & 0 & z \\ -1 & -1 & 0 & t-1 \end{vmatrix} = 0 = - \begin{vmatrix} -2 & -1 & y-1 \\ 1 & 1 & z \\ -1 & -1 & t-1 \end{vmatrix} = - \begin{vmatrix} -2 & -1 & y-1 \\ 1 & 1 & z \\ 0 & 0 & z+t-1 \end{vmatrix} = \\ = -(z+t-1)(-2+1) = z+t-1 = 0$$

Por tanto, $S \vee T \equiv z + t = 1$.

Ejercicio 5.1.19. Sea L la recta de \mathbb{R}^2 que tiene por ecuación cartesiana $x - y = 1$ en el sistema de referencia $\mathcal{R} = \{(1, -1), (2, 1), (0, 2)\}$. Calcula su ecuación cartesiana en el sistema de referencia usual.

Tenemos que la base asociada a \mathcal{R} es $\mathcal{B} = \{(1, 2), (-1, 3)\}$. Consideraos ahora el punto $p = (x, y)_{\mathcal{R}} = (s, t)_{\mathcal{R}_0}$. Tenemos que las ecuaciones de cambio de sistema de referencia de \mathcal{R} a \mathcal{R}_0 son:

$$\begin{pmatrix} s \\ t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}_{\mathcal{R}_0} + \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 + x - y \\ -1 + 2x + 3y \end{pmatrix}$$

De la primera ecuación, tenemos que $s = 1 + x - y = 2$.

Por tanto, como una recta en \mathbb{R}^2 viene determinada por una única ecuación cartesiana, tenemos que es:

$$L = \{(s, t) \in \mathbb{R}^2 \mid s = 2\}.$$

Ejercicio 5.1.20. Calcula las ecuaciones cartesianas de los siguientes subespacios afines de \mathbb{R}^4 :

1. La recta r que pasa por los puntos $(0, -1, 1, 1)$ y $(1, 1, 0, 2)$.

Tenemos que el vector director es $(1, 2, -1, 1)$. Por tanto, la recta es:

$$r = (0, -1, 1, 1) + \mathcal{L}\{(1, 2, -1, 1)\}$$

Para obtener las ecuaciones cartesianas, sea (x, y, z, t) un punto arbitrario de la recta. Entonces, necesitamos que:

$$rg \begin{pmatrix} 1 & x-0 \\ 2 & y+1 \\ -1 & z-1 \\ 1 & t-1 \end{pmatrix} = 1$$

Para ello, necesitamos que estos tres determinantes sean nulos:

$$\begin{vmatrix} 1 & x \\ 2 & y+1 \end{vmatrix} = 0 = y+1-2x \implies -2x+y+1=0$$

$$\begin{vmatrix} 1 & x \\ -1 & z-1 \end{vmatrix} = 0 = z-1+x \implies x+z-1=0$$

$$\begin{vmatrix} 1 & x \\ 1 & t-1 \end{vmatrix} = 0 = t-1-x \implies -x+t-1=0$$

Por tanto, las ecuaciones cartesianas de r son:

$$r \equiv \begin{cases} -2x+y+1=0 \\ x+z-1=0 \\ -x+t-1=0 \end{cases}$$

2. El plano π que pasa por los puntos $(0, -1, 0, -1)$, $(1, 0, 1, 1)$ y $(2, 1, 0, 2)$.

Tenemos que dos vectores de la variedad de direcciones son $(1, 1, 1, 2)$ y $(2, 2, 0, 3)$.

Por tanto, tenemos que el plano es

$$\pi = (0, -1, 0, -1) + \mathcal{L}\{(1, 1, 1, 2), (2, 2, 0, 3)\}.$$

Para obtener las ecuaciones cartesianas, sea (x, y) un punto arbitrario del plano. Entonces, necesitamos que:

$$rg \begin{pmatrix} 1 & 2 & x-0 \\ 1 & 2 & y+1 \\ 1 & 0 & z-0 \\ 2 & 3 & t+1 \end{pmatrix} = 2$$

Para ello, necesitamos que estos dos determinantes sean nulos:

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & x-0 \\ 1 & 0 & z-0 \\ 2 & 3 & t+1 \end{vmatrix} = 0 = 4z+3x-3z-2(t+1) = 3x+z-2t-2$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 2 & x-0 \\ 1 & 2 & y+1 \\ 1 & 0 & z-0 \end{vmatrix} = 0 = 2z + 2(y+1) - 2x - 2z \implies 0 = -x + y + 1$$

Por tanto, las ecuaciones cartesianas de π son:

$$\pi \equiv \begin{cases} 3x + z - 2t - 2 = 0 \\ -x + y + 1 = 0 \end{cases}$$

3. El hiperplano S que contiene al plano $(0, 1, 1, 0) + \mathcal{L}(\{(1, -1, 0, 0), (0, 0, 1, -1)\})$ y pasa por el punto $(2, 0, 2, 0)$.

Tenemos que el siguiente vector pertenece a la variedad de direcciones:

$$\overrightarrow{(0, 1, 1, 0)(2, 0, 2, 0)} = (2, -1, 1, 0)$$

Por tanto, tenemos que:

$$S = (0, 1, 1, 0) + \mathcal{L}(\{(1, -1, 0, 0), (0, 0, 1, -1), (2, -1, 1, 0)\})$$

Para obtener las ecuaciones cartesianas, necesitamos que el siguiente determinante sea nulo:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 2 & x-0 \\ -1 & 0 & -1 & y-1 \\ 0 & 1 & 1 & z-1 \\ 0 & -1 & 0 & t-0 \end{vmatrix} = 0 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 2 & x-0 \\ 0 & 0 & 1 & y-1+x \\ 0 & 1 & 1 & z-1 \\ 0 & -1 & 0 & t-0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & y-1+x \\ 1 & 1 & z-1 \\ -1 & 0 & t-0 \end{vmatrix} =$$

$$= (1-z) + (y-1+x) - t = x + y - z - t = 0$$

Por tanto, la ecuación cartesiana del hiperplano es:

$$S \equiv x + y - z - t = 0$$

4. El subespacio afín T que pasa por los puntos $(1, 1, -1, 0)$, $(0, 0, 0, 1)$, $(1, 0, 0, 0)$ y $(0, 2, -2, 1)$.

Tenemos los siguientes vectores del espacio de direcciones:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{(0, 0, 0, 1)(1, 1, -1, 0)} &= (1, 1, -1, -1) \\ \overrightarrow{(0, 0, 0, 1)(1, 0, 0, 0)} &= (1, 0, 0, -1) \\ \overrightarrow{(0, 0, 0, 1)(0, 2, -2, 1)} &= (0, 2, -2, 0) \end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que el subespacio afín buscado es:

$$T = (0, 0, 0, 1) + \mathcal{L}\{(1, 1, -1, -1), (1, 0, 0, -1), (0, 1, -1, 0)\}$$

No obstante, el primer vector del sistema de generadores es combinación lineal de los otros dos, por lo que:

$$T = (0, 0, 0, 1) + \mathcal{L}\{(1, 0, 0, -1), (0, 1, -1, 0)\}$$

Para las ecuaciones cartesianas del plano, necesitamos que:

$$rg \begin{pmatrix} 1 & 0 & x-0 \\ 0 & 1 & y-0 \\ 0 & -1 & z-0 \\ -1 & 0 & t-1 \end{pmatrix} = 2$$

Para ello, necesitamos que estos dos determinantes sean nulos:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & x-0 \\ 0 & 1 & y-0 \\ 0 & -1 & z-0 \end{vmatrix} = 0 = z + y$$

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & x-0 \\ 0 & -1 & z-0 \\ -1 & 0 & t-1 \end{vmatrix} = 0 = -t - 1 - x$$

Por tanto, las ecuaciones cartesianas del plano son:

$$T \equiv \begin{cases} y + z = 0 \\ x + t + 1 = 0 \end{cases}$$

Ejercicio 5.1.21 (Producto de aplicaciones afines). Sean $\mathcal{A}_i, \mathcal{A}'_i$ espacios afines y $f_i : \mathcal{A}_i \rightarrow \mathcal{A}'_i$ aplicaciones afines para cada $i = 1, 2$. Demostrar que la aplicación

$$\begin{aligned} f_1 \times f_2 : \mathcal{A}_1 \times \mathcal{A}_2 &\longrightarrow \mathcal{A}'_1 \times \mathcal{A}'_2 \\ (p_1, p_2) &\longmapsto (f_1(p_1), f_2(p_2)) \end{aligned}$$

es una aplicación afín y $\overrightarrow{f_1 \times f_2} = \overrightarrow{f_1} \times \overrightarrow{f_2}$.

Para que sea una aplicación afín, es necesario encontrar una aplicación lineal asociada $\overrightarrow{f_1 \times f_2}$ que cumpla que:

$$\overrightarrow{f_1 \times f_2}[\overrightarrow{(p_1, p_2)(q_1, q_2)}] = \overrightarrow{(f_1 \times f_2)(p_1, p_2) (f_1 \times f_2)(q_1, q_2)} = \overrightarrow{(f_1(p_1), f_2(p_2))(f_1(q_1), f_2(q_2))}$$

Veamos que $\overrightarrow{f_1} \times \overrightarrow{f_2}$ cumple lo pedido:

$$\begin{aligned} (\overrightarrow{f_1} \times \overrightarrow{f_2})[\overrightarrow{(p_1, p_2)(q_1, q_2)}] &= (\overrightarrow{f_1} \times \overrightarrow{f_2})[(q_1, q_2) - (p_1, p_2)] = (\overrightarrow{f_1} \times \overrightarrow{f_2})(q_1 - p_1, q_2 - p_2) = \\ &= (\overrightarrow{f_1} \times \overrightarrow{f_2})(\overrightarrow{p_1 q_1}, \overrightarrow{p_2 q_2}) = \overrightarrow{(f_1(p_1)f_1(q_1), f_2(p_2)f_2(q_2))} = \overrightarrow{(f_1(q_1) - f_1(p_1), f_2(q_2) - f_2(p_2))} = \\ &= \overrightarrow{(f_1(q_1), f_2(q_2)) - (f_1(p_1), f_2(p_2))} = \overrightarrow{(f_1(p_1), f_2(p_2))(f_1(q_1), f_2(q_2))} \end{aligned}$$

Por tanto, hemos visto que, efectivamente, $f_1 \times f_2$ es una aplicación afín con $\overrightarrow{f_1 \times f_2} = \overrightarrow{f_1} \times \overrightarrow{f_2}$.

Ejercicio 5.1.22. Dadas $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ aplicación afín, $q \in \mathcal{A}$ y $h : \overrightarrow{\mathcal{A}} \rightarrow \overrightarrow{\mathcal{A}'}$ aplicación lineal, probar que la aplicación

$$\begin{aligned} g : \mathcal{A} &\longrightarrow \mathcal{A}' \\ p &\longmapsto f(p) + h(\overrightarrow{qp}) \end{aligned}$$

es la única aplicación afín con $g(q) = f(q)$ y $\vec{g} = h + \vec{f}$.

Veamos en primer lugar que g cumple dichos resultados. Es directo ver que $g(q) = f(p) + h(\vec{0}) = f(p)$. Comprobemos ahora que la aplicación lineal asociada es la correcta:

$$\begin{aligned}\vec{g}(\overrightarrow{p_1 p_2}) &= \overrightarrow{g(p_1)g(p_2)} = \overrightarrow{[f(p_1) + h(\overrightarrow{qp_1})][f(p_2) + h(\overrightarrow{qp_2})]} = \\ &= \overrightarrow{f(p_2) + h(\overrightarrow{qp_2}) - f(p_1) - h(\overrightarrow{qp_1})} = \overrightarrow{f(p_1)f(p_2)} + h(\overrightarrow{qp_2} + \overrightarrow{p_1 q}) = \\ &= \vec{f}(\overrightarrow{p_1 p_2}) + h(\overrightarrow{p_1 p_2}) = (h + \vec{f})(\overrightarrow{p_1 p_2})\end{aligned}$$

Por tanto, como esto es válido para todo $p_2, p_1 \in \mathcal{A}$, tenemos que $\vec{g} = h + \vec{f}$. Por tanto, g cumple las dos condiciones dadas. Veamos ahora que es única.

Opción 1) De forma rutinaria.

Supongamos que existe una aplicación afín $g' : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ con $g'(q) = f(q)$ y $\vec{g'} = h + \vec{f}$, y busquemos el valor de $g'(p)$, para cualquier $p \in \mathcal{A}$. De la definición de aplicación afín asociada, tenemos que:

$$\vec{g'}(\overrightarrow{qp}) = \overrightarrow{g'(q)g'(p)} = \overrightarrow{f(q)g'(p)} = g'(p) - f(q)$$

Ahora, como hemos supuesto que $\vec{g'} = h + \vec{f}$, tenemos que:

$$\vec{g'}(\overrightarrow{qp}) = (h + \vec{f})(\overrightarrow{qp}) = h(\overrightarrow{qp}) + \vec{f}(\overrightarrow{qp}) = h(\overrightarrow{qp}) + \overrightarrow{f(q)f(p)} = h(\overrightarrow{qp}) + f(p) - f(q)$$

Igualando ambos resultados, tenemos que:

$$g'(p) - f(q) = h(\overrightarrow{qp}) + f(p) - f(q) \implies g'(p) = f(p) + h(\overrightarrow{qp}) \quad \forall p \in \mathcal{A}$$

Por tanto, podemos ver que $g'(p) = g(p) \forall p \in \mathcal{A}$, por lo que $g' = g$.

Opción 2) Usando el Teorema 1.11.

Como $\vec{g'} = \vec{g}$, y $g(q) = f(p) = g'(q)$, tenemos que $q = g'$.

Por tanto, queda demostrado que g es la única aplicación que cumple dichos resultados.

Ejercicio 5.1.23. Dada la siguiente aplicación afín:

$$\begin{aligned}f : \mathbb{R}^3 &\longrightarrow \mathbb{R}^2 \\ (x, y, z) &\longmapsto (x - 2y + z - 1, x + y + z + 1)\end{aligned}$$

Calcular:

1. La imagen de la recta $L_1 = (1, 1, 2) + \mathcal{L}\{(2, 0, 1)\}$.

Opción 1) Calculamos las ecuaciones paramétricas de la recta:

$$\begin{cases} x = 1 + 2\lambda \\ y = 1 \\ z = 2 + \lambda \end{cases} \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

La imagen de L_1 por f tiene por ecuaciones paramétricas:

$$\begin{cases} x = (1 + 2\lambda) - 2(1) + (2 + \lambda) - 1 = 3\lambda \\ y = (1 + 2\lambda) + 1 + (2 + \lambda) + 1 = 5 + 3\lambda \end{cases} \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

Por tanto, $f(L_1) = (0, 5) + \mathcal{L}\{(3, 3)\} = (0, 5) + \mathcal{L}\{(1, 1)\}$.

Opción 2) Tenemos que todos los puntos de L_1 son de la forma $p = p_0 + \lambda v$, con $p_0 = (1, 1, 2)$ y $v = (2, 0, 1)$. Por tanto, y usando que \vec{f} es lineal, tenemos que $f(p) = f(p_0) + \lambda \vec{f}(v)$. Por tanto, $f(L_1) = f(p_0) + \mathcal{L}\{\vec{f}(v)\}$. Expresando f de forma matricial, tenemos que:

$$f \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \implies M(\vec{f}, \mathcal{B}_u, \mathcal{B}_u) = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Por tanto, deducimos que $\vec{f}(2, 0, 1) = (3, 3)$ y $f(1, 1, 2) = (0, 5)$, por lo que:

$$f(L_1) = (0, 5) + \mathcal{L}\{(3, 3)\} = (0, 5) + \mathcal{L}\{(1, 1)\}$$

Es decir, es una recta.

Optaremos por la opción 2, ya que se puede realizar de forma mecánica sin necesidad de escribir tantos pasos.

2. La imagen de la recta $L_2 = (0, 1, 1) + \mathcal{L}\{(1, 0, -1)\}$.

Tenemos que $f(0, 1, 1) = (-2, 3)$ y $\vec{f}(1, 0, -1) = (0, 0)$. Por tanto, tenemos que:

$$f(L_2) = (-2, 3) + \mathcal{L}\{0\} = (-2, 3)$$

Es decir, la imagen de L_2 es un punto.

3. La preimagen del punto $(1, 3)$.

Tenemos que $f^{-1}(1, 3) = \{(x, y, z) \mid f(x, y, z) = (1, 3)\}$. Es decir, son las soluciones de este sistema:

$$\begin{cases} 1 = x - 2y + z - 1 \\ 3 = x + y + z + 1 \end{cases} \implies \begin{cases} 2 = x - 2y + z \\ 2 = x + y + z \end{cases}$$

Restando, tenemos que $0 = -3y$, por lo que $y = 0$. La solución del sistema es:

$$\begin{cases} x = \lambda \\ y = 0 \\ z = 2 - \lambda \end{cases} \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

Es decir, $f^{-1}(1, 3) = (0, 0, 2) + \mathcal{L}\{(1, 0, -1)\}$.

