

- 1.— En el espacio afín  $\mathbb{R}^3$  se considera la referencia canónica  $R$  y la referencia  $R' = \{(1, 0, 1); (1, 1, 0), (1, 1, 1), (1, 0, 0)\}$ . Denotamos respectivamente por  $(x, y, z)$  y  $(x', y', z')$  a las coordenadas de un punto respecto a la referencias  $R$  y  $R'$ . Hallar las ecuaciones del plano  $x + y - 2z + 1 = 0$  en la referencia  $R'$ .

Las ecuaciones de cambio de referencia son:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + M_{CB} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix}, \quad M_{CB} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

La ecuación del plano puede escribirse como:

$$(1 \quad 1 \quad -2) \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} + 1 = 0.$$

Sustituimos usando la ecuación de cambio de referencia:

$$(1 \quad 1 \quad -2) \left( \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} + M_{CB} \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} \right) + 1 = 0.$$

Operando queda:

$$-1 + (2 \quad 0 \quad 1) \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} + 1 = 0$$

y simplificando:

$$2x' + z' = 0.$$

- 2.— En el espacio afín y euclídeo ordinario y referido a un sistema ortonormal, se definen los puntos  $A(2, -1, 1)$ ,  $B(-1, 0, 3)$ , las rectas

$$r : \frac{x+1}{3} = \frac{y-2}{1} = \frac{z}{1}, \quad s : \frac{x}{1} = \frac{y}{2} = \frac{z}{-3}$$

y los planos  $P : 3x - 2y + 4z + 8 = 0$ ,  $Q : x + 5y - 6z - 4 = 0$ .

Las rectas se darán en forma continua y los planos por sus ecuaciones cartesianas. Se pide:

- (n) Recta que pasa por  $A$ , corta a  $s$  y es perpendicular a  $r$ .

Las rectas que pasan por  $A$  y son perpendiculares a  $r$ , están en el plano que pasa por  $A$  y es perpendicular a  $r$ . Dicho plano tiene por vector normal el director de  $r$ ,  $(3, 1, 1)$ . Así su ecuación será:

$$3x + y + z + \lambda = 0$$

Imponiendo que  $A(2, -1, 1)$  verifique la ecuación, obtenemos  $\lambda = -6$ .

Ahora como la recta que buscamos ha de cortar a  $s$ , calculamos la intersección de  $s$  con este plano. Un punto de  $s$  es de la forma  $(a, 2a, -3a)$ . Sustituyendo en la ecuación del plano:

$$3a + 2a - 3a - 6 = 0$$

vemos que  $a = 3$ . Por tanto la recta que buscamos es la que une los puntos  $A(2, -1, 1)$  y  $(3, 6, -9)$ :

$$\frac{x-2}{3-2} = \frac{y+1}{6+1} = \frac{z-1}{-9-1} \iff x-2 = \frac{y+1}{7} = \frac{z-1}{-10}$$

(o) *Plano perpendicular a  $P$ , paralelo a  $r$  y que pasa por  $A$ .*

Los vectores directores del plano que buscamos son el normal a  $P$ ,  $(3, -2, 4)$  y el director de  $r$ ,  $(3, 1, 1)$ . Además ha de pasar por  $A(2, -1, 1)$ . Por tanto la ecuación pedida viene dada por la anulación del determinante:

$$\begin{vmatrix} x-2 & y+1 & z-1 \\ 3 & -2 & 4 \\ 3 & 1 & 1 \end{vmatrix} = 0 \iff -6x + 9y + 9z + 12 = 0 \iff 2x - 3y - 3z - 4 = 0$$

(p) *Perpendicular común a  $r$  y  $s$ .*

La recta que buscamos esta contenida en los planos  $\pi_1$  y  $\pi_2$  definidos por  $r$  y  $s$  y la dirección perpendicular a ambos respectivamente. Por tanto es la intersección de estos dos planos. Lo que haremos es calcular el plano  $\pi_1$  e intersecarlo con  $s$  para conocer un punto de la recta que buscamos. Calcularemos también la dirección ortogonal a ambas rectas.

La dirección perpendicular a  $r$  y  $s$ , la obtenemos haciendo el producto vectorial de los vectores directores de las dos rectas:

$$\begin{vmatrix} \bar{e}_1 & \bar{e}_2 & \bar{e}_3 \\ 3 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & -3 \end{vmatrix} = -5\bar{e}_1 + 10\bar{e}_2 + 5\bar{e}_3$$

Podemos tomar para simplificar la dirección  $(-1, 2, 1)$ . Ahora la ecuación del plano  $\pi_1$  es:

$$\begin{vmatrix} x+1 & y-2 & z \\ 3 & 1 & 1 \\ -1 & 2 & 1 \end{vmatrix} = 0 \iff -x - 4y + 7z + 7 = 0$$

Intersecamos con  $s$ . Un punto de esta recta es de la forma  $(a, 2a, -3a)$ . Susituyendo en la ecuación de  $\pi_1$ :

$$-a - 8a - 21a + 7 = 0 \implies a = 7/30$$

Por tanto el puntos de intersección de la recta buscada con  $s$  es  $(7/30, 7/15, -7/10)$ . La ecuación de la recta pedida es:

$$\frac{x-7/30}{-1} = \frac{y-7/15}{2} = \frac{z+7/10}{1}$$

(q) *Distancias de  $A$  a  $B$ , de  $A$  a  $r$ , de  $B$  a  $P$  y de  $r$  a  $s$ .*

La distancia de  $A$  a  $B$  se obtiene directamente:

$$d(A, B) = \sqrt{(-1-2)^2 + (0+1)^2 + (3-1)^2} = \sqrt{14}$$

La distancia de  $A$  a  $r$  se obtiene mediante la fórmula:

$$d(A, r) = \frac{\|\overline{AC} \wedge \bar{v}\|}{\|\bar{v}\|}$$

donde  $C$  es un punto de  $r$  y  $v$  su vector director. En este caso,  $C(-1, 2, 0)$ ,  $\bar{v}(3, 1, 1)$ .

$$d(A, r) = \frac{\|(-3, 3, -1) \wedge (3, 1, 1)\|}{\|(3, 1, 1)\|} = \frac{4\sqrt{13}}{\sqrt{11}} = \frac{4\sqrt{143}}{11}$$

*Observación:* Si no recordamos la fórmula, se puede calcular el plano perpendicular a  $r$  pasando por  $A$ . La intersección de dicho plano con  $r$  nos da un punto  $M$  que es la proyección de  $A$  sobre  $r$ . La distancia pedida es la distancia entre  $A$  y  $M$ .

La distancia de  $B$  a  $P$  viene dada por la expresión:

$$d(B, P) = \frac{3 \cdot (-1) - 2 \cdot 0 + 4 \cdot 3 + 8}{\sqrt{3^2 + (-2)^2 + 4^2}} = \frac{17}{\sqrt{29}} = \frac{17\sqrt{29}}{29}$$

*Observación:* De nuevo si queremos reducir el cálculo a la distancia entre dos puntos, hallamos el punto de corte de la recta perpendicular al plano y que pasa por  $B$  con el plano  $P$ .

Por último para calcular la distancia entre  $r$  y  $s$ , hallamos el punto de corte de la perpendicular a ambas con alguna de las rectas. Vimos en el apartado (p) que el punto de corte con  $s$  es  $(7/30, 7/15, -7/10)$ . Ahora la distancia pedida es la de este punto a la recta  $r$ :

$$d(r, s) = \frac{\|(7/30 + 1, 7/15 - 2, -7/10) \wedge (3, 1, 1)\|}{\|(3, 1, 1)\|} = \frac{5\sqrt{66}/6}{\sqrt{11}} = \frac{5\sqrt{6}}{6}$$

Otra forma es usar directamente la fórmula:

$$d(r, s) = \frac{|[(-1, 2, 0) - (0, 0, 0), (3, 1, 1), (1, 2, -3)]|}{\|(3, 1, 1) \wedge (1, 2, -3)\|} = \frac{5\sqrt{6}}{6}$$

(r) *Ángulos formados por  $r$  y  $s$ , por  $s$  y  $Q$  y por  $P$  y  $Q$ .*

El ángulo formado por  $r$  y  $s$  es el ángulo formado por sus direcciones:

$$\cos(\alpha(r, s)) = \frac{|((3, 1, 1)(1, 2, -3))|}{\|(3, 1, 1)\| \|(1, 2, -3)\|} = \frac{2}{\sqrt{11}\sqrt{14}} \Rightarrow \alpha(r, s) = 80,72^\circ$$

