

Cálculo con Derive

Santiago Angulo Díaz-Parreño (sangulo@ceu.es)

Juan Carlos Garro Garro (garro.eps@ceu.es)

Eduardo López Ramírez (elopez@ceu.es)

José Rojo Montijano (jrojo.eps@ceu.es)

Anselmo Romero Limón (arlimon@ceu.es)

Alfredo Sánchez Alberca (asalber@ceu.es)

Susana Victoria Rodríguez (victoria.eps@ceu.es)

Departamento de Matemática Aplicada y Estadística
CEU San Pablo

Septiembre 2016



CEU

*Universidad
San Pablo*

Cálculo con Derive

Santiago Angulo Díaz-Parreño (sangulo@ceu.es), Anselmo Romero Limón (arlimon@ceu.es), Alfredo Sánchez Alberca (asalber@ceu.es).



Esta obra está bajo una licencia Reconocimiento – No comercial – Compartir bajo la misma licencia 3.0 España de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/>.

Con esta licencia eres libre de:

- Copiar, distribuir y mostrar este trabajo.
- Realizar modificaciones de este trabajo.

Bajo las siguientes condiciones:



Reconocimiento. Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciador (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).



No comercial. No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



Compartir bajo la misma licencia. Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

- Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.
 - alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor
 - Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.
-

Índice general

1. Introducción a Derive	1
1.1. Introducción	1
1.2. Funciones básicas	1
2. Funciones Elementales	11
2.1. Fundamentos teóricos	11
2.1.1. Dominio e imagen	11
2.1.2. Signo y crecimiento	11
2.1.3. Extremos Relativos	12
2.1.4. Concavidad	12
2.1.5. Asíntotas	13
2.1.6. Periodicidad	13
2.2. Ejercicios resueltos	15
2.3. Ejercicios propuestos	17
3. Límites y Continuidad	19
3.1. Fundamentos teóricos	19
3.1.1. Límite de una función en un punto	19
3.1.2. Álgebra de límites	19
3.1.3. Asíntotas	20
3.1.4. Continuidad de una función en un punto	20
3.2. Ejercicios resueltos	22
3.3. Ejercicios propuestos	25
4. Derivadas de funciones de una variable	27
4.1. Fundamentos teóricos	27
4.1.1. Tasas de variación media e instantánea. La derivada	27
4.1.2. Función derivada y derivadas sucesivas	28
4.1.3. Estudio del crecimiento de una función	29
4.1.4. Determinación de los extremos relativos	29
4.1.5. Estudio de la concavidad de una función	30
4.2. Ejercicios resueltos	31
4.3. Ejercicios propuestos	33
5. Derivadas de funciones de varias variables	35
5.1. Fundamentos teóricos	35
5.1.1. Derivadas parciales de una función de n variables	35
5.1.2. Derivadas parciales sucesivas de una función de n variables	36
5.1.3. Vector gradiente y matriz hessiana	37
5.1.4. Derivada direccional	38

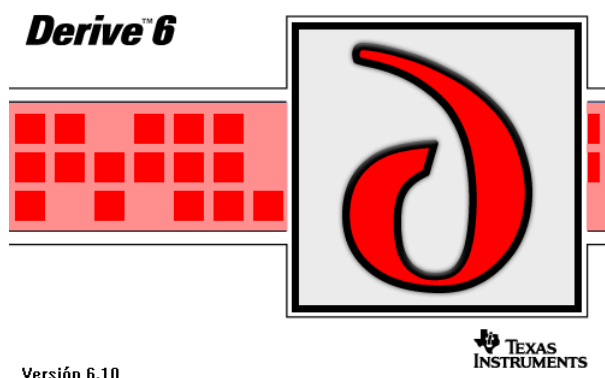
5.1.5. Derivación implícita	38
5.1.6. Cálculo de extremos	39
5.2. Ejercicios resueltos	40
5.3. Ejercicios propuestos	44
6. Polinomios de Taylor	45
6.1. Fundamentos teóricos	45
6.1.1. Polinomios de Taylor de funciones de una variable	45
6.1.2. Polinomios de Taylor de funciones de varias variables	46
6.2. Ejercicios resueltos	48
6.3. Ejercicios propuestos	50
7. Integrales	51
7.1. Fundamentos teóricos	51
7.1.1. Primitivas e Integrales	51
7.1.2. Integral de Riemann	52
7.1.3. Integrales impropias	53
7.1.4. Cálculo de áreas	53
7.1.5. Cálculo de Volúmenes	54
7.2. Ejercicios resueltos	55
7.3. Ejercicios propuestos	57
8. Ecuaciones Diferenciales Ordinarias	59
8.1. Fundamentos teóricos	59
8.1.1. Ecuaciones diferenciales ordinarias (E.D.O.)	59
8.1.2. Ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden	59
8.1.3. EDO de variables separables	60
8.1.4. EDO Homogéneas	61
8.1.5. EDO Lineales	61
8.2. Ejercicios resueltos	62
8.3. Ejercicios propuestos	64

Introducción a Derive

1 Introducción

La gran potencia de cálculo alcanzada por los ordenadores en las últimas décadas, ha convertido a los mismos en poderosas herramientas al servicio de todas aquellas disciplinas que, como las matemáticas, requieren cálculos largos y complejos.

Derive® * es uno de los programas de cálculo numérico y simbólico más utilizados. Aparte de sus capacidades el cálculo numérico, vectorial y matricial, también permite realizar representaciones gráficas, lo cual permite resolver multitud de problemas de álgebra, análisis, cálculo, geometría e incluso estadística. La ventaja de Derive frente a otros programas habituales de cálculo como Mathematica, Mapple o MATLAB, radica en su sencillez y simplicidad de uso, lo cual lo hace idóneo para la enseñanza de las matemáticas.



El objetivo de esta práctica es introducir al alumno en la utilización de este programa, enseñándole a realizar las operaciones básicas más habituales.

2 Funciones básicas

Arranque

Como cualquier otra aplicación de Windows, para arrancar el programa hay que pulsar sobre la opción correspondiente del menú Inicio►Programas, o bien sobre el icono de escritorio

*Esta practica está basada en la versión 6.1 de Derive® para Windows en castellano.



Cuando el programa arranca, en la pantalla aparece la ventana principal del programa que se conoce como *ventana de Álgebra* (figura 1.1).

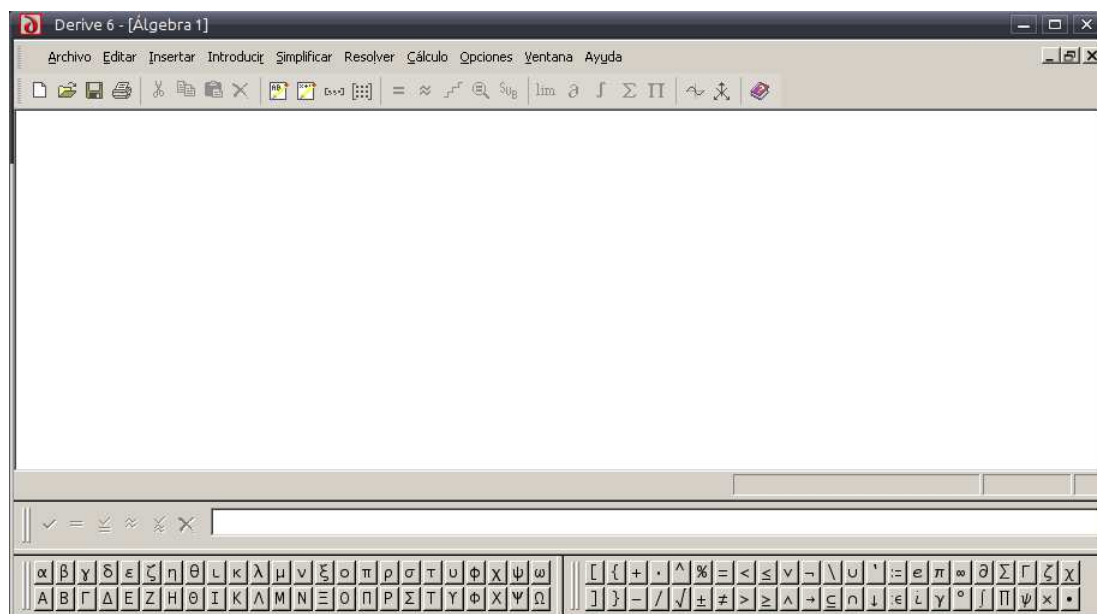


Figura 1.1 – Ventana principal de Derive.

Como cualquier otra ventana de aplicación de Windows, la ventana principal tiene una barra de título, una barra de menú con las distintas funciones que puede hacer Derive (cálculo de límites, derivadas, integrales, representaciones gráficas, etc.), una barra de botones que son atajos a las opciones más habituales de los menús, y una barra de estado en la parte inferior que nos indica lo que hace el programa en cada instante. Además, por defecto, en la parte inferior de la ventana aparece el editor de expresiones, que pasamos a describir a continuación.

Edición de expresiones

Antes de realizar cualquier cálculo sobre una expresión matemática, lo primero es escribir dicha expresión y aprender a manipularla.

Introducción de expresiones

Para introducir una expresión se utiliza el editor de expresiones (figura 1.2), el cual aparece directamente en la parte baja de la ventana de Álgebra.



Figura 1.2 – Editor de expresiones.

1. Introducción a Derive

El editor de expresiones está compuesto por una línea de edición, que se utiliza para dar forma a las expresiones matemáticas (también permite introducir comentarios de texto) que vamos a utilizar con el programa, una barra con las letras del alfabeto griego, a menudo presentes en las expresiones matemáticas, y una barra de símbolos matemáticos con los operadores más habituales (suma, resta, producto, división, paréntesis, raíz cuadrada) y las constantes que más se utilizan (número e , número π ...).

En el editor de expresiones podemos escribir números, letras (que serán variables), símbolos y operadores aritméticos y relacionales. Los operadores más habituales en la construcción de expresiones son los que aparecen en la siguiente tabla:

Símbolo	Operador
+	suma
-	resta
*	producto
/	cociente
^	potenciación

A la hora de escribir una expresión hay que tener en cuenta que Derive tiene establecido un orden de prioridad en la evaluación de los operadores. En primer lugar evalúa las funciones y constantes predefinidas, después evalúa las potencias, después productos y cocientes (ambos con igual prioridad y de izquierda a derecha), y por último sumas y restas (ambas con igual prioridad y de izquierda a derecha). Para forzar la evaluación de una subexpresión, saltándose el orden de evaluación de Derive, se utilizan paréntesis. Así, como se ve en el siguiente ejemplo, dependiendo de cómo se introduzca una expresión pueden obtenerse resultados diferentes.

Expresión introducida	Expresión resultante
$4x-1/x-5$	$4x - \frac{1}{x} - 5$
$(4x-1)/x-5$	$\frac{4x-1}{x} - 5$
$4x-1/(x-5)$	$4x - \frac{1}{x-5}$
$(4x-1)/(x-5)$	$\frac{4x-1}{x-5}$

Cada vez que introducimos una expresión, esta aparece en la ventana de Algebra etiquetada con un número precedido del símbolo de almoadilla #, tal y como se muestra en la figura 1.3. Posteriormente, cada vez que queramos hacer referencia a dicha expresión podremos utilizar su etiqueta en lugar de volver a escribir la expresión.

Es posible seleccionar cualquier expresión o subexpresión de la ventana Algebra con el ratón o bien con las teclas del cursor.

La tecla F3 permite introducir la expresión que tengamos seleccionada en el editor de expresiones.

Modificación de expresiones

Una vez introducida una expresión, podemos volver a editarla para realizar cualquier corrección o cambio mediante el menú **Editar** ▶ **Expresión** y aparecerá la ventana del editor de expresiones con la expresión seleccionada.

Eliminación de expresiones

Para eliminar una expresión de la ventana de Algebra, basta con seleccionarla y utilizar el menú **Editar** ▶ **Borrar** y la expresión seleccionada desaparecerá automáticamente, mientras que el resto de

las expresiones se reenumeran automáticamente. También es posible eliminar bloques completos de expresiones consecutivas seleccionando previamente el bloque de expresiones a eliminar.

¡Importante! Si hemos eliminado alguna expresión por equivocación, es posible recuperarla mediante el menú **Editar** ▶ **Recuperar**.

Reordenación de expresiones

Es posible cambiar la posición que ocupa una expresión en la ventana de Álgebra marcándola y arrastrándola mediante el ratón hasta la posición que queremos que ocupe. Al cambiar la posición de una expresión, inmediatamente se reenumeran las expresiones de la ventana de Álgebra.