Ejercicio 5.1.24. Demuestra que la siguiente aplicación afín es una homotecia y calcula su centro.

$$\begin{aligned} f : \mathbb{R}^2 &\longrightarrow \mathbb{R}^2 \\ (x, y) &\longmapsto (1 - 2x, 3 - 2y) \end{aligned}$$

Veamos cual es su aplicación lineal asociada:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{f} \left(\overrightarrow{(x, y)(x', y')} \right) &= \overrightarrow{f(x, y)f(x', y')} = \overrightarrow{(1 - 2x, 3 - 2y)(1 - 2x', 3 - 2y')} = \\ &= (1 - 2x', 3 - 2y') - (1 - 2x, 3 - 2y) = (-2(x' - x), -2(y' - y)) = -2[(x', y') - (x, y)] = \\ &= -2\overrightarrow{(x, y)(x', y')} = -2Id_{\mathbb{R}^2} \left(\overrightarrow{(x, y)(x', y')} \right) \end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que $\overrightarrow{f} = -2Id_{\mathbb{R}^2}$; es decir, es una homotecia de razón -2 . Veamos cuál es su centro o :

$$\begin{aligned} o &= (x, y) + \frac{1}{1 + 2} \overrightarrow{(x, y)f(x, y)} = (x, y) + \frac{1}{3}[(1 - 2x, 3 - 2y) - (x, y)] = \\ &= (x, y) + \frac{1}{3}[(1, 3) - (3x, 3y)] = \frac{1}{3}(1, 3) = \left(\frac{1}{3}, 1 \right) \end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que f es una homotecia de razón -2 y centro $o = \left(\frac{1}{3}, 1 \right)$.

Ejercicio 5.1.25. Calcula el subespacio afín de los puntos fijos de la aplicación afín $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ dada por $f(x, y, z) = \left(x + 3y + \frac{3}{2}, -2y - \frac{3}{2}, -4x - 4y - z - 2 \right)$.

Calculamos los puntos $(x, y, z) \in \mathbb{R}^3$ tal que $f(x, y, z) = (x, y, z)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} x + 3y + \frac{3}{2} = x \\ -2y - \frac{3}{2} = y \\ -4x - 4y - z - 2 = z \end{array} \right\} \implies \left\{ \begin{array}{l} x = \lambda \\ y = -\frac{1}{2} \\ z = -2\lambda \end{array} \right. \quad \lambda \in \mathbb{R}$$

Por tanto, tenemos las ecuaciones paramétricas de \mathcal{P}_f son las dadas. Entonces, tenemos que:

$$\mathcal{P}_f = \left(0, -\frac{1}{2}, 0 \right) + \mathcal{L}\{(1, 0, -2)\}$$

Ejercicio 5.1.26. En \mathbb{R}^2 consideremos el sistema de referencia dado por los puntos $\mathcal{R} = \{(0, -1), (3, 0), (-2, 1)\}$ y la aplicación $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ que en coordenadas (x, y) respecto de \mathcal{R} se escribe como $f(x, y) = (x - 2y, -x + y)$. Escribe la matriz asociada a f en el sistema de referencia usual de \mathbb{R}^2 .

Calculamos la matriz asociada a f en \mathcal{R} :

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & -1 & 1 \end{array} \right)$$

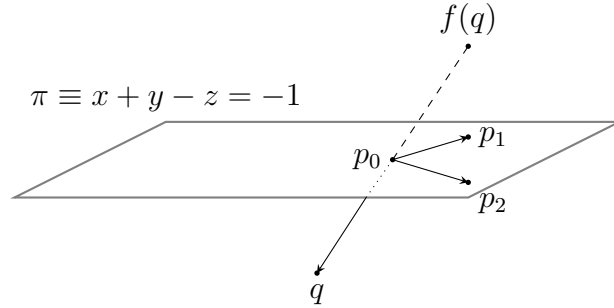
Además, la matriz de cambio de sistema de referencia de \mathcal{R} a \mathcal{R}_0 , sabiendo que $\mathcal{R} = \{(0, -1), \mathcal{B} = \{(3, 1), (-2, 2)\}\}$, es:

$$M(\mathcal{R}, \mathcal{R}_0) = M(Id_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ -1 & 1 & 2 \end{array} \right)$$

Por tanto, tenemos que:

$$\begin{aligned}
 M(f, \mathcal{R}_0) &= M(Id_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(f, \mathcal{R}) \cdot M(Id_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}) = \\
 &= M(Id_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(f, \mathcal{R}) \cdot M(Id_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0)^{-1} \\
 &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ -1 & 1 & 2 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -2 \\ 0 & -1 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & -2 \\ -1 & 1 & 2 \end{array} \right)^{-1} = \\
 &= \frac{1}{4} \left(\begin{array}{c|cc} 4 & 0 & 0 \\ -7 & 9 & -7 \\ -5 & -1 & -1 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

Ejercicio 5.1.27. Calcula la aplicación afín $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ que tiene como puntos fijos a los del plano $x + y - z = -1$ y tal que $f(0, 0, 0) = (1, 1, 1)$. ¿Es f biyectiva?



Consideramos dos vectores de $\overrightarrow{\pi}$ linealmente independientes:

$$v_1 = (1, 0, 1) \quad v_2 = (0, 1, 1)$$

Sea ahora $p_0 = (-1, -1, -1) \in \pi$ y $q = (0, 0, 0) \in \mathbb{R}^2$. Sea entonces el tercer vector de la base $v_3 = \overrightarrow{p_0 q} = (1, 1, 1)$. Comprobemos que los tres vectores son linealmente independientes:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 1 - 1 - 1 = -1 \neq 0$$

Por tanto, forman base. Tomamos el sistema de referencia $\mathcal{R} = \{p_0, \mathcal{B} = \{v_1, v_2, v_3\}\}$. Tenemos que $f(p_0) = p_0$ por ser un punto fijo, por lo que $f(p_0) = (0, 0, 0)_{\mathcal{R}}$. Calculamos ahora las imágenes mediante \overrightarrow{f} de los vectores de la base.

Tenemos que $v_i = \overrightarrow{p_0 p_i}$, con $p_i \in \pi$ para $i = 1, 2$. Entonces,

$$\overrightarrow{f}(v_i) = \overrightarrow{f(p_0) f(p_i)} = \overrightarrow{p_0 p_i} = v_i \quad i = 1, 2$$

Además, tenemos que:

$$\overrightarrow{f}(v_3) = \overrightarrow{f(p_0) f(q)} = \overrightarrow{p_0 (1, 1, 1)} = (2, 2, 2) = 2v_3$$

Entonces, la matriz asociada a f es:

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|cccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{array} \right)$$

Como la matriz asociada a \overrightarrow{f} es regular, tenemos que \overrightarrow{f} es biyectiva; y por tanto f también lo es.

Para obtener la matriz asociada a f en \mathcal{R}_0 , usamos que:

$$M(Id_{\mathbb{R}^3}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right)$$

Entonces, tenemos que:

$$\begin{aligned} M(f, \mathcal{R}_0) &= M(Id_{\mathbb{R}^3}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(f, \mathcal{R}) \cdot M(Id_{\mathbb{R}^3}, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}) = \\ &= \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right)^{-1} = \\ &= \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{array} \right) \end{aligned}$$

Ejercicio 5.1.28. Consideremos los sistemas de referencia de \mathbb{R}^2 dados por

$$\mathcal{R} = \{(1, 1), (2, 1), (2, 2)\} \quad \text{y} \quad \mathcal{R}' = \{(1, 0), (0, 0), (-1, -1)\}.$$

Sea $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ la única aplicación afín tal que

$$f(1, 1) = (3, 3), \quad f(2, 1) = (3, -1), \quad f(2, 2) = (2, 0).$$

Calcula las ecuaciones que representan a f respecto de los sistemas de referencia \mathcal{R} (en el dominio) y \mathcal{R}' (en el codominio), y las ecuaciones que representan a f respecto de los sistemas de referencia usuales. ¿Cuál es la imagen del punto $(5, 5)$?

Sea $\mathcal{R} = \{(1, 1), \mathcal{B} = \{(1, 0), (1, 1)\}\}$, $\mathcal{R}' = \{(1, 0), \mathcal{B}' = (-1, 0), (-2, -1)\}$. De forma directa, podemos obtener $M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0)$. Tenemos que:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{f}(1, 0) &= \overline{f(1, 1)f(2, 1)} = \overline{(3, 3)(3, -1)} = (0, -4) \\ \overrightarrow{f}(1, 1) &= \overline{f(1, 1)f(2, 2)} = \overline{(3, 3)(2, 0)} = (-1, -3) \end{aligned}$$

Por tanto,

$$M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & -1 \\ 3 & -4 & -3 \end{array} \right)$$

Para obtener las ecuaciones en los sistemas de referencia pedidos, calculamos las

matrices de cambio de base necesarias:

$$\begin{aligned}
 M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}') &= M(\text{Id}_{\mathcal{R}^2}, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}') \cdot M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) = \\
 &= M(\text{Id}_{\mathcal{R}^2}, \mathcal{R}', \mathcal{R}_0)^{-1} \cdot M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) = \\
 &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & -1 \end{array} \right)^{-1} \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & -1 \\ 3 & -4 & -3 \end{array} \right) = \\
 &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 4 & -8 & -5 \\ -3 & 4 & 3 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

Para las ecuaciones en los sistemas de referencia usuales, tenemos que:

$$\begin{aligned}
 M(f, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}_0) &= M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(\text{Id}_{\mathcal{R}^2}, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}) = \\
 &= M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(\text{Id}_{\mathcal{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0)^{-1} = \\
 &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & -1 \\ 3 & -4 & -3 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{array} \right)^{-1} = \\
 &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 4 & 0 & -1 \\ 6 & -4 & 1 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

Ejercicio 5.1.29. Sean \mathcal{A} un espacio afín, $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ una aplicación afín y el subespacio $S = p_0 + \mathcal{L}\{v_0\}$ una recta en \mathcal{A} . Demuestra que $f(S) = S$ si y solo si $\overrightarrow{p_0 f(p_0)} \in \mathcal{L}\{v_0\}$ y v_0 es un vector propio de \overrightarrow{f} de valor propio no nulo.

\Rightarrow) Suponemos que f deja invariante a la recta. Entonces, como $p_0 \in S$, entonces $f(p_0) \in S$, por lo que $\overrightarrow{p_0 f(p_0)} \in \overrightarrow{S} = \mathcal{L}\{v_0\}$. Veamos ahora que v_0 es un vector propio de \overrightarrow{f} de valor propio no nulo.

Para ver esto, veamos en primer lugar que $\exists p \in S$ tal que $f(p) \neq f(p_0)$. Si fuese $f(p) = f(p_0)$ para todo $p \in S$, tendríamos que $f(S) = f(p_0)$ un único punto, que no es posible ya que $f(S)$ es una recta. Por tanto, $\exists p \in S$ tal que $f(p) \neq f(p_0)$.

Como $f(p) \neq f(p_0)$, entonces $p \neq p_0$. Entonces, $\overrightarrow{pp_0} \in S$ no es nulo, por lo que $\overrightarrow{pp_0} = \lambda_1 v_0$, con $\lambda_1 \in \mathbb{R}^*$. Entonces, tenemos que:

$$\begin{aligned}
 \overrightarrow{f}(\overrightarrow{pp_0}) &\stackrel{(1)}{=} \overrightarrow{f}(\lambda_1 v_0) = \lambda_1 \overrightarrow{f}(v_0) \\
 &\stackrel{(2)}{=} \overrightarrow{f(p)f(p_0)} = \lambda_2 v_0
 \end{aligned}$$

Donde en (1) he aplicado lo visto anteriormente, y en (2) he aplicado la definición de aplicación lineal asociada y que, como $p, p_0 \in S$, sus imágenes pertenecen a S y, por tanto, dicho vector a \overrightarrow{S} . Además, como $f(p) \neq f(p_0)$, no es nulo, por lo que $\lambda_2 \in \mathbb{R}^*$.

Entonces, tenemos que:

$$\overrightarrow{f}(v_0) = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} v_0$$

con $\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \in \mathbb{R}^*$ valor propio, que no es nulo ya que $\lambda_1, \lambda_2 \neq 0$.

\Leftarrow) Veamos en primer lugar que $f(p_0) \in S$. Tenemos que $\overrightarrow{p_0 f(p_0)} = \lambda v_0$, con $\lambda \in \mathbb{R}$. Entonces, $f(p_0) = p_0 + \lambda v_0 \in S$, por lo que se tiene.

Además, por hipótesis v_0 es un vector propio de \vec{f} con valor propio $\lambda_1 \in \mathbb{R}^*$, por lo que $\vec{f}(v_0) = \lambda_1 v_0$.

Demostremos la doble inclusión:

\subset) Sea $p \in S$. Si $p = p_0$, tenemos que $f(p) \in S$, por lo que descartamos este caso inicial. Si $p \neq p_0$, entonces $p = p_0 + \lambda_2 v_0$, con $\lambda_2 \in \mathbb{R}^*$. Entonces,

$$f(p) = f(p_0) + \lambda_2 \vec{f}(v_0) = f(p_0) + \lambda_2 \lambda_1 v_0 \in S$$

Por tanto, tengo que $f(S) \subset S$.

\supset) Sea $q \in S$. Veamos que $\exists p \in S$ tal que $f(p) = q$. Tenemos que:

$$\begin{aligned} q &= p_0 + \lambda_2 v_0 + f(p_0) - f(p_0) = -\overrightarrow{p_0 f(p_0)} + \lambda_2 v_0 + f(p_0) = \\ &= \lambda_3 v_0 + f(p_0) = \lambda_3 \cdot \frac{\lambda}{\lambda} \cdot v_0 + f(p_0) = \frac{\lambda_3}{\lambda} \cdot \vec{f}(v_0) + f(p_0) = \\ &= f\left(p_0 + \frac{\lambda_3}{\lambda} \cdot v_0\right) \end{aligned}$$

Definiendo $p = p_0 + \frac{\lambda_3}{\lambda} \cdot v_0 \in S$, tenemos que $f(p) = q$. Por tanto, $q \in f(S)$.

Entonces, $f(S) = S$.

Ejercicio 5.1.30. Sean \mathcal{A} un plano afín, $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ una aplicación afín y R_1, R_2, R_3 tres rectas distintas donde no hay dos paralelas. Prueba que si $f(R_i) \parallel R_i$, $i = 1, 2, 3$, entonces f es una traslación o una homotecia.

Sean $p, q \in R_1$, $p \neq q$. Entonces, $\overrightarrow{pq} \in \overrightarrow{R_1}$, por lo que se puede tomar $\overrightarrow{R_1} = \mathcal{L}\{\overrightarrow{pq}\}$. Como $f(p), f(q) \in f(R_1)$, entonces $\overrightarrow{f(p)f(q)} \in \overrightarrow{R_1}$. Por tanto,

$$\overrightarrow{f(p)f(q)} = \vec{f}(\overrightarrow{pq}) \in \overrightarrow{R_1} \implies \vec{f}(\overrightarrow{pq}) = \lambda \overrightarrow{pq} \implies \vec{f}(v) = \lambda Id_{\vec{\mathcal{A}}}(v) \quad \forall v \in \overrightarrow{R_1}.$$

TERMINAR

Ejercicio 5.1.31. Sea $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ una aplicación afín de un espacio afín \mathcal{A} en sí mismo. Consideremos el subespacio vectorial $\mathcal{W} = \{v \in \vec{\mathcal{A}} \mid \vec{f}(v) = v\}$. Demuestra que

1. Si $\mathcal{W} = \{\vec{0}\}$ entonces f tiene un único punto fijo.
2. Si $\mathcal{W} \neq \{\vec{0}\}$ entonces el conjunto de puntos fijos de f es vacío o un subespacio afín cuyo espacio de direcciones es \mathcal{W} .

Ejercicio 5.1.32. Consideremos $k + 1$ puntos p_0, p_1, \dots, p_k de un espacio afín \mathcal{A} . Definimos el baricentro de estos puntos como

$$b = p_0 + \frac{1}{k+1} \sum_{i=1}^k \overrightarrow{p_0 p_i}.$$

Demuestra que b no depende del punto inicial p_0 elegido. (Cuando $k = 1$ el punto b se le denomina el punto medio de p_0 y p_1).

Ejercicio 5.1.33. Sea $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}'$ una aplicación afín entre dos espacios afines. Si $b \in \mathcal{A}$ es el baricentro de los puntos $p_0, p_1, \dots, p_k \in \mathcal{A}$, demuestra que $f(b)$ es el baricentro de los puntos $f(p_0), f(p_1), \dots, f(p_k)$.

Ejercicio 5.1.34. Un triángulo en un espacio afín son tres puntos afínmente independientes. Prueba que las tres medianas de un triángulo se cortan en el baricentro de sus vértices, donde se llama mediana a cada recta que pasa por un vértice y el punto medio de los otros dos.

Ejercicio 5.1.35. Sea T_1 un triángulo en un plano afín \mathcal{A} y T_2 el triángulo cuyos vértices son los tres puntos medios de los vértices de T_1 . Prueba que T_1 y T_2 tienen lados paralelos e igual baricentro. Calcula el centro y razón de la homotecia en \mathcal{A} que transforma T_2 en T_1 .

Ejercicio 5.1.36. Sean \mathcal{A} un espacio afín y $a_0, a_1, a_2 \in \mathcal{A}$ los vértices de un triángulo con baricentro $B \in \mathcal{A}$. Sean $a_3, a_4 \in \mathcal{A}$ los puntos intersección del lado que contiene a a_1 y a_2 con las rectas paralelas a los otros dos lados pasando por b . Demuestra que, salvo reordenación de los puntos a_3, a_4 , se tiene que

$$\overrightarrow{a_1 a_3} = \overrightarrow{a_3 a_4} = \overrightarrow{a_4 a_2} = \frac{1}{3} \cdot \overrightarrow{a_1 a_2}$$

Ejercicio 5.1.37. Sean \mathcal{A} un espacio afín de dimensión mayor o igual a dos y $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ una aplicación biyectiva (no necesariamente afín) que lleva rectas en rectas paralelas. Demuestra que

1. Toda recta que pasa por un punto fijo es una recta fija.

Sea $r = p + \overrightarrow{r}$ una recta, es decir, $\dim \overrightarrow{r} = 1$ y $p \in \mathcal{A}$. Entonces, como f lleva rectas en rectas paralelas, tenemos que

$$f(r) = f(p) + \overrightarrow{r} \quad \forall p \in r$$

Sea ahora p_0 el punto fijo, es decir, $f(p_0) = p_0$. Entonces:

$$f(r) = f(p_0) + \overrightarrow{r} = p_0 + \overrightarrow{r} = r$$

Por tanto, como $f(r) = r$, tenemos que f es una recta fija.

