

7. Coniche in \mathbf{R}^2 .

Gli insiemi di punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ che soddisfano un'equazione lineare (di primo grado)

$$ax_1 + bx_2 = c$$

con $a, b, c \in \mathbf{R}$, a, b non entrambi nulli, sono esattamente le rette del piano. Ci occupiamo adesso degli insiemi o "luoghi geometrici" definiti da equazioni di secondo grado.

Definizione. Una conica in \mathbf{R}^2 è l'insieme dei punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ che soddisfano un'equazione di secondo grado

$$ax_1^2 + bx_2^2 + cx_1x_2 + dx_1 + ex_2 + f = 0$$

dove $a, b, c, d, e, f \in \mathbf{R}$ con a, b, c non tutti nulli.

Osserviamo innanzitutto che, a differenza delle rette, le coniche di \mathbf{R}^2 possono avere forme geometriche diverse.

Esempio 7.1. I punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ che soddisfano l'equazione $2x_1^2 + 9x_2^2 = 1$ formano un'ellisse.

Fig.1. L'ellisse $2x_1^2 + 9x_2^2 = 1$ in \mathbf{R}^2 .

Esempio 7.2. I punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ che soddisfano l'equazione $2x_1^2 - 9x_2^2 = 1$ formano un'iperbole.

Fig.2. L'iperbole $2x_1^2 - 9x_2^2 = 1$ in \mathbf{R}^2 .

Esempio 7.3. I punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ che soddisfano l'equazione $2x_1^2 - x_2 = 0$ formano una parabola.

Fig.3. La parabola $2x_1^2 - x_2 = 0$ in \mathbf{R}^2 .

Esempio 7.4. I punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ che soddisfano l'equazione $x_1^2 + x_2^2 - 2x_1 - 4x_2 + 1 = (x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2)^2 - 4 = 0$ formano la circonferenza di centro $\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$ e raggio 2.

Fig.4. La circonferenza $(x_1 - 1)^2 + (x_2 - 2)^2 - 4 = 0$ in \mathbf{R}^2 .

Esempio 7.5. I punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ che soddisfano l'equazione $x_1^2 - 1 = (x_1 + 1)(x_1 - 1) = 0$ formano la coppia di rette verticali $r : x_1 = -1$ ed $s : x_1 = 1$.

Fig.5. La coppia di rette $(x_1 + 1)(x_1 - 1) = 0$ in \mathbf{R}^2 .

Esempio 7.6. I punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ che soddisfano l'equazione $x_1^2 + 2x_2^2 = 0$ consistono nel solo punto $\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$.

Esempio 7.7. Non ci sono punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ che soddisfano l'equazione $x_1^2 + 2x_2^2 + 1 = 0$.

Una domanda naturale è dunque la seguente: data un'equazione di secondo grado nel piano

$$ax_1^2 + bx_2^2 + cx_1x_2 + dx_1 + ex_2 + f = 0,$$

che tipo di conica definisce? Ad esempio, l'equazione

$$11x_1^2 - 24x_1x_2 + 4x_2^2 + 28x_1 - 96x_2 - 120 = 0 \quad (1)$$

che tipo di conica definisce? Ricordiamo innanzitutto che le equazioni di un dato luogo geometrico dipendono dal sistema di riferimento. Ogni conica, in un opportuno sistema di riferimento, ha un'equazione particolarmente semplice; da questa equazione risulta chiaro di che conica si tratta. Diamo ora un metodo generale per determinare questo sistema di riferimento "conveniente" per una conica qualunque. Sia dunque

$$ax_1^2 + bx_2^2 + cx_1x_2 + dx_1 + ex_2 + f = 0 \quad (2)$$

un'equazione di secondo grado in \mathbf{R}^2 , dove $a, b, c, d, e, f \in \mathbf{R}$, con a, b, c non tutti nulli. Procediamo in due passi:

1) Il primo passo consiste in un cambiamento di coordinate che elimina il termine misto di secondo grado cx_1x_2 dall'equazione (2).