Introducción de comentarios

Hay dos formas diferentes para introducir un comentario en la secuencia de expresiones. La primera consiste en utilizar la línea de edición escribiendo el texto del comentario entre comillas, y, si procedemos de esta manera, el comentario aparecerá como una expresión más, con su correspondiente etiqueta de ordenación. La segunda es mediante el menú **Insertar** ▶ **Objeto de Texto**, y de esta forma el comentario aparece sin etiqueta de ordenación ya que se trata de un objeto más insertado en el archivo, como también lo sería una gráfica, un dibujo, una fotografía o una hoja de cálculo...

Nombres de variables

Por defecto Derive utiliza una sola letra para representar una variable, de manera que la expresión xy , no se interpreta como una variable de nombre xy , sino como el producto de la variable x por la variable y . Además, por defecto, no distingue entre mayúsculas y minúsculas. Por ejemplo, Derive interpretará que queremos trabajar con la función coseno tanto si introducimos en la línea de edición $\cos(x)$ como si introducimos $\cos(X)$. No obstante, es posible hacer que el programa utilice variables con más de una letra y distinga entre mayúsculas y minúsculas mediante el menú **Opciones** ▶ **Ajustes de Modo** ▶ **Introducción**.

Definición de constantes y funciones

Es posible definir constantes y funciones mediante el operador de definición $:=$. Para definir una constante basta con escribir el nombre de la constante seguido de $:=$ y el valor de dicha constante. Por ejemplo para definir la constante de la aceleración de la gravedad, escribiríamos $g:=9.8$. Por otro lado, para definir una función se escribe el nombre de la función seguido de la lista de variables de la misma separadas por comas y entre paréntesis; después se escribe $:=$ y por último la expresión que define la función. Así, por ejemplo, para definir la función que calcula el área de un triángulo de base b y altura h , escribiríamos $a(b,h):=(b*h)/2$ (ver figura 1.3).

Con respecto a la definición de funciones, o de constantes, resultan especialmente **¡Importantes!** dos matizaciones:

- Si hemos definido una función o una constante, la definición permanece activa durante toda la sesión de trabajo con el documento, incluso si borramos la expresión en la que hemos procedido a la definición (al borrar en la pantalla no borramos la memoria interna en la que se almacenan las definiciones de las constantes y funciones). Para cambiar una definición previa no quedará más remedio que redefinir ($g:=9.812$), o dejar la asignación en blanco si lo que queremos es borrar la definición ($g:=$).
- En las definiciones de funciones sí que, por defecto, Derive distingue entre minúsculas y mayúsculas. De tal forma que, por ejemplo, distinguirá entre $a(b,h)$ y $A(b,h)$.

Funciones y constantes predefinidas

Derive tiene ya implementadas la mayoría de la funciones elementales y constantes que suelen utilizarse en los cálculos matemáticos. La sintaxis de algunas de estas funciones y constantes se muestra en la tabla 1.1, aunque, muy a menudo, en lugar de utilizar dicha sintaxis se utilizan los operadores y constantes que aparecen en la barra de símbolos. Por ejemplo, se puede observar cómo cambia el aspecto de la letra e introducida en la línea de edición como un variable más, o si en su lugar utilizamos $\#e$, o la e que aparece en la barra de símbolos. En los dos últimos casos lo que hemos introducido en la línea de edición es la constante de Euler, base de los logaritmos naturales.

Para conocer todas las funciones predefinidas de Derive lo mejor es utilizar el menú Ayuda ▶ En Línea y visitar la sección Funciones y Constantes Internas.

Sintaxis	Explicación
$\#e$	Constante de Euler $e = 2,71828\dots$
π	El número $\pi = 3,14159\dots$
$\#i$	El número imaginario $i = \sqrt{-1}$
\inf	Infinito ∞
$\exp(x)$	Función exponencial e^x
$\log(x, a)$	Logaritmo en base a , $\log_a x$
$\ln(x)$	Logaritmo neperiano $\ln x$
\sqrt{x}	Función raíz cuadrada \sqrt{x}
$\sin(x)$	Función seno $\sin x$
$\cos(x)$	Función coseno $\cos x$
$\tan(x)$	Función tangente $\tan x$
$\arcsin(x)$	Función arcoseno $\arcsin x$
$\arccos(x)$	Función arcocoseno $\arccos x$
$\operatorname{arctan}(x)$	Función arcotangente $\operatorname{arctan} x$

Cuadro 1.1 – Sintaxis de algunas funciones elementales y constantes predefinidas en Derive.

¡Importante!: en las funciones predefinidas, Derive, por defecto, no distingue entre mayúsculas y minúsculas. Por ejemplo, opera con la función coseno tanto si introducimos $\cos(x)$, $\operatorname{Cos}(x)$, o $\operatorname{COS}(x)$.

Vectores y matrices

Derive también permite la manipulación de vectores y matrices. Para crear un vector se utiliza el menú Introducir ▶ Vector. Al seleccionar este menú aparece un cuadro de diálogo donde debemos introducir el número de elementos del vector, y tras pulsar Sí aparece otro cuadro de diálogo donde deben introducirse las componentes del mismo.

Otra forma de introducir vectores es mediante la línea de edición, introduciendo entre corchetes las componentes del vector separadas por comas. Por ejemplo, para introducir el vector (x, y, z) escribiríamos $[x, y, z]$ (ver figura 1.3).

Para crear matrices se utiliza el menú Introducir ▶ Matriz. Con este menú aparece un cuadro de diálogo donde debemos introducir las filas y las columnas de nuestra matriz, y tras pulsar Sí, aparece otro cuadro de diálogo donde deben introducirse las componentes de la misma.

Otra forma de introducir matrices es mediante la línea de edición, introduciendo entre corchetes los vectores fila que componen la matriz separados por comas, teniendo en cuenta que, como se explica anteriormente, cada vector debe ir escrito a su vez entre corchetes. Así, para introducir por ejemplo la matriz

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ a & b & c \end{pmatrix}$$

CÁLCULO CON DERIVE

escribiríamos $[[1, 2, 3], [a, b, c]]$ (ver figura 1.3).

Anotaciones

Es posible asociar a cada expresión una pequeña anotación, o nota. Para ello se selecciona la expresión y se utiliza el menú **Editar** ▶ **Anotación**. Dicha anotación aparecerá en la barra de estado cada vez que seleccionemos la expresión y también es posible imprimirlo junto a la expresión.

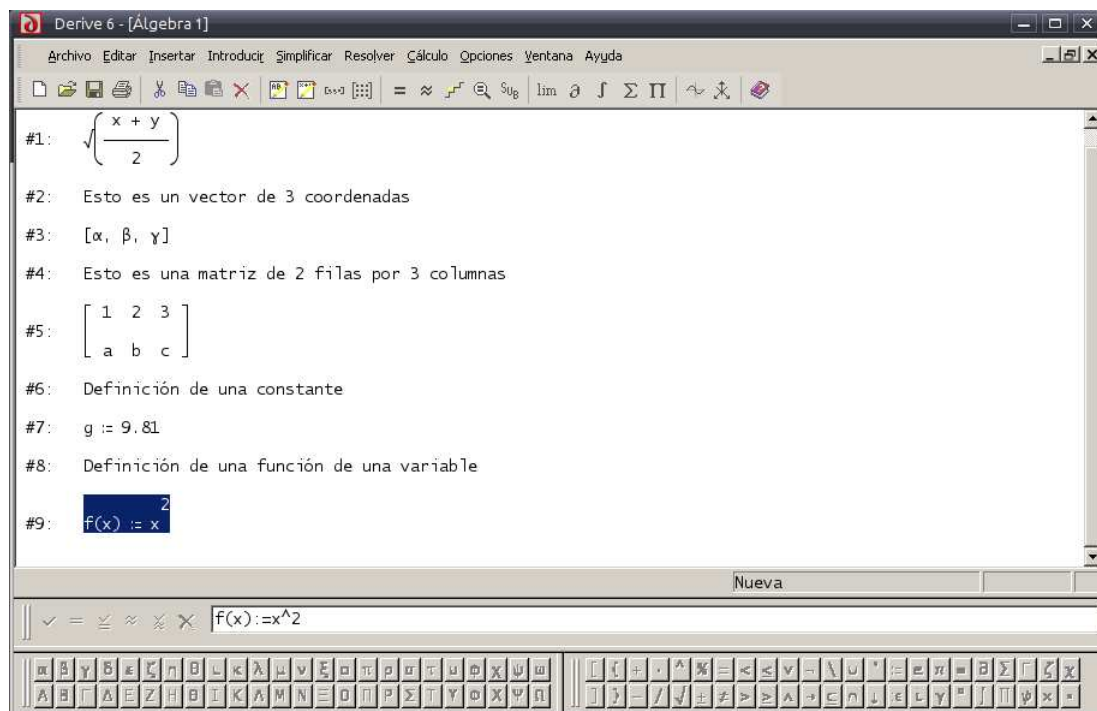


Figura 1.3 – Ventana de Álgebra con distintos tipos de expresiones.

Manipulación de archivos

Las expresiones y los cálculos realizados dentro de la ventana de Álgebra suelen almacenarse en archivos.

Guardar un archivo

Para crear un archivo donde se guarden las expresiones de la ventana de Álgebra se utiliza el menú **Archivo** ▶ **Guardar**, y en el cuadro de diálogo que aparece se le da nombre al archivo y se selecciona la carpeta donde queremos guardarlo. Derive le pone automáticamente la extensión *.dfw a sus archivos. Una vez creado el archivo, su nombre aparecerá en la barra de título de la ventana de Derive. Posteriormente, para guardar cambios en una ventana de Álgebra, bastará con seleccionar de nuevo el menú **Archivo** ▶ **Guardar**, de manera que el archivo se actualizará.

Recuperar un archivo

Para recuperar en una ventana de Álgebra el contenido de un archivo se utiliza el menú **Archivo** ▶ **Abrir**, y en el cuadro de diálogo que aparece se selecciona el archivo deseado. Automáticamente el contenido del archivo aparece en una ventana nueva de Álgebra.

Otra forma de abrir archivos es mediante el menú **Archivo** ▶ **Leer** ▶ **Math**, que se utiliza para almacenar en memoria la definición de nuevas funciones, presentes en los archivos con extensión *.mth, que expanden el potencial de cálculo del núcleo del programa, el cual queda operativo nada más arrancar Derive. Al igual que antes aparece un cuadro de diálogo donde debemos seleccionar el archivo que queremos abrir, sólo que ahora, el contenido del archivo no aparece en una nueva ventana de Álgebra, sino que se añade en la ventana de Álgebra activa, a continuación de las expresiones existentes. Otra forma de proceder con igual resultado es mediante el menú **Archivo** ▶ **Leer** ▶ **Utilidades**, que también permite acceder hasta, y cargar en memoria, los archivos con extensión *.mth, pero en este caso el conjunto de expresiones que componen dichos archivos no aparece en la pantalla, aunque sí que, al estar cargadas en la memoria del ordenador, serán operativas.

Cerrar y abrir nuevas ventanas de Álgebra

Cuando terminemos una sesión de trabajo, podemos cerrar la ventana de Álgebra correspondiente mediante el menú **Archivo** ▶ **Cerrar**. Por otro lado, en cualquier momento de una sesión de trabajo podemos abrir, añadidas a la que aparece por defecto, tantas ventanas de Álgebra como estimemos oportunas mediante el menú **Archivo** ▶ **Nuevo**. El programa trabaja con cada una de las ventanas de Álgebra activas de forma completamente independiente, lo cual implica, entre otras cosas, que podremos utilizar los mismos nombres de variables en todas las ventanas abiertas sin interferencia entre las mismas.

Impresión

Para imprimir el contenido de una ventana de Álgebra, o bien una gráfica, se utiliza el menú **Archivo** ▶ **Imprimir**. En el caso de una ventana de Álgebra aparecerá un cuadro de diálogo donde se puede seleccionar **Todo**, para imprimir todo el contenido de la ventana, **Páginas** para imprimir un rango de páginas o **Selección** para imprimir la zona previamente seleccionada de la ventana. No obstante, antes de imprimir, conviene utilizar el menú **Archivo** ▶ **Vista Previa** para ver por pantalla cómo quedaría la hoja impresa. Si todo está bien, bastaría con pulsar el botón **Imprimir** para que aparezca el cuadro de diálogo de impresión y desde ahí enviarlo a la impresora. La orientación y los márgenes pueden cambiarse con el menú **Archivo** ▶ **Configurar** ▶ **Página**, mientras que otras opciones como el tipo de letra, o el encabezado y pie de página se controlan mediante el menú **Opciones** ▶ **Impresión** ▶ **Cabecera** y **Pie**.