2. La recta que pasa por un punto y su imagen es una recta fija.

Sea ahora $r = p + \overrightarrow{r}$ una recta con $p_0, f(p_0) \in r$. Entonces, como ambos puntos están en la recta, tenemos que:

$$r = p_0 + \overrightarrow{r} \quad r = f(p_0) + \overrightarrow{r}$$

Calculemos ahora $f(r)$ para ver si es fija:

$$f(r) = f(p_0 + \overrightarrow{r}) = f(p_0) + \overrightarrow{r} = r$$

Por tanto, como $f(r) = r$, tenemos que f es una recta fija.

3. Si f tiene dos puntos fijos ha de ser la identidad.

Sean $p_0, p_1 \in \mathcal{A}$, $p_0 \neq p_1$, los puntos fijos; es decir, $f(p_0) = p_0$ y $f(p_1) = p_1$. Consideramos ahora $q \in \mathcal{A}$. Realizamos distinción entre si los tres puntos están o no alineados:

- a) Supongamos que no están alineados:

Sean entonces $\overrightarrow{p_1q}, \overrightarrow{p_2q} \in \overrightarrow{\mathcal{A}}$ dos vectores linealmente independientes (lo son ya que no están alineados). Consideramos las rectas $L_1 = q + \mathcal{L}\{\overrightarrow{p_1q}\}$, $L_2 = q + \mathcal{L}\{\overrightarrow{p_2q}\}$.

Tenemos que $q \in L_1, L_2$, por lo que $q \in L_1 \cap L_2$. Usemos ahora la fórmula de las dimensiones:

$$\dim(L_1 \cap L_2) = 2 - \dim(L_1 \vee L_2) \implies \dim(L_1 \cap L_2) = 0 \implies L_1 \cap L_2 = \{q\}$$

Además, como $p_1 \in L_1$ y $p_2 \in L_2$, como pasa por un punto fijo, es fija.

4. Si f tiene un único punto fijo ha de ser una homotecia.
5. Si f no tiene ningún punto fijo ha de ser una traslación.

Ejercicio 5.1.38. Sean T_1, T_2 dos triángulos de un espacio afín \mathcal{A} , con vértices respectivos a_1, b_1, c_1 y a_2, b_2, c_2 . Supongamos que los triángulos no tienen vértices comunes y las tres rectas $R_{a_1a_2}$, $R_{b_1b_2}$ y $R_{c_1c_2}$ son paralelas o se cortan en el mismo punto. Demuestra que si

$$R_{a_1b_1} \parallel R_{a_2b_2} \quad \text{y} \quad R_{a_1c_1} \parallel R_{a_2c_2}$$

entonces $R_{b_1c_1} \parallel R_{b_2c_2}$.

Ejercicio 5.1.39. Sea \mathcal{A} un espacio afín. Sea la aplicación $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ biyectiva y lleva rectas de \mathcal{A} en rectas paralelas, es decir:

$$r \parallel f(r) \quad \forall r \subset \mathcal{A}, \dim r = 1$$

Demostrar que f es una dilatación.

5.2. El Espacio Afín Euclídeo.

Ejercicio 5.2.1. Sean \mathcal{A} un espacio afín euclídeo y S un subespacio afín suyo. Dado un punto $p \in \mathcal{A}$ demuestra que existe $q_0 \in S$ tal que

$$d(p, q_0) = d(p, S) := \inf\{d(p, q) : q \in S\}.$$

Demostremos en primer lugar que existe $q_0 \in S$ tal que $\overrightarrow{pq_0} \in \overrightarrow{S}^\perp$. Notemos el subespacio S como $S = q + \overrightarrow{S}$.

Como se tiene que $\overrightarrow{\mathcal{A}} = \overrightarrow{S} \oplus \overrightarrow{S}^\perp$, entonces $\exists_1 u \in \overrightarrow{S}, v \in \overrightarrow{S}^\perp$ tal que:

$$\overrightarrow{pq} = u + v$$

Sea $q_0 = q - u \in S$. Entonces:

$$v = \overrightarrow{pq} - u = q - p - u = q_0 - p = \overrightarrow{pq_0} \in \overrightarrow{S}^\perp$$

Veamos ahora que $d(p, q_0) \leq d(p, q) \forall q \in S$:

$$\begin{aligned} d^2(p, q) &= \langle \overrightarrow{pq}, \overrightarrow{pq} \rangle = \langle \overrightarrow{pq_0} + \overrightarrow{q_0q}, \overrightarrow{pq_0} + \overrightarrow{q_0q} \rangle = \|\overrightarrow{pq_0}\|^2 + \|\overrightarrow{q_0q}\|^2 + 2\langle \overrightarrow{pq_0}, \overrightarrow{q_0q} \rangle = \\ &= \|\overrightarrow{pq_0}\|^2 + \|\overrightarrow{q_0q}\|^2 \geq \|\overrightarrow{pq_0}\|^2 = d^2(p, q_0) \quad \forall q \in S \end{aligned}$$

Por tanto, $d(p, q_0)$ es un minorante del conjunto. Como además $q_0 \in S$, pertenece al conjunto, por lo que es el ínfimo.

Por tanto, se tiene.

Ejercicio 5.2.2 (Hiperplano afín de puntos equidistantes). Dados tres puntos $p, q, r \in \mathbb{R}^n$, demostrar que se cumple la igualdad

$$d(p, q)^2 - d(q, r)^2 = 2\langle \overrightarrow{rm_{pq}}, \overrightarrow{qp} \rangle,$$

donde m_{pq} es el punto medio entre p y q . Utilizar esta igualdad para probar lo siguiente: si $p \neq q$, entonces el conjunto de los puntos de \mathbb{R}^n que se encuentran a la misma distancia de p y de q coincide con el hiperplano $m_{pq} + \mathcal{L}(\{\overrightarrow{pq}\})^\perp$.

Ejercicio 5.2.3. Dados los siguientes pares de rectas de \mathbb{R}^2 , estudia su posición relativa. Si se cortan, determina el ángulo que forman; en otro caso, calcula la distancia entre ellas.

1. $R = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x = y\}, S = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid 2x - y = 0\}$.

Tenemos que $R = (0, 0) + \mathcal{L}\{(1, 1)\}, S = (0, 0) + \mathcal{L}(1, 2)$.

Por tanto, son secantes. El origen $(0, 0) \in S \cap R$ está en la intersección. Veamos el ángulo entre las rectas:

$$\frac{\langle (1, 1), (1, 2) \rangle}{\|(1, 1)\| \|(1, 2)\|} = \frac{1 + 2}{\sqrt{2} \cdot \sqrt{5}} = \frac{3}{\sqrt{10}} \qquad \frac{\langle (1, 1), -(1, 2) \rangle}{\|(1, 1)\| \|(1, 2)\|} = -\frac{3}{\sqrt{10}}$$

Por tanto, tenemos que el ángulo es:

$$\alpha = \angle(S, R) = \arccos\left(\frac{3}{\sqrt{10}}\right) \approx 0,32 \text{ rad}$$

$$2. R = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x - y = 1\}, S = \{(2\lambda, 1 + 2\lambda) \mid \lambda \in \mathbb{R}\}.$$

Tenemos que $S = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y = 1 + x\} = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x - y = -1\}$. Por tanto, como las ecuaciones cartesianas de $S \cap R$ forman un SI, tenemos que $S \cap R = \emptyset$. Calculamos la distancia entre ambas rectas.

Tenemos que $R = \{(\mu, \mu - 1) \mid \mu \in \mathbb{R}\} = (0, -1) + \mathcal{L}\{(1, 1)\}$. Además, $S = (0, 1) + \mathcal{L}\{(1, 1)\}$. Por tanto, un vector arbitrario que una ambas rectas es $v = \overrightarrow{(\mu, \mu - 1)(2\lambda, 1 + 2\lambda)} = (2\lambda - \mu, 2\lambda - \mu + 2)$. Como $v \in \overrightarrow{R}^\perp$, entonces:

$$\langle (2\lambda - \mu, 2\lambda - \mu + 2), (1, 1) \rangle = 0 \iff 4\lambda - 2\mu + 2 = 0$$

Por ejemplo, para $\lambda = 0, \mu = 1$ se tiene que $v \in \overrightarrow{R}^\perp = \overrightarrow{S}^\perp$, tenemos que:

$$d(R, S) = \|v\| = \|(-1, 1)\| = \sqrt{2}$$

Ejercicio 5.2.4. En el espacio vectorial $\mathcal{P}_2(\mathbb{R})$, consideramos el producto escalar definido como $\langle p(x), q(x) \rangle = \int_0^1 p(x)q(x) dx$. Dotamos $\mathcal{P}_2(\mathbb{R})$ de la estructura afín canónica (que lo convierte en un espacio afín euclídeo) y consideramos las siguientes rectas afines:

$$S = \{p(x) \in \mathcal{P}_2(\mathbb{R}) \mid p(0) = 5, p''(8) = 4\} \quad \text{y} \quad T = \langle \{5x^2 - 2x, 2x^2 - x + 1\} \rangle.$$

Comprueba si S y T se cortan en un punto, y en dicho caso calcula el ángulo que forman.

Buscamos obtener las ecuaciones cartesianas de S . Tenemos que $p \in \mathcal{P}_2(\mathbb{R})$ arbitrario es $p(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$, con $a_0, a_1, a_2 \in \mathbb{R}$. Además, $p'(x) = a_1 + 2a_2x$ y $p''(x) = 2a_2$. Por tanto, las condiciones dadas son $a_0 = 5, a_2 = 2$. Por tanto, las ecuaciones paramétricas de S en el sistema de referencia $\mathcal{R} = \{0, \mathcal{B}_u = \{1, x, x^2\}\}$ son:

$$S = \{(a_0, a_1, a_2)_{\mathcal{R}} \in \mathcal{P}_2(\mathbb{R}) \mid a_0 = 5, a_2 = 2\}$$

Respecto a T , tenemos que el vector director es:

$$\overrightarrow{(5x^2 - 2x)(2x^2 - x + 1)} = (2x^2 - x + 1) - (5x^2 - 2x) = -3x^2 + x + 1$$

Por tanto, $T = 5x^2 - 2x + \mathcal{L}\{-3x^2 + x + 1\}$. Para calcular las ecuaciones cartesianas en \mathcal{R} , el siguiente determinante ha de ser nulo:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 - a_0 \\ 1 & -2 - a_1 \\ -3 & 5 - a_2 \end{vmatrix} = 0$$

Para ello, ha de ser:

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 - a_0 \\ 1 & -2 - a_1 \end{vmatrix} = 0 = -2 - a_1 + a_0 = 0 \quad \begin{vmatrix} 1 & 0 - a_0 \\ -3 & 5 - a_2 \end{vmatrix} = 0 = 5 - a_2 - 3a_0 = 0$$

Por tanto, las ecuaciones cartesianas en \mathcal{R} son:

$$T = \{(a_0, a_1, a_2)_{\mathcal{R}} \in \mathcal{P}_2(\mathbb{R}) \mid a_0 - a_1 = 2, 3a_0 + a_2 = 5\}$$

Por tanto, las ecuaciones cartesianas de $S \cap T$ en \mathcal{R} son:

$$S \cap T = \{(a_0, a_1, a_2)_{\mathcal{R}} \in \mathcal{P}_2(\mathbb{R}) \mid a_0 = 5, a_1 = 3, a_2 = 2, 3a_0 + a_2 = 5\}$$

Por tanto, $S \cap T = \emptyset$, por lo que no se cortan.

Ejercicio 5.2.5. En el espacio vectorial $\mathcal{M}_{2 \times 2}(\mathbb{R})$, consideramos el producto escalar definido como $\langle M, N \rangle = \text{tr}(M^t N)$. Dotamos $\mathcal{M}_{2 \times 2}(\mathbb{R})$ de la estructura afín canónica (que lo convierte en un espacio afín euclídeo). Calcula el ángulo que forman los siguientes hiperplanos afines:

$$S = \{M \in \mathcal{M}_{2 \times 2}(\mathbb{R}) \mid \text{tr}(M) = 2\} \quad \text{y} \quad T = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2 \times 2}(\mathbb{R}) \mid a = 1 \right\}$$

Tenemos que S viene dado por:

$$S = \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \in \mathcal{M}_{2 \times 2}(\mathbb{R}) \mid a + d = 2 \right\}$$

Tenemos que los vectores normales a S y T , que son:

$$n_S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad n_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Entonces $\angle(S, T) = \angle(n_S, n_T)$, por lo que:

$$\angle(S, T) = \arccos \left(\frac{\text{tr}(n_S^t n_T)}{\text{tr}(n_S^t n_S) \cdot \text{tr}(n_T^t n_T)} \right) = \arccos \left(\frac{1}{2 \cdot 1} \right) = \frac{\pi}{3}$$

Ejercicio 5.2.6. En \mathbb{R}^2 consideramos dos triángulos $T_1 = \{a_1, a_2, a_3\}$ y $T_2 = \{b_1, b_2, b_3\}$. Demuestra que:

1. Existen seis aplicaciones afines de \mathbb{R}^2 en \mathbb{R}^2 que llevan T_1 en T_2 .

Son las distintas formas de reordenar el conjunto de 3 elementos; es decir, las permutaciones, que son $3! = 6$.

2. Una de las aplicaciones afines anteriores $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ es isometría si y sólo si

$$d(a_i, a_j) = d(f(a_i), f(a_j)), \quad \forall i, j \in \{1, 2, 3\},$$

donde $d(\cdot, \cdot)$ es la función distancia de \mathbb{R}^2 .

\Rightarrow) Por ser isometría, se tiene de forma directa.

\Leftarrow) Veamos que \vec{f} es una isometría. Como T_1 son tres puntos afínmente independientes, sea $\mathcal{B} = \{\overrightarrow{a_1 a_2}, \overrightarrow{a_1 a_3}\}$. Entonces, tenemos que:

$$\langle u, v \rangle = \langle \alpha \overrightarrow{a_1 a_2} + \beta \overrightarrow{a_1 a_3}, \alpha \overrightarrow{a_1 a_2} + \beta \overrightarrow{a_1 a_3} \rangle = \alpha^2 \|\overrightarrow{a_1 a_2}\|^2 + \beta^2 \|\overrightarrow{a_1 a_3}\|^2 + 2\alpha\beta \langle \overrightarrow{a_1 a_2}, \overrightarrow{a_1 a_3} \rangle$$

TERMINAR

Ejercicio 5.2.7. En \mathbb{R}^3 , considera el plano afín $\Pi = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x+y-z = -1\}$. Sea $s : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ la simetría respecto de Π . Calcula la imagen mediante s de la recta dada por las ecuaciones $r \equiv \frac{x-1}{2} = \frac{y+1}{-3} = z-1$.

Sabemos que $r = (1, -1, 1) + \mathcal{L}(2, -3, 1)$. Como el vector director de la recta no es un vector de $\overrightarrow{\mathbb{R}^3}$, tenemos que son secantes. Además, como son complementarios entonces su intersección es un único punto.

En este caso, da la casualidad de que $p_0 = (1, -1, 1) \in \Pi$, por lo que:

$$r \cap \Pi = \{(1, -1, 1)\} = \{p_0\}$$

Por tanto, tenemos que:

$$s(q) = p_0 + \sigma_{\Pi}(\overrightarrow{p_0 q}) \quad \forall q \in \mathbb{R}^3$$

Como tan solo piden la imagen de la recta dada, tenemos que $q = p_0 + \lambda v$, con $v = (2, -3, 1)$, $\lambda \in \mathbb{R}$. La imagen pedida es:

$$s(r) = s(p_0 + \lambda v) = p_0 + \sigma_{\Pi}(\overrightarrow{p_0(p_0 + \lambda v)}) = p_0 + \sigma_{\Pi}(\lambda v) = p_0 + \lambda \sigma_{\Pi}(v) \quad \forall \lambda \in \mathbb{R}$$

Por tanto, tan solo es necesario calcular $\sigma_{\Pi}(v)$. Para ello, lo descomponemos como $v = v_t + v_n$, con $v_t \in \overrightarrow{\Pi}$, $v_n \in \overrightarrow{\Pi}^\perp$. Veamos dos formas para hacerlo:

Forma 1: Más rápida y con menos cálculos, pero con un razonamiento más complejo.

Como $\overrightarrow{\Pi}^\perp = \mathcal{L}\{(1, 1, -1)\} = \mathcal{L}\{N\}$, tenemos que $v_n = \alpha N$, con $\alpha \in \mathbb{R}$. Calculemos el valor de α :

$$\langle v, N \rangle = \langle v_t, N \rangle + \alpha \langle N, N \rangle \implies \alpha = \frac{\langle v, N \rangle}{\langle N, N \rangle} = \frac{\langle v, N \rangle}{\|N\|^2} = \frac{-2}{3}$$

Además, tenemos que $v_t = v - \alpha N$. Entonces, sabiendo la definición de simetría vectorial, tenemos que:

$$\sigma_{\Pi}(v) = \sigma_{\Pi}(v_t + \alpha N) = v_t - \alpha N = v - 2\alpha N = (2, -3, 1) + \frac{4}{3}(1, 1, -1) = \frac{1}{3}(10, -5, -1)$$

Forma 2: Forma usual, resolviendo un sistema de ecuaciones con 3 ecuaciones. Unos cálculos bastante más complejos (hay que resolver un sistema 3×3), pero razonamiento más sencillo.

