

ECUACIONES DIFERENCIALES ORDINARIAS

$$\frac{dx}{dt} = a(y - x) \quad \frac{dy}{dt} = x(b - z) - y \quad \frac{dz}{dt} = xy - cz$$

APUNTES DEL CURSO

2018-2019 IMPARTIDO

POR ANTONIO SANCHEZ

Rafael Sánchez
& alii

Revisión del 6 de febrero de 2019 a las 22:23.

Índice general

0. Notación	5
I Primer parcial	7
1. Introducción a las ecuaciones diferenciales	9
1.1. Idea intuitiva	9
1.2. Método de separación de variables	11
1.3. Significado geométrico de la ecuación diferencial ordinaria	12
1.4. Ecuaciones diferenciales y problemas geométricos	13
1.4.1. Trayectorias ortogonales	13
1.4.2. Trayectorias ortogonales en coordenadas polares	15
1.5. Ecuaciones homogéneas de grado 0	16
II Segundo parcial	19
III Tercer parcial	21
IV Apéndices	23
2. Índices	25

Capítulo 0

Notación

- $\mathcal{P} \equiv f(x) = g(x)$, \mathcal{P} es una ecuación.
- $y = f(x)$, y es una variable dependiente.
- $\frac{dy}{dx} = y'$, derivada de y respecto de x .

Parte I

Primer parcial

Capítulo 1

Introducción a las ecuaciones diferenciales

1.1. Idea intuitiva

Definición 1 (Ecuación diferencial de primer orden). Sea $\mathbf{y} = f(x)$, una **ecuación diferencial de primer orden** es una ecuación de la forma: $\mathbf{y}' = F(x, \mathbf{y})$.

Sea $g(x)$ una función de x , diremos que es solución cuando la ecuación diferencial se cumpla para $\mathbf{y} = g(x)$.

Veamos unos ejemplos típicos.

Ejemplo 1

Consideramos $\mathcal{P} \equiv x'(t) = 2x(t)$ (o alternativamente $\mathbf{x}' = 2\mathbf{x}$)

Vemos que es una ecuación diferencial de primer orden ya que sigue la definición anterior. Es sencillo ver que $F(t, \mathbf{x}) = 2\mathbf{x} = 2x(t)$. Queremos hallar que funciones resuelven P

Aemás, observamos que si $x(t) = e^{2t}$, entonces $x'(t) = 2e^{2t} = 2x(t)$ y por tanto $x(t) = e^{2t}$ es una solución de P .

Si pensamos con más cuidado también observamos que $x(t) = 7e^{2t}$ también satisface P .

Nos interesaría entonces hallar una **solución general**, que con una sola ecuación englobe todas las soluciones. Aunque de momento no podemos justificarlo, si tomamos $x(t) = ae^{2t} \mid a \in \mathbb{R}$ entonces se cumple que $x'(t) = 2ae^{2t} = 2x(t)$ y por tanto es la solución general de P .

Del ejemplo anterior surgen problemas llamados *problema de valor inicial*, donde hallando la solución general y sabiendo la imagen de un punto t_0 por medio de $x(t)$ podemos determinar el parámetro y encontrar una solución explícitamente. Como continuación al ejemplo anterior consideremos el sistema:

$$\begin{cases} x'(t) = 2x(t) \\ x(0) = 8 \end{cases}$$

Para resolverlo, hallamos la solución general $x(t) = ae^{2t}$ y sustituimos la segunda ecuación. $x(0) = ae^0 = 8 \implies a = 8$.

Ejemplo 2

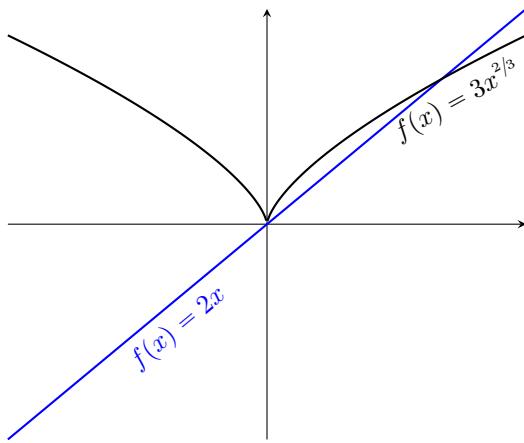
Consideramos $\mathcal{P} \equiv x'(t) = 3(x(t))^{2/3}$, queremos hallar la solución para $x(0) = 0$.

Empezamos hallando soluciones a la ecuación, en este caso $x(t) = t^3$ y $x(t) = 0$ resuelven la ecuación. Nuestro sistema sería:

$$\begin{cases} x'(t) = 3(x(t))^{2/3} \\ x(0) = 0 \end{cases}$$

Sin embargo, tanto $x(t) = t^3 \mid t = 0$ como $x(t) = 0$ resuelven P . No podemos hablar de la solución puesto que hay dos.

En los dos ejemplos anteriores tenemos una ecuación diferencial de la forma $\dot{x} = F(t, x)$, $f(x) = 2x$ y $f(x) = 3x^{2/3}$ respectivamente. Sin embargo, en la segunda tenemos dos soluciones para $x(0) = 0$. Al observar las gráficas de las dos funciones se ve la razón a simple vista, la segunda no es derivable en 0.