Simplificación de expresiones

Derive incorpora varios sistemas de simplificación de expresiones. El más sencillo es la simplificación básica, que puede realizarse mediante el menú **Simplificar** ▶ **Normal**. Este menú permite realizar simplificaciones simples como por ejemplo convertir la expresión $x + x$ en la expresión $2x$. Sin embargo, no permite pasar de un binomio como $(x+1)^2$ a su desarrollo $x^2 + 2x + 1$, ya que no está claro cuál de las dos expresiones es más simple. Para obtener el desarrollo de este binomio se utiliza el menú **Simplificar** ▶ **Expandir** que permite expandir una expresión con respecto a sus variables. Por el contrario, si lo que queremos es pasar del desarrollo a la forma del binomio, se utiliza el menú **Simplificar** ▶ **Factorizar** que permite factorizar una expresión con respecto a sus variables.

En cualquiera de estas simplificaciones, Derive trabaja por defecto en modo exacto y por eso devuelve expresiones fraccionarias. Para obtener el valor de una expresión en modo aproximado, con decimales, se utiliza el menú **Simplificar** ▶ **Aproximar**. Con este menú aparece un cuadro de diálogo donde debemos introducir el número de decimales que queremos para la aproximación.

CÁLCULO CON DERIVE

Por último, es posible sustituir cualquier variable de una expresión por un valor u otra expresión mediante el menú **Simplificar**►**Sustituir Variable**. En el cuadro de diálogo que aparece se elige la variable a sustituir y se introduce la expresión o el valor de sustitución en **Nuevo Valor**.

Representaciones gráficas

Derive permite representar gráficamente funciones en 2 y 3 dimensiones.

Gráficas en 2 dimensiones

Para representar una función o expresión de una variable, se selecciona la expresión y se utiliza el menú **Ventana**►**Nueva Ventana 2D**. Automáticamente aparece una ventana de gráficas en 2 dimensiones con unos ejes cartesianos, y para que aparezca la gráfica de la función, basta con pulsar el menú **Insertar**►**Gráfica** de esta ventana, o pulsar en su correspondiente botón de la barra de botones. En la figura 1.4 se muestra un ejemplo de gráfica en 2 dimensiones.

Si queremos que la gráfica, una vez obtenida, también aparezca en la ventana de Álgebra como un objeto más de la misma, desde la ventana 2D, utilizamos el menú **Archivo**►**Incrustar**.

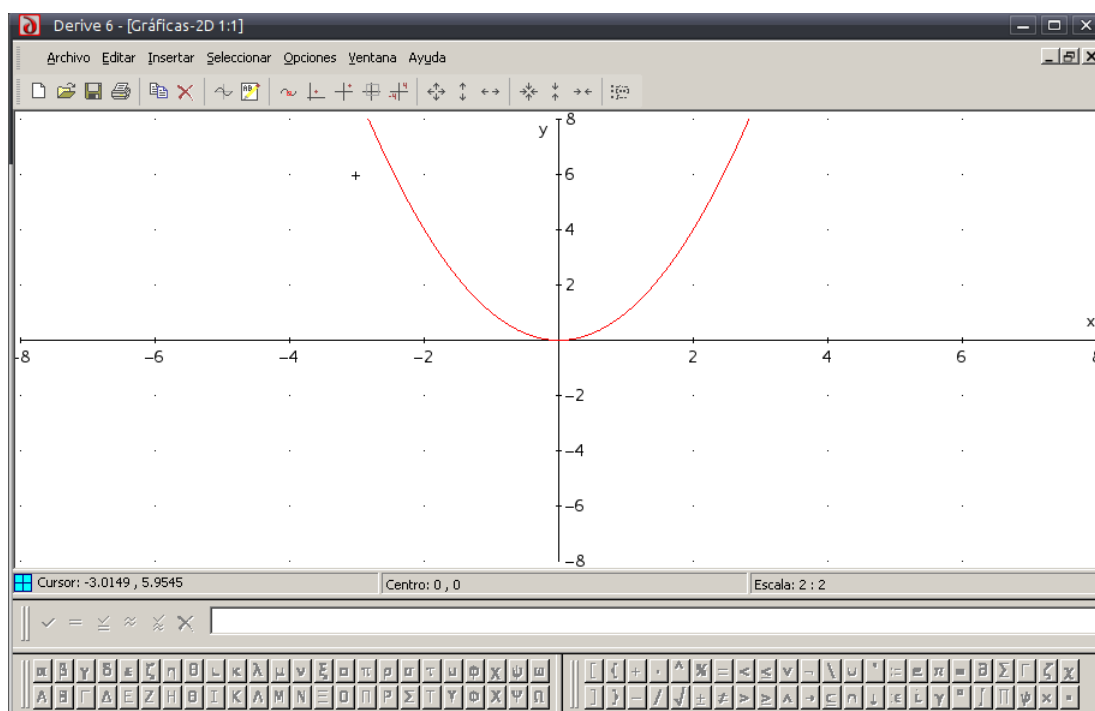


Figura 1.4 – Ventana de gráficas en 2 dimensiones.

Es posible representar más de una función en una misma gráfica, seleccionando la nueva expresión en la ventana de Álgebra, y pulsando de nuevo el menú **Insertar**►**Gráfica** en la ventana de gráficos en 2 dimensiones en que queramos que aparezca la representación gráfica de la expresión seleccionada. Cuando se quieren representar varias funciones, a veces resulta más cómodo mostrar al mismo tiempo la ventana de Álgebra y la de gráficas mediante el menú **Ventana**►**Mosaico Vertical**, tal y como se muestra en la figura 1.5.

También es posible borrar gráficas mediante el menú **Editar**►**Borrar Gráfica**. Si se elige la opción **Primera** se borra la primera gráfica dibujada, si se elige la opción **Última** se borra la última, y si se elige la opción **Anteriores** borra todas las gráficas excepto la última.

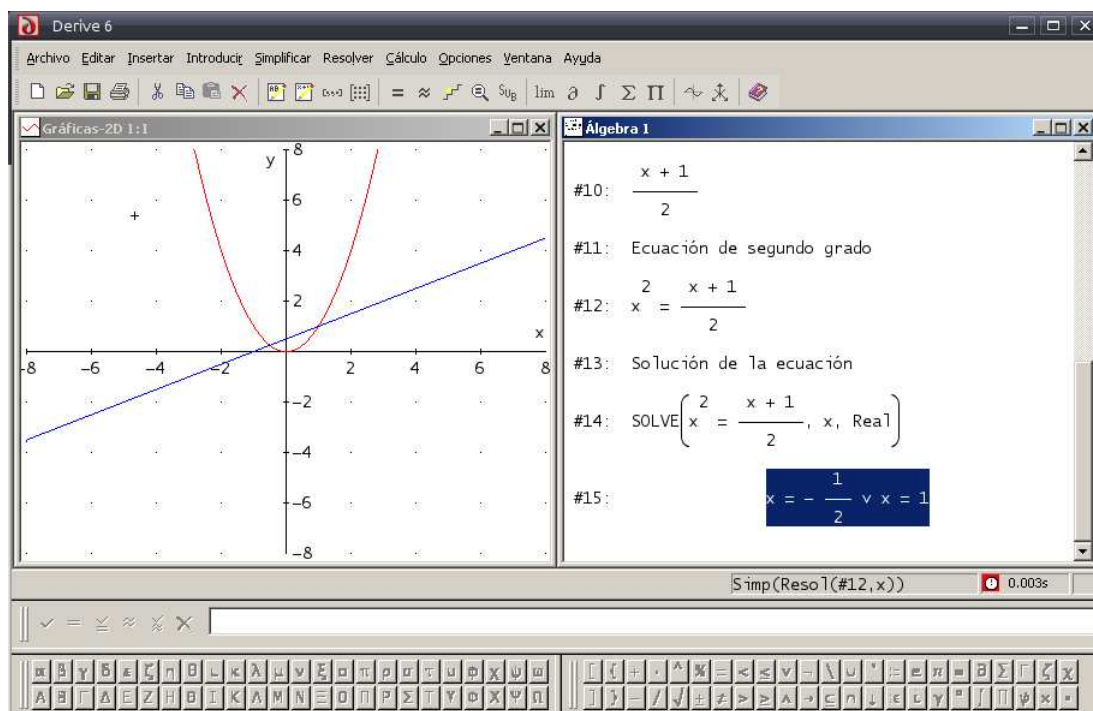


Figura 1.5 – Ventana de Álgebra y de gráficas en 2 dimensiones en una misma pantalla.

En la ventana de gráficas en 2 dimensiones existen distintos menús que permiten cambiar el aspecto de la gráfica representada. Una posibilidad muy interesante es cambiar la escala de los ejes mediante el menú **Seleccionar**►**Relación de Aspecto**.

También es posible ampliar la representación gráfica de una determinada zona del gráfico mediante el menú **Seleccionar**►**Rango de la Gráfica**, introduciendo las coordenadas de la zona que queremos ampliar, aunque es más práctico utilizar el botón **Seleccionar el rango**, y después utilizar el ratón para delimitar la zona que queremos ampliar.

En la ventana de gráficas en 2 dimensiones aparece una cruz que representa al cursor. Las coordenadas del cursor siempre aparecen en la barra de estado. Cuando se pulsa la tecla F3, la cruz se transforma en un cuadradito y se pasa a *modo de traza*. En este modo, al mover el cursor con las flechas del teclado, el cursor sigue la trayectoria de la función representada, con lo que podemos averiguar los valores que toma la misma en la barra de estado, tal y como se muestra en la figura 1.6.

Es posible centrar la gráfica de una función en cualquier punto mediante el menú **Seleccionar**►**Rango de la Gráfica**►**Longitud/Centro**, aunque, de nuevo, tal vez sea más operativo hacerlo mediante los botones **Centrar en el cursor** y **Centrar en el origen**.

Gráficas en 3 dimensiones

Para representar una función o expresión de dos variables, se selecciona la expresión y se utiliza el menú **Ventana**►**Nueva Ventana 3D**. Automáticamente aparece una ventana de gráficas en 3 dimensiones con unos ejes cartesianos, y para que aparezca la gráfica de la función, basta con pulsar el menú **Insertar**►**Gráfica de esta ventana**. En la figura 1.7 se muestra un ejemplo de gráfica en 3 dimensiones.

Al igual que en el caso de las gráficas de 2 dimensiones, existen distintos menús que permiten cambiar el aspecto de la gráfica representada. De todos ellos, sólo comentaremos el menú **Editar**►**Gráfica**►**Número de Paneles** que permite cambiar la resolución del gráfico, y el menú **Seleccionar**►**Posición de Ojo** que permite cambiar la posición desde donde se mira la gráfica.

CÁLCULO CON DERIVE

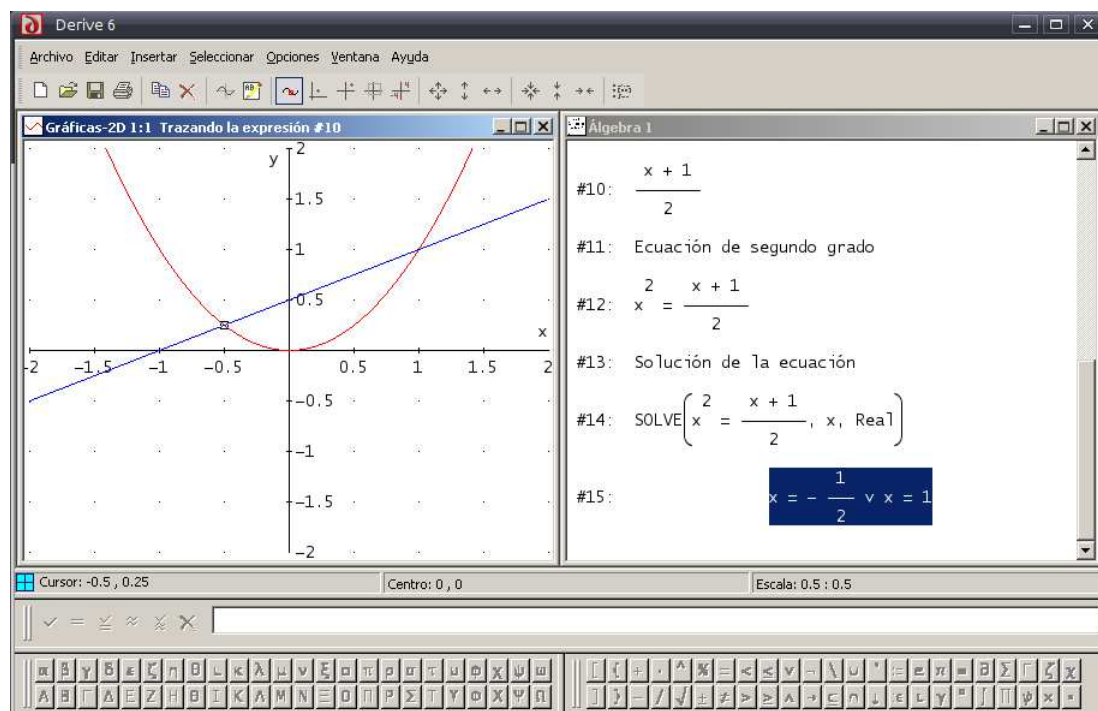


Figura 1.6 – Ventana de gráficas en 2 dimensiones en modo de traza con una gráfica ampliada.