Tenemos que $\overrightarrow{\Pi}^\perp = \mathcal{L}\{(1, 1, -1)\}$ y $\overrightarrow{\Pi} = \mathcal{L}\{(1, 0, 1), (1, -1, 0)\}$. Buscamos las coordenadas de v en la base $\mathcal{B} = \{(1, 0, 1), (1, -1, 0), (1, 1, -1)\}$:

$$(2, -3, 1) = \alpha(1, 0, 1) + \beta(1, -1, 0) + \gamma(1, 1, -1)$$

Por tanto, el sistema a resolver es:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha + \beta + \gamma = 2 \\ -\beta + \gamma = -3 \\ \alpha - \gamma = 1 \end{array} \right\} \implies \left\{ \begin{array}{l} \alpha = 1/3 \\ \beta = 7/3 \\ \gamma = -2/3 \end{array} \right.$$

Por tanto, $v = \frac{1}{3}(1, 0, 1) + \frac{7}{3}(1, -1, 0) - \frac{2}{3}(1, 1, -1)$. Entonces:

$$\sigma_{\Pi}(v) = \frac{1}{3}(1, 0, 1) + \frac{7}{3}(1, -1, 0) + \frac{2}{3}(1, 1, -1) = \frac{1}{3}(10, -5, -1)$$

Por tanto, y sabiendo el valor de $\sigma_{\vec{H}}(v)$, tenemos que:

$$s(r) = (1, -1, 1) + \mathcal{L} \{(10, -5, -1)\}$$

Ejercicio 5.2.8. Una aplicación afín $f : (\mathcal{A}, \langle, \rangle) \rightarrow (\mathcal{A}', \langle, \rangle')$ entre espacios afines euclidianos se dice que preserva la ortogonalidad si para cualesquiera rectas secantes R, S en \mathcal{A} tales que $R \perp S$, entonces $f(R) \perp f(S)$.

Probar que si $f : (\mathcal{A}, \langle, \rangle) \rightarrow (\mathcal{A}', \langle, \rangle')$ es una aplicación afín biyectiva, entonces f es una semejanza (composición de un movimiento rígido y una homotecia) si, y sólo si, f preserva la ortogonalidad.

\Rightarrow) Supongamos $R \perp S$, por lo que $\vec{R} \perp \vec{S}$; es decir, $\langle u, v \rangle = 0$ para todo $u \in \vec{R}$, $v \in \vec{S}$. Veamos si $f(R) \perp f(S)$, o equivalentemente $\vec{f}(\vec{R}) \perp \vec{f}(\vec{S})$.

Sean $u_f \in \vec{f}(\vec{R})$, $v_f \in \vec{f}(\vec{S})$. Como f es una biyección, tenemos que \vec{f} también lo es, por lo que $\exists_1 u \in \vec{R}, v \in \vec{S} \mid \vec{f}(u) = u_f, \vec{f}(v) = v_f$.

Veamos si $\langle u_f, v_f \rangle = 0$:

$$\langle u_f, v_f \rangle = \langle \vec{f}(u), \vec{f}(v) \rangle$$

Veamos ahora el valor de \vec{f} . Como f es la composición de un movimiento rígido con una homotecia, sea $f = g \circ h$, con h homotecia y g movimiento rígido. Entonces, tenemos que $\vec{h} = kId_{\vec{\mathcal{A}}}$, mientras que \vec{f} es una isometría vectorial. Por tanto:

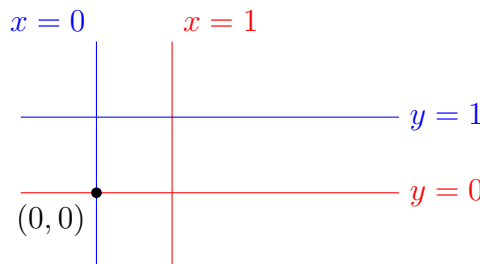
$$\begin{aligned} \langle u_f, v_f \rangle &= \langle \vec{f}(u), \vec{f}(v) \rangle = \langle \vec{g}(\vec{h}(u)), \vec{g}(\vec{h}(v)) \rangle = \langle \vec{g}(ku), \vec{g}(kv) \rangle \stackrel{(*)}{=} \\ &\stackrel{(*)}{=} \langle ku, kv \rangle = k^2 \langle u, v \rangle = 0 \quad \forall u_f \in \vec{R}, v_f \in \vec{S} \end{aligned}$$

donde en $(*)$ he aplicado que \vec{g} es una isometría vectorial.

Por tanto, hemos demostrado que si f es una semejanza, entonces preserva la ortogonalidad.

\Leftarrow) TERMINAR

Ejercicio 5.2.9. Encuentra, si existe, un movimiento rígido de \mathbb{R}^2 que lleve la recta $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x = 0\}$ en la recta $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y = 1\}$, y también lleve la recta $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid y = 0\}$ en la recta $\{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x = 1\}$.



Opción 1: Composición de un giro con una traslación.

Sean las las siguientes rectas, con sus respectivas imágenes:

$$\begin{aligned} r &= (0, 0) + \mathcal{L}\{(0, 1)\} \longrightarrow f(r) = (1, 1) + \mathcal{L}\{(-1, 0)\} \\ s &= (0, 0) + \mathcal{L}\{(1, 0)\} \longrightarrow f(s) = (1, 1) + \mathcal{L}\{(0, 1)\} \end{aligned}$$

Podemos ver que una posible solución es que f sea la composición de un giro de 90 grados centrado en el origen junto con una traslación según el vector $(1, 1)$.

Opción 2: Simetría axial.

También podemos ver las rectas, con sus respectivas imágenes, de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} r &= (0, 1) + \mathcal{L}\{(0, 1)\} \longrightarrow f(r) = (0, 1) + \mathcal{L}\{(-1, 0)\} \\ s &= (1, 0) + \mathcal{L}\{(1, 0)\} \longrightarrow f(s) = (1, 0) + \mathcal{L}\{(0, -1)\} \end{aligned}$$

Podemos ver que hay dos puntos fijos, $(0, 1)$, $(1, 0)$. Tenemos que se trata de la reflexión axial respecto de $L = (0, 1) + \mathcal{L}\{(1, -1)\}$; es decir, $L \equiv y = -x + 1$.

Ejercicio 5.2.10. Sean f_1, f_2 las simetrías (ortogonales) de \mathbb{R}^2 respecto de las rectas $R_1 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x - y = 2\}$ y $R_2 = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x - 2y = 1\}$, respectivamente. Calcula $f_1 \circ f_2$ y descríbela geoméricamente.

Ejercicio 5.2.11. Considera un espacio afín euclídeo \mathcal{A} de dimensión 3, y sea f un movimiento rígido de \mathcal{A} tal que $f(1, 0, 1) = (2, -3, 1)$ en coordenadas de un sistema de referencia euclídeo fijo. Si sabemos que f es la simetría respecto de un plano, calcula dicho plano.

Ejercicio 5.2.12. Sea \mathcal{A} un espacio afín euclídeo de dimensión 2, y sean R_1 y R_2 dos rectas de \mathcal{A} . Prueba que siempre es posible encontrar un movimiento rígido $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ que lleve R_1 en R_2 . Estudia de qué tipo es f , según la posición relativa de R_1 y R_2 . ¿Se puede elegir siempre directo? ¿E inverso?

Ejercicio 5.2.13. Sean p y q dos puntos distintos en un espacio afín euclídeo. Demuestra que existe una única simetría respecto de un hiperplano que lleva p en q .

Ejercicio 5.2.14. Sean R_1 y R_2 dos rectas que se cruzan en un espacio afín euclídeo tridimensional \mathcal{A} . Demuestra que existe una única recta afín R que interseca de manera ortogonal a R_1 y R_2 . Prueba además que la distancia de R_1 a R_2 es exactamente la distancia entre los puntos dados por $R_1 \cap R$ y $R_2 \cap R$.

Ejercicio 5.2.15. Consideremos la aplicación $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ que viene dada por $f(x, y) = (y - 2, x + 1)$. ¿Es f un movimiento rígido? En tal caso, clasifícalo.

Ejercicio 5.2.16. Demostrar que si p y q son dos puntos de un espacio afín euclídeo \mathcal{A} , entonces siempre existe un movimiento rígido $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ tal que $f(p) = q$. De forma más general, probar que si \mathcal{A} tiene dimensión finita y S, S' son dos subespacios afines de \mathcal{A} de dimensión m , entonces existe un movimiento rígido $f : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{A}$ tal que $f(S) = S_0$.

Ejercicio 5.2.17. Consideremos la aplicación $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ que viene dada por $f(x, y) = (2y - 1, -2x + 3)$. ¿Es f un movimiento rígido? En tal caso, clasifícalo.

Ejercicio 5.2.18. Sean $f_1, f_2 : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ las isometrías dadas, respectivamente, por las simetrías respecto de las rectas de ecuación $x + y = 0$ y $x + 2y = 2$.

1. Calcula explícitamente f_1 y f_2 en coordenadas usuales.
2. Clasifica el movimiento rígido $g = f_1 \circ f_2$.

Ejercicio 5.2.19. Demuestra que las siguientes aplicaciones son movimientos rígidos del plano y clasifícalos.

$$1. f(x, y) = \left(3 - \frac{3x}{5} + \frac{4y}{5}, 1 - \frac{4x}{5} - \frac{3y}{5} \right).$$

Tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 3 & -3/5 & 4/5 \\ 1 & -4/5 & -3/5 \end{array} \right)$$

Como \mathcal{R}_0 es un sistema de referencia ortonormal, para ver si f es una isometría (equivalentemente vemos que \vec{f} lo es) basta con probar que $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) \in O(2)$. Tenemos que:

$$M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)^t = \begin{pmatrix} -3/5 & 4/5 \\ -4/5 & -3/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -3/5 & -4/5 \\ 4/5 & -3/5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = Id_2$$

Por tanto, \vec{f} es una isometría y por tanto, también lo es f . Como $|f| = 1$, tenemos que f es una isometría directa en el plano. Calculamos sus puntos fijos $(x, y) \in \mathbb{R}^2$:

$$\begin{pmatrix} -3/5 - 1 & 4/5 \\ -4/5 & -3/5 - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -8/5 & 4/5 \\ -4/5 & -8/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3 \\ -1 \end{pmatrix}$$

Equivalentemente,

$$\begin{pmatrix} -8 & 4 \\ -4 & -8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -15 \\ -5 \end{pmatrix}$$

Por tanto, tenemos que solo hay un punto fijo, el punto $o = \frac{1}{4}(7, -1)$. Por tanto, se trata de un giro en el plano centrado en el punto o . Para calcular el ángulo no orientado sabemos que:

$$2 \cos \theta = \text{tr}(M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)) = -\frac{6}{5} \implies \cos \theta = -\frac{6}{10} = -\frac{3}{5} \implies \theta \approx 2,21 \text{ rad}$$

Por tanto, se trata de un giro en el plano centrado en el punto $o = \frac{1}{4}(7, -1)$ y de ángulo $\theta \approx 2,21$ rad.

$$2. f(x, y) = \left(\frac{x}{2} - \frac{\sqrt{3}y}{2} + 1, \frac{\sqrt{3}x}{2} + \frac{y}{2} + 2 \right).$$

Tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 2 & \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{array} \right)$$

Como \mathcal{R}_0 es un sistema de referencia ortonormal, para ver si f es una isometría (equivalentemente vemos que \vec{f} lo es) basta con probar que $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) \in O(2)$. Tenemos que:

$$M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)^t = \begin{pmatrix} 1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -\sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = Id_2$$

Por tanto, \vec{f} es una isometría y por tanto, también lo es f . Como $|f| = 1$, tenemos que f es una isometría directa en el plano. Calculamos sus puntos fijos $(x, y) \in \mathbb{R}^2$:

$$\begin{pmatrix} 1/2 - 1 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & -1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ -2 \end{pmatrix}$$

Equivalentemente,

$$\begin{pmatrix} -1 & -\sqrt{3} \\ \sqrt{3} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ -4 \end{pmatrix}$$

Por tanto, tenemos que solo hay un punto fijo, el punto

$$o = \frac{1}{2}(-2\sqrt{3} + 1, \sqrt{3} + 2)$$

Por tanto, se traza de un giro en el plano centrado en el punto o . Para calcular el ángulo no orientado sabemos que:

$$2 \cos \theta = \text{tr}(M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)) = 1 \implies \cos \theta = \frac{1}{2} \implies \theta = \frac{\pi}{3} \text{ rad}$$

Por tanto, se trata de un giro en el plano de ángulo $\theta = \frac{\pi}{3}$ rad y centrado en el punto $o = \frac{1}{2}(-2\sqrt{3} + 1, \sqrt{3} + 2)$.

$$3. f(x, y) = \left(-\frac{x}{2} + \frac{\sqrt{3}y}{2} + 1, \frac{\sqrt{3}x}{2} + \frac{y}{2} - 1 \right).$$

Tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1 & \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{array} \right)$$

Como \mathcal{R}_0 es un sistema de referencia ortonormal, para ver si f es una isometría (equivalentemente vemos que \vec{f} lo es) basta con probar que $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) \in O(2)$. Tenemos que:

$$M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)^t = \begin{pmatrix} -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = Id_2$$

Por tanto, \vec{f} es una isometría y por tanto, también lo es f . Como $|f| = -1$, tenemos que f es una isometría inversa en el plano. Calculamos sus puntos fijos $(x, y) \in \mathbb{R}^2$:

$$\begin{pmatrix} -1/2 - 1 & \sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -3/2 & \sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & -1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Equivalentemente,

$$\begin{pmatrix} -3 & \sqrt{3} \\ \sqrt{3} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Por tanto, tenemos que f no tiene puntos fijos, ya que ese sistema es un SI. Por tanto, tenemos que es una simetría axial con deslizamiento.

Calculamos en primer lugar su eje de simetría L , buscando primero \vec{L} . Como $\vec{f} = \sigma_{\vec{L}}$, tenemos que $\vec{L} = V_1$, por lo que:

$$\begin{aligned} \vec{L} &= \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid (M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) - Id)(x, y)^t = (0, 0)^t\} = \\ &= \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} -1/2 - 1 & \sqrt{3}/2 \\ \sqrt{3}/2 & 1/2 - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} = \\ &= \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} -3 & \sqrt{3} \\ \sqrt{3} & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} = \\ &= \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x = \frac{\sqrt{3}}{3}y \right\} = \mathcal{L} \left\{ \left(\frac{\sqrt{3}}{3}, 1 \right) \right\} \end{aligned}$$

Falta ahora calcular un punto $(x, y) \in S$. Para ello, hay dos opciones:

Opción 1: Método General. Este método también es válido para los movimientos helicoidales.

Sea $(x, y) \in L$, por lo que $\overrightarrow{(x, y)f(x, y)} \in \vec{L}$. Aplicando esta condición, tenemos que:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{(x, y)f(x, y)} &= f(x, y) - (x, y) = \left(-\frac{3}{2}x + \frac{\sqrt{3}y}{2} + 1, \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} - 1 \right) \in \vec{L} \implies \\ \implies -\frac{3}{2}x + \frac{\sqrt{3}y}{2} + 1 &= \frac{\sqrt{3}}{3} \left(\frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{y}{2} - 1 \right) \implies -\frac{3}{2}x + \frac{\sqrt{3}y}{2} + 1 = \frac{x}{2} - \frac{\sqrt{3}}{6}y - \frac{\sqrt{3}}{3} \implies \\ \implies -2x + \frac{2\sqrt{3}}{3}y + 1 + \frac{\sqrt{3}}{3} &= 0 \implies x = \frac{\sqrt{3}}{3}y + \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{6} \end{aligned}$$

Esta es la ecuación cartesiana del eje en el sistema de referencia \mathcal{R}_0 . Por tanto, tenemos que un punto del eje es $(1/2, -1/2)$.

Opción 2 : Método concreto para las reflexiones con deslizamiento.

Tenemos que $m_{pf(p)} \in L$ por ser una simetría con desplazamiento. Por tanto, dado $p = (0, 0)$, tenemos que $f(p) = (1, -1)$, por lo que:

$$m_{pf(p)} = \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right) \in S$$

Es decir,

$$L = \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right) + \mathcal{L} \left\{ \left(\frac{\sqrt{3}}{3}, 1 \right) \right\}$$

Falta ahora por calcular el vector de desplazamiento, tenemos que este se calcula como $v = \overrightarrow{pf(p)}$ para cualquier $p \in L$.

$$v = f \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right) - \left(\frac{1}{2}, -\frac{1}{2} \right) = \left(\frac{1 - \sqrt{3}}{4}, \frac{-3 + \sqrt{3}}{4} \right)$$

$$4. f(x, y) = \left(\frac{3x}{5} + \frac{4y}{5} + 2, \frac{4x}{5} - \frac{3y}{5} + 5 \right).$$

Tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 2 & 3/5 & 4/5 \\ 5 & 4/5 & -3/5 \end{array} \right)$$

Como \mathcal{R}_0 es un sistema de referencia ortonormal, para ver si f es una isometría (equivalentemente vemos que \vec{f} lo es) basta con probar que $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) \in O(2)$. Tenemos que:

$$M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)^t = \begin{pmatrix} 3/5 & 4/5 \\ 4/5 & -3/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 3/5 & 4/5 \\ 4/5 & -3/5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = Id_2$$

Por tanto, \vec{f} es una isometría y por tanto, también lo es f . Como $|f| = -1$, tenemos que f es una isometría inversa en el plano. Calculamos sus puntos fijos $(x, y) \in \mathbb{R}^2$:

$$\begin{pmatrix} 3/5 - 1 & 4/5 \\ 4/5 & -3/5 - 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2/5 & 4/5 \\ 4/5 & -8/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ -5 \end{pmatrix}$$

Equivalentemente,

$$\begin{pmatrix} -2 & 4 \\ 4 & -8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -10 \\ -25 \end{pmatrix}$$

Por tanto, tenemos que f no tiene puntos fijos, ya que ese sistema es un SI. Por tanto, tenemos que es una simetría axial con deslizamiento.