Ejemplo 3 (Crecimiento de una población)

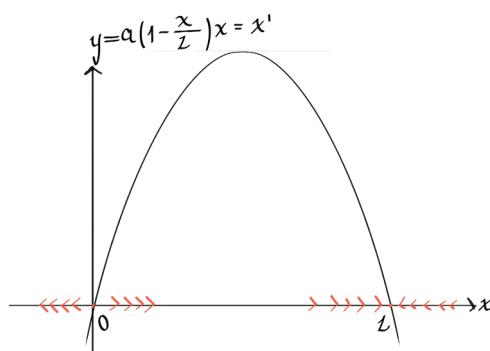
Consideramos $P \equiv \dot{x} = \lambda x$. (λ típicamente es natalidad o mortalidad). Sabiendo que modela el crecimiento de una población en función del tiempo, podemos aproximar (veremos por qué más adelante) $\frac{\Delta x}{\Delta t} \sim \frac{dx}{dt} = \dot{x}$. Por tanto (como es una tasa, se entiende que el tiempo tiende a 0 para hallarla):

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \sim \frac{dx}{dt} = \lambda \cdot x \implies \lambda = \lim_{t \rightarrow 0} \frac{x'}{x}$$

El crecimiento de una población de organismos lo suficientemente grandes no se ve representada por la ecuación anterior debido a la limitación de recursos. Interesaría por tanto modelizar la ecuación teniendo esto en cuenta. Para ello utilizaremos el parámetro L como el límite al que tendería la población con los recursos existentes.

Ejemplo 4 (Crecimiento de una población con limitación de recursos)

Consideramos $P \equiv \dot{x} = a(1 - \frac{x}{L})x$ con $a > 0$. De esta forma cuando $x \ll L$ o $x \gg L$, tenemos prácticamente la ecuación del ejemplo anterior. Si $x \sim L$ entonces la población apenas crece/decrece. Para encontrar soluciones a esta ecuación no hace falta resolverla, basta graficarla. Partimos de $\dot{x} = f(t, x) = a(1 - \frac{x}{L})x$.



Es fácil ver que \dot{x} es una parábola, que corta al eje X en 0 y L . Además, se indica con (») la dirección en la que se mueve $x(t)$ conforme avanza t . Tanto 0 como L son puntos de equilibrio, repulsor (inestable) y atractor (estable) respectivamente.

Habiendo encontrado las soluciones de la función anterior, nos preguntamos como varía la población frente al tiempo. Más adelante veremos formalmente como representar x frente a t . Sin embargo, podemos razonar el aspecto de la función. Sabemos que tiene que corregirse cerca de L , y que si $x << L$ entonces tiene un crecimiento parecido al exponencial. Por tanto, podría tener el aspecto de la figura 1.1. De este gráfico podemos deducir varias cosas. Para empezar, sabemos que $x''(t_0) = 0$ tiene solución para la curva c_2 ya que tiene un punto de inflexión. Además, observamos distintos tipos de crecimiento en función del valor de $x(0)$ por lo que tendría sentido intentar determinar para qué valores x_0 obtenemos el crecimiento de c_1 y para cuáles el de c_2 .

Ejercicio propuesto 1. ¿Para qué valores de x_0 se dan los diferentes crecimientos de c_1 y c_2 ?.

Sugerencia: Considerar el problema de valor inicial con $x''(t_0) = 0$.

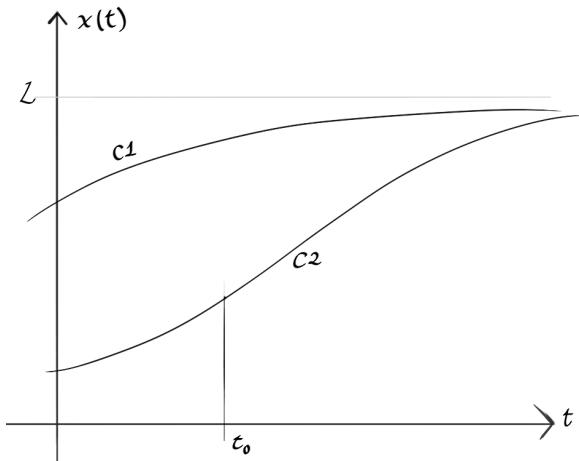


Figura 1.1: Población - Tiempo

1.2. Método de separación de variables

Esta sección trata sobre el primer método de resolución de ecuaciones diferenciales. Antes de definir el método formalmente vamos a ver un ejemplo.

Ejemplo 5 (*Resolución sencilla*)

Sea $\mathcal{P} \equiv y' = xy$. Halla las soluciones de la ecuación.

$y' = \frac{dy}{dx}$, con esta igualdad podemos hacer manipulaciones sin justificar (de momento).

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} = xy &\implies \frac{dy}{y} = xdx \implies \int \frac{dy}{y} = \int xdx \implies \log|y| = \frac{x^2}{2} + C \implies |y| = e^{x^2/2+C} = e^C \cdot e^{x^2/2} \\ y &= \pm e^C \cdot e^{x^2/2} = ke^{x^2/2} \mid k \in \mathbb{R} \end{aligned}$$

Esta resolución se conoce como método de separación de variables.

Ejercicio propuesto 2. Resolver $\mathcal{P} \equiv x' = a(1 - x/L)x$ con $x(0) = 0$.

Vamos a generalizar el método por medio de la siguiente proposición.