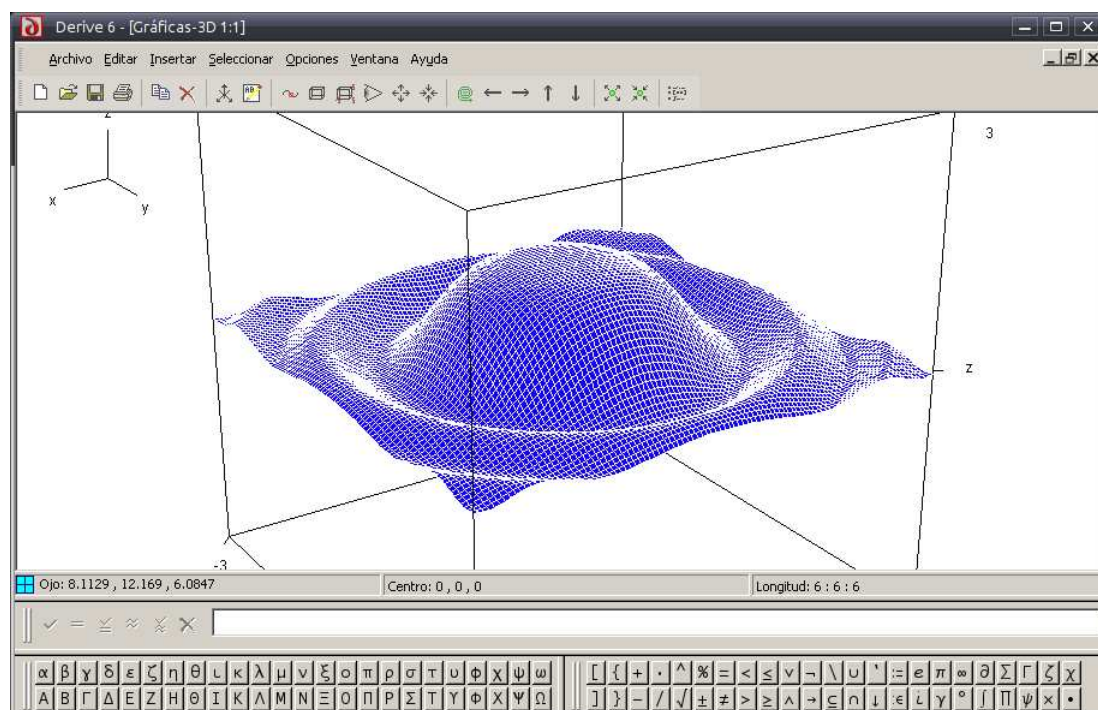


Figura 1.7 – Ventana de gráficas en 3 dimensiones.

Funciones Elementales

1 Fundamentos teóricos

En esta práctica se introducen los conceptos básicos sobre funciones reales de variable real, esto es, funciones

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}.$$

1.1 Dominio e imagen

El *Dominio* de la función f es el conjunto de los números reales x para los que existe $f(x)$ y se designa mediante $\text{Dom } f$.

La *Imagen* de f es el conjunto de los números reales y para los que existe algún $x \in \mathbb{R}$ tal que $f(x) = y$, y se denota por $\text{Im } f$.

1.2 Signo y crecimiento

El *signo* de la función es positivo (+) en los valores de x para los que $f(x) > 0$ y negativo (−) en los que $f(x) < 0$. Los valores de x en los que la función se anula se conocen como *raíces* de la función.

Una función $f(x)$ es *creciente* en un intervalo I si $\forall x_1, x_2 \in I$ tales que $x_1 < x_2$ se verifica que $f(x_1) \leq f(x_2)$.

Del mismo modo, se dice que una función $f(x)$ es *decreciente* en un intervalo I si $\forall x_1, x_2 \in I$ tales que $x_1 < x_2$ se verifica que $f(x_1) \geq f(x_2)$. En la figura 2.1 se muestran estos conceptos.

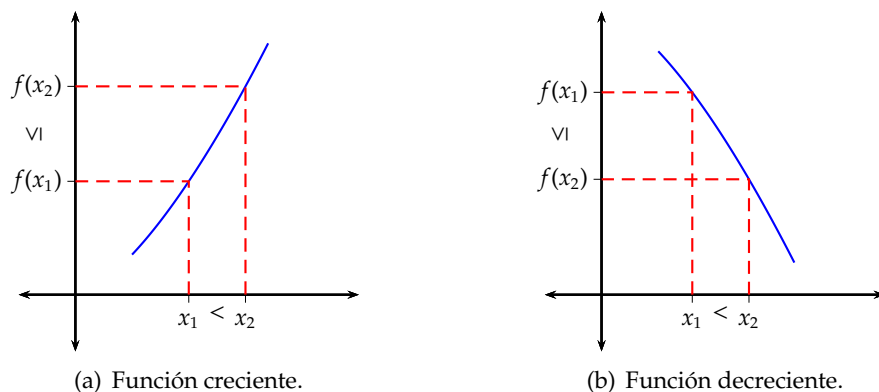


Figura 2.1 – Crecimiento de una función.

1.3 Extremos Relativos

Una función $f(x)$ tiene un *máximo relativo* en x_0 si existe un entorno A de x_0 tal que $\forall x \in A$ se verifica que $f(x) \leq f(x_0)$.

Una función $f(x)$ tiene un *mínimo relativo* en x_0 si existe un entorno A de x_0 tal que $\forall x \in A$ se verifica que $f(x) \geq f(x_0)$.

Diremos que la función $f(x)$ tiene un *extremo relativo* en un punto si tiene un *máximo o mínimo relativo* en dicho punto. Estos conceptos se muestran en la figura 2.2.

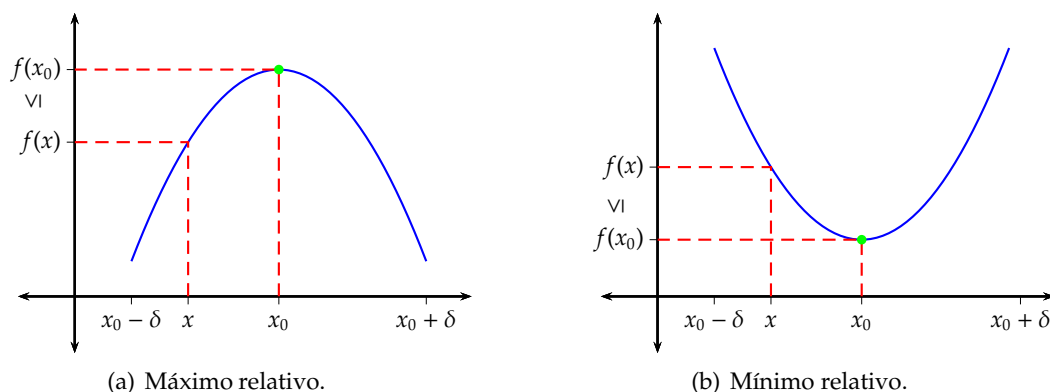


Figura 2.2 – Extremos relativos de una función.

Una función $f(x)$ está *acotada superiormente* si $\exists K \in \mathbb{R}$ tal que $f(x) \leq K \forall x \in \text{Dom } f$. Análogamente, se dice que una función $f(x)$ está *acotada inferiormente* si $\exists K \in \mathbb{R}$ tal que $f(x) \geq K \forall x \in \text{Dom } f$.

Una función $f(x)$ está *acotada* si lo está superior e inferiormente, es decir si $\exists K \in \mathbb{R}$ tal que $|f(x)| \leq K \forall x \in \text{Dom } f$.

1.4 Concavidad

De forma intuitiva se puede decir que una función $f(x)$ es *cóncava* en un intervalo I si $\forall x_1, x_2 \in I$, el segmento de extremos $(x_1, f(x_1))$ y $(x_2, f(x_2))$ queda por encima de la gráfica de f .

Análogamente se dirá que es *convexa* si el segmento anterior queda por debajo de la gráfica de f .

Diremos que la función $f(x)$ tiene un *punto de inflexión* en x_0 si en ese punto la función pasa de cóncava a convexa o de convexa a cóncava. Estos conceptos se ilustran en la figura 2.3.

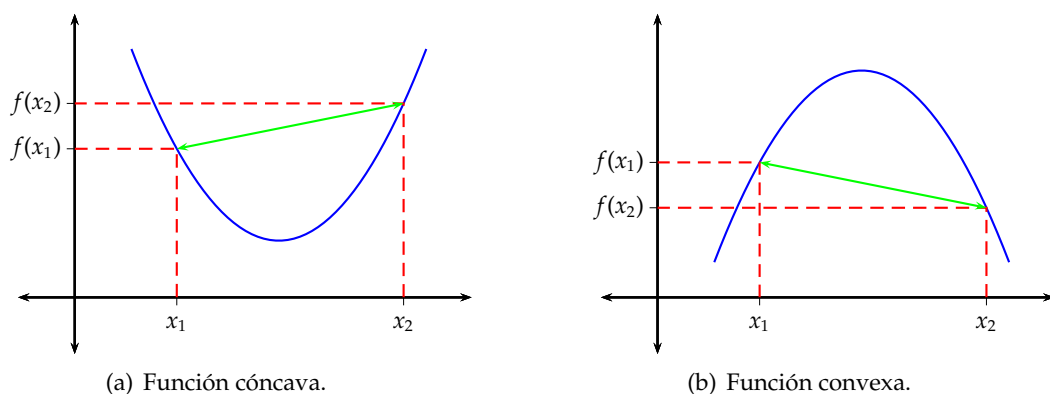


Figura 2.3 – Concavidad de una función.

1.5 Asíntotas

La recta $x = a$ es una *asíntota vertical* de la función $f(x)$ si al menos uno de los límites laterales de $f(x)$ cuando x tiende hacia a es $+\infty$ o $-\infty$, es decir cuando se verifique alguna de las siguientes igualdades

$$\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = \pm\infty \quad \text{o} \quad \lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = \pm\infty$$

La recta $y = b$ es una *asíntota horizontal* de la función $f(x)$ si alguno de los límites de $f(x)$ cuando x tiende hacia $+\infty$ o $-\infty$ es igual a b , es decir cuando se verifique

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = b \quad \text{o} \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = b$$

La recta $y = mx + n$ es una *asíntota oblicua* de la función $f(x)$ si alguno de los límites de $f(x) - (mx + n)$ cuando x tiende hacia $+\infty$ o $-\infty$ es igual a 0, es decir si

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} (f(x) - mx) = n \quad \text{o} \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} (f(x) - mx) = n$$

En la figura 2.4 se muestran los distintos tipos de asíntotas.

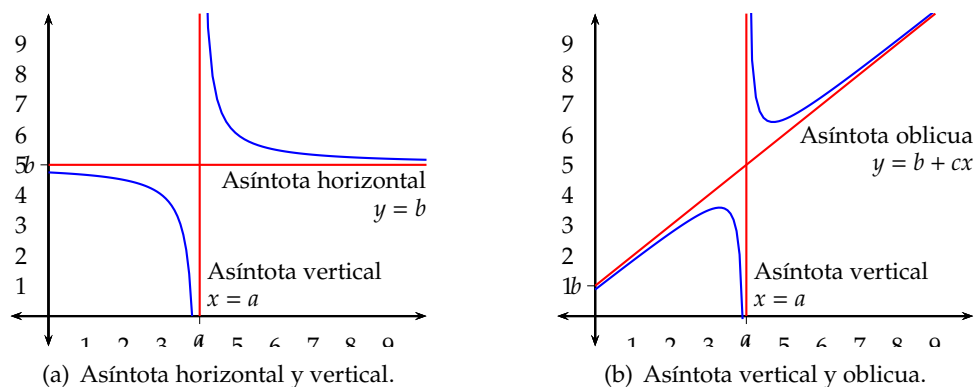


Figura 2.4 – Tipos de asíntotas de una función.

1.6 Periodicidad

Una función $f(x)$ es *periódica* si existe $h \in \mathbb{R}^+$ tal que

$$f(x + h) = f(x) \quad \forall x \in \text{Dom } f$$

siendo el período T de la función, el menor valor h que verifique la igualdad anterior.

En una función periódica, por ejemplo $f(x) = A \sin(\omega t)$, se denomina *amplitud* al valor de A , y es la mitad de la diferencia entre los valores máximos y mínimos de la función. En la figura 2.5 se ilustran estos conceptos.