Sia

$$ax_1^2 + bx_2^2 + cx_1x_2 = \mathbf{x}^t \cdot Q \cdot \mathbf{x},$$

con $Q = \begin{pmatrix} a & c/2 \\ c/2 & b \end{pmatrix}$, la forma quadratica formata dai termini di secondo grado dell'equazione (2). Poiché Q è una matrice reale simmetrica, ha autovalori reali ed esiste una base \mathcal{B} ortonormale di \mathbf{R}^2 , formata da autovettori di Q . Nel sistema di coordinate $(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)$ indotto da \mathcal{B} , la forma quadratica si diagonalizza, diventa cioè

$$A\tilde{X}_1^2 + B\tilde{X}_2^2,$$

dove A e B sono gli autovalori di Q . Sia dunque $\mathcal{B} = \{\mathbf{e}'_1, \mathbf{e}'_2\}$, con $\mathbf{e}'_1 = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_3 \end{pmatrix}$, $\mathbf{e}'_2 = \begin{pmatrix} m_2 \\ m_4 \end{pmatrix}$, e sia

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_1 & m_2 \\ m_3 & m_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

il cambiamento di coordinate dalla base \mathcal{B} alla base canonica. Si tratta di un cambiamento di coordinate ortonormale e la matrice $M = \begin{pmatrix} m_1 & m_2 \\ m_3 & m_4 \end{pmatrix}$ è una matrice ortogonale. Sostituendo le relazioni (3) nell'equazione (2), essa prende la forma

$$A\tilde{X}_1^2 + B\tilde{X}_2^2 + C\tilde{X}_1 + D\tilde{X}_2 + E = 0, \quad (4)$$

dove $A, B, C, D, E \in \mathbf{R}$, con A, B non entrambi nulli.

2) Il secondo passo consiste in un cambiamento di coordinate, questa volta una traslazione, che elimina entrambi i termini di grado uno, oppure uno dei termini di grado uno e il termine noto dall'equazione (4). Scriviamo

$$\begin{aligned} \tilde{X}_1 &= X_1 + \alpha \\ \tilde{X}_2 &= X_2 + \beta. \end{aligned}$$

e sostituiamo queste relazioni nell'equazione (4); troviamo

$$AX_1^2 + BX_2^2 + (2A\alpha + C)X_1 + (2B\beta + D)X_2 + (A\alpha^2 + B\beta^2 + C\alpha + D\beta + E) = 0. \quad (5)$$

A questo punto è chiaro che, se A e B sono entrambi diversi da zero, esistono α e β in grado di eliminare entrambi i termini di primo grado. In questo caso infatti α e β si ricavano dalla (5) imponendo $(2A\alpha + C) = 0$ e $(2B\beta + D) = 0$, da cui

$$\alpha = -C/2A \quad \text{e} \quad \beta = -D/2B.$$

L'equazione (5) diventa in questo caso:

$$AX_1^2 + BX_2^2 + E' = 0, \quad (6)$$

dove $A, B, E' \in \mathbf{R}$, con $A, B \neq 0$.

Supponiamo adesso che uno dei due coefficienti A, B dei termini di secondo grado nella (4) sia nullo. Pur di scambiare X_1 e X_2 , possiamo supporre ad esempio $B = 0$. In questo caso, non potendo eliminare il termine di primo grado in X_2 , possiamo usare il parametro β della traslazione per eliminare il termine di grado zero. Imponendo $(A\alpha^2 + C\alpha + D\beta + E) = 0$, purché sia $D \neq 0$, ricaviamo

$$\beta = (-E - A\alpha^2 - C\alpha)/D,$$

e l'equazione (5) diventa

$$AX_1^2 + D'X_2 = 0, \quad (7)$$

dove $A, D' \in \mathbf{R}$, con $A \neq 0$. Se infine $B = D = 0$, possiamo solo eliminare il termine di primo grado in X_1 e ridurre l'equazione alla forma

$$AX_1^2 + F' = 0, \quad (8)$$

con $A, F' \in \mathbf{R}$, $A \neq 0$.

In conclusione, in un opportuno sistema di riferimento X_1, X_2 del piano, una conica è definita da un'equazione della forma (6), (7) o (8). Una lista completa, delle varie possibilità è contenuta nella Tabella 6.

Tabella 6.

1.	$\frac{X_1^2}{a^2} + \frac{X_2^2}{b^2} = 1$	ellisse
2.	$\frac{X_1^2}{a^2} + \frac{X_2^2}{b^2} = -1$	\emptyset
3.	$\frac{X_1^2}{a^2} + \frac{X_2^2}{b^2} = 0$	un punto
4.	$\frac{X_1^2}{a^2} - \frac{X_2^2}{b^2} = 1$	iperbole
5.	$\frac{X_1^2}{a^2} - \frac{X_2^2}{b^2} = 0$	rette incidenti
6.	$aX_1^2 = X_2$	parabola
7.	$\frac{X_1^2}{a^2} = 1$	rette parallele distinte
8.	$X_1^2 = 0$	rette parallele coincidenti
9.	$\frac{X_1^2}{a^2} = -1$	\emptyset

I coefficienti $a, b \in \mathbf{R}$ sono opportuni numeri positivi. Se nelle coniche di tipo 1, 2, 3 si pone $a \geq b$, allora la Tabella 6 non contiene ripetizioni.