El ángulo formado por  $s$  y  $Q$  es el complementario del que forman la dirección normal a  $Q$  y la dirección de  $s$ . Por tanto:

$$\sin(\alpha(s, Q)) = \frac{|((1, 2, -3)(1, 5, -6))|}{\|(1, 2, -3)\| \|(1, 5, -6)\|} = \frac{29}{\sqrt{14}\sqrt{62}} \Rightarrow \alpha(s, Q) = 79,84^\circ$$

El ángulo formado por  $P$  y  $Q$  es el que forman sus direcciones normales:

$$\cos(\alpha(P, Q)) = \frac{|((3, -2, 4)(1, 5, -6))|}{\|(3, -2, 4)\| \|(1, 5, -6)\|} = \frac{31}{\sqrt{29}\sqrt{62}} \Rightarrow \alpha(P, Q) = 43,02^\circ$$

**3.**— *En el espacio afín  $E_3$  se considera el triángulo de vértices  $A(3, 0, 0)$ ,  $B(1, 1, 1)$  y  $C(1, 0, 2)$ .*

(i) *Hallar las ecuaciones de las mediatrices del triángulo.*

Las mediatrices son las rectas que pasan por el punto medio de cada lado y son perpendiculares a él. Obviamente todas ellas están contenidas en el plano que contiene al triángulo. Dicho plano  $\pi$  es:

$$\begin{vmatrix} x-3 & y & z \\ 1-3 & 1 & 1 \\ 1-3 & 0 & 2 \end{vmatrix} = 0 \iff x + y + z = 3.$$

Daremos las ecuaciones implícitas de cada una de las mediatrices; geoméricamente equivale a expresarlas como intersección de dos planos. Uno de ellos es el plano  $\pi$  que contiene al triángulo; el otro cada uno de los planos pasando por el punto medio de los lados y que tiene como vector normal el propio lado.

**Mediatriz de AB:**

El punto medio de  $AB$  es:

$$M_{AB} = (A + B)/2 = (2, 1/2, 1/2)$$

El segmento  $AB$  es  $(-2, 1, 1)$ . Por tanto el plano buscado es de la forma  $-2x + y + z + d = 0$ . Sustituyendo las coordenadas del punto medio obtenemos  $d = 3$ . Por tanto las ecuaciones de la mediatriz son:

$$\begin{cases} x + y + z - 3 = 0 \\ -2x + y + z + 3 = 0 \end{cases}$$

**Mediatriz de AC:**

El punto medio de  $AC$  es:

$$M_{AC} = (A + C)/2 = (2, 0, 1)$$

El segmento  $AC$  es  $(-2, 0, 2)$ . Por tanto el plano buscado es de la forma  $-2x + 2z + f = 0$ . Sustituyendo las coordenadas del punto medio obtenemos  $f = 2$ . Por tanto las ecuaciones de la mediatriz son:

$$\begin{cases} x + y + z - 3 = 0 \\ -x + z + 1 = 0 \end{cases}$$

**Mediatriz de BC:**

El punto medio de  $BC$  es:

$$M_{BC} = (B + C)/2 = (1, 1/2, 3/2)$$

El segmento  $BC$  es  $(0, -1, 1)$ . Por tanto el plano buscado es de la forma  $-y + z + g = 0$ . Sustituyendo las coordenadas del punto medio obtenemos  $g = -1$ . Por tanto las ecuaciones de la mediatriz son:

$$\begin{cases} x + y + z - 3 = 0 \\ -y + z - 1 = 0 \end{cases}$$

- (ii) *Hallar las coordenadas del centro de la circunferencia circunscrita al triángulo.*

El circuncentro (centro de la circunferencia circunscrita) es precisamente la intersección de las mediatrices. Basta resolver el sistema formado las ecuaciones de dos de ellas:

$$\begin{cases} x + y + z - 3 = 0 \\ -x + z + 1 = 0 \\ -y + z - 1 = 0 \end{cases}$$

Obtenemos  $(x, y, z) = (2, 0, 1)$ .

- (iii) *Hallar el volumen de la pirámide que tiene por base el triángulo  $ABC$  y vértice en el origen de coordenadas.*

El volumen de la pirámide es:

$$V = \frac{1}{3}Ah,$$

siendo  $A$  el área de la base y  $h$  la altura. El área de la base es el área del triángulo de vértices dados:

$$A = \frac{1}{2}\|AB \times AC\| = \frac{1}{2}\|(2, 2, 2)\| = \sqrt{3}.$$

La altura es la distancia del vértice, el origen, al plano que contiene al triángulo:

$$h = d(\pi, (0, 0, 0)) = \frac{|0 + 0 + 0 - 3|}{\|(1, 1, 1)\|} = \frac{3}{\sqrt{3}}$$

El volumen queda:

$$V = \frac{1}{3}Ah = 1.$$


---

5.— En el espacio afín se considera el producto escalar dado por la matriz de Gram:

$$G_C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 5 \end{pmatrix}.$$

Sean las rectas:

$$r \equiv \begin{cases} x + y + 12 = 0 \\ z = 5 \end{cases}, \quad s \equiv (x, y, z) = (1, 2, 2) + \lambda(0, 1, 2).$$

Calcular la distancia entre las rectas  $r$  y  $s$ .

Las ecuaciones paramétricas de la recta  $r$  son:

$$x = a, \quad y = -12 - a, \quad z = 5$$

y su vector director  $(1, -1, 0)$ ; por tanto un punto  $P$  de tal recta es de la forma  $P = (a, -12 - a, 5)$ .

Un punto  $Q$  de la recta  $s$  es de la forma  $Q = (1, 2 + b, 2 + 2b)$ .

La distancia  $d(P, Q)$  coincide con la distancia buscada  $d(r, s)$  cuando el vector  $PQ$  es perpendicular a las dos rectas dadas:

$$PQ = Q - P = (1 - a, 14 + a + b, 2b - 3).$$

Imponemos las condiciones de perpendicularidad. Hay que recordar que para hacer los productos escalares hay que usar la matriz de Gram dada:

$$PQ \perp (1, -1, 0) \iff PQ \cdot (1, -1, 0) = 0 \iff (1 - a, 14 + a + b, 2b - 3)G_C(1, 1, 0)^t = 0 \iff -7 - 2a - 5b = 0.$$

y

$$PQ \perp (0, 1, 2) \iff PQ \cdot (0, 1, 2) = 0 \iff (1 - a, 14 + a + b, 2b - 3)G_C(0, 1, 2)^t = 0 \iff 34 + 5a + 29b = 0.$$

Resolviendo el sistema se obtiene:

$$a = b = -1$$

Por tanto

$$PQ = Q - P = (1 - a, 14 + a + b, 2b - 3) = (1 + 1, 14 - 1 - 1, 2(-1) - 3) = (2, 12, -5)$$

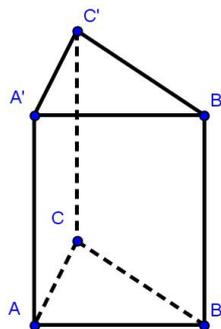
La distancia pedida es la norma del vector  $\vec{PQ}$ ; recordemos de nuevo usar la matriz de Gram para calcularla:

$$\|PQ\| = \sqrt{(2, 12, -5)G_C(2, 12, -5)^t} = \sqrt{33}.$$

7.— En el espacio afín se considera el prisma recto triangular de vértices  $ABCA'B'C'$ . Se sabe que:

$$A = (1, 0, 0), \quad B = (1, 1, 0), \quad C = (2, 0, 1), \quad \text{Volumen} = 2,$$

y que el plano  $x = 0$  no corta al prisma.



(i) *Calcular el área del prisma.*

El área del prisma es el doble del área de la base más el área lateral. El área lateral es el perímetro del triángulo base por la altura.

El área de la base es:

$$\text{Area}(ABC) = \frac{1}{2} \|AB \times AC\| = \frac{1}{2} \|(1, 0, -1)\| = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

El perímetro de la base es:

$$P = \|AB\| + \|BC\| + \|AC\| = \|(0, 1, 0)\| + \|(1, -1, 1)\| + \|(1, 0, 1)\| = 1 + \sqrt{3} + \sqrt{2}.$$

Y la altura:

$$h = \frac{\text{volumen}}{\text{Area}(ABC)} = 2\sqrt{2}.$$

Por tanto el área del prisma es:

$$2\text{Area}(ABC) + P \cdot h = \sqrt{2} + 2\sqrt{2} + 2\sqrt{6} + 4 = 4 + 3\sqrt{2} + 2\sqrt{6} = 13.1416\dots$$

(ii) *Calcular las coordenadas de los vértices  $A', B', C'$ . ¿Es única?*

Para calcular las coordenadas de  $A', B', C'$  sumaremos a cada uno de los vértices  $A, B, C$  un vector ortogonal a la base y de norma la altura del prisma  $h$  calculada en el apartado anterior.