Proposición 1 (Método de separación de variables). Sea $F(x)$ una primitiva de $f(x)$ y $G(\mathbf{y})$ una primitiva de $g(\mathbf{y})$, es decir, $\frac{dF}{dx} = f(x)$ y $\frac{dG}{dy} = g(\mathbf{y})$, con $\mathbf{y} = f(x)$. Y sea una ecuación $\mathcal{P} \equiv \frac{dy}{dx} = \frac{f(x)}{g(y)}$, entonces las soluciones de \mathcal{P} cumplen:

$$G(y(x)) = F(x) + C \mid C \text{ constante.}$$

Demostración.

Por la regla de la cadena:

$$\frac{d}{dx} G(y(x)) = \frac{dG}{dy}(y(x)) \cdot \frac{dy}{dx}(x)$$

Como $\frac{dG}{dy} = g(y)$ y $\frac{dy}{dx} = \frac{f(x)}{g(y)}$ por hipótesis:

$$\frac{dG}{dy}(y(x)) \cdot \frac{dy}{dx}(x) = g(y(x)) \cdot \frac{f(x)}{g(y(x))} = f(x) = \frac{d}{dx}F(x)$$

Es decir:

$$\frac{d}{dx}G(y(x)) = \frac{d}{dx}F(x) \implies \frac{d}{dx}G(y(x)) - \frac{d}{dx}F(x) = 0 \implies G(y(x)) - F(x) = C \implies G(y(x)) = F(x) + C$$

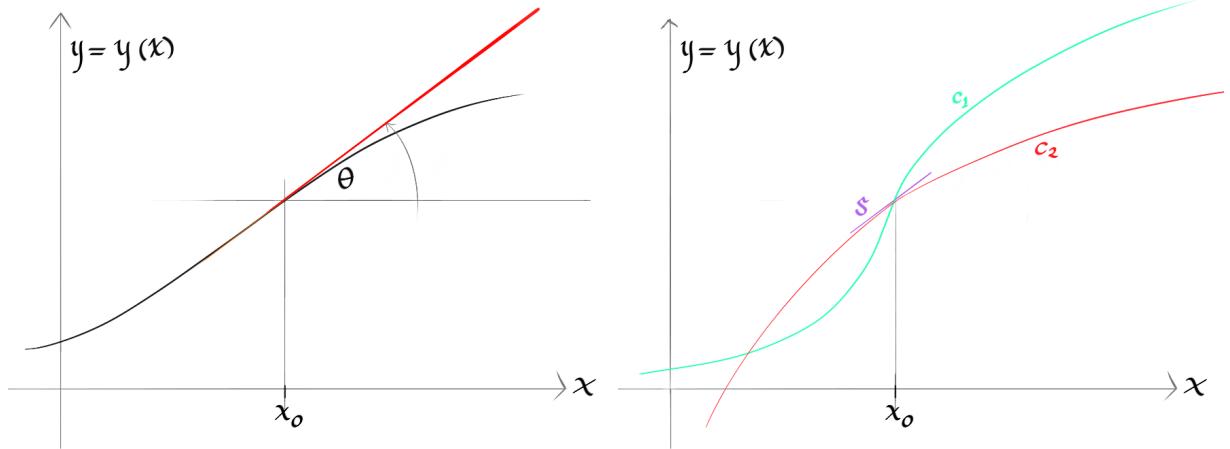
◊

Observación 1. La proposición anterior está incompleta, faltaría ver que condiciones tienen que cumplir $f(x)$ y $g(y)$. Para completarla tenemos que considerar la existencia de primitivas y la condición de que C sea constante.

- Ya que tenemos que usar que $F(x)$ y $G(y)$ son primitivas, basta pedir que tanto $f(x)$ y $g(y)$ sean continuas. Esto garantiza que $F(x)$ y $G(y)$ son ambas C^1
- Si $h'(x) = 0 \implies h(x)$ constante en cada intervalo en que está definida (pues \mathbb{R} es conexo). Si $h : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ entonces $h(x)$ es constante. Como C surge de integrar 0 a la derecha de la ecuación, podemos afirmar que $C = h(x)$ y por tanto constante.

1.3. Significado geométrico de la ecuación diferencial ordinaria

Vamos a analizar una ecuación diferencial de forma gráfica para interpretarla geométricamente. Consideramos $y' = f(x, y)$. Supongamos que y tiene la gráfica de la figura 1.2a. Entonces, $y'(x_0) = \tan \theta$, que



es la pendiente de la recta tangente a la gráfica de y en x_0 . Esto es cálculo elemental, lo que nos interesa es saber algo de la función y cuando sabemos algo de y' .

Ilustramos en la figura 1.2b entonces la casuística de conocer $\mathcal{P} \equiv y' = f(x, y)$. En este caso, nos preguntamos que aspecto podría tener y para que fuera solución de \mathcal{P} . Como conocemos $y'(x_0)$, podemos considerar que S es un segmento paralelo a la recta tangente de la gráfica en x_0 . Es fácil ver que C_1 no puede ser solución de \mathcal{P} pues $C'_1(x_0) \neq y'(x_0)$. Sin embargo, es evidente que C_2 sí resuelve \mathcal{P} .

Si repetimos el procedimiento de determinar como son las pendientes (como acabamos de hacer para x_0) para todos los puntos, hallamos el *campo de pendientes*.

