Curvas parametrizadas

Alan Reyes-Figueroa

Geometría Diferencial

(Aula 02) 12.enero.2023

Definición

*Una **curva parametrizada** α en $\mathbb{R}^n$ es una aplicación diferenciable definida en un intervalo abierto $(a, b) \subseteq \mathbb{R}$, $\alpha : (a, b) \to \mathbb{R}^n$.*

Definición

*Una **curva parametrizada** α en $\mathbb{R}^n$ es una aplicación diferenciable definida en un intervalo abierto $(a, b) \subseteq \mathbb{R}$, $\alpha : (a, b) \to \mathbb{R}^n$.*

$$\alpha(t) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t)) \in \mathbb{R}^n, \quad \text{para } t \in (a, b).$$

Definición

*Una **curva parametrizada** α en $\mathbb{R}^n$ es una aplicación diferenciable definida en un intervalo abierto $(a,b) \subseteq \mathbb{R}$, $\alpha : (a,b) \to \mathbb{R}^n$.*

$$\alpha(t) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t)) \in \mathbb{R}^n, \quad \text{para } t \in (a,b).$$

- La función α lleva el parámetro $t \in (a,b)$ en un punto $\alpha(t)$ de $\mathbb{R}^n$.

Definición

*Una **curva parametrizada** α en $\mathbb{R}^n$ es una aplicación diferenciable definida en un intervalo abierto $(a,b) \subseteq \mathbb{R}$, $\alpha : (a,b) \to \mathbb{R}^n$.*

$$\alpha(t) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t)) \in \mathbb{R}^n, \quad \text{para } t \in (a,b).$$

- La función α lleva el parámetro $t \in (a,b)$ en un punto $\alpha(t)$ de $\mathbb{R}^n$.
- Cuando decimos que α es diferenciable, usualmente endenderemos estos como que α es clase C^∞ (infinitamente diferenciable).
  Obs! En el libro de Do Carmo, diferenciable = C^∞. Cuidado!, en otros textos, diferenciable = C^1. Cuando sea conveniente, indicaremos explícitamente que α es de clase C^k.

Definición

Una ***curva parametrizada*** α *en* $\mathbb{R}^n$ *es una aplicación diferenciable definida en un intervalo abierto* $(a,b) \subseteq \mathbb{R}$*,* $\alpha : (a,b) \to \mathbb{R}^n$*.*

$$\alpha(t) = (x_1(t), x_2(t), \ldots, x_n(t)) \in \mathbb{R}^n, \quad \text{para } t \in (a,b).$$

- La función α lleva el parámetro $t \in (a,b)$ en un punto $\alpha(t)$ de $\mathbb{R}^n$.
- Cuando decimos que α es diferenciable, usualmente endenderemos estos como que α es clase C^∞ (infinitamente diferenciable).
  Obs! En el libro de Do Carmo, diferenciable = C^∞. Cuidado!, en otros textos, diferenciable = C^1. Cuando sea conveniente, indicaremos explícitamente que α es de clase C^k.
- Entenderemos intervalo abierto en el sentido amplio (incluimos los casos $a = -\infty$, $b = \infty$).

Sea $\alpha(t)$ una curva de clase C^1 en $\mathbb{R}^n$. La derivada

$$\alpha'(t) = (x_1'(t), x_2'(t), \ldots, x_n'(t)) \in \mathbb{R}^n$$

será llamada el **vector tangente** (o *vector velocidad*) de α en el punto t.

Si $I = (a, b)$, la imagen $\alpha(I)$ se llama el **trazo** de la curva α.

Sea $\alpha(t)$ una curva de clase C^1 en $\mathbb{R}^n$. La derivada

$$\alpha'(t) = (x_1'(t), x_2'(t), \ldots, x_n'(t)) \in \mathbb{R}^n$$

será llamada el **vector tangente** (o *vector velocidad*) de α en el punto t.

Si $I = (a, b)$, la imagen $\alpha(I)$ se llama el **trazo** de la curva α.

- No se debe confundir a la curva α con su trazo. Pueden existir diferentes curvas, todas con un mismo trazo o imagen.