Un vector ortogonal a la base y de norma  $h$  se obtiene como:

$$\pm h \cdot \frac{AB \times AC}{\|AB \times AC\|} = \pm 2\sqrt{2} \cdot \frac{(1, 0, -1)}{\sqrt{2}} = \pm(2, 0, -2).$$

Podría haber por tanto dos posibilidades para los vértices  $A', B', C'$ :

$$A' = A + (2, 0, -2) = (3, 0, -2), \quad B' = B + (2, 0, -2) = (3, 1, -2), \quad C' = C + (2, 0, -2) = (4, 0, -1),$$

ó

$$A' = A - (2, 0, -2) = (-1, 0, 2), \quad B' = B - (2, 0, -2) = (-1, 1, 2), \quad C' = C + (2, 0, -2) = (0, 0, 3).$$

Pero teniendo en cuenta que el plano  $x = 0$  NO CORTA al prisma, no puede haber vértices con coordenada  $x$  de distinto signo (ya que en ese caso el segmento que los une cortarí a tal plano); por tanto la única posibilidad es la primera, en la cual, todas las abscisas de los puntos del prisma son positivas:

$$A' = A + (2, 0, -2) = (3, 0, -2), \quad B' = B + (2, 0, -2) = (3, 1, -2), \quad C' = C + (2, 0, -2) = (4, 0, -1),$$

Deducimos por consiguiente que la solución es única.

(iii) *Decidir razonadamente si existe un giro que lleve los vértices  $A, B, C$  respectivamente en  $B, C, A$ . En caso afirmativo hallar el eje de giro.*

El giro debiera de llevar el segmento  $AB$  en el segmento  $BC$ . Pero:

$$\|AB\| = \|(0, 1, 0)\| = 1, \quad \|BC\| = \|(1, -1, 1)\| = \sqrt{3}.$$

Un giro debiera de conservar las distancias; como  $\|AB\| \neq \|BC\|$  es imposible que exista un giro en las condiciones indicadas.

---

8.— Calcular la ecuación de una homotecia que lleve el triángulo  $ABC$  en  $A'B'C'$  sabiendo que:

$$A = (1, 1), \quad B = (3, 2), \quad C = (2, 4), \quad A' = (2, 3), \quad \text{superficie}(A'B'C') = 10.$$

Una homotecia de razón  $k$  modifica las áreas con razón  $k^2$ . Por tanto:

$$k^2 = \frac{\text{sup}(A'B'C')}{\text{sup}(ABC)}.$$

Para hallar el área de  $ABC$  consideramos sus puntos situados en el plano 0 y utilizamos la interpretación geométrica del producto vectorial:

$$\text{sup}(ABC) = \frac{1}{2} \|AB \times AC\| = \frac{1}{2} \left\| \begin{vmatrix} \vec{e}_1 & \vec{e}_2 & \vec{e}_3 \\ 3-1 & 2-1 & 0 \\ 2-1 & 4-1 & 0 \end{vmatrix} \right\| = \frac{1}{2} \|(0, 0, 5)\| = \frac{5}{2}.$$

Por tanto:

$$k^2 = \frac{10}{5/2} = 4 \quad \Rightarrow \quad k = \pm 2.$$

Por otra parte una razón de centro  $(x_0, y_0)$  y razón  $k$  tiene por ecuación:

$$t(x, y) = (x_0, y_0) + k(x - x_0, y - y_0)$$

Imponemos que  $t(A) = A'$ :

$$t(1, 1) = (2, 3) \quad \Rightarrow \quad (x_0, y_0) + k(1 - x_0, 1 - y_0) = (2, 3) \quad \Rightarrow \quad (x_0, y_0) = \frac{1}{1-k}(2-k, 3-k).$$

Por tanto tenemos dos posibles homotecias:

- Para  $k = 2$ , la homotecia de centro  $(0, -1)$  y razón 2 de ecuación:

$$t(x, y) = (0, -1) + 2(x - 0, y + 1) = (0, 1) + 2(x, y)$$

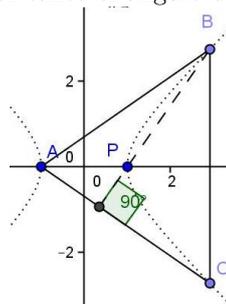
- Para  $k = -2$ , la homotecia de centro  $(\frac{4}{3}, \frac{5}{3})$  y razón  $-2$  de ecuación:

$$t(x, y) = (\frac{4}{3}, \frac{5}{3}) - 2(x - \frac{4}{3}, y - \frac{5}{3}) = (4, 5) - 2(x, y)$$

11.— En el plano afín sean los puntos  $A(-1, 0)$  y  $P(1, 0)$ . Calcular la ecuación implícita del lugar geométrico de puntos  $B$  del plano tales que  $AB$  sea uno de los lados iguales de un triángulo isósceles cuyo ortocentro es  $P$ . ¿Qué tipo de curva es?.

Hay dos posibles interpretaciones:

- Los lados iguales son  $AB$  y  $AC$ , y por tanto el ángulo desigual el  $A$ :



En un triángulo isósceles la recta que une el vértice del ángulo desigual con el ortocentro es un eje de simetría. En nuestro caso tal recta, la que une  $A$  y  $P$ , es el eje  $OX$ . Si  $B$  tiene coordenadas  $(x, y)$  su simétrico respecto al eje  $OX$  es el punto  $C$ ,  $(x, -y)$ , de forma que los tres vértices del triángulo son  $ABC$ .

Para que  $P$  sea el ortocentro el lado  $AC$  ha de ser perpendicular a la altura de vértice  $B$ , es decir, al vector  $BP$ . Por tanto:

$$\vec{AC} \cdot \vec{BP} = 0$$

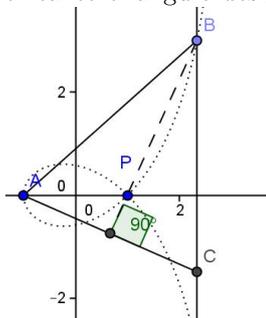
es decir:

$$(x - (-1), -y - 0) \cdot (1 - x, 0 - y) = 0 \iff (1 + x)(1 - x) + y^2 = 0 \iff x^2 - y^2 = 1$$

Vemos que la ecuación del lugar geométrico pedido corresponde a la hipérbola:

$$x^2 - y^2 = 1.$$

- Los lados iguales son  $AB$  y  $BC$  y por tanto el ángulo desigual  $B$ :



La altura sobre el lado  $BC$  es la recta que une  $A$  con el ortocentro; por tanto  $BC$  es perpendicular al eje  $OX$ . Así si  $B$  tiene coordenadas  $(x, y)$  entonces  $C$  tiene coordenadas  $(x, y')$ .

Dado que la distancia  $AB$  es la misma que  $BC$ :

$$(x + 1)^2 + y^2 = (y - y')^2 \iff (x + 1)^2 = y'^2 - 2yy'$$

Por otra parte la recta  $BP$  tiene que ser perpendicular la lado  $AB$ , es decir:

$$\vec{AC} \cdot \vec{BP} = 0 \iff (x - (-1), -y - 0) \cdot (1 - x, 0 - y') = 0 \iff (1 + x)(1 - x) + yy' = 0 \iff x^2 - 1 + yy' = 0$$

Despejando  $y'$  en la segunda ecuación y sustituyendo en la primera se tiene:

$$(x + 1)^2 = \frac{(1 - x^2)^2}{y^2} - 2(1 - x^2)$$

Dividiendo por  $x + 1$ :

$$(x + 1) = \frac{(x^2 - 1)(x - 1)}{y^2} + 2(x - 1)$$

Quitando denominadores y simplificando obtenemos

$$x^3 - x^2 - x + 1 - xy^2 - 3y^2 = 0,$$

que es la ecuación de una cúbica.

**12.**— En el plano afín y con respecto a la referencia canónica, sea  $P$  el punto de coordenadas  $(0, 1)$ . Para cada recta  $r$  pasando por el punto  $P$ , llamamos  $A$  y  $B$  a los puntos de intersección de  $r$  con la curva  $y = x^2$ . Hallar el lugar geométrico de los puntos medios de  $A$  y  $B$ . ¿Qué tipo de curva se obtiene?

**Método I:** Consideramos el haz de rectas de puntos pasando por  $(0, 1)$ . Está generado por dos rectas que pasan por él, por ejemplo,  $x = 0$  e  $y - 1 = 0$ . El haz es de la forma:

$$\lambda x + (y - 1) = 0.$$

(de esta forma excluimos la recta  $x = 0$ : pero eso no es problema, dicha recta es la única que no corta a la parábola dada en dos puntos por lo que no interviene en la construcción).