Ejemplo 6 (*Hallar un campo de pendientes*)

Sea $\mathcal{P} \equiv \mathbf{x}' = t^2 + \mathbf{x}^2$, es decir, $f(t, \mathbf{x}) = t^2 + \mathbf{x}^2$. Si queremos hallar qué pendiente se le asigna al punto $p = (1/\sqrt{2}, 1/\sqrt{2})$ evaluamos la función f , $f(p) = 1$. Por tanto, la función \mathbf{x} que soluciona \mathcal{P} tiene tangente

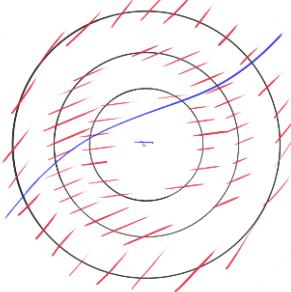
con pendiente 1 en $t = 1/\sqrt{2}$.

De hecho, es lógico pensar que a cualquier punto que cumpla $t^2 + x^2 = 1$ se le asignará una pendiente de 1 a su recta tangente. Este conjunto de puntos conforman la **isoclinia** de pendiente 1.

De forma general, para una constante c dada (en este ejemplo necesariamente no negativa pues $f(t, x)$ es suma de cuadrados), podemos definir la isoclinia de pendiente c :

$$ISO_c = \{(t, x) \mid f(t, x) = c\}$$

Volviendo a nuestro ejemplo, las isoclinias van a ser curvas que cumplan $t^2 + x^2 = c$ para un c dado.



Hemos representado las isoclinias junto con un pequeño segmento de pendiente c para distintos valores de c . Como las isoclinias cumplen que $t^2 + x^2 = c$, estas son las circunferencias de radio \sqrt{c} con $c > 0$. Podemos observar tambien que $ISO_0 = \{(0, 0)\}$ e $ISO_{c<0} = \emptyset$. Sin

Llamamos a la gráfica con pequeños segmentos campo de pendientes y por tanto, una función que resuelva \mathcal{P} tiene que ser tangente al segmento del punto por el que pase.

embargo, los campos de pendientes permiten ver cómo es la función a grandes rasgos. En nuestro ejemplo parece indicar que $x(t) \uparrow \infty$, pero no sabemos si lo hace de forma asintótica ($x(t) \uparrow \infty$ en t finito), o $x(t)$ crece a infinito cuando $t \rightarrow \infty$.

Esto no puede resolverse gráficamente y veremos como resolverlo de forma analítica más adelante.

1.4. Ecuaciones diferenciales y problemas geométricos

Gracias a la relación de la derivada con la tangencia de funciones, podemos plantear problemas geométricos en forma de ecuación diferencial.

1.4.1. Trayectorias ortogonales

De la recta tangente a un punto surge el concepto de recta normal a ese punto, que no es más que la recta perpendicular a la tangente y que pasa por dicho punto. Para ver como se relacionan estas dos rectas vamos a hacer un análisis simple. Diremos que dos curvas son ortogonales si en el punto de cruce las rectas tangentes a cada curva son perpendiculares entre sí.

De la figura 1.3 vemos que la pendiente de C es $pend_C = \tan(\theta)$. Asimismo, $pend_{C^\perp} = \tan(\omega)$ y $\omega = \theta - \pi/2$. A partir de aquí desarrollamos:

$$\tan(\omega) = \frac{\sin(\theta - \pi/2)}{\cos(\theta - \pi/2)} = \frac{-\cos(\theta)}{\sin(\theta)} = -\frac{1}{\tan(\theta)}$$

y por tanto,

$$pend_C \cdot pend_{C^\perp} = -1 \quad (1.1)$$

Nuestro objetivo es que dada una familia de curvas fam_C , podamos encontrar una (familia de) curva que sea ortogonal a todas las de la familia en los puntos de cruce.

Supongamos que la familia original satisface una ecuación diferencial ordinaria $y'_1 = f(x, y_1)$. Queremos encontrar otra ecuación que defina a la ortogonal.

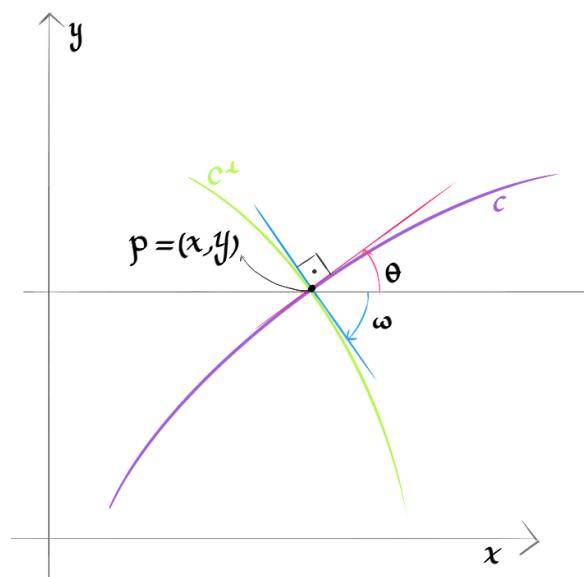


Figura 1.3: Relaciones entre curvas ortogonales

Como fam_C sigue una EDO (*ecuación diferencial ordinaria*), podemos afirmar que $pend_C = \mathbf{y}'_1 = f(x, \mathbf{y}_1)$. Usando 1.1, $pend_{C^\perp} = \frac{-1}{f(x, \mathbf{y}_1)}$. Pero además, si C^\perp sigue una EDO, está dada por una función $\mathbf{y}_2 = y_2(x)$ y entonces $\mathbf{y}'_2 = \frac{-1}{f(x, \mathbf{y}_1)}$.