Ejemplo

Dados $a, b, c \in \mathbb{R}$, la curva parametrizada

$$\alpha(t) = (a \cos ct, a \sin ct, bt), \quad t \in \mathbb{R}$$

tiene por trazo una hélice de paso $2\pi b$ sobre el cilindro $x^2 + y^2 = a^2$ en $\mathbb{R}^3$.

Ejemplo

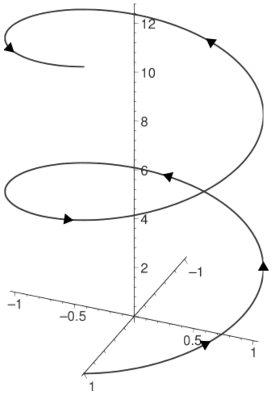
Dados $a, b, c \in \mathbb{R}$, la curva parametrizada

$$\alpha(t) = (a\cos ct, a\sin ct, bt), \quad t \in \mathbb{R}$$

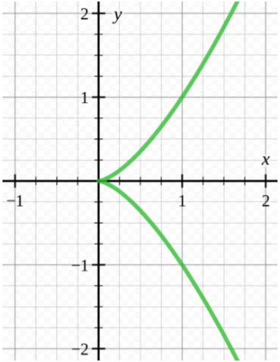
tiene por trazo una hélice de paso $2\pi b$ sobre el cilindro $x^2 + y^2 = a^2$ en $\mathbb{R}^3$.

α es una curva parametrizada diferenciable (de clase C^∞). Su vector tangente está dado por

$$\alpha'(t) = (-ac\sin ct, ac\cos ct, b) \in \mathbb{R}^3.$$



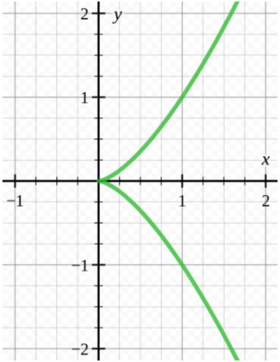
Ejemplo



$$y^3 = x^2.$$

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

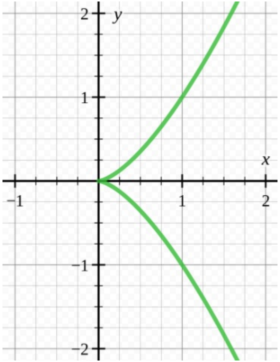
Ejemplo



$y^3 = x^2$.

La aplicación $\alpha(t) = (t^3, t^2)$, con $t \in \mathbb{R}$, s una curva parametrizada diferenciable (clase C^∞), Su trazo es una cúspide.

Ejemplo

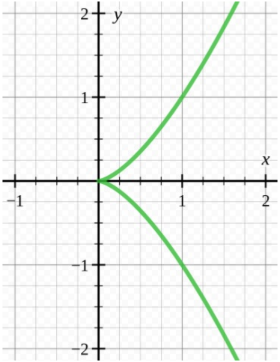


$y^3 = x^2$.

La aplicación $\alpha(t) = (t^3, t^2)$, con $t \in \mathbb{R}$, s una curva parametrizada diferenciable (clase C^∞), Su trazo es una cúspide.

Su derivada es $\alpha'(t) = (3t^2, 2t)$. Observe que en $t = 0$, $\alpha(0) = (0, 0)$ y su vector tangente es $\alpha'(0) = (0, 0)$.

Ejemplo



$y^3 = x^2$.

La aplicación $\alpha(t) = (t^3, t^2)$, con $t \in \mathbb{R}$, s una curva parametrizada diferenciable (clase C^∞), Su trazo es una cúspide.

Su derivada es $\alpha'(t) = (3t^2, 2t)$. Observe que en $t = 0$, $\alpha(0) = (0,0)$ y su vector tangente es $\alpha'(0) = (0,0)$.

Cuando sea conveniente, identificaremos una curva α en $\mathbb{R}^m$ a una curva en $\mathbb{R}^{m+p}$ mediante una inclusión $\alpha(t) = (x_1(t), \dots, x_m(t)) \longrightarrow (x_1(t), \dots, x_m(t), 0, 0, \dots, 0)$.