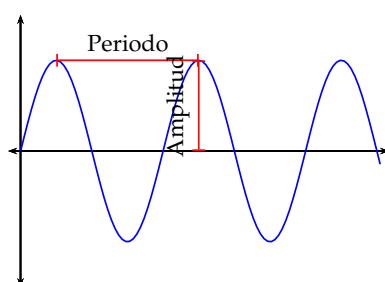


Figura 2.5 – Periodo y amplitud de una función periódica.

2 Ejercicios resueltos

1. Se considera la función

$$f(t) = \frac{t^4 + 19 \cdot t^2 - 5}{t^4 + 9 \cdot t^2 - 10}.$$

Se pide:

a) Representarla gráficamente y determinar a partir de dicha representación:

1) Dominio.



a' Para representarla, podemos definir la función en la línea de editor (o introducirla directamente, sin generar una definición), y posteriormente utilizamos el botón Ventana 2D para pasar a la ventana de gráficas 2D, y allí pinchamos en el botón Representar Expresión).

b' Una vez en la Ventana 2D, y ya que vamos a trabajar con la gráfica de la función durante todo el ejercicio, probablemente convenga el Modo de Trazar, en el que el cursor se desplaza a lo largo de la gráfica. Para ello pinchar en el botón Trazar las Gráficas.

c' Para determinar el dominio tan sólo hay que determinar los valores de x en los que existe la función.

d' Recordar que, tanto para éste como para el resto de los apartados del ejercicio, pretendemos llegar a conclusiones aproximadas que tan sólo sacamos del análisis de la gráfica.

2) Imagen.



Fijarse en los valores de la variable y hasta los que llega la función.

3) Asíntotas.



Son las líneas rectas, ya sea horizontales, verticales u oblicuas, hacia las que tiende la función.

4) Raíces.



Son los valores de la variable x , si los hay, en los que la función vale 0.

5) Signo.



Hay que determinar, aproximadamente, por un lado los intervalos de variable x en los que la función es positiva, y por el otro aquellos en los que es negativa.

6) Intervalos de crecimiento y decrecimiento.



De nuevo, por un lado hay que determinar los intervalos de variable x en los que a medida que crece x también lo hace y , que serían los intervalos de crecimiento, y también aquellos otros en los que a medida que crece x decrece y , que serían los intervalos de decrecimiento.

7) Intervalos de concavidad y convexidad.



Para los intervalos de concavidad y convexidad, nos fijamos en el segmento de línea recta que une dos puntos cualquiera del intervalo. Si dicho segmento queda por encima de la gráfica, entonces la función es cóncava en el intervalo, mientras que si queda por debajo, entonces es convexa en el mismo.

8) Extremos relativos.



Determinamos, aproximadamente, los puntos en los que se encuentran los máximos y mínimos relativos de la función.

9) Puntos de inflexión.



Determinamos, aproximadamente, los puntos en los que la función cambia de curvatura, de cóncava a convexa o a la inversa.

2. Representar en una misma gráfica las funciones $2^x, e^x, 0,7^x, 0,5^x$. A la vista de las gráficas obtenidas, indicar cuáles de las funciones anteriores son crecientes y cuáles son decrecientes.



Aunque podríamos representar en una misma gráfica todas las funciones dadas a la vez (sin más que introducir sus expresiones, marcar todas ellas, irnos a la ventana 2D, y pinchando en el botón Representar Expresiones), más bien conviene representar las funciones una a una, y utilizar el botón Insertar Anotación para asignar a cada una de las gráficas una pequeña anotación que nos ayude a distinguirla de las demás. Si desactivamos el modo de trazado y pasamos al modo habitual en el que podemos situarnos con el cursor en cualquier punto de la gráfica, podemos trasladar la anotación desde la posición inicialmente escogida para su ubicación en cualquier otro punto de la gráfica, sin más que pinchar con el ratón en la anotación, y, manteniendo pulsado el mismo, arrastrar hasta la nueva ubicación.

¿En general, para qué valores de a será la función creciente? ¿Y para qué valores de a será decreciente? Probar con distintos valores de a representando gráficamente nuevas funciones si fuera necesario.

3. Representar en una misma gráfica las funciones siguientes, indicando su período y amplitud.

a) $\sin x$, $\sin x + 2$, $\sin(x + 2)$.

b) $\sin 2x$, $2 \sin x$, $\sin \frac{x}{2}$.



De nuevo, en ambos apartados conviene representar las funciones una a una, e incluir anotaciones que nos hagan recordar a qué función corresponde cada gráfica.

4. Representar en una gráfica la función

$$f(x) = \begin{cases} -2x & \text{si } x \leq 0; \\ x^2 & \text{si } x > 0. \end{cases}$$



Para representar funciones a trozos, Derive utiliza una función predefinida llamada chi. La sintaxis de esta función es CHI (a, x, b), donde a u b son los límites de un intervalo, y x es la variable de la

función, y se define cómo:

$$\text{CHI}(a, x, b) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a \\ 1 & \text{si } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{si } x > b \end{cases}$$

Según esto, para representar la función anterior, habría que introducir la expresión

$$-2x \text{CHI}(-\text{inf}, x, 0) + x^2 \text{CHI}(0, x, \text{inf})$$

¡Cuidado! a pesar de que la función CHI es una función interna del programa, y que, por tanto, debería permitir que se introdujese en mayúsculas o en minúsculas indistintamente, al intentar introducirla en minúsculas da errores. Por ello, es conveniente, y puede que incluso indispensable, introducirla en mayúsculas.

3 Ejercicios propuestos

1. Hallar el dominio de las siguientes funciones a partir de sus representaciones gráficas:

a) $f(x) = \frac{x^2 + x + 1}{x^3 - x}$

b) $g(x) = \sqrt[3]{x^4 - 1}$.

c) $h(x) = \cos \frac{x+3}{x^2+1}$.

d) $l(x) = \arcsen \frac{x}{1+x}$.

2. Se considera la función

$$f(x) = \frac{x^3 + x + 2}{5x^3 - 9x^2 - 4x + 4}.$$

Representarla gráficamente y determinar a partir de dicha representación:

- a) Dominio.
 - b) Imagen.
 - c) Asíntotas.
 - d) Raíces.
 - e) Signo.
 - f) Intervalos de crecimiento y decrecimiento.
 - g) Intervalos de concavidad y convexidad.
 - h) Extremos relativos.
 - i) Puntos de inflexión.
3. Representar en una misma gráfica las funciones $\log_{10} x$, $\log_2 x$, $\log x$, $\log_{0,5} x$.
 - a) A la vista de las gráficas obtenidas, indicar cuáles de las funciones anteriores son crecientes y cuáles son decrecientes.
 - b) Determinar, a partir de los resultados obtenidos, o representando nuevas funciones si fuera necesario, para qué valores de a será creciente la función $\log_a x$.

CÁLCULO CON DERIVE

- c) Determinar, a partir de los resultados obtenidos, o representando nuevas funciones si fuera necesario, para qué valores de a será decreciente la función $\log_a x$.
4. Completar las siguientes frases con la palabra igual, o el número de veces que sea mayor o menor en cada caso:
- a) La función $\cos 2x$ tiene un período..... que la función $\cos x$.
 - b) La función $\cos 2x$ tiene una amplitud..... que la función $\cos x$.
 - c) La función $\cos \frac{x}{2}$ tiene un período..... que la función $\cos 3x$.
 - d) La función $\cos \frac{x}{2}$ tiene una amplitud..... que la función $\cos 3x$.
 - e) La función $3 \cos 2x$ tiene un período..... que la función $\cos \frac{x}{2}$.
 - f) La función $3 \cos 2x$ tiene una amplitud..... que la función $\cos \frac{x}{2}$.
5. Hallar a partir de la representación gráfica, las soluciones de $e^{-1/x} = \frac{1}{x}$.
6. Representar en una gráfica la función

$$f(x) = \begin{cases} x^3 & \text{si } x < 0 \\ e^x - 1 & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$$

Límites y Continuidad

1 Fundamentos teóricos

En esta práctica se introducen los conceptos de límite y continuidad de una función real, ambos muy relacionados.

1.1 Límite de una función en un punto

El concepto de límite está muy relacionado con el de proximidad y tendencia de una serie de valores. De manera informal, diremos que $l \in \mathbb{R}$ es el *límite* de una función $f(x)$ en un punto $a \in \mathbb{R}$, si $f(x)$ tiende o se aproxima cada vez más a l , a medida que x se aproxima a a , y se escribe

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = l.$$

Si lo que nos interesa es la tendencia de $f(x)$ cuando nos aproximamos al punto a sólo por un lado, hablamos de *límites laterales*. Diremos que l es el *límite por la izquierda* de una función $f(x)$ en un punto a , si $f(x)$ tiende o se aproxima cada vez más a l , a medida que x se aproxima a a por la izquierda, es decir con valores $x < a$, y se denota por

$$\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = l.$$

Del mismo modo, diremos que l es el *límite por la derecha* de una función $f(x)$ en un punto a , si $f(x)$ tiende o se aproxima cada vez más a l , a medida que x se aproxima a a por la derecha, es decir con valores $x > a$, y se denota por

$$\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = l.$$

Por supuesto, para que exista el límite global de la función $f(x)$ en el punto a , debe existir tanto el límite por la izquierda, como el límite por la derecha, y ser iguales, es decir

$$\left. \begin{array}{l} \lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = l \\ \lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = l \end{array} \right\} \Rightarrow \lim_{x \rightarrow a} f(x) = l.$$

1.2 Álgebra de límites

Para el cálculo práctico de límites, se utiliza el siguiente teorema, conocido como Teorema de *Álgebra de Límites*.

Dadas dos funciones $f(x)$ y $g(x)$, tales que $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = l_1$ y $\lim_{x \rightarrow a} g(x) = l_2$, entonces se cumple que:

1. $\lim_{x \rightarrow a} (f(x) \pm g(x)) = l_1 \pm l_2$.
2. $\lim_{x \rightarrow a} (f(x) \cdot g(x)) = l_1 \cdot l_2$.
3. $\lim_{x \rightarrow a} \frac{f(x)}{g(x)} = \frac{l_1}{l_2}$ si $l_2 \neq 0$.

1.3 Asíntotas

Como interpretación geométrica de los límites, definiremos rectas particulares a las que tiende (se “pega”) la gráfica de una función cuando la variable tiende a un cierto valor, finito o infinito.

Asíntotas verticales

La recta $x = a$ es una *Asíntota Vertical* de la función $f(x)$ si al menos uno de los límites laterales de f en a es $+\infty$ ó $-\infty$. Es decir:

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = \pm\infty$$

Asíntotas Horizontales

La recta $y = b$ es una *Asíntota Horizontal* de la función $f(x)$ si se cumple:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = b \quad \text{ó} \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} f(x) = b$$

Asíntotas Oblicuas

La recta $y = mx + n$, donde $m \neq 0$, es *Asíntota Oblicua* de la función $f(x)$ si:

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - (mx + n)] = 0 \quad \text{ó} \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) - (mx + n)] = 0$$

La determinación práctica de m y n se realiza del siguiente modo:

$$m = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{f(x)}{x}$$

$$n = \lim_{x \rightarrow +\infty} [f(x) - mx]$$

o bien lo mismo con los límites en $-\infty$:

$$m = \lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{f(x)}{x}$$

$$n = \lim_{x \rightarrow -\infty} [f(x) - mx]$$

En cualquiera de los casos, si obtenemos un valor real para m (no puede ser ni $+\infty$ ni $-\infty$) distinto de 0, procedemos después a calcular n , que también debe ser real (sí que puede ser 0).

Si $m = \pm\infty$ entonces la función crece (decrece) más deprisa que cualquier recta, y si $m = 0$ la función crece (decrece) más despacio que cualquier recta, y en cualquiera de los dos casos decimos que la función tiene una *Rama Parabólica*.

1.4 Continuidad de una función en un punto

Diremos que una función $f(x)$ es continua en un punto $a \in \mathbb{R}$, si se cumple

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a),$$

donde $f(a) \in \mathbb{R}$.

La definición anterior implica a su vez que se cumplan estas tres condiciones:

- Existe el límite de f en $x = a$.
- La función está definida en $x = a$; es decir, existe $f(a)$.

- Los dos valores anteriores coinciden.

Si la función f no es continua en $x = a$, diremos que es *discontinua* en el punto a , o bien que f tiene una *discontinuidad* en a .

Intuitivamente, una función es continua cuando puede dibujarse su gráfica sin levantar el lápiz.

Continuidad lateral en un punto

Si nos restringimos a los valores que toma una función a la derecha de un punto $x = a$, o a la izquierda, se habla de continuidad por la derecha o por la izquierda según la siguiente definición.