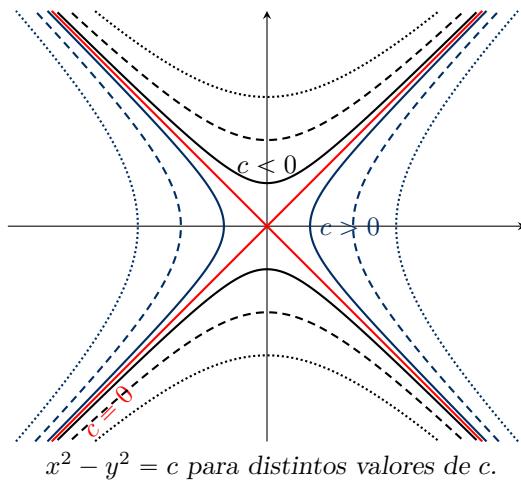
Concluimos con que dada fam_C descrita por $\mathbf{y}' = f(x, \mathbf{y})$, podemos encontrar fam_{C^\perp} que satisface:

$$\mathbf{y}' = -\frac{1}{f(x, \mathbf{y})}$$

Ejemplo 7 (Familia ortogonal a otra dada)

Consideramos la familia: $x^2 - y^2 = c \mid c \neq 0$

Para cada c , eso define \mathbf{y} implícitamente en función de x .



(También puede verse como las curvas de nivel del paraboloide hiperbólico)

Para hallar la familia de curvas ortogonales vamos a seguir una serie de pasos:

1. Encontrar una EDO que cumplan esas curvas.

$$x^2 - y^2 = c \rightarrow \frac{d}{dx}(x^2 - y^2 = c) \rightarrow 2x - 2y\mathbf{y}' = 0 \implies \mathbf{y}' = \frac{x}{y} = f(x, \mathbf{y})$$

2. Encontrar la EDO para trayectorias ortogonales.

$$\mathbf{y}' = -\frac{1}{f(x, \mathbf{y})} = -\frac{\mathbf{y}}{x}$$

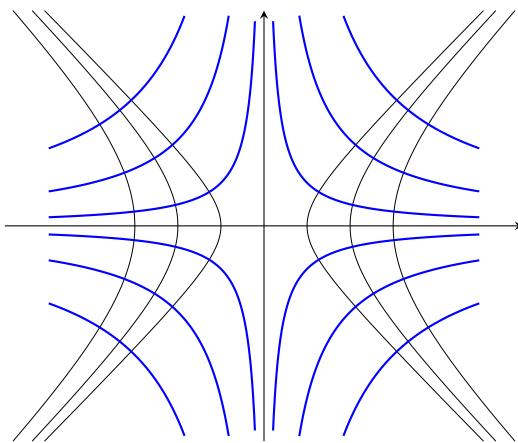
3. Resolver la ecuación anterior

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{\mathbf{y}}{x} \implies -\frac{dy}{\mathbf{y}} = \frac{dx}{x} \implies \log|\mathbf{y}| = \log|x| + C$$

es decir,

$$|\mathbf{y}| = \frac{e^C}{|x|} \implies |x\mathbf{y}| = e^C \implies x\mathbf{y} = k : k = e^C \vee k = e^{-C} \implies \mathbf{y} = \frac{k}{x}$$

Con la solución general podemos representar parte de la familia:



En azul posibles soluciones para distintos valores de k , en negro la familia original
Se observa que son curvas ortogonales a la familia original.

1.4.2. Trayectorias ortogonales en coordenadas polares

Veamos que al igual que encontramos una expresión para la trayectorias ortogonales en coordenadas rectangulares, también lo podemos hacer en coordenadas polares. En este caso partimos de una familia de curvas fam_C descrita por la solución de una EDO $r' = h(r, \theta)$. ¿Cuál es la familia ortogonal fam_{C^\perp} ?

Para ello tenemos que empezar analizando la expresión de la tangente como ecuación.