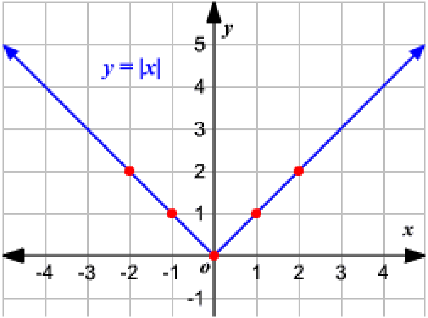
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Ejemplo

La curva $\alpha : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$ data por $\alpha(t) = (t, |t|)$, no es una curva diferenciable en $t = 0$. En este caso, α sólo es de clase C^0.

Ejemplo

La curva $\alpha : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$ data por $\alpha(t) = (t, |t|)$, no es una curva diferenciable en $t = 0$. En este caso, α sólo es de clase C^0.



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Ejemplos

Las curvas parametrizadas $\alpha : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$ y $\beta : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$ dadas por

$$\begin{aligned}\alpha(t) &= (\cos t, \sin t)\\ \beta(t) &= (\cos 2t, \sin 2t)\end{aligned}$$

Ejemplos

Las curvas parametrizadas $\alpha : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$ y $\beta : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$ dadas por

$$\begin{aligned}\alpha(t) &= (\cos t, \sin t)\\ \beta(t) &= (\cos 2t, \sin 2t)\end{aligned}$$

ambas poseen el mismo trazo (el círculo unitario S^1). Observe que el vector velocidad de la curva β es el doble del de la curva α.

Ejemplos

Las curvas parametrizadas $\alpha : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$ y $\beta : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$ dadas por

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= (\cos t, \sin t) \\ \beta(t) &= (\cos 2t, \sin 2t) \end{aligned}$$

ambas poseen el mismo trazo (el círculo unitario S^1). Observe que el vector velocidad de la curva β es el doble del de la curva α.

$$\begin{aligned} \alpha'(t) &= (-\sin t, \cos t) & |\alpha'| = 1, \\ \beta'(t) &= (-2\sin 2t, 2\cos 2t) & |\beta'| = 2. \end{aligned}$$

Ejemplos

Las curvas parametrizadas $\alpha : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$ y $\beta : \mathbb{R} \to \mathbb{R}^2$ dadas por

$$\begin{aligned} \alpha(t) &= (\cos t, \sin t) \\ \beta(t) &= (\cos 2t, \sin 2t) \end{aligned}$$

ambas poseen el mismo trazo (el círculo unitario S^1). Observe que el vector velocidad de la curva β es el doble del de la curva α.

$$\begin{aligned} \alpha'(t) &= (-\sin t, \cos t) & |\alpha'| &= 1, \\ \beta'(t) &= (-2\sin 2t, 2\cos 2t) & |\beta'| &= 2. \end{aligned}$$

(la curva β recorre el círculo el doble de rápido que α).

Curvas parametrizadas

Sea α una curva parametrizada de clase C^1 en $\mathbb{R}^n$. Si $\alpha'(t) \neq \mathbf{0}$ en un punto $\mathbf{p} = \alpha(t)$, entonces en el punto $\mathbf{p}$ está bien definida una recta en la dirección de $\mathbf{v} = \alpha'(t)$.

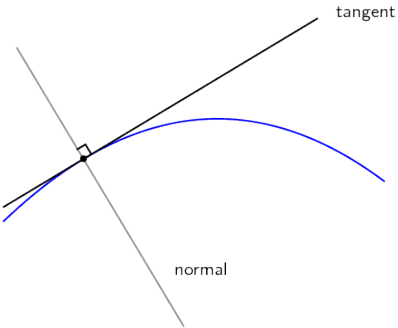
Sea α una curva parametrizada de clase C^1 en $\mathbb{R}^n$. Si $\alpha'(t) \neq \mathbf{0}$ en un punto $\mathbf{p} = \alpha(t)$, entonces en el punto $\mathbf{p}$ está bien definida una recta en la dirección de $\mathbf{v} = \alpha'(t)$.

Esta se llama la **recta tangente** a α en el punto $\mathbf{p}$.