Intersecamos la recta con la parábola:

$$\left. \begin{array}{l} \lambda x + (y - 1) = 0 \\ y = x^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda x + x^2 - 1 = 0 \Rightarrow x = \frac{-\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 + 4}}{2}$$

Los puntos de corte son  $(x_1, y_1)$  e  $(x_2, y_2)$  con:

$$x_1 = \frac{-\lambda + \sqrt{\lambda^2 + 4}}{2}, \quad y_1 = 1 - \lambda x = 1 - \frac{-\lambda^2 + \lambda\sqrt{\lambda^2 + 4}}{2}$$

y

$$x_2 = \frac{-\lambda - \sqrt{\lambda^2 + 4}}{2}, \quad y_2 = 1 - \lambda x = 1 - \frac{-\lambda^2 - \lambda\sqrt{\lambda^2 + 4}}{2}$$

El punto medio de ambos es:

$$(x, y) = \frac{(x_1, y_1) + (x_2, y_2)}{2} = \left( \frac{-\lambda}{2}, 1 + \frac{\lambda^2}{2} \right)$$

Las ecuaciones paramétricas son:

$$x = \frac{-\lambda}{2}, \quad y = 1 + \frac{\lambda^2}{2}.$$

Para hallar la ecuación implícita del lugar geométrico despejamos el parámetro en la primera ecuación y sustituimos en la segunda. Queda:

$$y = 1 + 2x^2 \iff 2x^2 - y + 1 = 0.$$

Se trata de una cónica de matriz asociada  $A$  y de términos cuadráticos  $T$ :

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1/2 \\ 0 & -1/2 & 1 \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Como  $\det(A) \neq 0$  y  $\det(T) = 0$  se trata de una parábola.

**Método II:** Una recta tiene por ecuación:

$$ax + by + c = 0$$

Imponemos que pase por el punto  $(0, 1)$ :

$$b + c = 0 \Rightarrow c = -b$$

La ecuación queda:

$$ax + by - b = 0.$$

Intersecamos con la parábola dada:

$$\left. \begin{array}{l} ax + by - b = 0 \\ y = x^2 \end{array} \right\} \Rightarrow \lambda ax + bx^2 - b = 0 \Rightarrow x = \frac{-a \pm \sqrt{a^2 + 4ab}}{2b}$$

Los puntos de corte son  $(x_1, y_1)$  e  $(x_2, y_2)$  con:

$$x_1 = \frac{-a + \sqrt{a^2 + 4ab}}{2b}, \quad y_1 = 1 - \frac{ax_1}{b} = 1 - \frac{-a^2 + a\sqrt{a^2 + 4ab}}{2b^2}$$

y

$$x_2 = \frac{-a - \sqrt{a^2 + 4ab}}{2b}, \quad y_2 = 1 - \frac{ax_2}{b} = 1 - \frac{-a^2 - a\sqrt{a^2 + 4ab}}{2b^2}$$

El punto medio de ambos es:

$$(x, y) = \frac{(x_1, y_1) + (x_2, y_2)}{2} = \left( \frac{-a}{2b}, 1 + \frac{a^2}{2b^2} \right)$$

Las ecuaciones paramétricas son:

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

Despejando  $a$  en la primera ecuación y sustituyendo en la segunda queda:

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

Ahora concluimos como en el método anterior.

**14.**— En el espacio afín euclideo y respecto a la referencia canónica se consideran los puntos  $A = (1, 0, 0)$  y  $B = (1, 2, 2)$ .

(i) *Hallar el lugar geométrico de puntos que equidistan de  $A$  y  $B$ .*

**Método I:** Un punto  $P = (x, y, z)$  equidista de  $A$  y  $B$  si:

$$d(P, A) = d(P, B) \iff \sqrt{(x-1)^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{(x-1)^2 + (y-2)^2 + (z-2)^2}$$

Elevando al cuadrado y operando resulta:

$$x^2 - 2x + 1 + y^2 + z^2 = x^2 - 2x + 1 + y^2 - 4y + 4 + z^2 - 4z + 4$$

Simplificando obtenemos el plano de ecuación:

$$y + z - 2 = 0.$$

**Método II:** Los puntos que equidistan de dos dados en el espacio son aquellos que yacen en el plano mediatriz; es decir el plano que pasa por el punto medio y es perpendicular al segmento que los une. Tenemos:

$$M = \frac{A+B}{2} = (1, 1, 1).$$

El vector  $\vec{AB} = (0, 2, 2)$  es perpendicular al plano buscado. Equivalentemente el vector  $(0, 1, 1)$  es el vector normal de tal plano. Por tanto éste es de la forma:

$$y + z + d = 0.$$

Imponemos que pase por  $M$ :

$$1 + 1 + d = 0 \Rightarrow d = -2.$$

Así el lugar geométrico pedido es:

$$y + z - 2 = 0.$$

- (ii) Hallar las coordenadas de un punto  $C$  en el plano  $z = 2$ , de manera que el triángulo  $ABC$  sea isósceles con  $AB$  el lado desigual y tenga área  $2\sqrt{3}$ . ¿Es única la solución?

Por estar en el plano  $z = 2$  el punto es de la forma  $C = (a, b, 2)$ . Ahora por formar un triángulo isósceles con  $AB$ , equidista de  $A$  y  $B$  y por tanto está en el lugar geométrico hallado en el apartado anterior:

$$b + 2 - 2 = 0 \Rightarrow b = 0.$$

Es decir  $C = (a, 0, 2)$ . Finalmente  $Area(ABC) = 2\sqrt{3}$ . Pero:

$$Area(ABC) = \frac{base \cdot h}{2} = \frac{\|\vec{AB}\| \|\vec{MC}\|}{2} = \frac{\sqrt{0^2 + 2^2 + 2^2} \sqrt{(a-1)^2 + (-1)^2 + 1^2}}{2} = \sqrt{2((a-1)^2 + 2)}$$

Igualando  $Area(ABC) = 2\sqrt{3}$  queda:

$$2\sqrt{3} = \sqrt{2((a-1)^2 + 2)} \Rightarrow 6 = (a-1)^2 + 2 \Rightarrow (a-1)^2 = 4 \Rightarrow (a-1)^2 = \pm 2.$$

Vemos que hay dos soluciones (la solución no es por tanto única):

$$a = 3 \text{ ó } a = -1.$$

Es decir:

$$C = (3, 0, 2) \text{ ó } C = (-1, 0, 2).$$

---

**I.**— *En el plano afín  $E_2$  y con respecto a una referencia rectangular se tiene el triángulo  $ABC$  de vértices  $A = (0, 0)$ ,  $B = (1, 0)$ ,  $C = (c, d)$ . Probar que sus tres alturas se cortan en un punto.*

Calculemos la ecuación de las tres alturas. Utilizaremos siempre el mismo método. Si conocemos el vector normal  $(p, q)$  de una recta su ecuación es:

$$px + qy + r = 0.$$

Para hallar  $r$  utilizamos que la recta que buscamos pasa por un punto adicional.

En nuestro caso los vectores normales (perpendiculares) a las alturas son los lados del triángulo, y el punto adicional el vértice opuesto:

- Recta perpendicular a  $AB$  y pasando por  $C$ . Vector normal  $\vec{AB} = (1, 0)$ , como pasa por  $C = (c, d)$  queda:

$$x - c = 0.$$

- Recta perpendicular a  $AC$  y pasando por  $B$ . Vector normal  $\vec{AC} = (c, d)$ , como pasa por  $B = (1, 0)$  queda:

$$cx + dy - c = 0.$$

- Recta perpendicular a  $BC$  y pasando por  $A$ . Vector normal  $\vec{BC} = (c-1, d)$ , como pasa por  $A = (0, 0)$  queda:

$$(c-1)x + dy = 0$$

Ahora podemos concluir de dos formas:

I) Si a la segunda ecuación le restamos la primera, obtenemos la tercera. Por tanto esta está en el haz de rectas formada por las dos primeras y las tres rectas se cortan en el mismo punto.