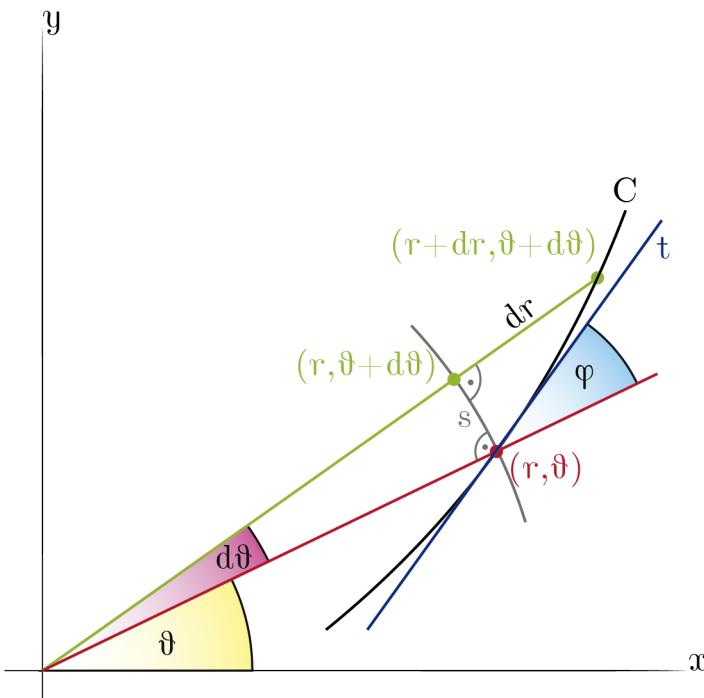


Figura 1.4: Análisis de dr y $d\theta$

En la figura 1.4 hemos trazado una curva arbitraria C . Queremos hallar una ecuación diferencial que describa a la tangente en cierto punto $p = (r, \theta)$. Para ello, hallamos un nuevo punto $q = (r + dr, \theta + d\theta) \in C$. Se indica además la circunferencia s de radio r con centro en 0, y la recta tangente t al punto original p .

Observamos que s es perpendicular a las rectas que unen el origen con p y q ($\vec{0p}$ y $\vec{0q}$ respectivamente), ya que son trazadas desde el radio de la misma. Además, la intersección de $\vec{0q}$ con s nos marca el punto $q' = (r, \theta + d\theta)$. Finalmente, denominamos ϕ al ángulo del que queremos hallar la tangente.

El gráfico de la figura 1.4 está distorsionado. Tanto dr como $d\theta$ son infinitesimales, es decir, extremadamente pequeños. Debido a ello podemos hacer distintas asunciones.

podemos aproximarlos con un segmento que va a ser perpendicular a las rectas $\vec{0p}$ y $\vec{0q}$. Esto hará que $\vec{0p}$ y $\vec{0q}$ sean aproximadamente paralelas, pues comparten un mismo segmento perpendicular a ellas. Además, podemos aproximar el arco de C que une p y q con un segmento de t . Esto se ilustra en la figura 1.5.

Para comenzar, el arco de circunferencia que une p y q' tiene longitud $rd\theta$ y

Como puede apreciarse en 1.5, el área sombreada se corresponde con un triángulo rectángulo en la aproximación, y de hecho tenemos descritos los catetos, lo que nos permite hallar $\tan \phi'$. Sin embargo, como hemos visto en la aproximación, ambas rectas perpendiculares a ts son paralelas entre sí. Es fácil ver entonces que $\phi = \phi'$ y al describir $\tan \phi'$ hemos descrito $\tan \phi$.

Por tanto, podemos concluir que:

$$\tan \phi = \frac{r d\theta}{dr} = r \frac{1}{\frac{dr}{d\theta}} = \frac{r}{r'}$$

Una vez hemos descrito la forma que tiene la tangente a una curva C arbitraria en forma de ecuación diferencial $r' = h(r, \theta)$, podemos hallar fam_{C^\perp} que buscábamos al comienzo de la sección. Para ello, vamos a considerar de nuevo una curva arbitraria C y su perpendicular C^\perp . Nos interesa especialmente la relación que existe entre los ángulos de las rectas tangentes de cada curva.

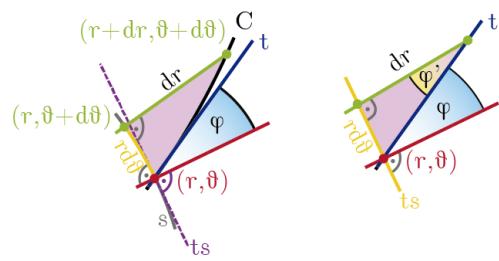


Figura 1.5: Aproximación por infinitesimales

En la figura 1.6 se ilustra la relación que buscamos. Supongamos que las dos curvas se cortan en un punto $p = (r, \theta)$ y consideramos la recta $0\vec{p}$. Al igual que en la figura 1.4, definimos ϕ_C como el ángulo existente entre $0\vec{p}$ y la curva C . Siguiendo el mismo procedimiento podemos definir ϕ_{C^\perp} .

Como por definición $C \perp C^\perp$, entonces el ángulo existente entre ellas es $\pi/2$, por tanto: $\phi_{C^\perp} = \pi/2 + \phi_C$.

Del caso en coordenadas rectangulares recordamos la ecuación:

$$\tan(\phi_{C^\perp}) = -\frac{1}{\tan(\phi_C)}$$

donde a la derecha de la ecuación figura todo lo relacionado con la curva original y a la izquierda lo relacionado con la curva tangente. Como hallamos antes que $\tan \alpha = r/r'$ para un ángulo α que describa a la recta tangente, de la misma forma $\tan(\phi_{C^\perp}) = r/r'$ describe a su recta tangente, que es ortogonal a la curva C original.