Una función es *continua por la derecha* en un punto $x = a$, y lo notaremos como f continua en a^+ , si existe el límite por la derecha en dicho punto y coincide con el valor de la función en el mismo:

$$\lim_{x \rightarrow a^+} f(x) = f(a)$$

De igual manera, la función es *continua por la izquierda* en un punto $x = a$, y lo notaremos como f continua en a^- , si existe el límite por la izquierda en dicho punto y coincide con el valor de la función en el mismo:

$$\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = f(a)$$

Propiedades de la continuidad en un punto

Como consecuencia de la definición de continuidad en un punto, podrían demostrarse toda una serie de teoremas, algunos de ellos especialmente importantes.

- **Álgebra de funciones continuas.** Si f y g son funciones continuas en $x = a$, entonces $f \pm g$ y $f \cdot g$ son también continuas en $x = a$. Si además $g(a) \neq 0$, entonces f/g también es continua en $x = a$.
- **Continuidad de funciones compuestas.** Si f es continua en $x = a$ y g es continua en $b = f(a)$, entonces la función compuesta $g \circ f$ es continua en $x = a$.
- **Continuidad y cálculo de límites.** Sean f y g dos funciones tales que existe $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = l \in \mathbb{R}$ y g es una función continua en l . Entonces:

$$\lim_{x \rightarrow a} g(f(x)) = g(l)$$

Tipos de discontinuidades

Puesto que la condición de continuidad puede no satisfacerse por distintos motivos, existen distintos tipos de discontinuidades:

- **Discontinuidad evitable.** Se dice que $f(x)$ tiene una *discontinuidad evitable* en el punto a , si existe el límite de la función pero no coincide con el valor de la función en el punto (bien porque sea diferente, bien por que la función no esté definida en dicho punto), es decir

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = l \neq f(a).$$

- **Discontinuidad de salto.** Se dice que $f(x)$ tiene una *discontinuidad de salto* en el punto a , si existe el límite de la función por la izquierda y por la derecha pero son diferentes, es decir,

$$\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = l_1 \neq l_2 = \lim_{x \rightarrow a^+} f(x).$$

A la diferencia entre ambos límites $l_1 - l_2$, se le llama *amplitud del salto*.

- **Discontinuidad esencial.** Se dice que $f(x)$ tiene una *discontinuidad esencial* en el punto a , si no existe alguno de los límites laterales de la función.

2 Ejercicios resueltos

1. Dada la función

$$f(x) = \left(1 + \frac{2}{x}\right)^{x/2},$$

se pide:

a) Dibujar su gráfica, y a la vista de misma conjeturar el resultado de los siguientes límites:

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1) $\lim_{x \rightarrow -\infty} f(x)$ | 4) $\lim_{x \rightarrow -2^+} f(x)$ |
| 2) $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x)$ | 5) $\lim_{x \rightarrow 2} f(x)$ |
| 3) $\lim_{x \rightarrow -2^-} f(x)$ | 6) $\lim_{x \rightarrow 0} f(x)$ |



- 1) Para representar la gráfica de la función, introducir su expresión, acceder a la ventana 2D, y pinchar en el botón Representar Expresión. Probablemente haya que cambiar la escala de la representación original pinchando en el botón de Zoom hacia fuera en ambos ejes, para tener una perspectiva más amplia de la forma de la función.
- 2) Para predecir cuáles pueden ser los valores de los límites pedidos, observar hacia qué valores tiende la función cuando la variable x se acerca al valor que aparece en cada límite. Para ello, puede resultar conveniente pinchar en el botón Trazar gráficas, para que el cursor sólo pueda desplazarse a lo largo de la misma.

b) Calcular los límites anteriores. ¿Coinciden los resultados con los conjeturados?



- 1) Utilizar el menú Cálculo ▶ Límites, o su correspondiente botón de la barra de botones.
- 2) En el cuadro de diálogo que aparece, seleccionar tanto la variable del límite como el punto en el que queremos calcularlo, y la tendencia (izquierda, derecha, o ambas).

2. Dada la función

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{x-2} & \text{si } x \leq 0; \\ \frac{x^2}{2x-6} & \text{si } x > 0; \end{cases}$$

a) Dibujar la gráfica de f y determinar gráficamente si existen asíntotas.



- 1) Introducir la expresión $f(x) := x/(x-2) \text{ CHI}(-\text{inf}, x, 0) + x^2/(2x-6) \text{ CHI}(0, x, \text{inf})$ en la ventana de Álgebra y seleccionarla.
- 2) Abrir una nueva ventana de gráficos en 2D con el menú Ventana ▶ Nueva Ventana 2D y seleccionar el menú Ventana -> Mosaico Vertical para ver la ventana de Álgebra y la de gráficos al mismo tiempo.
- 3) Hacer clic en el botón Representar Expresión en la ventana gráfica.

b) Calcular las asíntotas verticales de f .



El único punto donde la función no está definida es $x = 3$. Para ver si existe asíntota vertical en ese punto hay que calcular el límite en el punto.

- 1) Seleccionar el nombre de la función en la ventana de Álgebra.

- 2) Seleccionar el menú Cálculo • Límites o hacer clic en el botón Límites.
- 3) En el cuadro de diálogo que aparece introducir 3 en el campo Punto, seleccionar la opción Izquierda en la lista Tendiendo por y hacer clic en el botón Simplificar.
- 4) Repetir los tres pasos anteriores pero seleccionando la opción Derecha en la lista Tendiendo por.
- 5) Comprobar si el resultado tiene sentido mirando la gráfica.

Existe una asíntota vertical en $x = 3$ si alguno de los límites es infinito. En tal caso, introducir la expresión de la asíntota en la ventana de Álgebra y hacer clic en el botón Representar expresión de la ventana gráfica.

c) Calcular las asíntotas horizontales de f .



Para ver si existen asíntotas horizontales hay que calcular los límites en infinito.

- 1) Seleccionar el nombre de la función en la ventana de Álgebra.
- 2) Seleccionar el menú Cálculo • Límites o hacer clic en el botón Limite.
- 3) En el cuadro de diálogo que aparece introducir $-\infty$ en el campo Punto y hacer clic en el Simplificar.
- 4) Repetir los tres pasos anteriores pero introduciendo ∞ en el campo Punto.
- 5) Comprobar si el resultado tiene sentido mirando la gráfica.

Existe una asíntota horizontal $y = a$ si alguno de los límites es a . En tal caso, introducir la expresión de la asíntota en la ventana de Álgebra y hacer clic en el botón Representar expresión de la ventana gráfica.

d) Calcular las asíntotas oblicuas de f .



Para ver si existen asíntotas oblicuas hay que calcular el límite en infinito de la función dividida por x . Para ver si existe asíntota oblicua en $-\infty$, seguir los pasos siguientes:

- 1) Introducir la expresión $f(x)/x$ en la ventana de Álgebra y seleccionarla.
- 2) Seleccionar el menú Cálculo • Límites o hacer clic en el botón Limite.
- 3) En el cuadro de diálogo que aparece introducir $-\infty$ en el campo Punto y hacer clic en el Simplificar.

Existe asíntota oblicua $y = ax + b$ si el resultado del límite es a . En tal caso a es la pendiente de la asíntota. Para obtener el término independiente hay que calcular el límite en infinito de la función menos ax .

- 1) Introducir la expresión $f(x) - ax$, donde a es el valor del límite anterior, en la ventana de Álgebra y seleccionarla.
- 2) Seleccionar el menú Cálculo • Límites o hacer clic en el botón Limite.
- 3) En el cuadro de diálogo que aparece introducir $-\infty$ en el campo Punto y hacer clic en el Simplificar.

El término independiente de la asíntota oblicua es el resultado del límite.

Para ver si hay asíntota oblicua en ∞ repetir todos los pasos pero introduciendo ∞ en el campo Punto.

Si existe alguna asíntota oblicua introducir la expresión de la asíntota en la ventana de Álgebra y hacer clic en el botón Representar expresión de la ventana gráfica.

3. Clasificar las discontinuidades de las siguientes funciones en los puntos que se indica.

$$a) f(x) = \frac{\operatorname{sen} x}{x} \text{ en } x = 0.$$

$$b) g(x) = \frac{1}{2^{1/x}} \text{ en } x = 0.$$

$$c) h(x) = \frac{1}{1 + e^{\frac{1}{1-x}}} \text{ en } x = 1.$$



Para clasificar las discontinuidades en los puntos que se indican, además de definir cada una de las funciones, conviene representar su gráfica, lo cual, aunque no sirve para demostrar la presencia de una discontinuidad, sí que nos puede dar una idea sobre las discontinuidades presentes y su tipo (las discontinuidades evitables apenas aparecen visibles en la gráfica, aunque sí que Derive deja un pequeño hueco en la misma):

- a) Calcular el valor del límite en el punto. Para ello, se puede utilizar el botón Calcular un límite de la barra de botones, y activar la tendencia por Ambas en el cuadro de diálogo que aparece. Si dicho límite existe, entonces la discontinuidad es evitable.
- b) Si el límite no existe, puede que sí que existan los laterales. Para calcularlos utilizar el botón Calcular un límite y activar la tendencia por la Izquierda y luego por la Derecha. Si ambos límites laterales existen pero no son iguales, la discontinuidad será de salto.
- c) Si alguno de los límites laterales no existe, entonces la discontinuidad es esencial.

4. Hallar los puntos de discontinuidad y estudiar el carácter de dichas discontinuidades en la función:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x+1}{x^2-1}, & \text{si } x < 0; \\ \frac{1}{e^{1/(x^2-1)}}, & \text{si } x \geq 0. \end{cases}$$



- a) Para delimitar los posibles puntos de discontinuidad, previamente definir la función teniendo en cuenta que se trata de una función definida a trozos. Por lo tanto, habrá que multiplicar el primer tramo por $\text{CHI}(\infty, x, 0)$, y el segundo por $\text{CHI}(0, x, \infty)$.
- b) Aunque no sirve para demostrar la presencia o no de una discontinuidad, si representamos la gráfica de la función podemos darnos una idea sobre los puntos en los que aparecen las discontinuidades, teniendo muy presente que las discontinuidades evitables apenas resultan visibles en la gráfica, aunque sí que Derive deja un pequeño hueco en la misma.
- c) Una vez definida la función, hay que encontrar los puntos que quedan fuera del dominio de cada uno de los tramos. Para ello, hay que analizar dónde se anulan los denominadores presentes en las definiciones de ambos tramos. Por ejemplo, si $x < 0$, el denominador $x^2 - 1$ se anula en $x = \pm 1$; sin embargo tan sólo nos interesa $x = -1$ ya que la definición impone que $x < 0$.
- d) Cuando ya hemos descubierto cuáles son los puntos que están fuera del dominio, y por tanto son discontinuidades de la función, hay que analizar cual es su tipo. Para ello, aplicamos el mismo proceso que en el ejercicio anterior (vemos si existe el límite, con lo cual sería discontinuidad evitable, y si no existe analizamos los laterales para ver si es discontinuidad de salto; si no existe alguno de los laterales es discontinuidad esencial).
- e) Por último, también hay que analizar los puntos en los que hay un cambio de definición de la función. En nuestro caso, en $x = 0$, y, de nuevo, analizando el límite general y los límites laterales.

3 Ejercicios propuestos

1. Calcular los siguientes límites si existen:

$$a) \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x^3 - 3x + 2}{x^4 - 4x + 3}.$$

$$b) \lim_{x \rightarrow a} \frac{\operatorname{sen} x - \operatorname{sen} a}{x - a}.$$

$$c) \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x^2 - 3x + 2}{e^{2x}}.$$

$$d) \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{\log(x^2 - 1)}{x + 2}.$$

$$e) \lim_{x \rightarrow 1} \frac{\log(1/x)}{\operatorname{tg}(x + \frac{\pi}{2})}.$$

$$f) \lim_{x \rightarrow a} \frac{x^n - a^n}{x - a} \quad n \in \mathbb{N}.$$

$$g) \lim_{x \rightarrow 1} \frac{\sqrt[n]{x} - 1}{\sqrt[m]{x} - 1} \quad n, m \in \mathbb{Z}.$$

$$h) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{\operatorname{tg} x - \operatorname{sen} x}{x^3}.$$

$$i) \lim_{x \rightarrow \pi/4} \frac{\operatorname{sen} x - \cos x}{1 - \operatorname{tg} x}.$$

$$j) \lim_{x \rightarrow 0} x^2 e^{1/x^2}.$$

$$k) \lim_{x \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{a}{x}\right)^x.$$

$$l) \lim_{x \rightarrow \infty} \sqrt[n]{x^2}.$$

$$m) \lim_{x \rightarrow 0} \left(\frac{1}{x}\right)^{\operatorname{tg} x}.$$

$$n) \lim_{x \rightarrow 0} (\cos x)^{1/\operatorname{sen} x}.$$

$$\tilde{n}) \lim_{x \rightarrow 0} \frac{6}{4 + e^{-1/x}}.$$

$$o) \lim_{x \rightarrow \infty} (\sqrt{x^2 + x + 1} - \sqrt{x^2 - 2x - 1}).$$

$$p) \lim_{x \rightarrow \pi/2} \sec x - \operatorname{tg} x.$$

2. Dada la función:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x^2 + 1}{x + 3} & \text{si } x < 0 \\ \frac{1}{e^{1/(x^2 - 1)}} & \text{si } x \geq 0 \end{cases}$$

Calcular todas sus asíntotas.