II) Directamente calculamos la intersección de las dos primeras resolviendo el sistema. Queda:

$$x = c; \quad y = (c - c^2)/d.$$

Y comprobamos que también es un punto de la tercera:

$$(c-1)c + d(c - c^2)/d = c^2 - c + c - c^2 = 0.$$

**(Segundo parcial, junio 2007)**

---

**II.**— *Consideramos el espacio afín euclídeo  $E_3$  con el producto escalar cuya matriz de Gram respecto de la base canónica viene dada por:*

$$G = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

*Dado el tetraedro de vértices:*

$$A = (0, 0, 0), \quad B = (1, 0, 0), \quad C = (2, 0, 1), \quad D = (1, 1, 1),$$

*calcular las coordenadas de la proyección ortogonal del vértice  $A$  sobre la base opuesta  $BCD$ .*

La ecuación vectorial del plano  $BCD$  es:

$$X = B + \alpha \vec{BC} + \beta \vec{BD},$$

es decir:

$$(x, y, z) = (1, 0, 0) + \alpha(1, 0, 1) + \beta(0, 1, 1) = (1 + \alpha, \beta, \alpha + \beta).$$

La proyección buscada  $A'$  pertenece a ese plano y debe de cumplir que el vector  $AA'$  sea perpendicular al mismo; equivalente que sea perpendicular a sus vectores directores. Imponemos estas condiciones:

$$\vec{AA'} \perp \vec{BC} \quad \Rightarrow \quad (1 + \alpha, \beta, \alpha + \beta)G(1, 0, 1)^t = 0$$

$$\vec{AA'} \perp \vec{BD} \quad \Rightarrow \quad (1 + \alpha, \beta, \alpha + \beta)G(0, 1, 1)^t = 0$$

Operando obtenemos las ecuaciones:

$$4\alpha + 3\beta = -2$$

$$3\alpha + 5\beta = 0$$

y resolviendo el sistema:

$$\alpha = -\frac{10}{11}, \quad \beta = \frac{6}{11}.$$

La proyección pedida es:

$$A' = (1 + \alpha, \beta, \alpha + \beta) = \left(\frac{1}{11}, \frac{6}{11}, -\frac{4}{11}\right).$$

---

**III.**— En el espacio  $E_2$  dotado de un sistema de referencia rectangular, se tienen las rectas  $r : x = 1$  y  $s : y = x$ . Hallar una recta que pase por  $M(2, 1)$  y que corta a  $r$  y a  $s$  en dos puntos distintos (respectivamente  $A$  y  $B$ ), tales que  $M$  equidiste de  $A$  y  $B$ .

Dado que  $M$  equidista de  $A$  y  $B$  y los tres puntos son colineales,  $M$  es precisamente el punto medio entre  $A$  y  $B$ . El punto  $A$  es de la forma  $(1, a)$  y el  $B$ ,  $(b, b)$ . Por tanto:

$$(2, 1) = \frac{(1, a) + (b, b)}{2} = (b - 2, b - 1) \quad \Rightarrow \quad a = -1; \quad b = 3$$

La recta que buscamos es la que une los puntos  $M(2, 1)$  y  $A(1, -1)$ . Resulta por tanto

$$\frac{x - 2}{1 - 2} = \frac{y - 1}{-1 - 1} \quad \Leftrightarrow \quad 2x - y - 3 = 0$$

**(Examen extraordinario, setiembre 2001)**

---

**IV.**— En el espacio afín euclideo usual consideramos una pirámide triangular  $ABCD$  de la cual sabemos:

-  $A = (0, 0, 0)$ ,  $B = (1, 0, 0)$ ,  $C = (0, 1, 1)$ .

- El vértice  $D$  se encuentra en un plano paralelo a la base  $ABC$  y que pasa por el punto  $P = (0, 10, 9)$ .

- El vértice  $D$  equidista de los otros tres.

(i) Hallar el volumen de la pirámide.

El volumen de la pirámide es:

$$V = \frac{\text{base} \cdot \text{altura}}{3}.$$

El área de la base es la del triángulo  $ABC$ :

$$\frac{1}{2} \|\vec{AB} \times \vec{AC}\| = \frac{1}{2} \|(0, -1, 1)\| = \frac{1}{2} \sqrt{2}.$$

La altura es la distancia del punto  $D$  a  $ABC$ ; pero como el plano que contiene a  $D$  y es paralelo a  $ABC$  también pasa por  $P = (0, 10, 9)$ ,  $dis(D, ABC) = dis(P, ABC)$ . El plano  $ABC$  tiene por ecuación:

$$\begin{vmatrix} x & y & z \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{vmatrix} = \iff y - z = 0.$$

La altura queda por tanto:

$$h = \frac{|10 - 9|}{\sqrt{0^2 + 1^2 + 1^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

El volumen pedido será:

$$V = \frac{(\sqrt{2}/2) \cdot (1/\sqrt{2})}{3} = \frac{1}{6}.$$

(ii) *Hallar las coordenadas del vértice  $D$ .*

El vértice  $D$  se encuentra en el plano paralelo a  $ABC$  (cuya ecuación hemos calculado antes  $y - z = 0$ ) y pasando por  $P$ . Tal plano es de la forma:

$$y - z + k = 0$$

e imponiendo que pase por  $P$  queda  $10 - 9 + k = 0$ , de donde  $k = 1$ . Deducimos que el plano que contiene a  $D$  tiene por ecuación:

$$y - z - 1 = 0.$$

y por tanto podemos tomar  $D$  como:

$$D = (a, b + 1, b)$$

Ahora usamos que el punto  $D$  equidista de los otros tres:

$$\begin{aligned} d(A, D) = D(B, D) &\iff \sqrt{a^2 + (b + 1)^2 + b^2} = \sqrt{(a - 1)^2 + (b + 1)^2 + b^2} \\ d(A, D) = D(C, D) &\iff \sqrt{a^2 + (b + 1)^2 + b^2} = \sqrt{a^2 + b^2 + (b - 1)^2} \end{aligned}$$

Elevando al cuadrado ambas ecuaciones y simplificando queda:

$$\begin{aligned} 0 &= 2a - 1 \\ 0 &= 4b \end{aligned}$$

Obtenemos que  $a = 1/2$  y  $b = 0$ , con lo que  $D = (1/2, 1, 0)$ .

(iii) *Hallar las ecuaciones de la simetría respecto del plano  $ABC$ .*

El plano está generado por los vectores  $\vec{AB} = (1, 0, 0)$  y  $\vec{AC} = (0, 1, 1)$ . Un vector perpendicular a ambos es el vector normal al plano  $ABC$ ,  $(0, 1, -1)$ . Construimos una base con esos tres vectores:

$$B' = \{(1, 0, 0), (0, 1, 1), (0, 1, -1)\}.$$

En esa base la matriz de la simetría es:

$$F_{B'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Hacemos un cambio de base:

$$F_C = M_{CB'} F_{B'} M_{CB'}^{-1}.$$

donde:

$$M_{CB'} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}.$$

Operando resulta:

$$F_C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Las ecuaciones de la simetría son (teniendo en cuenta que el origen es un punto fijo de la misma):

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x-0 \\ y-0 \\ z-0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}.$$

(iv) *Hallar el simétrico de P respecto de la simetría anterior.*

Simplemente usamos la fórmula hallada en el apartado anterior:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 10 \\ 9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 9 \\ 10 \end{pmatrix}.$$

**V.**— *Dar la matriz de Gram de un producto escalar en  $\mathbb{R}^2$  de manera que el triángulo de vértices  $(0,0)$ ,  $(1,0)$  y  $(0,1)$  sea equilátero.*

Supongamos que la matriz de Gram respecto de la base canónica es:

$$G = \begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix}.$$

Los tres lados del triángulo están representados por los vectores:

$$\bar{u}_1 = (1,0) - (0,0) = (1,0), \quad \bar{u}_2 = (0,1) - (0,0) = (0,1), \quad \bar{u}_3 = (1,0) - (0,1) = (1,-1).$$

Para que el triángulo sea equilátero tiene que cumplirse que:

$$\bar{u}_1 \cdot \bar{u}_1 = \bar{u}_2 \cdot \bar{u}_2 = \bar{u}_3 \cdot \bar{u}_3.$$

Equivalentemente:

$$(1,0)G(1,0)^t = (0,1)G(0,1)^t = (1,-1)G(1,-1)^t.$$

Operando obtenemos:

$$a = c = a - 2b + c.$$

de donde:

$$c = a, \quad b = \frac{a}{2}.$$

Tomando, por ejemplo,  $a = 2$  nos queda:

$$G = \begin{pmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}.$$

Es una matriz de un producto escalar porque es simétrica y definida positiva (esto último es inmediato aplicando el criterio de Sylvester).

**VI.**— En el espacio afín se considera el producto escalar dado por la matriz de Gram:

$$G_C = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 6 & a \\ 1 & b & c \end{pmatrix}.$$

Sean los puntos  $A = (1, 2, 0)$ ,  $B = (1, 3, 1)$  y las rectas:

$$r \equiv \begin{cases} x + y - 2 = 0 \\ x - y - z = 0 \end{cases}, \quad s \equiv (x, y, z) = (1, 2, -1) + \lambda(0, 1, 2).$$

Hallar  $a, b, c$  sabiendo que  $d(A, B) = 3$  y que las rectas  $r$  y  $s$  son perpendiculares.

Por ser una matriz de Gram es simétrica y así  $b = a$ .