Usando esto, la definición $r' = h(r, \theta)$ del comienzo de la sección y la ecuación anterior obtenemos:

$$\frac{r}{r'} = -\frac{1}{r/r'} = -\frac{1}{r/h(r, \theta)} \implies \frac{r}{r'} = -\frac{h(r, \theta)}{r}$$

Finalmente, de la expresión anterior hallamos la ecuación diferencial general para describir a fam_{C^\perp} a partir de la función $h(r, \theta)$ que describe a fam_C :

$$r' = -\frac{r^2}{h(r, \theta)}$$

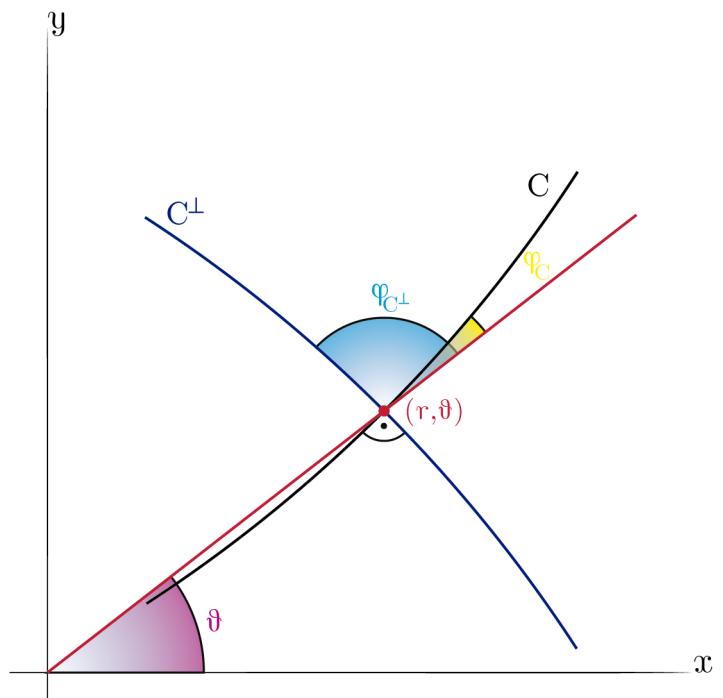


Figura 1.6: Ángulos entre curvas ortogonales

1.5. Ecuaciones homogéneas de grado 0

En esta sección daremos un breve método para resolver ecuaciones homogéneas de grado 0.

Definición 2 (Ecuación homogénea de grado k). Sea $f : KxK \rightarrow K$, decimos que es **homogénea de grado k** $\iff f(\lambda x_1, \lambda x_2) = \lambda^k \cdot f(x_1, x_2)$

Nos interesarán especialmente las de grado $k = 0$, es decir, aquellas en que $f(\lambda x_1, \lambda x_2) = f(x_1, x_2)$.

Supongamos que tenemos la EDO $\mathbf{y}' = f(x, \mathbf{y})$, tenemos que $f(x, \mathbf{y}) = f(x, \mathbf{y} \cdot x/x)$. Si f es homogénea de grado 0, y tomamos $\lambda = x$ entonces, $f(x, \mathbf{y} \cdot x/x) = f(\lambda, \mathbf{y} \cdot \lambda/x) = \lambda^0 f(1, \mathbf{y}/x)$, es decir:

$$\mathbf{y}' = f(x, \mathbf{y}) = f\left(1, \frac{\mathbf{y}}{x}\right)$$

Haciendo el cambio $\mathbf{z} = \mathbf{y}/x$ y desarrollando \mathbf{z}' tenemos:

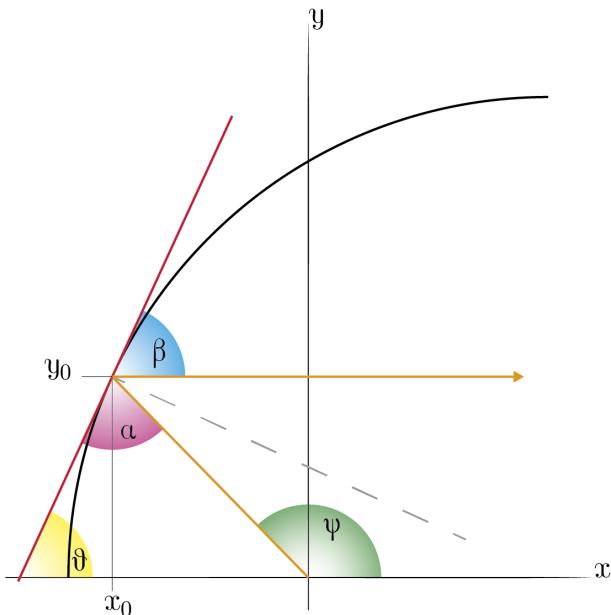
$$\mathbf{z}' = \frac{\mathbf{y}'}{x} - \frac{\mathbf{y}}{x} = \frac{f(1, \frac{\mathbf{y}}{x})}{x} - \frac{1}{x} \frac{\mathbf{y}}{x} = \frac{f(1, \mathbf{z}) - \mathbf{z}}{x}$$

que es una EDO de variables separables.

Veamos un ejemplo con resolución por este método:

Ejemplo 8 (Espejo parabólico)

Queremos construir un espejo para los faros de un automóvil. Buscamos que si la luz proviene del origen (la bombilla), ésta salga reflejada paralela al suelo. Vamos a hallar qué forma tiene que tener una sección del espejo (que tiene simetría radial) que cumple nuestro objetivo. Vamos a exemplificar con la ayuda del diagrama siguiente.