3. Las siguientes funciones no están definidas en $x = 0$. Determinar, cuando sea posible, su valor en dicho punto de modo que sean continuas.

$$a) f(x) = \frac{(1+x)^n - 1}{x}.$$

$$b) h(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{x}.$$

$$c) j(x) = \frac{\log(1+x) - \log(1-x)}{x}.$$

$$d) k(x) = x^2 \operatorname{sen} \frac{1}{x}.$$

Derivadas de funciones de una variable

1 Fundamentos teóricos

El concepto de derivada es uno de los más importantes del Cálculo pues resulta de gran utilidad en el estudio de funciones y tiene multitud de aplicaciones. En esta práctica introducimos este concepto y presentamos algunas de sus aplicaciones, tanto en funciones de una como de varias variables.

1.1 Tasas de variación media e instantánea. La derivada

Cuando queremos conocer la variación que experimenta una función real $f(x)$ en un intervalo $[a, b]$, se calcula la diferencia $f(b) - f(a)$ que se conoce como *incremento* de f , y se nota $\Delta f[a, b]$, aunque, a veces, simplemente se escribe Δf .

En muchas otras ocasiones veces resulta importante comparar la variación que experimenta la función f con relación a la variación que experimenta su argumento x en un intervalo $[a, b]$. Si tenemos en cuenta que $b = a + \Delta x$, esto viene dado por la *tasa de variación media*, que se define como:

$$\text{TVM}f[a, b] = \text{TVM}f[a, a + \Delta x] = \frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{f(b) - f(a)}{b - a} = \frac{f(a + \Delta x) - f(a)}{\Delta x}.$$

También resulta muy común llamar a Δx con la letra h , por lo que la expresión anterior queda de la forma:

$$\text{TVM}f[a, b] = \text{TVM}f[a, a + h] = \frac{\Delta f}{\Delta x} = \frac{f(a + h) - f(a)}{h}.$$

Desde el punto de vista geométrico, la tasa de variación media de f en el intervalo $[a, a + \Delta x]$ es la pendiente de la recta secante a f en los puntos $(a, f(a))$ y $(a + \Delta x, f(a + \Delta x))$, tal y como se muestra en la figura 4.1.

Y, a veces, incluso más importante que la tasa de variación media, es estudiar la tasa de variación que experimenta la función, no en un intervalo, sino en un punto, tomando para ello límites cuando el incremento en la variable independiente tiende 0. Definimos la tasa de variación de una función en un punto a , o también tasa de variación instantánea, a partir de la tasa de variación media de la función en el intervalo $[a, a + \Delta x]$. Dicha tasa, si existe, recibe el nombre de *derivada* de la función real $f(x)$ en un punto $a \in \mathbb{R}$, y se nota como $f'(a)$, o bien $\frac{df}{dx}(a)$:

$$f'(a) = \frac{df}{dx}(a) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta f}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(a + \Delta x) - f(a)}{\Delta x} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a + h) - f(a)}{h}.$$

Cuando este límite existe, se dice que la función f es *derivable* o *diferenciable* en el punto a .

Geoméricamente, $f'(a)$ es la pendiente de la recta tangente a la curva de $f(x)$ en el punto $(a, f(a))$, tal y como se aprecia en la figura 4.2.

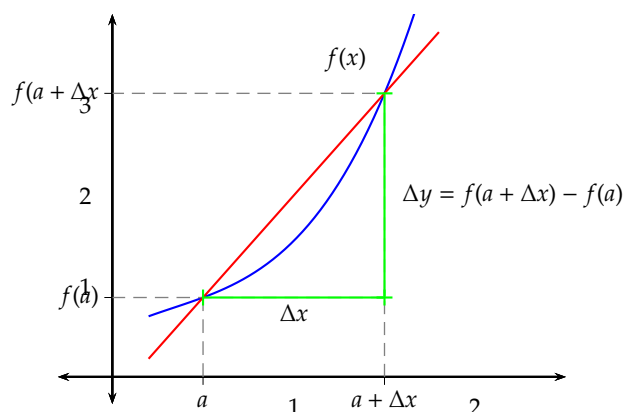


Figura 4.1 – La tasa de variación media como la pendiente de la recta secante a una función en dos puntos.

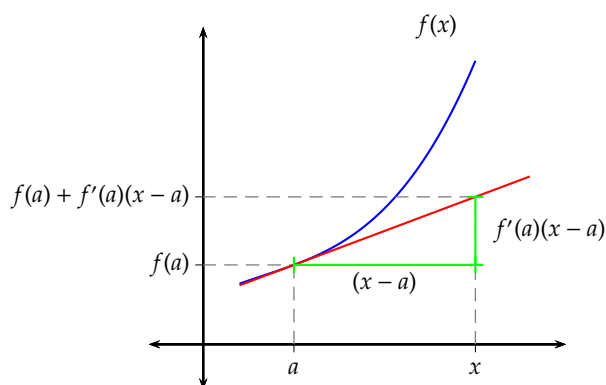


Figura 4.2 – La derivada como la pendiente de la recta tangente a una función en un punto.

Recta tangente y normal a una función en un punto

De la gráfica anterior, fácilmente se deduce que la ecuación de la recta tangente a una función $f(x)$ en el punto $(a, f(a))$ es:

$$y = f(a) + f'(a)(x - a).$$

Y teniendo en cuenta que la pendiente de la recta normal (recta perpendicular a la recta tangente) es la inversa cambiada de signo, la ecuación de la recta normal a $f(x)$ en el punto $(a, f(a))$ es:

$$y = f(a) - \frac{1}{f'(a)}(x - a).$$

1.2 Función derivada y derivadas sucesivas

El límite que nos sirve para calcular la derivada de una función en un punto, define una nueva función f' cuyo dominio está formado por los puntos en los que f es diferenciable. La función $f'(x)$, o también $\frac{df}{dx}$, se llama *primera derivada* de f .

4. Derivadas de funciones de una variable

Puesto que f' es una función, puede derivarse a su vez, y la primera derivada de f' se conoce como segunda derivada de f , y se nota $f''(x)$ o $\frac{d^2f}{dx^2}$. Análogamente, la n -ésima derivada de f , designada por $f^{(n)}$ o $\frac{d^n f}{dx^n}$, es la primera derivada de $f^{(n-1)}$, para $n = 2, 3, \dots$, es decir

$$\frac{d^n f}{dx^n} = \frac{d}{dx} \left(\frac{d^{n-1} f}{dx^{n-1}} \right) \quad n = 2, 3, \dots$$

1.3 Estudio del crecimiento de una función

Una función $f(x)$ es *creciente* en un intervalo I si $\forall x_1, x_2 \in I$ tales que $x_1 < x_2$ se verifica que $f(x_1) \leq f(x_2)$.

Del mismo modo, se dice que una función $f(x)$ es *decreciente* en un intervalo I si $\forall x_1, x_2 \in I$ tales que $x_1 < x_2$ se verifica que $f(x_1) \geq f(x_2)$. En la figura 4.3 se muestran estos conceptos.

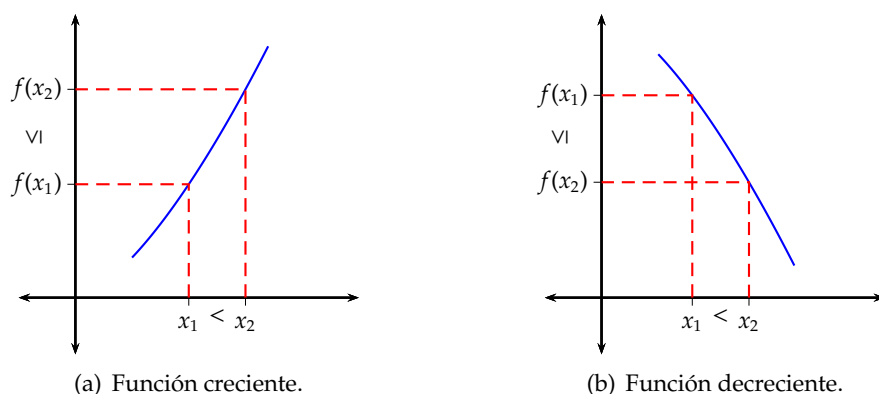


Figura 4.3 – Crecimiento de una función.

Si f es una función derivable en el intervalo I , el signo de la derivada puede utilizarse para estudiar el crecimiento de la función ya que se cumple:

- f es creciente en $x_0 \in I$, si y sólo si, $f'(x_0) \geq 0$.
- f es decreciente en $x_0 \in I$, si y sólo si, $f'(x_0) \leq 0$.

Desde el punto de vista geométrico, esto es evidente, ya en los intervalos donde f es creciente, cualquier recta tangente tiene pendiente positiva, mientras que en los intervalos donde f es decreciente, las tangentes tienen pendiente negativa, tal y como se observa en la figura 4.3.

1.4 Determinación de los extremos relativos

Una función $f(x)$ tiene un *máximo relativo* en x_0 si existe un entorno A de x_0 tal que $\forall x \in A$ se verifica que $f(x) \leq f(x_0)$.

Una función $f(x)$ tiene un *mínimo relativo* en x_0 si existe un entorno A de x_0 tal que $\forall x \in A$ se verifica que $f(x) \geq f(x_0)$.

Diremos que la función $f(x)$ tiene un *extremo relativo* en un punto si tiene un *máximo* o *mínimo relativo* en dicho punto.

Cuando f es una función continua, entonces también se puede definir un extremo relativo como aquel punto donde cambia el crecimiento de la función. Así, un máximo relativo es un punto donde la función pasa de ser creciente a ser decreciente, y un mínimo relativo es un punto donde la función pasa de ser decreciente a ser creciente, tal y como se muestra en la figura 4.4.

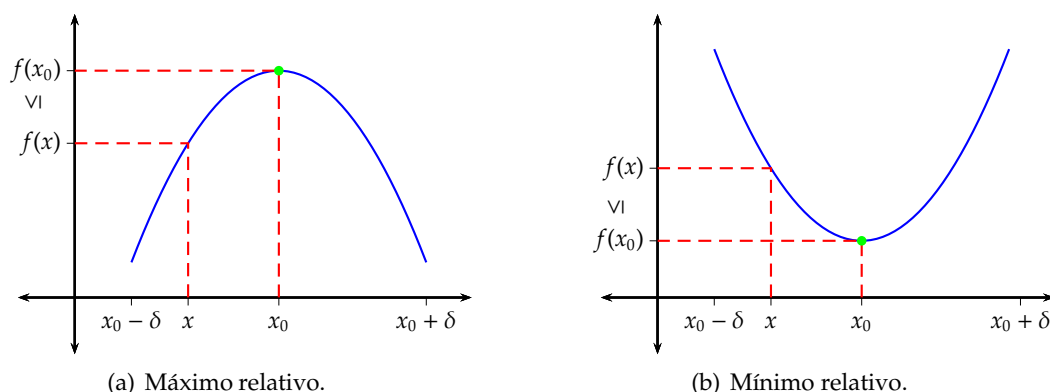


Figura 4.4 – Extremos relativos de una función.

Si f tiene un extremo relativo en un punto x_0 y existe la derivada en dicho punto, entonces se cumple que $f'(x_0) = 0$, es decir, la tangente a la gráfica de f en dicho punto es horizontal (figura 4.4). El recíproco no es cierto en general, de modo que esta es una condición necesaria pero no suficiente. No obstante, si f es una función derivable en un intervalo I , podemos utilizar esta propiedad para detectar los puntos entre los que se encontrarán los extremos relativos del intervalo I . Los puntos donde se anula la primera derivada, se conocen como *puntos críticos* y serán candidatos a extremos. Una vez detectados los puntos críticos, para ver si se trata de un extremo relativo o no, basta con estudiar el crecimiento de la función a la izquierda y a la derecha del punto tal y como se indicaba en la sección anterior. Resumiendo, si $f'(x_0) = 0$, entonces:

- Si existe un $\delta > 0$ tal que $f'(x) > 0 \forall x \in (x_0 - \delta, x_0)$ (derivada positiva a la izquierda de x_0) y $f'(x) < 0 \forall x \in (x_0, x_0 + \delta)$ (derivada negativa a la derecha de x_0), x_0 es un máximo relativo.
- Si existe un $\delta > 0$ tal que $f'(x) < 0 \forall x \in (x_0 - \delta, x_0)$ (derivada negativa a la izquierda de x_0) y $f'(x) > 0 \forall x \in (x_0, x_0 + \delta)$ (derivada positiva a la derecha de x_0), x_0 es un mínimo relativo.
- En cualquier otro, x_0 es un *punto de inflexión*.