Osserviamo che il nuovo sistema di riferimento X_1, X_2 può essere scelto così che il cambiamento di coordinate dal sistema x_1, x_2 al sistema X_1, X_2 sia una *isometria* o *trasformazione rigida del piano*. Può essere infatti ottenuto dalla composizione di rotazioni, riflessioni e traslazioni, che conservano angoli e distanze. Poiché un'equazione di secondo grado può essere portata mediante un'isometria in una e una sola delle equazioni della Tabella 6, essa dà una classificazione completa delle coniche del piano. A sottolineare che i cambiamenti di coordinate usati sono tutti isometrici, il procedimento descritto nei passi 1) e 2) si chiama *riduzione della conica in forma canonica metrica* e la classificazione prodotta si chiama *classificazione metrica delle coniche*.

Esaminiamo ora in dettaglio le coniche principali della Tabella 6.

Esempio 7.7. L'ellisse di equazione

$$\frac{X_1^2}{a^2} + \frac{X_2^2}{b^2} = 1$$

è una curva chiusa, è simmetrica rispetto agli assi coordinati e rispetto all'origine. I numeri positivi a e b sono le lunghezze dei semiassi dell'ellisse.

Fig.7. L'ellisse $\frac{X_1^2}{a^2} + \frac{X_2^2}{b^2} = 1$.

Un'ellisse può anche essere definita nel seguente modo:

Definizione. Siano F ed F' due punti di \mathbf{R}^2 e sia $a \in \mathbf{R}$, $a > 0$. L'*ellisse* di fuochi F ed F' e di semiassse a è l'insieme dei punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ tali che la somma delle distanze $d(P, F)$ di P da F e $d(P, F')$ da P a F' sia costante ed uguale a $2a$.

$$E = \{P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2 : d(P, F) + d(P, F') = 2a\}.$$

Se $F = F'$, l'ellisse non è altro che la circonferenza di centro F e raggio a . Se i fuochi F, F' sono i punti di coordinate $F = \begin{pmatrix} \sqrt{a^2 - b^2} \\ 0 \end{pmatrix}$ ed $F' = \begin{pmatrix} -\sqrt{a^2 - b^2} \\ 0 \end{pmatrix}$, con $a \geq b$, l'equazione dell'ellisse corrispondente è proprio $\frac{X_1^2}{a^2} + \frac{X_2^2}{b^2} = 1$.

Esempio 7.8. L'iperbole di equazione

$$\frac{X_1^2}{a^2} - \frac{X_2^2}{b^2} = 1$$

è una curva composta da due rami, approssimati asintoticamente dalla coppia di rette $\frac{X_1}{a} - \frac{X_2}{b} = 0$ e $\frac{X_1}{a} + \frac{X_2}{b} = 0$, gli asintoti, che si incontrano nell'origine. È simmetrica rispetto agli assi coordinati e rispetto all'origine. Il numero positivo a è la lunghezza del semiassse dell'iperbole.

Fig.8. L'iperbole $\frac{X_1^2}{a^2} - \frac{X_2^2}{b^2} = 1$.

Un'iperbole può anche essere definita nel seguente modo:

Definizione. Siano F ed F' due punti di \mathbf{R}^2 e sia $a \in \mathbf{R}$, $a > 0$. L'*iperbole* di fuochi F ed F' e di semiassse a è l'insieme dei punti $P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2$ tali che il valore assoluto della differenza delle distanze di P da F

ed F' sia costante ed uguale a $2a$:

$$I = \left\{ P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2 : |d(P, F) - d(P, F')| = 2a \right\}.$$

Se i fuochi F, F' sono i punti di coordinate $F = \begin{pmatrix} \sqrt{a^2 + b^2} \\ 0 \end{pmatrix}$ ed $F' = \begin{pmatrix} -\sqrt{a^2 + b^2} \\ 0 \end{pmatrix}$, l'equazione dell'iperbole corrispondente è proprio $\frac{X_1^2}{a^2} - \frac{X_2^2}{b^2} = 1$.

Esempio 7.9. La parabola di equazione

$$aX_1^2 = X_2$$

è una curva simmetrica rispetto all'asse X_2 , avente il suo vertice nell'origine degli assi.

Fig.9. La parabola $aX_1^2 = X_2$.