Como ya viene siendo conocido, $\tan(\theta) = \mathbf{y}'$. Y si nos fijamos en la figura, para cualquier punto (x, \mathbf{y}) del espejo $\tan(\psi) = \mathbf{y}/x$. Por tanto:

$$\frac{\mathbf{y}}{x} = \tan(\psi) = \tan(2\theta) = \frac{\sin(2\theta)}{\cos(2\theta)} = \frac{2 \sin(\theta) \cos(\theta)}{\cos^2(\theta) - \sin^2(\theta)} = \frac{2 \tan(\theta)}{1 - \tan^2(\theta)} = \frac{2\mathbf{y}'}{1 - \mathbf{y}'^2}$$

es decir,

$$(1 - \mathbf{y}'^2) \cdot \mathbf{y} = 2\mathbf{y}' \cdot x \implies \mathbf{y}' = \frac{-x \pm (x^2 + \mathbf{y}^2)^{1/2}}{\mathbf{y}}$$

de las dos opciones que tenemos, tenemos que ver cuál es válida. Como la pendiente de la recta tangente es positiva, nuestra ecuación diferencial sólo puede ser:

$$\mathbf{y}' = \frac{-x + \sqrt{(x^2 + \mathbf{y}^2)}}{\mathbf{y}}$$

Salta a la vista que no podemos resolverla por el método de separación de variables. Por ello, vamos a considerar un cambio de variables para convertirla en una ecuación de variables separables.

En la figura hemos marcado 4 ángulos: α , β , θ y ψ .

Si nos fijamos con más detenimiento, como la trayectoria del rayo es paralela al eje X los ángulos que forman ambas con la recta tangente en un punto arbitrario del espejo son idénticos, por lo que $\beta = \theta$.

Además, debido a que en la reflexión de un haz de luz el ángulo de reflexión coincide con el de incidencia tenemos que $\alpha = \beta$.

Es fácil ver que el ángulo supplementario a ψ ($\pi - \psi$ rad) forma parte de los ángulos internos de un triángulo, junto con α y θ . Por ello, podemos expresar la igualdad $\alpha + \theta + (\pi - \psi) = \pi$ rad $\implies \psi = \alpha + \theta = 2\theta$.

Sea $z(x) = y(x)/x$, hallamos la expresión de \mathbf{z}' :

$$\mathbf{z}' = \frac{\mathbf{y}'}{x} - \frac{\mathbf{y}}{x^2} = \frac{1}{x} \cdot (\mathbf{y}' - \mathbf{z}) = \frac{1}{x} \cdot \left(\frac{-x + \sqrt{(x^2 + \mathbf{y}^2)}}{\mathbf{y}} - \mathbf{z} \right) = \frac{1}{x} \cdot \left(-\frac{x}{\mathbf{y}} + \sqrt{\left(\frac{x}{\mathbf{y}}\right)^2 + 1} - \mathbf{z} \right)$$

y si del último paso hacemos el cambio $1/\mathbf{z} = x/\mathbf{y}$ obtenemos:

$$\mathbf{z}' = \frac{1}{x} \cdot \left(-\frac{1}{\mathbf{z}} + \sqrt{\frac{1}{\mathbf{z}^2} + 1} - \mathbf{z} \right)$$

que es de variables separables.

La solución a esta EDO es: $1 - \sqrt{1 + \mathbf{z}^2} = \frac{c}{x}$ y como $\mathbf{z} = y/x$ obtenemos la ecuación que describe la altura de nuestro espejo en función de x y una constante c , a falta de algún dato extra para resolver un PVI.

$$y(x) = \sqrt{c^2 + 2cx}$$

Parte II

Segundo parcial

Parte III

Tercer parcial

Parte IV

Apéndices

Capítulo 2

Índices

Lista de definiciones

1.	Definición (Ecuación diferencial de primer orden)	9
1.	Ejemplo	9
2.	Ejemplo	9
3.	Ejemplo (Crecimiento de una población)	10
4.	Ejemplo (Crecimiento de una población con limitación de recursos)	10
1.	Ejercicio propuesto	11
5.	Ejemplo (Resolución sencilla)	11
2.	Ejercicio propuesto	11
6.	Ejemplo (Hallar un campo de pendientes)	12
7.	Ejemplo (Familia ortogonal a otra dada)	14
2.	Definición (Ecuación homogénea de grado k)	17
8.	Ejemplo (Espejo parabólico)	17

Lista de teoremas

3.	Ejemplo (Crecimiento de una población)	10
4.	Ejemplo (Crecimiento de una población con limitación de recursos)	10
5.	Ejemplo (Resolución sencilla)	11
6.	Ejemplo (Hallar un campo de pendientes)	12
7.	Ejemplo (Familia ortogonal a otra dada)	14
8.	Ejemplo (Espejo parabólico)	17

Lista de ejemplos

3.	Ejemplo (Crecimiento de una población)	10
4.	Ejemplo (Crecimiento de una población con limitación de recursos)	10
5.	Ejemplo (Resolución sencilla)	11
6.	Ejemplo (Hallar un campo de pendientes)	12
7.	Ejemplo (Familia ortogonal a otra dada)	14
8.	Ejemplo (Espejo parabólico)	17

Lista de ejercicios

3.	Ejemplo (Crecimiento de una población)	10
4.	Ejemplo (Crecimiento de una población con limitación de recursos)	10
5.	Ejemplo (Resolución sencilla)	11
6.	Ejemplo (Hallar un campo de pendientes)	12
7.	Ejemplo (Familia ortogonal a otra dada)	14
8.	Ejemplo (Espejo parabólico)	17