Ahora:

$$3 = d(A, B) = \|\vec{AB}\| = \|B - A\| = \|(0, 1, 1)\| = \sqrt{(0, 1, 1)G_C(0, 1, 1)^t}.$$

Operando obtenemos la ecuación:

$$6 + 2a + c = 9 \iff 2a + c = 3 \quad (*)$$

Para utilizar que  $r$  y  $s$  son perpendiculares hallamos sus vectores directores e imponemos que sean ortogonales.

El vector director de  $s$  nos lo dan directamente  $\vec{u}_s = (0, 1, 2)$ . Para hallar el vector director de  $r$  pasamos de implícitas a paramétricas:

$$\begin{aligned} x + y - 2 = 0 \\ x - y - z = 0 \end{aligned} \Rightarrow x = -y + 2, \quad z = x - y = -2y + 2$$

Las paramétricas quedan:

$$x = -\lambda + 2, \quad y = \lambda, \quad z = -2\lambda + 2$$

y así  $\vec{u}_r = (-1, 1, -2)$ .

Ahora:

$$\vec{u}_s \cdot \vec{u}_r = 0 \iff (0, 1, 2)G_C(-1, 1, -2)^t = 0 \iff -2 + 6 + 2a - 2a - 4c = 0.$$

Despejando deducimos que  $c = 1$  y de  $(*)$ ,  $a = 1$ .

En definitiva  $a = b = c = 1$ .

**VII.**— En el espacio afín y euclídeo ordinario dotado de un sistema de referencia rectangular, un plano  $\Pi$  corta a los semiejes positivos en puntos que distan 1 del origen. Determinar el lugar geométrico de las rectas que pasando por el punto  $P(1, 2, 2)$  forman con el plano  $\Pi$  un ángulo de  $60^\circ$ .

**(Segundo Parcial, junio 2003)**

El plano que corta a los ejes en los puntos  $(1, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$  y  $(0, 0, 1)$  tiene por ecuación:

$$\frac{x}{1} + \frac{y}{1} + \frac{z}{1} = 1 \iff x + y + z - 1 = 0$$

Dado un punto  $(x, y, z)$  cualquiera, la recta que lo une a  $P$  forma un ángulo de 60 grados con el plano precisamente si el ángulo que forma con el vector normal al mismo es de  $90 - 60 = 30$  grados. El vector normal al plano es  $(1, 1, 1)$ . Por tanto planteamos la siguiente ecuación:

$$\cos(30) = \frac{(1, 1, 1)(x - 1, y - 2, z - 2)}{\|(1, 1, 1)\| \|(x - 1, y - 2, z - 2)\|}$$

Elevando al cuadrado y operando queda la ecuación:

$$5x^2 + 5y^2 + 5z^2 - 8xy - 8xz - 8yz + 22x + 4y + 4z - 19 = 0$$

**VIII.**— En el espacio afín  $E_3$  con el producto escalar usual, consideramos las rectas de ecuaciones:

$$r \equiv \begin{cases} 0 = z - 1 \\ 0 = y \end{cases}, \quad s \equiv \begin{cases} 0 = x \\ 0 = y + z - 2 \end{cases}$$

(i) Hallar la ecuación de una recta que pase por  $P(1, 1, -1)$  y corte a  $r$  y  $s$ .

La recta pedida está en los planos que contienen a  $r$  y a  $P$  y a  $s$  y a  $P$ . Por tanto será la intersección de tales planos.

Para hallar el plano que contiene a  $r$  y contiene a  $P$  usamos el haz de planos generado por las dos ecuaciones que nos definen  $r$ :

$$z - 1 + ay = 0.$$

Imponemos que pase por el punto  $P = (1, 1, -1)$ :

$$-1 - 1 + a = 0 \quad \Rightarrow \quad a = 2,$$

y obtenemos el plano:

$$2y + z - 1 = 0.$$

Igualmente, para hallar el plano que contiene a  $s$  y contiene a  $P$  usamos el haz de planos generado por las dos ecuaciones que nos definen  $r$ :

$$bx + y + z - 2 = 0.$$

Imponemos que pase por el punto  $P = (1, 1, -1)$ :

$$b + 1 - 1 - 2 = 0 \quad \Rightarrow \quad b = 2,$$

y obtenemos el plano:

$$2x + y + z - 2 = 0.$$

Las ecuaciones implícitas de la recta pedida son por tanto:

$$\begin{cases} 2y + z - 1 = 0 \\ 2x + y + z - 2 = 0 \end{cases}$$

(ii) Hallar la ecuación de un plano paralelo a  $r$  y  $s$  y que equidiste de ambas.

Dado que el plano buscado es paralelo a ambas rectas, su vector normal será perpendicular a los vectores directores de las rectas dadas. Por tanto podemos tomar como vector normal del plano el producto vectorial de los vectores directores de  $r$  y  $s$ .

Las ecuaciones paramétricas de  $r$  son:

$$x = a, \quad y = 0, \quad z = 1$$

y por tanto su vector director  $v_r = (1, 0, 0)$ .

Las ecuaciones paramétricas de  $s$  son:

$$x = 0, \quad y = b, \quad z = -b + 2.$$

y por tanto su vector director  $v_s = (0, 1, -1)$ .

El vector normal del plano buscado será:

$$n = u \times v = \begin{vmatrix} e_1 & e_2 & e_3 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{vmatrix} = e_2 + e_3 = (0, 1, 1)$$

El plano  $\pi$  pedido es de la forma  $y + z + c = 0$ .

Para hallar  $c$  utilizaremos la condición de la equidistancia. La distancia de un plano a una recta paralela, es la distancia de cualquier punto de la recta al plano. Tomamos los puntos  $(0, 0, 1) \in r$  y  $(0, 0, 2) \in s$ :

$$d(r, \pi) = d(s, \pi) \iff \frac{|0 + 1 + c|}{\sqrt{0^2 + 1^2 + 1^2}} = \frac{|0 + 2 + c|}{\sqrt{0^2 + 1^2 + 1^2}}$$

Si quitamos los valores absolutos hay dos posibilidades:

- O bien  $1 + c = 2 + c$ , pero entonces  $1 = 2$  y esto es imposible.

- O bien  $-1 - c = 2 + c$  y entonces  $c = -3/2$ .

Deducimos que el plano  $\pi$  tiene por ecuación implícita:

$$y + z - \frac{3}{2} = 0.$$

---

**IX.**— En el plano afín euclídeo  $E_2$  y con respecto a una referencia rectangular, sea  $C$  la elipse de ecuación  $x^2 + 2y^2 = 4$ . Calcular el lugar geométrico de los puntos medios de las cuerdas de  $C$  paralelas a la recta  $x = y$ .

La ecuación de  $C$  es:

$$x^2 + 2y^2 = 4.$$

La ecuación de una recta paralela a  $x = y$  es:

$$x = y + c.$$

Intersecamos ambas:

$$(y + c)^2 + 2y^2 = 4 \Rightarrow 3y^2 + 2cy + c^2 - 4 = 0 \Rightarrow y = -\frac{c}{3} \pm \frac{1}{3}\sqrt{12 - 2c^2}.$$

Obtenemos dos soluciones:

$$y_1 = -\frac{c}{3} + \frac{1}{3}\sqrt{12 - 2c^2}, \quad x_1 = y_1 + c.$$

$$y_2 = -\frac{c}{3} - \frac{1}{3}\sqrt{12 - 2c^2}, \quad x_2 = y_2 + c.$$

Es decir, las cuerdas cortan en los puntos  $(x_1, y_1)$  y  $(x_2, y_2)$ . El punto medio es:

$$(x, y) = \frac{(x_1, y_1) + (x_2, y_2)}{2} = (2c/3, -c/3).$$

Vemos que el lugar geométrico es la recta de ecuación paramétrica:

$$(x, y) = (2c/3, -c/3)$$

o de ecuación implícita  $x = -2y$ .

**Observación.** En realidad, de manera más rigurosa, el lugar geométrico pedido no es toda la recta, si no tan solo el segmento que se obtiene cuando el parámetro  $c$  varía en el intervalo  $[-\sqrt{6}, \sqrt{6}]$ . En otro caso los valores de  $y_1$  y  $y_2$  no son reales. Geométricamente esto significa que las cuerdas no cortan a la elipse.