Sea L el eje de simetría, y calculemos \vec{L} . Como $\vec{f} = \sigma_{\vec{L}}$, tenemos que $\vec{L} = V_1$, por lo que:

$$\begin{aligned}\vec{L} &= \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid (M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) - Id)(x, y)^t = (0, 0)^t\} = \\ &= \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} -2 & 4 \\ 4 & -8 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} = \\ &= \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid -x + 2y = 0\} = \mathcal{L}\{(2, 1)\}\end{aligned}$$

Busquemos ahora un punto de L . tenemos que $m_{pf(p)} \in L$ para todo $p \in \mathbb{R}^2$. Sea $p = (0, 0)$, $f(p) = (2, 5)$. Tenemos que:

$$m_{pf(p)} = (1, 5/2) \in L$$

Por tanto, el eje es $L = (1, 5/2) + \mathcal{L}\{(2, 1)\}$. El vector de desplazamiento es $v = \overrightarrow{pf(p)}$ para todo $p \in L$. Entonces:

$$v = \overrightarrow{pf(p)} = f(1, 5/2) - (1, 5/2) = \left(\frac{18}{5}, \frac{9}{5}\right)$$

Ejercicio 5.2.20. Demuestra que las siguientes aplicaciones son movimientos rígidos del espacio y clasifícalos.

1. $f(x, y, z) = (2 + y, x, 1 + z)$.

Tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

Como \mathcal{R}_0 es un sistema de referencia ortonormal, para ver si f es una isometría (equivalentemente vemos que \vec{f} lo es) basta con probar que $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) \in O(3)$. Tenemos que:

$$M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)^t = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = Id_3$$

Por tanto, tenemos que \vec{f} es una isometría, y por tanto f lo es también. Como $|\vec{f}| = -1$, tenemos que se trata de una isometría inversa. Calculemos los puntos fijos:

$$-\begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Por tanto, f no tiene puntos fijos, por lo que se trata de una simetría especular con deslizamiento. Calculemos el plano de simetría π . Obtenemos en primer

lugar $\vec{\pi}$, que como $\vec{f} = \sigma_{\vec{\pi}}$, tenemos que es V_1 :

$$\begin{aligned}\vec{\pi} &= \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid (M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) - Id)(x, y, z)^t = (0, 0, 0)^t\} = \\ &= \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} = \\ &= \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x - y = 0\} = \mathcal{L}\{(1, 1, 0), (0, 0, 1)\}\end{aligned}$$

Busquemos ahora un punto de π . tenemos que $m_{pf(p)} \in \pi$ para todo $p \in \mathbb{R}^3$. Sea $p = (0, 0, 0)$, $f(p) = (2, 0, 1)$. Tenemos que:

$$m_{pf(p)} = \left(1, 0, \frac{1}{2}\right) \in \pi$$

Por tanto, el plano de simetría es $\pi = (1, 0, \frac{1}{2}) + \mathcal{L}\{(1, 1, 0), (0, 0, 1)\}$. El vector de desplazamiento es $v = \overrightarrow{pf(p)}$ para todo $p \in \pi$. Entonces:

$$v = \overrightarrow{pf(p)} = f\left(1, 0, \frac{1}{2}\right) - \left(1, 0, \frac{1}{2}\right) = \left(2, 1, \frac{3}{2}\right) - \left(1, 0, \frac{1}{2}\right) = (1, 1, 1)$$

$$2. f(x, y, z) = \left(\frac{x}{2} - \frac{\sqrt{3}z}{2} + 2, y + 2, \frac{\sqrt{3}x}{2} + \frac{z}{2} + 2\right).$$

Tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 2 & 1/2 & 0 & -\sqrt{3}/2 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & \sqrt{3}/2 & 0 & 1/2 \end{array}\right)$$

Como \mathcal{R}_0 es un sistema de referencia ortonormal, para ver si f es una isometría (equivalentemente vemos que \vec{f} lo es) basta con probar que $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) \in O(3)$. Tenemos que:

$$M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)^t = \begin{pmatrix} 1/2 & 0 & -\sqrt{3}/2 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sqrt{3}/2 & 0 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/2 & 0 & \sqrt{3}/2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sqrt{3}/2 & 0 & 1/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = Id_3$$

Por tanto, tenemos que \vec{f} es una isometría, y por tanto f lo es también. Como $|\vec{f}| = 1$, tenemos que se trata de una isometría directa. Calculemos los puntos fijos:

$$-\begin{pmatrix} -1/2 & 0 & -\sqrt{3}/2 \\ 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{3}/2 & 0 & -1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Por tanto, f no tiene puntos fijos, por lo que se trata de una traslación o de un movimiento helicoidal. Como $\vec{f} \neq Id_{\mathbb{R}^3}$, tenemos que f es un movimiento helicoidal. Busquemos el eje de giro L , el ángulo de giro θ , y el vector de deslizamiento v .

Como $\vec{f} = G_{\theta, \vec{L}}$, tenemos que $\vec{L} = V_1$. Por tanto,

$$\begin{aligned}\vec{L} &= \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid (M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) - Id)(x, y, z)^t = (0, 0, 0)^t\} = \\ &= \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{pmatrix} -1/2 & 0 & -\sqrt{3}/2 \\ 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{3}/2 & 0 & -1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} = \\ &= \mathcal{L}\{(0, 1, 0)\}\end{aligned}$$

Para obtener un punto del eje, sabemos que dado $(x, y, z) \in L$, entonces $\overrightarrow{(x, y, z)f(x, y, z)} \in \vec{L}$. Por tanto,

$$\begin{aligned}\overrightarrow{(x, y, z)f(x, y, z)} &= f(x, y, z) - (x, y, z) = \left(-\frac{x}{2} - \frac{\sqrt{3}z}{2} + 2, 2, \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{z}{2} + 2 \right) \in \vec{L} \iff \\ &\iff -\frac{x}{2} - \frac{\sqrt{3}z}{2} + 2 = 0 = \frac{\sqrt{3}x}{2} - \frac{z}{2} + 2 \iff x = 1 - \sqrt{3}, \quad z = 1 + \sqrt{3}\end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que el eje es:

$$L = (1 - \sqrt{3}, 0, 1 + \sqrt{3}) + \mathcal{L}\{(0, 1, 0)\}$$

Para calcular el ángulo de giro, sabemos que:

$$2 \cos \theta + 1 = \text{tr}(M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)) = 2 \implies \cos \theta = \frac{1}{2} \implies \theta = \frac{\pi}{3}$$

Por último, tan solo falta calcular el vector de desplazamiento. Tenemos que $v = \overrightarrow{pf(p)}$ para cualquier $p \in L$. Tomando $p = (1 - \sqrt{3}, 0, 1 + \sqrt{3})$, tenemos que $f(p) = (1 - \sqrt{3}, 2, 1 + \sqrt{3})$. Por tanto,

$$v = (0, 2, 0)$$

$$3. \quad f(x, y, z) = \left(-\frac{4x}{5} + \frac{3z}{5} + 3, y, \frac{3x}{5} + \frac{4z}{5} - 1 \right).$$

Tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 3 & -4/5 & 0 & 3/5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 3/5 & 0 & 4/5 \end{array} \right)$$

Como \mathcal{R}_0 es un sistema de referencia ortonormal, para ver si f es una isometría (equivalentemente vemos que \vec{f} lo es) basta con probar que $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) \in O(3)$.

Tenemos que:

$$M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)^t = \begin{pmatrix} -4/5 & 0 & 3/5 \\ 0 & 1 & 0 \\ 3/5 & 0 & 4/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -4/5 & 0 & 3/5 \\ 0 & 1 & 0 \\ 3/5 & 0 & 4/5 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = Id_3$$

Por tanto, tenemos que \vec{f} es una isometría, y por tanto f lo es también. Como $|\vec{f}| = -1$, tenemos que se trata de una isometría inversa. Calculemos los puntos fijos:

$$-\begin{pmatrix} -9/5 & 0 & 3/5 \\ 0 & 0 & 0 \\ 3/5 & 0 & -1/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix} \implies x = \frac{5}{3} + \frac{1}{3}z$$

Es decir, f tiene un plano de puntos fijos, por lo que se trata de una simetría especular. El plano es:

$$\pi = \left(\frac{5}{3}, 0, 0\right) + \mathcal{L}\{(0, 1, 0), (1, 0, 3)\}$$

$$4. f(x, y, z) = \left(-\frac{4x}{5} + \frac{3z}{5} + 3, y + 4, \frac{3x}{5} + \frac{4z}{5} - 1\right).$$

Tenemos que $f(x, y, z) = f'(x, y, z) + (0, 4, 0)$, donde f' es la reflexión especular del apartado anterior.

Por tanto, tenemos que se trata una reflexión especular en el plano $\pi = \left(\frac{5}{3}, 0, 0\right) + \mathcal{L}\{(0, 1, 0), (1, 0, 3)\}$ con deslizamiento según el vector $v = (0, 4, 0)$.

$$5. f(x, y, z) = \left(\frac{2y}{\sqrt{5}} + \frac{z}{\sqrt{5}}, \frac{\sqrt{5}x}{3} - \frac{2y}{3\sqrt{5}} + \frac{4z}{3\sqrt{5}}, -\frac{2x}{3} - \frac{y}{3} + \frac{2z}{3}\right).$$

Tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 2/\sqrt{5} & 1/\sqrt{5} \\ 0 & \sqrt{5}/3 & -2/3\sqrt{5} & 4/3\sqrt{5} \\ 0 & -2/3 & -1/3 & 2/3 \end{array} \right)$$

Como \mathcal{R}_0 es un sistema de referencia ortonormal, para ver si f es una isometría (equivalentemente vemos que \vec{f} lo es) basta con probar que $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) \in O(3)$. Tenemos que:

$$\begin{pmatrix} 0 & 2/\sqrt{5} & 1/\sqrt{5} \\ \sqrt{5}/3 & -2/3\sqrt{5} & 4/3\sqrt{5} \\ -2/3 & -1/3 & 2/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \sqrt{5}/3 & -2/3 \\ 2/\sqrt{5} & -2/3\sqrt{5} & -1/3 \\ 1/\sqrt{5} & 4/3\sqrt{5} & 2/3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = Id_3$$

Por tanto, tenemos que \vec{f} es una isometría, y por tanto f lo es también. Como $|\vec{f}| = -1$, tenemos que se trata de una isometría inversa. Además, como $f(0, 0, 0) = (0, 0, 0)$, sabemos que al menos hay un punto fijo. Veamos si hay más:

$$-\begin{pmatrix} -1 & 2/\sqrt{5} & 1/\sqrt{5} \\ \sqrt{5}/3 & -2/3\sqrt{5} - 1 & 4/3\sqrt{5} \\ -2/3 & -1/3 & -1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Como el rango de la matriz de coeficientes es 3, tenemos que el sistema es SCD, por lo que tan solo hay una solución, que sabemos que es el origen. Por

tanto, se trata de un giro con simetría. Sabemos que el ángulo de giro θ cumple la siguiente condición:

$$2 \cos \theta - 1 = \text{tr}(M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)) = \frac{2}{3} - \frac{2}{3\sqrt{5}} \implies \cos \theta = \frac{25 - 2\sqrt{5}}{30} \implies \theta \approx 0,817 \text{ rad.}$$

Calculemos ahora el eje L . Sabemos que \vec{f} es un giro con simetría vectoriales, y $\vec{L} = V_{-1}$. Entonces:

$$\begin{aligned} \vec{L} &= \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid (M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) + Id)(x, y, z)^t = (0, 0, 0)^t\} = \\ &= \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{pmatrix} 1 & 2/\sqrt{5} & 1/\sqrt{5} \\ \sqrt{5}/3 & -2/3\sqrt{5} + 1 & 4/3\sqrt{5} \\ -2/3 & -1/3 & 5/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\} = \\ &= \mathcal{L} \left\{ (\sqrt{5} + 4, -2\sqrt{5} - 3, 1) \right\} \end{aligned}$$

Por tanto, tenemos que el eje de giro es:

$$L = (0, 0, 0) + \mathcal{L} \left\{ (\sqrt{5} + 4, -2\sqrt{5} - 3, 1) \right\}$$

$$6. f(x, y, z) = \left(\frac{\sqrt{5}x}{3} - \frac{2y}{3\sqrt{5}} + \frac{4z}{3\sqrt{5}}, \frac{2y}{\sqrt{5}} + \frac{z}{\sqrt{5}}, -\frac{2x}{3} - \frac{y}{3} + \frac{2z}{3} \right).$$

Tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & \sqrt{5}/3 & -2/3\sqrt{5} & 4/3\sqrt{5} \\ 0 & 0 & 2/\sqrt{5} & 1/\sqrt{5} \\ 0 & -2/3 & -1/3 & 2/3 \end{array} \right)$$

Como \mathcal{R}_0 es un sistema de referencia ortonormal, para ver si f es una isometría (equivalentemente vemos que \vec{f} lo es) basta con probar que $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) \in O(3)$. Tenemos que:

$$\begin{pmatrix} \sqrt{5}/3 & -2/3\sqrt{5} & 4/3\sqrt{5} \\ 0 & 2/\sqrt{5} & 1/\sqrt{5} \\ -2/3 & -1/3 & 2/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sqrt{5}/3 & 0 & -2/3 \\ -2/3\sqrt{5} & 2/\sqrt{5} & -1/3 \\ 4/3\sqrt{5} & 1/\sqrt{5} & 2/3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = Id_3$$

Por tanto, tenemos que \vec{f} es una isometría, y por tanto f lo es también. Como $|\vec{f}| = 1$, tenemos que se trata de una isometría directa. Además, como $f(0, 0, 0) = (0, 0, 0)$, sabemos que al menos hay un punto fijo. Veamos si hay más:

$$- \begin{pmatrix} \sqrt{5}/3 - 1 & -2/3\sqrt{5} & 4/3\sqrt{5} \\ 0 & 2/\sqrt{5} - 1 & 1/\sqrt{5} \\ -2/3 & -1/3 & -1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \implies \begin{cases} x = \frac{-\sqrt{5}-3}{2} \cdot \lambda \\ y = (\sqrt{5}+2) \cdot \lambda \\ z = \lambda \end{cases}$$

Por tanto, tenemos que hay una recta de puntos fijos,

$$L = (0, 0, 0) + \mathcal{L} \left\{ \left(\frac{-\sqrt{5}-3}{2}, \sqrt{5}+2, 1 \right) \right\}$$

Veamos ahora el ángulo de giro θ . Tenemos que:

$$2 \cos \theta + 1 = \text{tr}(M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)) = \frac{10 + 11\sqrt{5}}{15} \implies \cos \theta = \frac{-5 + 11\sqrt{5}}{30} \implies \theta \approx 0,86 \text{ rad.}$$

Ejercicio 5.2.21. Calcula en coordenadas usuales de \mathbb{R}^2 el giro centrado en el punto $c = (1, 2)$ y de ángulo $\frac{2\pi}{3}$.

Sea el sistema de referencia $\mathcal{R} = \{c, \mathcal{B}_u\}$, y sea $\theta = \frac{2\pi}{3}$. Entonces, tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -1/2 \end{array} \right)$$

Para expresarlo en coordenadas usuales, tenemos que:

$$\begin{aligned} M(f, \mathcal{R}_0) &= M(\text{Id}_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(f, \mathcal{R}) \cdot M(\text{Id}_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}) = \\ &= M(\text{Id}_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(f, \mathcal{R}) \cdot M(\text{Id}_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0)^{-1} = \\ &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -1/2 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 1 \end{array} \right)^{-1} = \\ &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 2\sqrt{3}+3/2 & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \\ -\sqrt{3}+6/2 & \sqrt{3}/2 & -1/2 \end{array} \right) \end{aligned}$$

Ejercicio 5.2.22. Calcula la simetría con deslizamiento respecto de la recta dada por la ecuación $L \equiv x - y = 1$ de \mathbb{R}^2 y vector de desplazamiento $v = (-2, -2)$.

Tenemos que $L = (1, 0) + \mathcal{L}\{(1, 1)\}$, por lo que $\vec{L}^\perp = \mathcal{L}\{(1, -1)\}$. Sea entonces el sistema de referencia $\mathcal{R} = \{(1, 0), \mathcal{B} = \{(1, 1), (1, -1)\}\}$.

Tenemos que $f(1, 0) = (1, 0) + (-2, -2) = (-1, -2)$. Calculamos sus coordenadas en \mathcal{R} :

$$(-1, -2) = (1, 0) + \alpha(1, 1) + \beta(1, -1) = (1 + \alpha + \beta, \alpha - \beta)$$

Por tanto, $\alpha = -2$, $\beta = 0$, por lo que $f(1, 0) = (-2, 0)_{\mathcal{R}}$. Entonces,

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

Para expresarlo en coordenadas usuales (aunque en este caso no lo piden), tenemos que:

$$\begin{aligned} M(f, \mathcal{R}_0) &= M(\text{Id}_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(f, \mathcal{R}) \cdot M(\text{Id}_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}) = \\ &= M(\text{Id}_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(f, \mathcal{R}) \cdot M(\text{Id}_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0)^{-1} = \\ &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline -2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{array} \right)^{-1} = \\ &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ -3 & 1 & 0 \end{array} \right) \end{aligned}$$

Ejercicio 5.2.23. Sea $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ la aplicación afín dada por

$$f(-1, -1) = (0, 0), \quad f(-1, -2) = (1, 0), \quad f(0, -1) = (0, 1).$$

Demuestra que f es un movimiento rígido y clasifícalo.