Curvas parametrizadas

Sea α una curva parametrizada de clase C^1 en $\mathbb{R}^n$. Si $\alpha'(t) \neq \mathbf{0}$ en un punto $\mathbf{p} = \alpha(t)$, entonces en el punto $\mathbf{p}$ está bien definida una recta en la dirección de $\mathbf{v} = \alpha'(t)$.

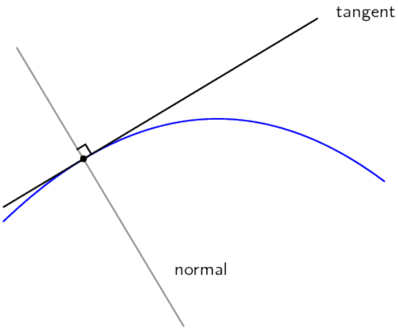
Esta se llama la **recta tangente** a α en el punto $\mathbf{p}$.



Curvas parametrizadas

Sea α una curva parametrizada de clase C^1 en $\mathbb{R}^n$. Si $\alpha'(t) \neq \mathbf{0}$ en un punto $\mathbf{p} = \alpha(t)$, entonces en el punto $\mathbf{p}$ está bien definida una recta en la dirección de $\mathbf{v} = \alpha'(t)$.

Esta se llama la **recta tangente** a α en el punto $\mathbf{p}$.



- Esta recta es esencial para el desarrollo de la geometría diferencial de curvas.
- Usualmente requeriremos que una curva α tenga recta tangente definida en todos sus puntos.

Definición

*Sea $\alpha : (a, b) \to \mathbb{R}^n$ una curva parametrizada de clase C^1. Si para algún $t \in (a, b)$ se tiene que $\alpha'(t) = \mathbf{0}$, entonces diremos que t es un **punto singular** de α.*

Definición

*Sea $\alpha : (a, b) \to \mathbb{R}^n$ una curva parametrizada de clase C^1. Si para algún $t \in (a, b)$ se tiene que $\alpha'(t) = \mathbf{0}$, entonces diremos que t es un **punto singular** de α.*

*Un punto $t \in (a, b)$ donde $\alpha'(t) \neq \mathbf{0}$ se llama un **punto regular** de α.*

Definición

*Sea $\alpha : (a, b) \to \mathbb{R}^n$ una curva parametrizada de clase C^1. Si para algún $t \in (a, b)$ se tiene que $\alpha'(t) = \mathbf{0}$, entonces diremos que t es un **punto singular** de α.*
*Un punto $t \in (a, b)$ donde $\alpha'(t) \neq \mathbf{0}$ se llama un **punto regular** de α.*

Definición

*Una curva $\alpha : (a, b) \to \mathbb{R}^n$ de clase C^1 tal que $\alpha'(t) \neq \mathbf{0}$, para todo $t \in (a, b)$, se llama una **curva parametrizada regular**.*

Definición

*Sea $\alpha : (a,b) \to \mathbb{R}^n$ una curva parametrizada de clase C^1. Si para algún $t \in (a,b)$ se tiene que $\alpha'(t) = \mathbf{0}$, entonces diremos que t es un **punto singular** de α.*

*Un punto $t \in (a,b)$ donde $\alpha'(t) \neq \mathbf{0}$ se llama un **punto regular** de α.*

Definición

*Una curva $\alpha : (a,b) \to \mathbb{R}^n$ de clase C^1 tal que $\alpha'(t) \neq \mathbf{0}$, para todo $t \in (a,b)$, se llama una **curva parametrizada regular**.*

Obs! De ahora en adelante nos limitamos a estudiar curvas regulares.

Longitud de arco

Definición

Sea $\alpha : I = (c_1, c_2) \to \mathbb{R}^n$ una curva regular de clase C^1. La ***longitud de arco*** *de α, a partir de punto $t_0 \in I$ es*

$$s(t) = \int_{t_0}^{t} |\alpha'(\tau)|\, d\tau.$$

¿Por qué se define así la longitud de arco?

Longitud de arco

Definición

*Sea $\alpha : I = (c_1, c_2) \to \mathbb{R}^n$ una curva regular de clase C^1. La **longitud de arco** de α, a partir de punto $t_0 \in I$ es*

$$s(t) = \int_{t_0}^{t} |\alpha'(\tau)|\, d\tau.$$

¿Por qué se define así la longitud de arco?