La parabola può essere definita anche nel seguente modo:

Definizione. Siano r una retta ed F un punto di \mathbf{R}^2 . Sia p un numero positivo. La *parabola* C di fuoco F , direttrice r e parametro $p = d(F, r)/2$ è l'insieme dei punti del piano equidistanti da F e da r

$$C = \left\{ P = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \in \mathbf{R}^2 \mid d(P, F) = d(P, r) \right\}.$$

Scegliendo come fuoco il punto $F = \begin{pmatrix} 0 \\ 1/4a \end{pmatrix}$ sull'asse delle ordinate e come direttrice la retta parallela all'asse delle ascisse di equazione $X_2 = -1/4a$, il valore del parametro risulta $p = 1/4a$ e l'equazione della parabola corrispondente è proprio $aX_1^2 = X_2$.

Esempio 7.10. Per illustrare il procedimento di riduzione a forma canonica sopra esposto, studiamo adesso la conica

$$11x_1^2 - 24x_1x_2 + 4x_2^2 + 28x_1 - 96x_2 - 120 = 0$$

dell'equazione (1). Ne determiniamo il tipo riducendola in forma canonica e diamo poi un'interpretazione geometrica dei cambiamenti di coordinate coinvolti.

La forma quadratica associata alla conica è $11x_1^2 - 24x_1x_2 + 4x_2^2$. La matrice simmetrica corrispondente è $Q = \begin{pmatrix} 11 & -12 \\ -12 & 4 \end{pmatrix}$. Gli autovalori di Q sono $\lambda = 20$ e $\mu = -5$. I rispettivi autospazi sono $V_{20} =$

$\text{span} \left\{ \begin{pmatrix} -4 \\ 3 \end{pmatrix} \right\}$ e $V_{-5} = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix} \right\}$. Una base ortonormale di \mathbf{R}^2 formata da autovettori di Q è data da

$\mathcal{B} = \left\{ \begin{pmatrix} -4/5 \\ 3/5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3/5 \\ 4/5 \end{pmatrix} \right\}$. Il cambiamento di coordinate ortonormale

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4/5 & 3/5 \\ 3/5 & 4/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{4}{5}\tilde{X}_1 + \frac{3}{5}\tilde{X}_2 \\ \frac{3}{5}\tilde{X}_1 + \frac{4}{5}\tilde{X}_2 \end{pmatrix}$$

porta l'equazione nella forma

$$4\tilde{X}_1^2 - \tilde{X}_2^2 - 16\tilde{X}_1 - 12\tilde{X}_2 - 24 = 0. \quad (10)$$

Cerchiamo adesso α e β in modo che il cambiamento di coordinate

$$\begin{aligned} \tilde{X}_1 &= X_1 + \alpha \\ \tilde{X}_2 &= X_2 + \beta \end{aligned} \quad (11)$$

elimini dall'equazione (10) i termini di primo grado. Sostituendo le relazioni (11) nell'equazione (10), troviamo

$$4X_1^2 - X_2^2 + (8\alpha - 16)X_1 - (2\beta + 12)X_2 + (4\alpha^2 - \beta^2 - 16\alpha - 12\beta - 24) = 0,$$

da cui ricaviamo $\alpha = 2$ e $\beta = -6$. L'equazione della conica diventa così

$$4X_1^2 - X_2^2 - 4 = 0, \quad \text{ossia} \quad X_1^2 - \frac{X_2^2}{4} = 1.$$

Si tratta di un'iperbole, con semiasse di lunghezza 1 e avente come asintoti le rette $2x_1 \pm x_2 = 0$.

Fig.10. L'iperbole $11x_1^2 - 24x_1x_2 + 4x_2^2 + 28x_1 - 96x_2 - 120 = 0$ in forma canonica.

Vogliamo adesso rappresentare la conica nel riferimento originario (x_1, x_2) . Per fare ciò, abbiamo bisogno di conoscere assi e centro di simmetria, asintoti e lunghezza del semiasse dell'iperbole nel riferimento (x_1, x_2) . Nel sistema di riferimento (X_1, X_2) gli assi di simmetria coincidono con gli assi coordinati e quindi hanno equazioni $X_1 = 0$ e $X_2 = 0$.