Definimos en primer lugar el sistema de referencia dado por $\mathcal{R} = \{(-1, -1), (-1, -2), (0, -1)\}$. Tenemos que su base asociada es $\mathcal{B} = \{(0, -1), (1, 0)\}$. Calculemos las imágenes de los vectores de la base mediante \vec{f} :

$$\begin{aligned} \vec{f}(0, -1) &= \overrightarrow{f(-1, -1)f(-1, -2)} = \overrightarrow{(0, 0)(1, 0)} = (1, 0) \\ \vec{f}(1, 0) &= \overrightarrow{f(-1, -1)f(0, -1)} = \overrightarrow{(0, 0)(0, 1)} = (0, 1) \end{aligned}$$

Tenemos que su matriz asociada es:

$$M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

En el sistema de referencia usual, tenemos que es:

$$\begin{aligned} M(f, \mathcal{R}_0) &= M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(Id_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}) = \\ &= M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(Id_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0)^{-1} = \\ &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & 0 \end{array} \right)^{-1} = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ \hline -1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 \end{array} \right) \end{aligned}$$

Es fácil comprobar que cumple las tres condiciones dadas por el enunciado. Como \mathcal{R}_0 es un sistema de referencia ortonormal, tenemos que para comprobar que f es un movimiento rígido basta con comprobar que $M(\vec{f}, \mathcal{B}_u) \in O(2)$. Tenemos que:

$$M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)^t = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} = Id_2$$

Por tanto, tenemos que es una isometría. Como $|\vec{f}| = 1$, tenemos que f es una isometría directa. Calculemos los puntos fijos:

$$-\begin{pmatrix} -1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 1 \end{pmatrix} \implies \begin{cases} x = -1 \\ y = 0 \end{cases}$$

Es decir, es una isometría directa con un único punto fijo, por lo que se trata de un giro de ángulo $\theta \neq 0$. Calculemos su ángulo de giro:

$$2 \cos \theta = \text{tr}(M(\vec{f}, \mathcal{B}_u)) \implies \cos \theta = 0 \implies \theta = \frac{\pi}{2}$$

Es decir, se trata de giro centrado en el punto $(-1, 0)$ y de ángulo $\frac{\pi}{2}$ rad.

Ejercicio 5.2.24. Sea \mathcal{R} el sistema de referencia de \mathbb{R}^2 con origen en el punto $(1, 1)$ y base asociada $\{(1, 1), (-1, 1)\}$. Consideremos la aplicación afín f tal que, si (x, y) son las coordenadas de un punto genérico p en el sistema de referencia \mathcal{R} , entonces las coordenadas de $f(p)$ en el sistema de referencia usual vienen dadas por

$$\begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}.$$

¿Es f un movimiento rígido? En caso afirmativo, clasifícalo.

Tenemos que $\mathcal{R} = \{(1, 1), \mathcal{B}\}$, con $\mathcal{B} = \{(1, 1), (-1, 1)\}$. La matriz asociada de f viene dada por:

$$M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & -1 \end{array} \right)$$

En el sistema de referencia usual, tenemos que es:

$$\begin{aligned} M(f, \mathcal{R}_0) &= M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(Id_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}) = \\ &= M(f, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0) \cdot M(Id_{\mathbb{R}^2}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0)^{-1} = \\ &= \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 3 & 1 & -1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{array} \right)^{-1} = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 1 \\ 2 & 1 & 0 \end{array} \right) \end{aligned}$$

Claramente, \vec{f} es una isometría; y como $|\vec{f}| = -1$, tenemos que es una isometría inversa. Calculemos sus puntos fijos:

$$-\begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 2 \end{pmatrix}$$

Por tanto, tenemos que hay una recta de puntos fijos: $L \equiv x - y = -2$. Es decir, $L = (-1, 1) + \mathcal{L}\{(1, 1)\}$. Como f es una isometría inversa, tenemos que f es una reflexión axial sobre la recta L .

Ejercicio 5.2.25. Sean $f_1, f_2 : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$ las isometrías dadas respectivamente por las simetrías respecto de los planos de ecuaciones $x + y = 1$ y $x - z = 2$.

1. Calcula explícitamente f_1 y f_2 en coordenadas usuales.

Sea f_1 la simetría especular respecto de $\pi_1 = (0, 1, 1) + \mathcal{L}\{(1, -1, 0), (0, 0, 1)\}$. Tenemos que $\vec{\pi}_1^\perp = \mathcal{L}\{(1, 1, 0)\}$; por lo que consideramos el sistema de referencia $\mathcal{R} = \{(0, 1, 1), \mathcal{B}\}$, con $\mathcal{B} = \{(1, -1, 0), (0, 0, 1), (1, 1, 0)\}$. Tenemos que:

$$M(f_1, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

En las coordenadas usuales, esta es:

$$\begin{aligned}
 M(f_1, \mathcal{R}_0) &= M(Id_{\mathbb{R}^3}, \mathcal{R}, \mathcal{R}_0)M(f_1, \mathcal{R})M(Id_{\mathbb{R}^3}, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}) = \\
 &= \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right)^{-1} = \\
 &= \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

Sea f_2 la simetría especular respecto de $\pi_2 = (1, 0, -1) + \mathcal{L}\{(1, 0, 1), (0, 1, 0)\}$. Tenemos que $\vec{\pi}_2^\perp = \mathcal{L}\{(1, 0, -1)\}$; por lo que consideramos el sistema de referencia $\mathcal{R}' = \{(1, 0, -1), \mathcal{B}'\}$, con $\mathcal{B}' = \{(1, 0, 1), (0, 1, 0), (1, 0, -1)\}$. Tenemos que:

$$M(f_2, \mathcal{R}') = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right)$$

En las coordenadas usuales, esta es:

$$\begin{aligned}
 M(f_2, \mathcal{R}_0) &= M(Id_{\mathbb{R}^3}, \mathcal{R}', \mathcal{R}_0)M(f_2, \mathcal{R}')M(Id_{\mathbb{R}^3}, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}') = \\
 &= \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & -1 \end{array} \right)^{-1} = \\
 &= \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -2 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

2. Clasifica el movimiento rígido $g = f_1 \circ f_2$.

Tenemos que $|g| = |f_1| \cdot |f_2| = 1$, por lo que se trata de una isometría directa en el espacio. Además, tenemos que la recta dada por la intersección de ambos planos es una recta de puntos fijos. Es decir, la recta L dada por:

$$L = \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \begin{array}{l} x + y = 1 \\ x - z = 2 \end{array} \right\} = (0, 1, -2) + \mathcal{L}\{(1, -1, 1)\}$$

es una recta de puntos fijos. Como $\vec{f} \neq Id_{\mathbb{R}^3}$, tenemos que no hay más puntos fijos, por lo que se trata de un giro sobre el eje L . Para obtener el ángulo de giro, obtenemos $M(\vec{g}, \mathcal{B}_u)$:

$$\begin{aligned}
 M(\vec{g}, \mathcal{B}_u) &= M(\overrightarrow{f_1 \circ f_2}, \mathcal{B}_u) = M(\vec{f}_1 \circ \vec{f}_2, \mathcal{B}_u) = M(\vec{f}_1, \mathcal{B}_u) \cdot M(\vec{f}_2, \mathcal{B}_u) = \\
 &= \left(\begin{array}{ccc} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \left(\begin{array}{ccc} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{ccc} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \end{array} \right)
 \end{aligned}$$

Por tanto, si θ es el ángulo de giro, tenemos que:

$$1 + 2 \cos \theta = \text{tr}(M(\vec{g}, \mathcal{B}_u)) = 0 \implies \cos \theta = -\frac{1}{2} \implies \theta = \frac{2\pi}{3}$$

Ejercicio 5.2.26. Calcula en coordenadas usuales la isometría de \mathbb{R}^3 dada por el movimiento helicoidal alrededor de la recta $R = (1, 2, 1) + \mathcal{L}\{(1, 0, -1)\}$ con giro de ángulo $\theta = \frac{\pi}{2}$ y vector de traslación $v = (-2, 0, 2)$.

Sea $\vec{R}^\perp = \mathcal{L}\{(0, 1, 0), (1, 0, 1)\}$. Consideramos entonces el sistema de referencia dado por $\mathcal{R} = \{(1, 2, 1), \mathcal{B}\}$, con $\mathcal{B} = \{(1, 0, -1), (0, 1, 0), (1, 0, 1)\}$. Calculemos las coordenadas de v en \mathcal{B} :

$$v = (-2, 0, 2) = \alpha(1, 0, -1) + \beta(0, 1, 0) + \gamma(1, 0, 1)$$

Entonces, $\alpha = -2$, $\beta = 0$, $\gamma = 0$, por lo que $v = (-2, 0, 0)_{\mathcal{B}}$. Entonces, tenemos que:

$$M(f, \mathcal{R}) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{array} \right)$$

Ejercicio 5.2.27. Clasifica el siguiente movimiento rígido de \mathbb{R}^3 :

$$f(x, y, z) = \frac{1}{3}(2x + 2y + z + 2, x - 2y + 2z - 2, 2x - y - 2z - 4)$$

y calcula sus elementos notables (o geométricos).

Ejercicio 5.2.28. Calcula la simetría con deslizamiento respecto del plano de ecuación $x + y + z = 1$ de \mathbb{R}^3 y con vector de traslación $v = (2, -1, -1)$.

Ejercicio 5.2.29. Clasifica el movimiento rígido de \mathbb{R}^3 dado por

$$f(x, y, z) = \left(\frac{2x + 2y + z + 3}{3}, \frac{-2x + y + 2z}{3}, \frac{-x + 2y - 2z - 3}{3} \right)$$

Ejercicio 5.2.30. Calcula la isometría de \mathbb{R}^3 dada por la composición de un giro de ángulo $\frac{\pi}{2}$ respecto del eje $R \equiv (1, 2, 0) + \mathcal{L}(\{(0, 1, 0)\})$ y la simetría respecto del plano $y = -1$.

Ejercicio 5.2.31. Para cada $\alpha \in \mathbb{R}$ se considera el movimiento rígido de \mathbb{R}^3 dado por:

$$f_\alpha(x, y, z) = \frac{1}{3}(-x + 2y + 2z + 2, 2x + 2y - z - 1, 2x - y + 2z - \alpha).$$

Clasificar, según los valores de α , qué tipo de movimiento es f_α , calculando en cada caso el conjunto de puntos fijos.

Ejercicio 5.2.32. Sea \mathcal{R} es el sistema de referencia con origen en el punto $(1, 0, 1)$ y base asociada $\{(1, 0, 0), (1, 1, 0), (1, 1, 1)\}$. Determina si la siguiente aplicación afín $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^3$, que en coordenadas respecto del sistema de referencia afín \mathcal{R} está dada por

$$f \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{1}{5} \left[\begin{pmatrix} -9 \\ 16 \\ -7 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 5 & 2 & -2 \\ 0 & 7 & 8 \\ 0 & -4 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \right]$$

es un movimiento rígido y, en caso afirmativo, clasifícalo.

Ejercicio 5.2.33. Decide de forma razonada qué tipo de movimiento rígido es:

1. La composición de dos simetrías ortogonales en el plano euclídeo \mathbb{R}^2 .
2. La composición de dos simetrías ortogonales con deslizamiento en el plano euclídeo \mathbb{R}^2 .
3. La composición de un giro y una simetría en el plano euclídeo \mathbb{R}^2 .
4. La composición de un giro y una simetría con deslizamiento en el plano euclídeo \mathbb{R}^2 .
5. La composición de dos simetrías ortogonales en el espacio euclídeo \mathbb{R}^3 .
6. La composición de un giro y una simetría en el espacio euclídeo \mathbb{R}^3 .
7. La composición de un giro y una traslación en el espacio euclídeo \mathbb{R}^3 .
8. La composición de dos simetrías centrales en el espacio euclídeo \mathbb{R}^3 .

Ejercicio 5.2.34. Demuestra que la composición de dos simetrías respecto de dos puntos distintos es una traslación.

Ejercicio 5.2.35. Sea T un triángulo en un espacio afín euclídeo \mathcal{A} con vértices $a, b, c \in \mathcal{A}$. La recta que pasa por el vértice a y con vector director

$$v_a = \frac{1}{\|\vec{ab}\|} \vec{ab} + \frac{1}{\|\vec{ac}\|} \vec{ac}$$

la llamamos bisectriz que pasa por a . Si se definen de manera análoga las bisectrices que pasan por los vértices b y c , prueba que las tres rectas se cortan en un mismo punto, que llamaremos incentro del triángulo.

Ejercicio 5.2.36. Calcula el baricentro, ortocentro, circuncentro e incentro del triángulo de \mathbb{R}^2 que tiene por vértices a los puntos $(0, 0), (1, 0)$ y $(0, 1)$.

Ejercicio 5.2.37. ¿Está el incentro de cualquier triángulo alineado con el baricentro, ortocentro y circuncentro?

Ejercicio 5.2.38 (Ejercicio de Examen 2022-23). Demostrar que, en un triángulo isósceles, los 4 puntos notables de un triángulo están alineados.

Tenemos que ver que los 4 puntos están en una misma recta. Esto se debe a que la misma altura

5.3. Hipercuádricas afines.

Ejercicio 5.3.1. Clasifica las hipercuádricas de un espacio afín euclídeo de dimensión 1.

Tenemos que la forma cuadrática de toda hipercuádrica en cierto sistema de referencia euclídeo \mathcal{R} es una de las siguientes:

1. $\frac{x^2}{a^2} = 0$.

Es un único punto doble, el origen.

2. $\frac{x^2}{a^2} = 1$.

Son dos puntos, $x = \pm a$.

3. $\frac{x^2}{a^2} = -1$.

No es posible, por lo que es el vacío.

Ejercicio 5.3.2. En el semiplano $P = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid y = 0, x \geq 0\}$ tomamos una circunferencia C de centro $(c, 0, 0)$ y radio $r > 0$ con $C > r > 0$. Se llama toro de revolución generado por C a la superficie T obtenida al rotar C alrededor del eje z . Dibujar T y describir la superficie como el conjunto de soluciones de una ecuación con 3 incógnitas. ¿Es dicha ecuación la de una cuádrica?

Ejercicio 5.3.3. Sea \mathcal{A} un espacio afín de dimensión n y S un subespacio afín suyo de dimensión $m > 0$. Demuestra que:

1. Existe un sistema de referencia \mathcal{R} de \mathcal{A} tal que las ecuaciones implícitas de S en dicho sistema son $x_{m+1} = 0, \dots, x_n = 0$.
2. Si H es una hipercuádrica de \mathcal{A} entonces $H \cap S$ es una hipercuádrica de S o bien vacío o todo S .

Ejercicio 5.3.4. Sean H una hipercuádrica y R una recta de un espacio afín \mathcal{A} . Prueba que $R \cap H$ puede ser vacío, un punto, dos puntos o toda la recta. Da un ejemplo conocido de cada uno de los casos cuando \mathcal{A} tiene dimensión 2 y dimensión 3.

Ejercicio 5.3.5. Construir explícitamente un isomorfismo afín $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ tal que $f(C) = C'$ en cada uno de los siguientes casos:

1. $n = 2$, $C = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \right\}$, $C' = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 - y^2 = 1\}$.
2. $n = 3$, $C = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 + y^2 + z^2 = 1\}$, $C' = \left\{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \right\}$.
3. $n = 2$, $C = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x^2 - y = 0\}$, $C' = \{(x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid x - y^2 = 0\}$.
4. $n = 3$, $C = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid ax^2 + by^2 = 1\}$, $C' = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid x^2 + y^2 = 1\}$.

Ejercicio 5.3.6. Cuestiones sobre elipses:

1. Dados dos puntos distintos p_1, p_2 de un plano afín euclídeo \mathcal{A} y $r > \frac{1}{2}d(p_1, p_2)$, demuestra que $H = \{p \in \mathcal{A} \mid d(p, p_1) + d(p, p_2) = r\}$ es una elipse. Los puntos p_1, p_2 reciben el nombre de focos de la elipse. Se llama centro de la elipse al punto medio de sus focos y vértices a los puntos de intersección de la elipse con la recta que pasa por sus focos.
2. Prueba que toda elipse se puede escribir como en el apartado anterior, para ciertos puntos $p_1, p_2 \in \mathcal{A}$.
3. Demuestra que toda elipse H es simétrica con respecto a la recta $R_{p_1 p_2}$ que pasa por sus focos y con respecto a la mediatriz de sus focos.
4. Prueba que, para cada punto p de una elipse H , la recta tangente a H en p forma ángulos iguales con las rectas que pasan por p y cada uno de sus focos.

Ejercicio 5.3.7. Cuestiones sobre hipérbolas:

1. Dados dos puntos distintos p_1, p_2 de un plano afín euclídeo \mathcal{A} y $r > \frac{1}{2}d(p_1, p_2)$, demuestra que $H = \{p \in \mathcal{A} \mid |d(p, p_1) - d(p, p_2)| = r\}$ es una hipérbola. Los puntos p_1, p_2 reciben el nombre de focos de la hipérbola. Se llama centro de la hipérbola al punto medio de sus focos y vértices a los puntos de intersección de la hipérbola con la recta que pasa por sus focos.
2. Prueba que toda hipérbola se puede escribir como en el apartado anterior, para ciertos puntos $p_1, p_2 \in \mathcal{A}$.
3. Demuestra que toda hipérbola H es simétrica con respecto a la recta $R_{p_1 p_2}$ que pasa por sus focos y con respecto a la mediatriz de sus focos.
4. Prueba que, para cada punto p de una hipérbola H , la recta tangente a H en p forma ángulos iguales con las rectas que pasan por p y cada uno de sus focos.