Recordemos que si $[a, b] \subset I$ y $t_0 = a < t_1 < t_2 < \ldots < t_k = b$ es una partición del intervalo $[a, b]$, podemos definir una poligonal $P = \{P_0, P_1, \ldots, P_k\}$, con $P_i = \alpha(t_i)$, $i = 0, 1, 2, \ldots, k$.

La longitud de esta poligonal es

$$\ell(\alpha, P) = \sum_{i=1}^{k} |P_i - P_{i-1}| = \sum_{i=1}^{k} |\alpha(t_i) - \alpha(t_{i-1})|.$$

La longitud de esta poligonal es

$$\ell(\alpha, P) = \sum_{i=1}^{k} |P_i - P_{i-1}| = \sum_{i=1}^{k} |\alpha(t_i) - \alpha(t_{i-1})|.$$

Por el Teorema del Valor Medio, como α es diferenciable (en todo punto), para cada $i = 1, 2, \ldots, k$, existen $\xi_i \in (t_{i-1}, t_i)$ tales que

$$|\alpha(t_i) - \alpha(t_{i-1})| = |\alpha'(\xi_i) \cdot (t_i - t_{i-1})| = |\alpha'(\xi_i)|\, \Delta t_i.$$

La longitud de esta poligonal es

$$\ell(\alpha, P) = \sum_{i=1}^{k} |P_i - P_{i-1}| = \sum_{i=1}^{k} |\alpha(t_i) - \alpha(t_{i-1})|.$$

Por el Teorema del Valor Medio, como α es diferenciable (en todo punto), para cada $i = 1, 2, \ldots, k$, existen $\xi_i \in (t_{i-1}, t_i)$ tales que

$$|\alpha(t_i) - \alpha(t_{i-1})| = |\alpha'(\xi_i) \cdot (t_i - t_{i-1})| = |\alpha'(\xi_i)|\, \Delta t_i.$$

Luego $\ell(\alpha, P) = \sum_{i=1}^{k} |\alpha'(\xi_i)|\, \Delta t_i$, y tomando el límite en la norma de la partición, obtenemos

Longitud de arco

$$s = \lim_{\Delta P \to 0} \ell(\alpha, P) = \int_{t_0}^{t} |\alpha'(\tau)| \, d\tau.$$

Longitud de arco

$$s = \lim_{\Delta P \to 0} \ell(\alpha, P) = \int_{t_0}^{t} |\alpha'(\tau)|\, d\tau.$$

Como $\alpha'(t) \neq 0$ para todo t, la función $s(t)$ es diferenciable y

$$\frac{ds}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{t_0}^{t} |\alpha'(\tau)|\, d\tau = |\alpha'(t)|.$$

Longitud de arco

$$s = \lim_{\Delta P \to 0} \ell(\alpha, P) = \int_{t_0}^{t} |\alpha'(\tau)|\, d\tau.$$

Como $\alpha'(t) \neq 0$ para todo t, la función $s(t)$ es diferenciable y

$$\frac{ds}{dt} = \frac{d}{dt}\int_{t_0}^{t} |\alpha'(\tau)|\, d\tau = |\alpha'(t)|.$$

Puede ocurrir que t ya sea la longitud de arco de la curva α medido a partir de cierto punto t_0. En este caso, $|\alpha'(t)| = \frac{ds}{dt} = 1$.

Longitud de arco

$$s = \lim_{\Delta P \to 0} \ell(\alpha, P) = \int_{t_0}^{t} |\alpha'(\tau)|\, d\tau.$$

Como $\alpha'(t) \neq 0$ para todo t, la función $s(t)$ es diferenciable y

$$\frac{ds}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{t_0}^{t} |\alpha'(\tau)|\, d\tau = |\alpha'(t)|.$$

Puede ocurrir que t ya sea la longitud de arco de la curva α medido a partir de cierto punto t_0. En este caso, $|\alpha'(t)| = \frac{ds}{dt} = 1$.

Recíprocamente, si $|\alpha'(t)| = 1$, entonces

$$s = \int_{t_0}^{t} |\alpha'(\tau)|\, d\tau = \int_{t_0}^{t} d\tau = t - t_0.$$