Conoscendo le formule del cambiamento di coordinate dal sistema (X_1, X_2) al sistema (x_1, x_2) possiamo ricavare le equazioni degli assi di simmetria nelle coordinate (x_1, x_2) . Componendo le trasformazioni

$$\mathbf{x} = M\tilde{\mathbf{X}} \quad \text{e} \quad \tilde{\mathbf{X}} = T_{\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}}\mathbf{X}$$

usate per ridurre la conica in forma canonica, otteniamo

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4/5 & 3/5 \\ 3/5 & 4/5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 + 2 \\ X_2 - 6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{4}{5}X_1 + \frac{3}{5}X_2 - \frac{26}{5} \\ \frac{3}{5}X_1 + \frac{4}{5}X_2 - \frac{18}{5} \end{pmatrix}.$$

Queste relazioni, sostituite nell'equazione della conica in (x_1, x_2) , ci hanno dato l'equazione della conica in (X_1, X_2) . Invertendole troviamo

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{4}{5}x_1 + \frac{3}{5}x_2 - 2 \\ \frac{3}{5}x_1 + \frac{4}{5}x_2 + 6 \end{pmatrix}. \quad (12)$$

Queste relazioni, sostituite nell'equazione di un luogo geometrico in (X_1, X_2) , ci danno le equazioni dello stesso luogo in (x_1, x_2) .

Fig.11. L'iperbole $11x_1^2 - 24x_1x_2 + 4x_2^2 + 28x_1 - 96x_2 - 120 = 0$.

Dalle equazioni (12) risulta che $X_1 = 0$ se e solo se $-4/5x_1 + 3/5x_2 - 2 = 0$. Dunque quest'ultima è proprio l'equazione dell'asse X_2 nel riferimento (x_1, x_2) . Analogamente, l'equazione dell'asse $X_2 = 0$ nel riferimento (x_1, x_2) è data da $3/5x_1 + 4/5x_2 + 6 = 0$, le coordinate del centro di simmetria sono $(-26/5, -18/5)$, le equazioni degli asintoti sono rispettivamente $-x_1 + 2x_2 + 2 = 0$ e $11x_1 - 2x_2 + 50 = 0$. Infine, la lunghezza del semiasse è come prima uguale a 1.

Osservazione. Geometricamente possiamo interpretare così i cambiamenti di coordinate effettuati rispettivamente nel passo 1 e nel passo 2: il riferimento $(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)$ è un riferimento centrato nell'origine delle coordinate (x_1, x_2) , con assi coordinati paralleli agli assi di simmetria della conica; il riferimento (X_1, X_2) ha l'origine delle coordinate coincidente col centro di simmetria della conica ed assi coordinati coincidenti con gli assi di simmetria della conica.

Fig.12. I sistemi di coordinate $(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2)$ e (X_1, X_2) .

Esempio 7.11. Disegniamo la conica C

$$x_1^2 + x_2^2 + 2x_1x_2 - 2x_1 - 2x_2 - 1 = 0. \quad (13)$$

La forma quadratica associata a C è data da $x_1^2 + x_2^2 + 2x_1x_2$, la matrice simmetrica corrispondente è $Q = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$. Gli autovalori di Q sono $\lambda = 0$ e $\mu = 2$, con autospazi dati rispettivamente da $V_0 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \right\}$ e $V_2 = \text{span} \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$. Il cambiamento di coordinate ortonormale

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{X}_1 \\ \tilde{X}_2 \end{pmatrix}$$

riduce l'equazione (13) nella forma

$$2\tilde{X}_2^2 - 2\sqrt{2}\tilde{X}_2 - 1 = 0. \quad (14)$$

Cerchiamo adesso β in modo che il cambiamento di coordinate

$$\begin{aligned}\tilde{X}_1 &= X_1 \\ \tilde{X}_2 &= X_2 + \beta\end{aligned}$$

elimini il termine di primo grado in X_2 dall'equazione (14). Dalle sostituzioni

$$2(X_2 + \beta)^2 - 2\sqrt{2}(X_2 + \beta) - 1 = 2X_2^2 + (4\beta - 2\sqrt{2})X_2 + 4\beta^2 - 2\sqrt{2}\beta - 1 = 0,$$

ricaviamo $\beta = \sqrt{2}/2$; l'equazione diventa così

$$X_2^2 - 1 = 0.$$

Nel riferimento (X_1, X_2) , la conica è costituita dunque dalla coppia di rette parallele di equazioni

$$X_2 = 1 \quad \text{e} \quad X_2 = -1.$$

Invertendo il cambiamento di coordinate

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 + \sqrt{2}/2 \end{pmatrix}$$

usato per portare l'equazione (13) in forma canonica, troviamo

$$\begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}x_1 - \frac{1}{\sqrt{2}}x_2 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}x_1 + \frac{1}{\sqrt{2}}x_2 - \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix}.$$

Ne segue che, nel sistema (x_1, x_2) , le rette in questione hanno rispettivamente equazione

$$x_1 + x_2 = (1 + \sqrt{2}) \quad \text{e} \quad x_1 + x_2 = (1 - \sqrt{2}).$$

Fig.13. $x_1 + x_2 = 1 + \sqrt{2}$ e $x_1 + x_2 = 1 - \sqrt{2}$.