Ejercicio 5.3.8. Cuestiones sobre parábolas:

1. Sean p_0 un punto de un plano afín euclídeo \mathcal{A} y R una recta de \mathcal{A} que no contiene a p_0 . Demuestra que $H = \{p \in \mathcal{A} \mid d(p, p_0) = d(p, R)\}$ es una parábola. El punto p_0 recibe el nombre de foco de la parábola y R se llama directriz de la parábola. Se llama vértice de la parábola al punto de la parábola más próximo al foco o, equivalentemente, a la directriz.
2. Prueba que toda parábola se puede escribir como en el apartado anterior, para cierto punto p_0 y cierta recta R de \mathcal{A} .
3. Demuestra que toda parábola H es simétrica con respecto a la recta que pasa por su foco y es perpendicular a su directriz (esta recta se llama eje de la parábola).
4. Prueba que, para cada punto p de una parábola H , la recta tangente a H en p forma ángulos iguales con la recta que pasa por p y su foco y con la recta que pasa por p y es paralela al eje de la parábola.

Ejercicio 5.3.9. Consideremos las siguientes rectas de \mathbb{R}^3 :

$$R_1 = (1, 0, 0) + \mathcal{L}\{(0, 1, 1)\} \quad R_2 = (1, 0, 0) + \mathcal{L}\{(0, -1, 1)\}$$

1. Demuestra que la superficie generada al rotar R_1 (o bien R_2) alrededor del eje z es el hiperboloide de una hoja que tiene ecuación $x^2 + y^2 - z^2 = 1$.
2. Deduce que si H es cualquier hiperboloide de una hoja de \mathbb{R}^3 y $p \in H$ entonces existen dos rectas distintas contenidas en H que pasan por p .

Ejercicio 5.3.10. Prueba que cualquier plano de \mathbb{R}^3 corta al hiperboloide de una hoja que tiene ecuación $x^2 + y^2 - z^2 = 1$.

Ejercicio 5.3.11. Encuentra, si existe, una parábola de \mathbb{R}^2 que pase por los puntos $(2, 0)$, $(0, 1)$, $(3, 1)$ y $(0, 0)$.

Tenemos que una hipercuádrica es del tipo:

$$Ax^2 + By^2 + Cxy + Dx + Ey + F = 0$$

Establecemos las condiciones de contorno dadas:

$$\begin{aligned} (2, 0) &\longrightarrow 4A + 2D + F = 0 \\ (0, 1) &\longrightarrow B + E + F = 0 \\ (3, 1) &\longrightarrow 9A + B + 3C + 3D + E + F = 0 \\ (0, 0) &\longrightarrow F = 0 \end{aligned}$$

Por tanto, el sistema a resolver queda:

$$\left\{ \begin{array}{l} F = 0 \\ 2A + D = 0 \\ B + E = 0 \\ 9A + B + 3C + 3D + E = 0 \end{array} \right\} \implies \left\{ \begin{array}{l} F = 0 \\ D = -2A \\ E = -B \\ 9A + B + 3C - 6A - B = 0 \end{array} \right\} \implies \left\{ \begin{array}{l} F = 0 \\ D = -2A \\ E = -B \\ C = -A \end{array} \right\}$$

Por tanto, nuestra hipercuádrica queda:

$$Ax^2 + By^2 - Axy - 2Ax - By = 0 \quad A, B \in \mathbb{R}$$

Por tanto, hay gran cantidad de hipercuádricas que pasan por los 4 puntos. Clasifiquémoslas en función de $A, B \in \mathbb{R}$:

$$\begin{aligned} 0 &= Ax^2 + By^2 - Axy - 2Ax - By = \\ &= A[x^2 - x(y + 2)] + By^2 - By = \\ &= A \left[x - \frac{y + 2}{2} \right]^2 - A \cdot \frac{(y + 2)^2}{4} + By^2 - By = \\ &= A \left(x - \frac{y + 2}{2} \right)^2 + \left(B - \frac{A}{4} \right) y^2 - (A + B)y - A \end{aligned}$$

Como en una parábola existe un sistema de referencia \mathcal{R}' tal que su ecuación reducida en dicho sistema es $\tilde{x}^2 = 2\tilde{y}$, entonces necesito que la segunda coordenada no esté elevado al cuadrado. Por tanto,

$$B - \frac{A}{4} = 0 \iff A = 4B$$

Tenemos entonces que la hipercuádrica queda:

$$0 = 4B \left(x - \frac{y+2}{2} \right)^2 - 5By - 4B = 4B \left(x - \frac{y+2}{2} \right)^2 - 2 \cdot \frac{5By + 4B}{2}$$

Aplicamos entonces el cambio de sistema de referencia a \mathcal{R}' , de forma que:

$$M(Id, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}') = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 0 & 0 \\ -2\sqrt{B} & 2\sqrt{B} & -\sqrt{B} \\ 2B & 0 & 5B \end{array} \right)$$

Tenemos que se trata de un sistema de referencia para todo $B \in \mathbb{R}^*$, por lo que $B \neq 0$. En dicho sistema, si las coordenadas de un punto son $(\tilde{x}, \tilde{y})_{\mathcal{R}'}$, tenemos que:

$$\tilde{x}^2 = 2\tilde{y}^2$$

Es decir, se trata de una parábola. Por tanto, tenemos que las parábolas que pasan por dichos puntos son de la forma:

$$4Bx^2 + By^2 - 4Bxy - 8Bx - By = 0 \iff 4x^2 + y^2 - 4xy - 8x - y = 0$$

Y por tanto, hemos determinado de forma única dicha parábola. Notemos que hemos simplificado porque $B \neq 0$.

Ejercicio 5.3.12. Clasifica euclídeamente las siguientes cónicas de \mathbb{R}^2 y obtén, en cada caso, un sistema de referencia euclídeo en el cual su expresión sea reducida:

$$1. -125 - 220x - 14x^2 - 40y - 96xy + 14y^2 = 0.$$

Tenemos que la matriz asociada a dicha cónica es:

$$\hat{A} = \left(\begin{array}{c|cc} -125 & -110 & -20 \\ -110 & -14 & -48 \\ -20 & -48 & 14 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} a & z \\ z^t & A \end{array} \right)$$

Diagonalizamos A . Su polinomio característico es:

$$\lambda^2 - 2500 = 0 \iff \lambda = \pm 50$$

Sus vectores propios asociados son:

$$V_{50} = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} -64 & -48 \\ -48 & -36 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{5}(-3, 4) \right\}$$

$$V_{-50} = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} 36 & -48 \\ -48 & 64 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{5}(4, 3) \right\}$$

Además, para que el vector \tilde{z} (primera columna) sea entero nulo, busquemos que:

$$Ac + z = 0 = \begin{pmatrix} -14 & -48 \\ -48 & 14 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -110 \\ -20 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Esto se da si y solo si:

$$\begin{pmatrix} -14 & -48 \\ -48 & 14 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 110 \\ 20 \end{pmatrix} \implies c = (-1, -2)$$

Por tanto, definimos el sistema de referencia $\mathcal{R}' = \left\{ (-1, -2), \left\{ \frac{1}{5}(-3, 4), \frac{1}{5}(4, 3) \right\} \right\}$.

Para calcular el nuevo valor de \tilde{a} , sabemos que el determinante es invariante mediante semejanzas.

$$|\hat{A}| = -62500 = \tilde{a} \cdot 50 \cdot -50 \implies \tilde{a} = 25$$

Por tanto, la matriz asociada a la hipercuádrica en \mathcal{R}' es:

$$\left(\begin{array}{c|cc} 25 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 50 & 0 \\ 0 & 0 & -50 \end{array} \right)$$

Por tanto, su ecuación en dicho sistema de referencia es:

$$50\tilde{x}^2 - 50\tilde{y}^2 = -25 \iff 2\tilde{x}^2 - 2\tilde{y}^2 = -1$$

Por tanto, se trata de una hipérbola que corta al eje X de ese nuevo sistema de referencia. Sus ejes son:

$$e_1 = (-1, -2) + \mathcal{L}\{(-3, 4)\} \quad e_2 = (-1, -2) + \mathcal{L}\{(4, 3)\}$$

Su centro es el punto $(-1, -2)$. La longitud de los semiejes (que son iguales, por ser equilátera) es $a = b = \frac{1}{\sqrt{2}}$. La mitad de la distancia focal es $c = 1$. Entonces, los focos son:

$$F_1 = (1, 0)_{\mathcal{R}'} \quad F_2 = (-1, 0)_{\mathcal{R}'}$$

Las ecuaciones de las asíntotas en \mathcal{R}' son:

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{b} = 0 \implies y = -\frac{b}{a}x = -x \quad \frac{x}{a} - \frac{y}{b} = 0 \implies y = \frac{b}{a}x = x$$

$$2. \quad 3x^2 + 2xy + 3y^2 + 4\sqrt{2}x + 4\sqrt{2}y + 2 = 0.$$

Tenemos que la matriz asociada a dicha cónica es:

$$\hat{A} = \left(\begin{array}{c|cc} 2 & 2\sqrt{2} & 2\sqrt{2} \\ \hline 2\sqrt{2} & 3 & 1 \\ 2\sqrt{2} & 1 & 3 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} a & z \\ \hline z^t & A \end{array} \right)$$

Diagonalizamos A . Su polinomio característico es:

$$\lambda^2 - 6\lambda + 8 = 0 \iff \begin{cases} \lambda_1 = 4 \\ \lambda_2 = 2 \end{cases}$$

Sus vectores propios asociados son:

$$V_4 = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1) \right\}$$

$$V_2 = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}(-1, 1) \right\}$$

Además, para que el vector \tilde{z} (primera columna) sea entero nulo, busquemos que:

$$Ac + z = 0 = \begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2\sqrt{2} \\ 2\sqrt{2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Esto se da si y solo si:

$$\begin{pmatrix} 3 & 1 \\ 1 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2\sqrt{2} \\ -2\sqrt{2} \end{pmatrix} \implies c = \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right)$$

Por tanto, definimos el sistema de referencia $\mathcal{R}' = \left\{ \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right), \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1), \frac{1}{\sqrt{2}}(-1, 1) \right\} \right\}$.

Para calcular el nuevo valor de \tilde{a} , sabemos que el determinante es invariante mediante semejanzas.

$$|\hat{A}| = -16 = \tilde{a} \cdot 4 \cdot 2 \implies \tilde{a} = -2$$

Por tanto, su matriz asociada en \mathcal{R}' es:

$$\left(\begin{array}{c|cc} -2 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{array} \right)$$

Por tanto, su ecuación en dicho sistema de referencia es:

$$4\tilde{x}^2 + 2\tilde{y}^2 = 2 \iff 2\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 = 1$$

Por tanto, se trata de una elipse. Sus ejes son:

$$e_1 = \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right) + \mathcal{L}\{(1, 1)\} \quad e_2 = \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right) + \mathcal{L}\{(-1, 1)\}$$

Su centro es el punto $\left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right)$. La longitud de los semiejes es $b = \frac{1}{\sqrt{2}}$, $a = 1$. La mitad de la distancia focal es $c = \sqrt{a^2 - b^2} = \frac{1}{\sqrt{2}}$. Entonces, los focos son:

$$F_1 = (0, -1/\sqrt{2})_{\mathcal{R}'} \quad F_2 = (0, 1/\sqrt{2})_{\mathcal{R}'}$$

$$3. -2\sqrt{2} + 12x + 3\sqrt{2}x^2 + 4y + 2\sqrt{2}xy + 3\sqrt{2}y^2 = 0.$$

Tenemos que la matriz asociada a dicha cónica es:

$$\hat{A} = \left(\begin{array}{c|cc} -2\sqrt{2} & 6 & 2 \\ \hline 6 & 3\sqrt{2} & \sqrt{2} \\ 2 & \sqrt{2} & 3\sqrt{2} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} a & z \\ \hline z^t & A \end{array} \right)$$

Diagonalizamos A . Su polinomio característico es:

$$\lambda^2 - 6\sqrt{2}\lambda + 16 = 0 \iff \begin{cases} \lambda_1 = 4\sqrt{2} \\ \lambda_2 = 2\sqrt{2} \end{cases}$$

Sus vectores propios asociados son:

$$V_{4\sqrt{2}} = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} -\sqrt{2} & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & -\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1) \right\}$$

$$V_{2\sqrt{2}} = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & \sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}(-1, 1) \right\}$$

Además, para que el vector \tilde{z} (primera columna) sea entero nulo, busquemos que:

$$Ac + z = 0 = \begin{pmatrix} 3\sqrt{2} & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & 3\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 6 \\ 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Esto se da si y solo si:

$$\begin{pmatrix} 3\sqrt{2} & \sqrt{2} \\ \sqrt{2} & 3\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -6 \\ -2 \end{pmatrix} \implies c = (-\sqrt{2}, 0)$$

Por tanto, definimos el sistema de referencia $\mathcal{R}' = \left\{ (-\sqrt{2}, 0), \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1), \frac{1}{\sqrt{2}}(-1, 1) \right\} \right\}$.

Para calcular el nuevo valor de \tilde{a} , sabemos que el determinante es invariante mediante semejanzas.

$$|\hat{A}| = -128\sqrt{2} = \tilde{a} \cdot 4\sqrt{2} \cdot 2\sqrt{2} \implies \tilde{a} = -8\sqrt{2}$$

Por tanto, su matriz asociada en \mathcal{R}' es:

$$\left(\begin{array}{c|cc} -8\sqrt{2} & 0 & 0 \\ \hline 0 & 4\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 0 & 2\sqrt{2} \end{array} \right)$$

Por tanto, su ecuación en dicho sistema de referencia es:

$$4\sqrt{2}\tilde{x}^2 + 2\sqrt{2}\tilde{y}^2 = 8\sqrt{2} \iff \frac{\tilde{x}^2}{2} + \frac{\tilde{y}^2}{4} = 1$$

Por tanto, se trata de una elipse. Sus ejes son:

$$e_1 = \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, -\frac{\sqrt{2}}{2} \right) + \mathcal{L}\{(1, 1)\} \quad e_2 = \left(-\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2} \right) + \mathcal{L}\{(-1, 1)\}$$

Su centro es el punto $(-\sqrt{2}, 0)$. La longitud de los semiejes es $b = \sqrt{2}$, $a = 2$. La mitad de la distancia focal es $c = \sqrt{a^2 - b^2} = \sqrt{2}$. Entonces, los focos son:

$$F_1 = (0, -\sqrt{2})_{\mathcal{R}'}, \quad F_2 = (0, \sqrt{2})_{\mathcal{R}'}$$

4. $4x^2 + y^2 + 4xy + 2x + 1 = 0$.

Tenemos que la matriz asociada a dicha cónica es:

$$\hat{A} = \left(\begin{array}{c|cc} 1 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 4 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} a & z \\ \hline z^t & A \end{array} \right)$$

Diagonalizamos A . Su polinomio característico es:

$$\lambda^2 - 5\lambda = 0 \iff \begin{cases} \lambda_1 = 5 \\ \lambda_2 = 0 \end{cases}$$

Por tanto, se trata de una parábola. Sus vectores propios asociados son:

$$V_5 = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} -1 & 2 \\ 2 & -4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{\sqrt{5}}(2, 1) \right\}$$

$$V_0 = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} 4 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{\sqrt{5}}(1, -2) \right\}$$

El eje entonces de la parábola es:

$$\begin{aligned} e &= \left\{ (x, y)^t \in \mathbb{R}^2 \mid (0, 2, 1) \hat{A} (1, x, y)^t = 0 \right\} = \\ &= \left\{ (x, y)^t \in \mathbb{R}^2 \mid (0, 2, 1) \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 4 & 2 \\ 0 & 2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \\ &= \left\{ (x, y)^t \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} 2 & 10 & 5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \\ &= \left\{ (x, y)^t \in \mathbb{R}^2 \mid 2 + 10x + 5y = 0 \right\} = \\ &= (-6/5, 2) + \mathcal{L}\{(-1, 2)\} \end{aligned}$$

Para calcular el vértice de la parábola, tenemos que resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\left\{ \begin{array}{l} 2 + 10x + 5y = 0 \\ 4x^2 + y^2 + 4xy + 2x + 1 = 0 \end{array} \right\} \implies v = \left(\frac{-29}{50}, \frac{19}{25} \right)$$

Por tanto, definimos el sistema de referencia $\mathcal{R}' = \left\{ \left(\frac{-29}{50}, \frac{19}{25} \right), \left\{ \frac{1}{\sqrt{5}}(2, 1), \frac{1}{\sqrt{5}}(1, -2) \right\} \right\}$.

En \mathcal{R}' , su matriz asociada queda:

$$\left(\begin{array}{c|cc} 0 & 0 & \lambda \\ \hline 0 & 5 & 0 \\ \lambda & 0 & 0 \end{array} \right)$$

Para calcular el valor de λ , sabemos que el determinante es invariante mediante semejanzas.

$$|\hat{A}| = -1 = -5\lambda^2 \implies \lambda = \pm \frac{1}{\sqrt{5}}$$

Por tanto, su ecuación en dicho sistema de referencia es:

$$5x^2 = -2\lambda y \iff \frac{5}{-\lambda}x^2 = 2y$$

Como el coeficiente de x^2 es positivo, tenemos que $\lambda = -\frac{1}{\sqrt{5}}$. Si la distancia del vértice al foco es c , entonces:

$$\frac{1}{2c} = -\frac{\lambda}{5} \implies c = -\frac{\lambda}{10} = \frac{1}{10\sqrt{5}}$$

Por tanto, consideramos los siguientes puntos:

$$\begin{aligned} P_1 &= \left(\frac{-29}{50}, \frac{19}{25}\right) + \frac{1}{10\sqrt{5}} \cdot \frac{1}{\sqrt{5}}(1, -2) = \left(\frac{-14}{25}, \frac{18}{25}\right) \\ P_2 &= \left(\frac{-29}{50}, \frac{19}{25}\right) - \frac{1}{10\sqrt{5}} \cdot \frac{1}{\sqrt{5}}(1, -2) = \left(\frac{-3}{5}, \frac{4}{5}\right) \end{aligned}$$

Por tanto, supongamos que la directriz pasa por P_2 es decir, $d' = P_2 + \mathcal{L}\{(2, 1)\}$. Su ecuación cartesiana es:

$$\begin{vmatrix} 2 & x + 3/5 \\ 1 & y - 4/5 \end{vmatrix} = 0 = 2y - \frac{8}{5} - x - \frac{3}{5} = 2y - x - \frac{11}{5}$$

Comprobemos si lo que hemos supuesto como directriz corta a la parábola o no:

$$\begin{cases} 2y - x - \frac{11}{5} = 0 \\ 4x^2 + y^2 + 4xy + 2x + 1 = 0 \end{cases}$$

Como dicho sistema *tiene dos soluciones* reales, entonces no era la directriz. Por tanto, la directriz es $d = \left(\frac{-14}{25}, \frac{18}{25}\right) + \mathcal{L}\{(2, 1)\}$; y el foco es $P_2 = F = \left(\frac{-3}{5}, \frac{4}{5}\right)$.