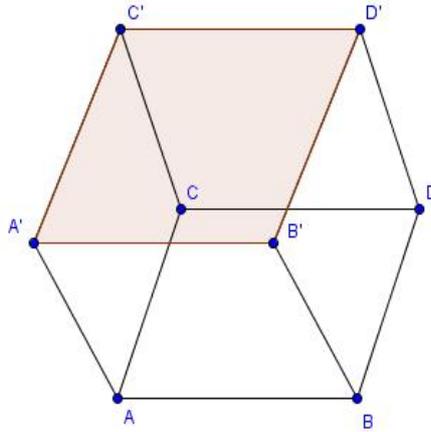
**(Examen extraordinario, septiembre 2006)**

---

**X.**— En el espacio afín euclídeo  $E_3$  con el producto escalar usual y respecto a la referencia canónica se considera un cubo contenido en el semiespacio superior ( $E_3^+ = \{(x, y, z) \in E_3 | z \geq 0\}$ ). Se sabe que tres de sus vértices pertenecientes a una misma cara tienen por coordenadas:

$$A = (0, 0, 0), \quad B = (5, 0, 0), \quad C = (0, 3, 4)$$

Calcular la ecuación del plano donde descansa la cara opuesta a la dada.



El plano que buscamos es paralelo al que contiene a los tres vértices  $A, B, C$ :

$$\pi \equiv \begin{vmatrix} x-0 & y-0 & z-0 \\ 5-0 & 0-0 & 0-0 \\ 0-0 & 3-0 & 4-0 \end{vmatrix} = 0 \iff 4y - 3z = 0.$$

Por tanto el plano de la cara opuesta es de la forma:

$$4y - 3z + c = 0.$$

Para el punto  $A'$  del mismo que se encuentra sobre  $A$ , tenemos en cuanto que el vector  $AA'$  es perpendicular al plano  $\pi$  y de longitud el lado del cubo y con coordenada  $z$  positiva (para que esté en el semiespacio superior).

El lado del cubo es  $d(A, B) = 5$ . El vector normal del plano  $\pi$  es  $(0, 4, -3)$ . Por tanto:

$$AA' = 5 \cdot \frac{(0, -4, 3)}{\|(0, 4, -3)\|} = (0, -4, 3).$$

y

$$A' = (0, 0, 0) + (0, -4, 3) = (0, -4, 3)$$

Ahora simplemente imponemos que este punto pertenezca al plano  $4y - 3z + c = 0$ :

$$4 \cdot (-4) - 3 \cdot 3 + c = 0 \Rightarrow c = 25.$$

El plano pedido tiene por ecuación:

$$4y - 3z + 25 = 0.$$

**XI.**— En el plano afín hallar las ecuaciones de un giro que lleve la recta  $3x - 4y = 0$  en la recta  $y + 3 = 0$  y esté centrado en un punto de la recta  $y = 0$ .

El centro de giro debe de equidistar de ambas rectas. Por tanto buscamos un punto  $P = (a, 0)$  sobre la recta  $y = 0$  que equidiste de las otras dos:

$$d(P, 3x - 4y = 0) = d(P, y + 3 = 0) \iff \frac{|3a - 4 \cdot 0|}{\sqrt{3^2 + 4^2}} = \frac{|0 + 3|}{\sqrt{1^2 + 0^2}} \iff |a| = 5 \iff a = \pm 5.$$

Hay pos posibilidades. Tomamos una de ellas como centro  $P = (5, 0)$ .

Ahora para saber el ángulo de giro hallamos la proyección ortogonal  $A$  de  $P$  sobre la recta  $3x - 4y = 0$  y la proyección ortogonal  $B$  de  $P$  sobre la recta  $y + 3 = 0$ .

El punto  $A$  cumple la ecuación de  $3x - 4y = 0$  y así es de la forma  $A = (4k, 3k)$ . El vector que lo une con  $P$  tiene que ser paralelo al vector normal:

$$\frac{4k - 5}{3} = \frac{3k - 0}{-4} \iff k = 4/5.$$

Obtenemos  $A = (16/5, 12/5)$  y  $\vec{P}A = A - P = (-9/5, 12/5)$ .

El punto  $B$  cumple la ecuación de  $y + 3 = 0$  y así es de la forma  $B = (m, -3)$ . El vector que lo une con  $P$  tiene que ser paralelo al vector normal  $(1, 0)$ :

$$m - 5 = 0 \iff m = 5.$$

Obtenemos  $B = (5, -3)$  y  $\vec{P}B = A - P = (0, -3)$ .

El ángulo de giro  $\alpha$  es el que forman los vectore  $\vec{P}A$  y  $\vec{P}B$ :

$$\cos(\alpha) = \frac{\vec{P}A \cdot \vec{P}B}{\|\vec{P}A\| \|\vec{P}B\|} = \frac{-36/5}{9} = \frac{-4}{5}.$$

El sentido de giro coincide con la orientación de la base  $\{\vec{P}A, \vec{P}B\}$  es decir con el signo del determinante de:

$$\det \begin{pmatrix} -9/5 & 0 \\ 12/5 & -3 \end{pmatrix} = 27/5 > 0.$$

Por tanto:

$$\sin(\alpha) = +\sqrt{1 - \cos^2(\alpha)} = \frac{3}{5}.$$

En definitiva las ecuaciones del giro quedan:

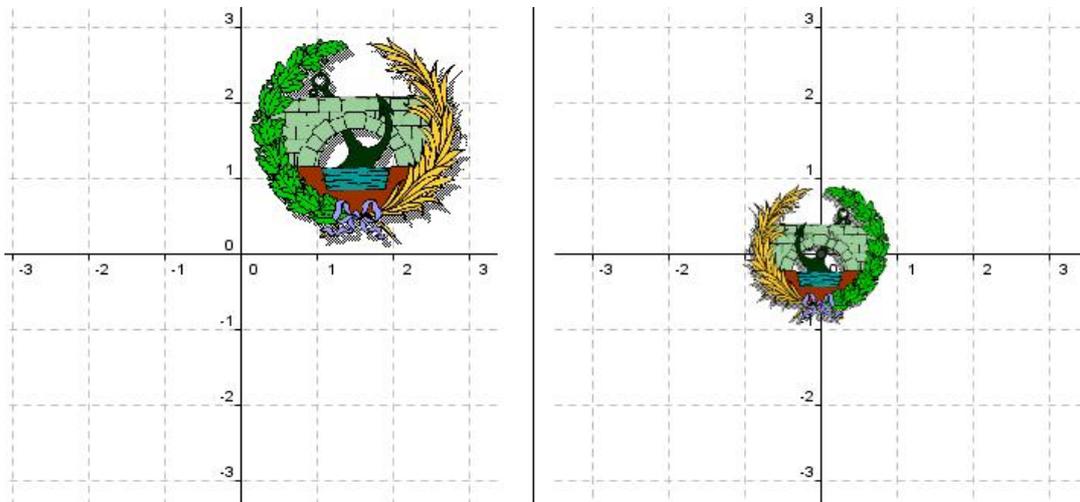
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - 5 \\ y - 0 \end{pmatrix}.$$

Sustituyendo el ángulo:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -4/5 & -3/5 \\ 3/5 & -4/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - 5 \\ y \end{pmatrix}.$$


---

**XII.**— Encontrar las ecuaciones de una transformación del plano afín que lleve una figura a la otra.



Dividiremos la transformación en varios pasos.

Observamos que el tamaño de la figura final es  $2/3$  el de la inicial. Hacemos una homotecia centrada en el origen y de razón  $2/3$ .

$$f_1(x, y) = \frac{2}{3}(x, y).$$

Vemos que la figura que queremos obtener es simétrica de la que tenemos ahora respecto de una recta paralela al eje  $y$ . Hacemos la simetría respecto de ese eje:

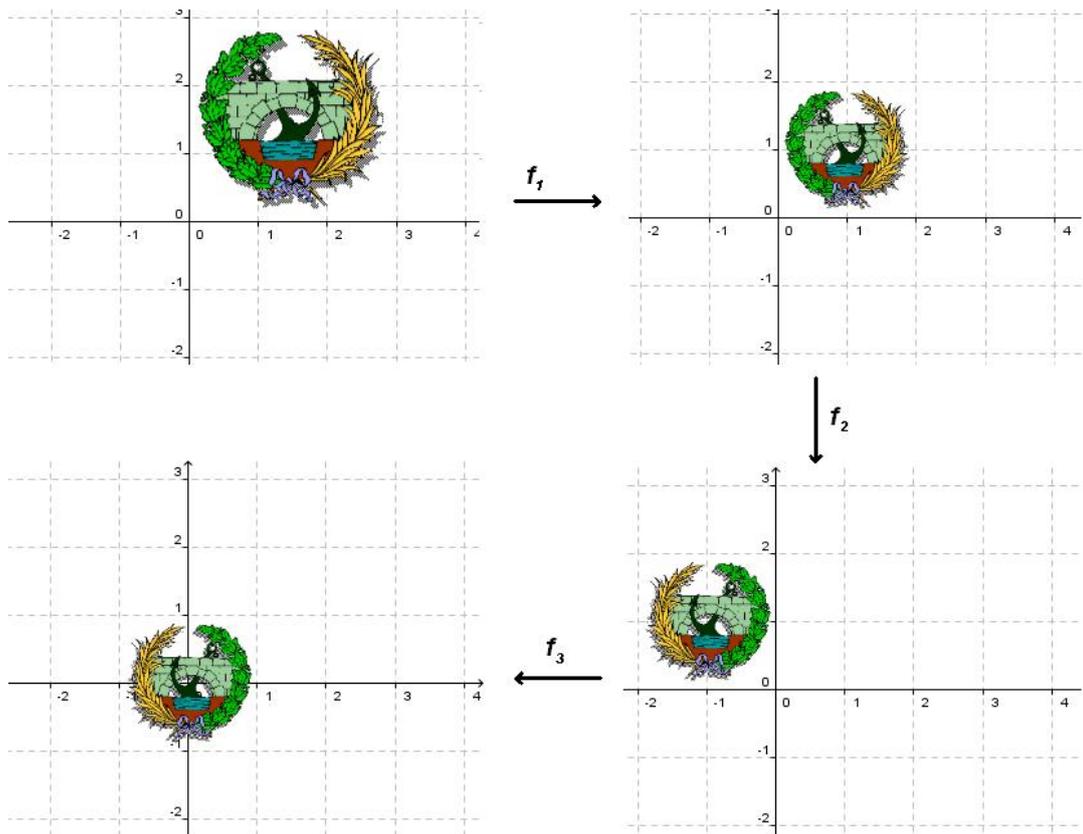
$$f_2(x, y) = (-x, y).$$

Finalmente tenemos que trasladar la figura. El vértice  $(-2, 2)$  ha de ser el  $(-1, 1)$ . Por tanto trasladamos según el vector  $(1, -1)$ :

$$f_3(x, y) = (x, y) + (1, -1).$$

La transformación pedida es la composición de las tres:

$$f(x, y) = f_3(f_2(f_1(x, y))) = f_3(f_2(2x/3, 2y/3)) = f_3(-2x/3, 2y/3) = (1, -1) + \frac{2}{3}(-x, y).$$



**XIII.**— Supongamos que escogemos 2011 puntos distintos del espacio y componemos todas las simetrías respecto a tales puntos. ¿Qué tipo de transformación afín obtendremos?

Una simetría respecto a  $P = (a, b, c)$  tiene por ecuación:

$$f(X) = f(x, y, z) = (a, b, c) - (x - a, y - b, z - c) = (2a, 2b, 2c) - (x, y, z) = 2P - X.$$

Por tanto la matriz asociada a la parte lineal de la transformación afín es  $-Id$ . Entonces la matriz asociada a la parte lineal de la transformación afín que se obtiene componiendo 2011 simetrías respecto a un punto es  $(-Id)^{2011} = -Id$ . Deducimos que la composición es de nuevo una simetría respecto a un punto.

**Observación:** Si los puntos que escogemos son  $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{2011}$  al ir componiendo obtenemos:

$$\begin{aligned} f_1(X) &= 2P_1 - X \\ f_2(f_1(X)) &= 2P_2 - (2P_1 - X) = 2(P_2 - P_1) + X \\ f_3(f_2(f_1(X))) &= 2P_3 - 2(P_2 - P_1) - X = 2(P_3 - P_2 + P_1) - X \end{aligned}$$

Nos fijamos entonces que la simetría que obtenemos al componer todas las transformaciones es respecto al punto de coordenadas:

$$P_{2011} - P_{2010} + P_{2009} - \dots + P_3 - P_2 + P_1.$$

**XIV.**— En el plano afín hallar las ecuaciones de un giro que lleva los puntos  $A = (-1, 4)$  y  $B = (1, 5)$  respectivamente en  $A' = (3, 4)$  y  $B' = (5, 3)$ . Indicar el centro y ángulo de giro, considerando como orientación positiva la dada por la base canónica.

Tenemos en cuenta que el centro de un giro pertenece a la mediatriz del segmento que une un punto con su imagen. Por tanto calcularemos la mediatriz de  $AA'$  y de  $BB'$ ; la intersección de ambas será el centro de giro.

El punto medio de  $AA'$  es:

$$M_1 = \frac{A + A'}{2} = (1, 4).$$

La mediatriz es la recta que pasa por  $M_1$  y tiene como vector normal el  $AA' = (4, 0)$ :

$$4x + d = 0.$$

Imponiendo que pase por  $M_1$ :

$$4 + d = 0 \quad \Rightarrow \quad d = -4.$$

Por tanto la mediatriz de  $AA'$  es la recta  $x - 1 = 0$ .

El punto medio de  $BB'$ :

$$M_2 = \frac{B + B'}{2} = (3, 4).$$

La mediatriz es la recta que pasa por  $M_2$  y tiene como vector normal el  $BB' = (4, -2)$ :

$$4x - 2y + c = 0.$$

Imponiendo que pase por  $M_2$ :

$$4 \cdot 3 - 2 \cdot 4 + c = 0 \quad \Rightarrow \quad c = -4.$$

Por tanto la mediatriz de  $BB'$  es la recta  $2x - y - 2 = 0$ .

El centro es la intersección de ambas:

$$\left. \begin{array}{l} x - 1 = 0 \\ 2x - y - 2 = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow C = (x, y) = (1, 0).$$

Ahora el giro debe de llevar el vector  $CA = (-2, 4)$  en el vector  $CA' = (2, 4)$ , por tanto el ángulo de giro  $\alpha$  cumplirá:

$$\cos(\alpha) = \frac{(-2, 4) \cdot (2, 4)}{\|(-2, 4)\| \|(2, 4)\|} = \frac{12}{20} = \frac{3}{5}.$$

El sentido de giro es la orientación de la base  $B = \{(-2, 4), (2, 4)\}$ :

$$\text{signo}(\det(M_{CB})) = \text{signo} \left( \det \begin{pmatrix} -2 & 2 \\ 4 & 4 \end{pmatrix} \right) = \text{signo}(-16) < 0.$$

Se trata por tanto de un giro de centro  $(1, 0)$  y ángulo de giro:

$$\alpha = -\arccos(3/5).$$

El seno del ángulo es por tanto:

$$\sin(\alpha) = -\sqrt{1 - \cos^2(\alpha)} = -4/5.$$

Las ecuaciones de giro quedan:

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3/5 & 4/5 \\ -4/5 & 3/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x - 1 \\ y - 0 \end{pmatrix}.$$

---

**XV.**— En el espacio  $E_3$  se considera un sistema de referencia  $\mathcal{R} = \{O; \bar{e}_1, \bar{e}_2, \bar{e}_3\}$  del que se sabe que la base  $\{\bar{e}_1, \bar{e}_1 + \bar{e}_2, \bar{e}_1 + \bar{e}_2 + \bar{e}_3\}$  es ortonormal. Con respecto a  $\mathcal{R}$  se tienen las ecuaciones de las rectas  $r$  y  $s$ :

$$r \equiv \begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \end{cases} \quad s \equiv \begin{cases} y = 1 \\ x + z = 0 \end{cases}$$

Determina la ecuación implícita del lugar geométrico de las rectas que cortan a  $r$  y  $s$  y son perpendiculares a  $s$ .

En primer lugar hallamos la matriz de Gram respecto de la referencia dada. Sabemos que con respecto a la base:

$$B = \{\bar{e}_1, \bar{e}_1 + \bar{e}_2, \bar{e}_1 + \bar{e}_2 + \bar{e}_3\}$$

la matriz de Gram es la identidad. Tenemos:

$$M_{CB} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad M_{BC} = M_{CB}^{-1}.$$

Entonces:

$$G_C = M_{BC}^t G_B M_{BC} = M_{BC}^t M_{BC} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & -1 & 2 \end{pmatrix}.$$

Los puntos de la recta  $r$  son de la forma:

$$(0, 0, a)$$

Los puntos de la recta  $s$  son de la forma:

$$(b, 1, -b)$$

El vector que une ambos es el vector director de las rectas pedidas:

$$(b, 1, -b - a)$$

y ha de ser perpendicular a  $s$ , luego:

$$(1, 0, -1)G_C(b, 1, -b - a)^t = 0 \Rightarrow (1, 0, -2)(b, 1, -b - a)^t = 0 \Rightarrow a = -3b/2.$$

La ecuación paramétrica de los puntos que unen:

$$(0, 0, -3b/2), (b, 1, -b)$$

es:

$$\begin{aligned} x &= \lambda b \\ y &= \lambda \\ z &= -3b/2 + b\lambda/2 \end{aligned}$$

Eliminando parámetros queda:

$$\lambda = y; \quad b = x/y;$$

y sustituyendo en la última ecuación:

$$z = -3x/(2y) + x/2 \Rightarrow 2yz + 3x - xy = 0.$$

(Segundo parcial, junio 2007)

---