5. $-3 + 2x + x^2 - 6y - 6xy + y^2 = 0$.

Tenemos que la matriz asociada a dicha cónica es:

$$\hat{A} = \left(\begin{array}{c|cc} -3 & 1 & -3 \\ \hline 1 & 1 & -3 \\ -3 & -3 & 1 \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c|c} a & z \\ \hline z^t & A \end{array} \right)$$

Diagonalizamos A . Su polinomio característico es:

$$\lambda^2 - 2\lambda - 8 = 0 \iff \begin{cases} \lambda_1 = 4 \\ \lambda_2 = -2 \end{cases}$$

Sus vectores propios asociados son:

$$V_4 = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} -3 & -3 \\ -3 & -3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \mathcal{L}\left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}(1, -1) \right\}$$

$$V_{-2} = \left\{ (x, y) \in \mathbb{R}^2 \mid \begin{pmatrix} 3 & -3 \\ -3 & 3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = 0 \right\} = \mathcal{L} \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1) \right\}$$

Además, para que el vector \tilde{z} (primera columna) sea entero nulo, busquemos que:

$$Ac + z = 0 = \begin{pmatrix} 1 & -3 \\ -3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ -3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Esto se da si y solo si:

$$\begin{pmatrix} 1 & -3 \\ -3 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 \\ 3 \end{pmatrix} \implies c = (-1, 0)$$

Por tanto, definimos el sistema de referencia $\mathcal{R}' = \left\{ (-1, 0), \left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}(1, -1), \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1) \right\} \right\}$.

Para calcular el nuevo valor de \tilde{a} , sabemos que el determinante es invariante mediante semejanzas.

$$|\hat{A}| = 32 = \tilde{a} \cdot 4 \cdot -2 \implies \tilde{a} = -4$$

Por tanto, la matriz asociada a la hipercuádrica en \mathcal{R}' es:

$$\left(\begin{array}{c|cc} -4 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{array} \right)$$

Por tanto, su ecuación en dicho sistema de referencia es:

$$4\tilde{x}^2 - 2\tilde{y}^2 = 4 \iff \tilde{x}^2 - \frac{1}{2}\tilde{y}^2 = 1$$

Por tanto, se trata de una hipérbola que corta al eje X de ese nuevo sistema de referencia. Sus ejes son:

$$e_1 = (-1, 0) + \mathcal{L}\{(1, -1)\} \quad e_2 = (-1, 0) + \mathcal{L}\{(1, 1)\}$$

Su centro es el punto $(-1, 0)$. La longitud de los semiejes es $a = \sqrt{2}$, $b = 1$. La mitad de la distancia focal es $c = \sqrt{3}$. Entonces, los focos son:

$$F_1 = (\sqrt{3}, 0)_{\mathcal{R}'} \quad F_2 = (-\sqrt{3}, 0)_{\mathcal{R}'}$$

Las ecuaciones de las asíntotas en \mathcal{R}' son:

$$\frac{x}{b} + \frac{y}{a} = 0 \implies y = -\sqrt{2}x \quad \frac{x}{b} - \frac{y}{a} = 0 \implies y = \sqrt{2}x$$

Ejercicio 5.3.13. Clasifica euclídeamente las siguientes cuádricas de \mathbb{R}^3 y obtén, en cada caso, un sistema de referencia euclídeo en el cual su expresión sea reducida:

1. $3x^2 + 4y^2 + 2z^2 - 4xy + 4xz - 6x - 6y + 3 = 0$.
2. $3x^2 + y^2 + 3z^2 - 2xz + 2\sqrt{2}x + 2y + 2\sqrt{2}z + 2 = 0$.

Ejercicio 5.3.14. Clasifica las siguientes cónicas afines de \mathbb{R}^2 y determina un sistema de referencia donde su expresión sea reducida:

1. $4x^2 - 2xy + 2y^2 + x - 3y - 3 = 0$.
2. $2x^2 - 4xy + 2y^2 + 12x - 18y + 11 = 0$.
3. $2x^2 + 12xy + 18y^2 + 4x - 6y + 10 = 0$
4. $x^2 - 4xy + 4y^2 + 4x - 9y + 2 = 0$.
5. $x^2 - 4xy + 4y^2 + 2x - 4y + 1 = 0$.
6. $3x^2 + 6xy + 3y^2 - 12x - 11y + 11 = 0$.

Ejercicio 5.3.15. Clasifica las siguientes cónicas afines de \mathbb{R}^3 y determina un sistema de referencia donde su expresión sea reducida:

1. $3x^2 + 4y^2 + 21z^2 + 6xy + 12xz + 18yz - 12x - 14y - 29z + 14 = 0$.

Empleamos el método de completar cuadrados:

$$\begin{aligned}
 0 &= 3x^2 + 4y^2 + 21z^2 + 6xy + 12xz + 18yz - 12x - 14y - 29z + 14 = \\
 &= 3x^2 + 6x(y + 2z - 2) + 4y^2 + 21z^2 + 18yz - 14y - 29z + 14 = \\
 &= 3[x^2 + 2x(y + 2z - 2)] + 4y^2 + 21z^2 + 18yz - 14y - 29z + 14 = \\
 &= 3(x + y + 2z - 2)^2 - 3(y + 2z - 2)^2 + 4y^2 + 21z^2 + 18yz - 14y - 29z + 14 = \\
 &= 3(x + y + 2z - 2)^2 - 3(y^2 + 4z^2 + 4 + 4yz - 4y - 8z) + \\
 &\quad + 4y^2 + 21z^2 + 18yz - 14y - 29z + 14 = \\
 &= 3(x + y + 2z - 2)^2 + y^2 + 9z^2 + 6yz - 2y - 5z + 2 = \\
 &= 3(x + y + 2z - 2)^2 + y^2 + 2y(3z - 1) + 9z^2 - 5z + 2 = \\
 &= 3(x + y + 2z - 2)^2 + [y + (3z - 1)]^2 - (3z - 1)^2 + 9z^2 - 5z + 2 = \\
 &= 3(x + y + 2z - 2)^2 + [y + 3z - 1]^2 + z + 1 = \\
 &= [\sqrt{3}(x + y + 2z - 2)]^2 + [y + 3z - 1]^2 - 2 \left[-\frac{z + 1}{2} \right]
 \end{aligned}$$

Aplicamos entonces el cambio de sistema de referencia a \mathcal{R}' , de forma que:

$$M(Id, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}') = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2\sqrt{3} & \sqrt{3} & \sqrt{3} & 2\sqrt{3} \\ -1 & 0 & 1 & 3 \\ -1/2 & 0 & 0 & -1/2 \end{array} \right)$$

Para hallar el sistema de referencia \mathcal{R}' , tenemos que:

$$M(Id, \mathcal{R}', \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -2\sqrt{3} & \sqrt{3} & \sqrt{3} & 2\sqrt{3} \\ -1 & 0 & 1 & 3 \\ -1/2 & 0 & 0 & -1/2 \end{array} \right)^{-1} = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{3}/3 & -1 & -2 \\ 4 & 0 & 1 & 6 \\ -1 & 0 & 0 & -2 \end{array} \right)$$

Es decir, si $\mathcal{R}_0 = \{O, \{e_1, e_2, e_3\}\}$, entonces:

$$\mathcal{R}' = \{(0, 4, -1), \{(\sqrt{3}/3, 0, 0), (-1, 1, 0), (-2, 6, -2)\}\}$$

En dicho sistema, si las coordenadas de un punto son $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})_{\mathcal{R}'}$, tenemos que:

$$\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 = 2\tilde{z}$$

Por tanto, se trata de un paraboloide elíptico.

$$2. \quad 3x^2 + 2y^2 + 7z^2 + 6xy + 12xz + 6yz - 12x - 10y - 10z + 12 = 0.$$

$$3. \quad x^2 + 2y^2 - 2z^2 - 2xy + 2xz - 4yz + 4y - 12z = 0.$$

$$4. \quad x^2 + 4y^2 + z^2 - 4xy + 2xz - 4yz + 2x - 3y + 4 = 0.$$

Empleamos el método de completar cuadrados:

$$\begin{aligned} 0 &= x^2 + 4y^2 + z^2 - 4xy + 2xz - 4yz + 2x - 3y + 4 = \\ &= x^2 + 2x(-2y + z + 1) + 4y^2 + z^2 - 4yz - 3y + 4 = \\ &= (x - 2y + z + 1)^2 - (-2y + z + 1)^2 + 4y^2 + z^2 - 4yz - 3y + 4 = \\ &= (x - 2y + z + 1)^2 - (4y^2 + z^2 + 1 - 4yz - 4y + 2z) + 4y^2 + z^2 - 4yz - 3y + 4 = \\ &= (x - 2y + z + 1)^2 + y + 3 - 2z \\ &= (x - 2y + z + 1)^2 - 2 \cdot \frac{-y - 3 + 2z}{2} \end{aligned}$$

Aplicamos entonces el cambio de sistema de referencia a \mathcal{R}' , de forma que:

$$M(Id, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}') = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3/2 & 0 & -1/2 & 1 \end{array} \right)$$

Notemos que hemos usado $\tilde{y} = y$, aunque bastaría con poner valores de \tilde{y} de forma que la matriz anterior fuese regular, para que fuese un cambio de sistema de referencia.

Para hallar el sistema de referencia \mathcal{R}' , tenemos que:

$$M(Id, \mathcal{R}', \mathcal{R}_0) = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3/2 & 0 & -1/2 & 1 \end{array} \right)^{-1} = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -5/2 & 1 & 3/2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3/2 & 0 & 1/2 & 1 \end{array} \right)$$

Es decir, si $\mathcal{R}_0 = \{O, \{e_1, e_2, e_3\}\}$, entonces:

$$\mathcal{R}' = \left\{ \left(-\frac{5}{2}, 0, \frac{3}{2} \right), \left\{ (1, 0, 0), \left(\frac{3}{2}, 1, \frac{1}{2} \right), (-1, 0, 1) \right\} \right\}$$

En dicho sistema, si las coordenadas de un punto son $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})_{\mathcal{R}'}$, tenemos que:

$$\tilde{x}^2 = 2\tilde{z}^2$$

Por tanto, se trata de un cilindro hiperbólico.

5. $x^2 + 11y^2 + 9z^2 - 6xy + 4xz - 8yz + 2x - 2y + 2z + 3 = 0.$

Empleamos el método de completar cuadrados:

$$\begin{aligned}
 0 &= x^2 + 11y^2 + 9z^2 - 6xy + 4xz - 8yz + 2x - 2y + 2z + 3 = \\
 &= x^2 + 2x(-3y + 2z + 1) + 11y^2 + 9z^2 - 8yz - 2y + 2z + 3 = \\
 &= [x + (1 - 3y + 2z)]^2 - (1 - 3y + 2z)^2 + 11y^2 + 9z^2 - 8yz - 2y + 2z + 3 = \\
 &= (x + 1 - 3y + 2z)^2 - (1 + 9y^2 + 4z^2 - 6y + 4z - 12yz) + 11y^2 + 9z^2 - \\
 &\quad - 8yz - 2y + 2z + 3 = \\
 &= (x + 1 - 3y + 2z)^2 + 2y^2 + 5z^2 + 4yz + 4y - 2z + 2 = \\
 &= (x + 1 - 3y + 2z)^2 + 2y^2 + 4y(z + 1) + 5z^2 - 2z + 2 = \\
 &= (x + 1 - 3y + 2z)^2 + 2[y + (z + 1)]^2 - 2(z + 1)^2 + 5z^2 - 2z + 2 = \\
 &= (x + 1 - 3y + 2z)^2 + 2(y + z + 1)^2 + 3z^2 - 6z = \\
 &= (x + 1 - 3y + 2z)^2 + 2(y + z + 1)^2 + 3(z^2 - 2z + 1) - 3 = \\
 &= (x + 1 - 3y + 2z)^2 + 2(y + z + 1)^2 + 3(z - 1)^2 - 3 = \\
 &= \frac{1}{3}(x + 1 - 3y + 2z)^2 + \frac{2}{3}(y + z + 1)^2 + \frac{3}{3}(z - 1)^2 - 1
 \end{aligned}$$

Aplicamos entonces el cambio de sistema de referencia a \mathcal{R}' , de forma que:

$$M(Id, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}') = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\begin{array}{c|ccc} \sqrt{3} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & -3 & 2 \\ \sqrt{2} & 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -\sqrt{3} & 0 & 0 & \sqrt{3} \end{array} \right)$$

Para hallar el sistema de referencia \mathcal{R}' , tenemos que:

$$M(Id, \mathcal{R}', \mathcal{R}_0) = \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\begin{array}{c|ccc} \sqrt{3} & 0 & 0 & 0 \\ \hline 1 & 1 & -3 & 2 \\ \sqrt{2} & 0 & \sqrt{2} & \sqrt{2} \\ -\sqrt{3} & 0 & 0 & \sqrt{3} \end{array} \right) \right]^{-1} = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline -9 & \sqrt{3} & 3\sqrt{6}/2 & -5 \\ -2 & 0 & \sqrt{6}/2 & -1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right)$$

Es decir, si $\mathcal{R}_0 = \{O, \{e_1, e_2, e_3\}\}$, entonces:

$$\mathcal{R}' = \left\{ (-9, -2, 1), \left\{ \left(\sqrt{3}, 0, 0 \right), \left(\frac{3\sqrt{6}}{2}, \frac{\sqrt{6}}{2}, 0 \right), (-5, -1, 1) \right\} \right\}$$

En dicho sistema, si las coordenadas de un punto son $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})_{\mathcal{R}'}$, tenemos que:

$$\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 + \tilde{z}^2 = 1$$

Por tanto, se trata de un elipsoide.

6. $xy + xz + yz - 1 = 0.$

Empleamos el método de completar cuadrados:

$$\begin{aligned}
0 &= xy + xz + yz - 1 = \\
&= x(y + z) + yz - 1 = \\
&= x(y + z) + \frac{1}{4}(y + z)^2 - \frac{1}{4}(y - z)^2 - 1 = \\
&= (y + z) \left[x + \frac{1}{4}(y + z) \right] - \frac{1}{4}(y - z)^2 - 1 = \\
&= \frac{1}{4} \left(y + z + x + \frac{1}{4}(y + z) \right)^2 - \frac{1}{4} \left(y + z - x - \frac{1}{4}(y + z) \right)^2 - \frac{1}{4}(y - z)^2 - 1 = \\
&= \frac{1}{4} \left(x + \frac{5}{4}(y + z) \right)^2 - \frac{1}{4} \left(-x + \frac{3}{4}(y + z) \right)^2 - \frac{1}{4}(y - z)^2 - 1 = \\
&= \frac{1}{4} \left(-x + \frac{3}{4}(y + z) \right)^2 + \frac{1}{4}(y - z)^2 - \frac{1}{4} \left(x + \frac{5}{4}(y + z) \right)^2 + 1
\end{aligned}$$

Aplicamos entonces el cambio de sistema de referencia a \mathcal{R}' , de forma que:

$$M(Id, \mathcal{R}_0, \mathcal{R}') = \frac{1}{2} \left(\begin{array}{c|ccc} 2 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -1 & 3/4 & 3/4 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 5/4 & 5/4 \end{array} \right)$$

Para hallar el sistema de referencia \mathcal{R}' , tenemos que:

$$M(Id, \mathcal{R}', \mathcal{R}_0) = \left[\frac{1}{2} \left(\begin{array}{c|ccc} 2 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -1 & 3/4 & 3/4 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 5/4 & 5/4 \end{array} \right) \right]^{-1} = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & -5/4 & 0 & 3/4 \\ 0 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 0 & 1/2 & -1 & 1/2 \end{array} \right)$$

Es decir, si $\mathcal{R}_0 = \{O, \{e_1, e_2, e_3\}\}$, entonces:

$$\mathcal{R}' = \left\{ O, \left\{ \left(-\frac{5}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right), (0, 1, -1), \left(\frac{3}{4}, \frac{1}{2}, \frac{1}{2} \right) \right\} \right\}$$

En dicho sistema, si las coordenadas de un punto son $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})_{\mathcal{R}'}$, tenemos que:

$$\tilde{x}^2 + \tilde{y}^2 - \tilde{z}^2 = -1$$

Por tanto, se trata de un hiperboloide de dos hojas. Vemos que corta a la recta $\tilde{x} = \tilde{y} = 0$ (eje \tilde{z}).

Ejercicio 5.3.16. Clasifica, según los valores del parámetro $a \in \mathbb{R}$, la siguientes cónicas de \mathbb{R}^2 :

1. $x^2 + ay^2 + 2xy - 2x + a = 0$.
2. $x^2 + axy + y^2 + 1 = 0$.

Ejercicio 5.3.17. En \mathbb{R}^3 consideramos el punto $F = (0, 0, 1)$ y el plano afín S de ecuación $x - z = 0$. Definimos el conjunto:

$$C = \{p \in \mathbb{R}^3 \mid d(p, F) = d(p, S)\}.$$

Demostrar que C es una cuádrica y clasificarla.