1.5 Estudio de la concavidad de una función

Se dice que una función $f(x)$ es *cóncava* en un intervalo I si $\forall x_1, x_2 \in I$, el segmento de extremos $(x_1, f(x_1))$ y $(x_2, f(x_2))$ queda por encima de la gráfica de f .

Análogamente se dirá que es *convexa* si el segmento anterior queda por debajo de la gráfica de f .

Diremos que la función $f(x)$ tiene un *punto de inflexión* en x_0 si en ese punto la función pasa de cóncava a convexa o de convexa a cóncava. Estos conceptos se ilustran en la figura 4.5.

Si f es una función derivable en el intervalo I , el signo de la segunda derivada puede utilizarse para estudiar la concavidad de la función ya que se cumple:

- f es cóncava en $x_0 \in I$, si y sólo si, $f''(x_0) \geq 0$.
- f es convexa en $x_0 \in I$, si y sólo si, $f''(x_0) \leq 0$.

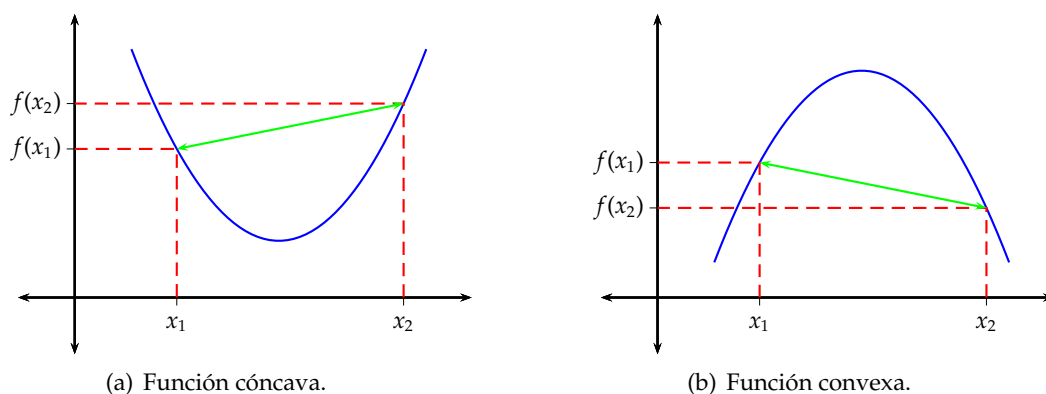


Figura 4.5 – Concavidad de una función.

2 Ejercicios resueltos

1. Estudiar mediante la definición de derivada la derivabilidad de las funciones siguientes:

$$f(x) = |x - 1| \quad \text{en } x = 1,$$

$$g(x) = \begin{cases} x \operatorname{sen} \frac{1}{x}, & \text{si } x \neq 0; \\ 0, & \text{si } x = 0. \end{cases} \quad \text{en } x = 0.$$



- a) Para la función $f(x)$, podemos inicialmente definirla, teniendo en cuenta que la sintaxis de la función valor absoluto es `Abs`, y después utilizar la definición de derivada en un punto dada en el problema anterior, y calcular el límite mediante el botón `Calcular un límite`. Por lo tanto, si existe la derivada en $x = 1$ su valor es:

$$f'(1) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(1+h) - f(1)}{h}$$

- b) Para la función $g(x)$, podemos, para su definición, utilizar la función condicional de `Derive` `If(condición, opción 1, opción 2)`, de tal forma que si se cumple la condición el programa realizará la opción 1, y si no se cumple realizará la opción 2. La función condicional de `Derive`, `If`, entre otras muchas posibilidades, sirve para introducir funciones definidas a trozos. En nuestro caso la condición es $x \neq 0$, la opción 1 es $x \sin(1/x)$, y la opción 2 es 0. Así, la función $g(x)$ puede definirse mediante:

$$g(x) := \text{IF}(x \neq 0, x \sin(1/x), 0)$$

Y con ello, para calcular la derivada en $x = 0$, procedemos mediante la definición de derivada en un punto:

$$g'(0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{g(0+h) - g(0)}{h}$$

2. Calcular las derivadas de las siguientes funciones hasta el orden 4:

a) $a^x \log a$.

b) $\frac{\operatorname{sen} x + \cos x}{2}$.

c) $\frac{1}{\sqrt{1+x}}.$

A la vista de los resultados, ¿cual sería la expresión de la derivada n -ésima de cada una de estas funciones?



Para cada función repetir los siguientes pasos

- Definir la función en la venta de Álgebra con el nombre $f(x)$.
- Para la primera derivada introducir la expresión $f'(x)$ y hacer clic en el botón Simplificar.
- Para la segunda derivada introducir la expresión $f''(x)$ y hacer clic en el botón Simplificar.
- Para la tercera derivada introducir la expresión $f'''(x)$ y hacer clic en el botón Simplificar.
- Para la cuarta derivada introducir la expresión $f''''(x)$ y hacer clic en el botón Simplificar.

3. Calcular la recta tangente a la gráfica de la función $f(x) = \log(\sqrt{x+1})$ en $x = 1$. Dibujar el gráfico de la función y de la recta tangente.



- Definir la función en la venta de Álgebra con el nombre $f(x)$.
- Abrir una nueva ventana gráfica con el menú Ventana ▶ Nueva Ventana 2D y seleccionar Ventana -> Mosaico Vertical para ver la ventana de Álgebra y la ventana gráfica al mismo tiempo.
- Hacer clic en el botón Representar Expresión de la ventana gráfica.
- Introducir la expresión $f(1)+f'(1)(x-1)$, correspondiente a la ecuación de la recta tangente a la gráfica de la función f en $x = 1$, en la ventana de Álgebra y hacer clic en el botón Simplificar.
- Hacer clic en el botón Representar Expresión de la ventana gráfica.

4. Dada la función:

$$g(x) = \frac{2x^3 - 3x}{x^2 + 1}$$

- a) Representar la gráfica de g .



Una vez introducida la función en Derive, utilizar el botón Ventana 2D para pasar al entorno de dibujo de funciones de una única variable, y allí utilizar el botón Representar Expresión para representar la gráfica.

- b) Calcular la función derivada $g'(x)$, y representar su gráfica.



Marcar la expresión de la función y utilizar el botón Hallar una derivada y escoger la variable x y el orden 1. Para representar la gráfica de la función derivada, seguir el proceso del punto anterior.

- c) Calcular las raíces de $g'(x)$.



Para calcular las raíces, marcar la expresión de la función derivada y utilizar el botón Resolver o despejar, escogiendo la variable x , y conviene utilizar el dominio Real para obtener únicamente la raíces reales, que son las que nos interesan.

4. Derivadas de funciones de una variable

- d) A la vista de las raíces y de la gráfica de la función derivada, determinar los extremos relativos de la función y los intervalos de crecimiento.



Tener en cuenta que la función es creciente en los puntos en los que la derivada es positiva, decreciente si la derivada es negativa, y aquellos puntos en los que la derivada vale cero (puntos críticos) serán extremos relativos si en ellos cambia el crecimiento de la función.

- e) Calcular la segunda derivada $g''(x)$, y representar su gráfica.



La podemos obtener derivando, mediante el botón Hallar una derivada, la función de partida, y escogiendo como orden de derivación 2; o también podemos directamente derivar la función derivada escogiendo como orden de derivación 1. Para representar la gráfica seguimos los pasos de cualquier otra representación.

- f) Calcular las raíces de $g''(x)$.



Igual que en apartados anteriores, marcamos la expresión de la segunda derivada y utilizamos el botón Resolver o despejar.

- g) A la vista de las raíces y de la gráfica de la segunda derivada, determinar los intervalos de concavidad de la función y los puntos de inflexión.



Recordar que la función de partida es cóncava si la derivada segunda es mayor que 0, convexa si la derivada segunda es menor que 0, y en los puntos en los que valga cero hay un candidato a punto de inflexión, que confirmaremos si lo es viendo si la función cambia de concavidad en dicho punto.

3 Ejercicios propuestos

1. Probar que no es derivable en $x = 0$ la siguiente función:

$$f(x) = \begin{cases} e^x - 1 & \text{si } x \geq 0, \\ x^3 & \text{si } x < 0. \end{cases}$$

2. Para cada una de las siguientes curvas, hallar las ecuaciones de las rectas tangente y normal en el punto x_0 indicado.

a) $y = x^{\sin x}$, $x_0 = \pi/2$.

b) $y = (3 - x^2)^4 \sqrt[3]{5x - 4}$, $x_0 = 1$.

c) $y = \log \sqrt{\frac{1+x}{1-x}} + \arctan x$, $x_0 = 0$.

3. Estudiar el crecimiento, decrecimiento, extremos relativos, concavidad y puntos de inflexión de la función $f(x) = \frac{x}{x^2 - 2}$.

4. Se ha diseñado un envoltorio cilíndrico para cápsulas. Si el contenido de las cápsulas debe ser de 0,15 ml, hallar las dimensiones del cilindro para que el material empleado en el envoltorio sea mínimo.

CÁLCULO CON DERIVE

5. La cantidad de trigo en una cosecha C depende de la cantidad de nitrógeno en el suelo n según la ecuación

$$C(n) = \frac{n}{1 + n^2}, \quad n \geq 0$$

¿Para qué cantidad de nitrógeno se obtendrá la mayor cosecha de trigo?

Derivadas de funciones de varias variables

1 Fundamentos teóricos

El concepto de derivada es uno de los más importantes del Cálculo pues resulta de gran utilidad en el estudio de funciones y tiene multitud de aplicaciones. En esta práctica introducimos este concepto de derivada parcial en funciones de varias variables y presentamos algunas de sus aplicaciones.

1.1 Derivadas parciales de una función de n variables

Recordemos que la derivada de una función de una única variable en un punto $x = a$ se define como la tasa de variación instantánea de la función en dicho punto. Si llamamos h al incremento en la variable, la derivada de la función en $x = a$ se nota como $f'(a)$ ó $\frac{df}{dx}(a)$, y se calcula como:

$$f'(a) = \frac{df}{dx}(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h}$$

Y, en general, para cualquier x en un conjunto en el que la función de una única variable sea derivable, puede definirse la función derivada $f'(x)$ ó $\frac{df}{dx}$, mediante el límite:

$$f'(x) = \frac{df}{dx} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$$

que, no obstante, se calcula aplicando las adecuadas reglas de derivación, más bien que acudiendo a la resolución directa del límite.

De igual forma, si tenemos una función de n variables $f(\vec{x}) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, se pueden definir esas mismas tasas de variación instantáneas con respecto a cada una de las variables en un punto $\vec{a} = (a_1, a_2, \dots, a_n)$, para obtener las *Derivadas Parciales* de la función con respecto a cada una de las variables en el punto $\vec{x} = \vec{a}$, que se notarán como $f_{x_i}(\vec{a})$, o bien por $\frac{\partial f}{\partial x_i}(\vec{a})$:

$$f_{x_i}(\vec{a}) = \frac{\partial f}{\partial x_i}(\vec{a}) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a_1, \dots, a_i + h, \dots, a_n) - f(a_1, \dots, a_i, \dots, a_n)}{h},$$

Y la *Función Derivada Parcial* con respecto a cualquiera de las variables x_i , para todos los \vec{x} de un conjunto, que se notará como f_{x_i} , o $\frac{\partial f}{\partial x_i}$:

$$f_{x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_1, \dots, x_i + h, \dots, x_n) - f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)}{h},$$

Lo cual, a efectos de cálculo, se resume en que la derivada parcial de una función de varias variables se obtiene como la derivada de una función de una única variable, que es aquella con respecto a la que se deriva, y constantes el resto. Como consecuencia, las reglas de derivación también se aplican en el

cálculo de las derivadas parciales de este tipo de funciones, sin más que considerar constantes todas las variables con respecto a las que no estamos derivando.

Si para las funciones de una variable la derivada en un punto a tiene una interpretación gráfica sencilla como la pendiente de la recta tangente a la gráfica de la función en el punto $(a, f(a))$, también para funciones de dos variables la derivada parcial con respecto a x en el punto $\vec{a} = (x_0, y_0)$:

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x_0, y_0) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(x_0 + h, y_0) - f(x_0, y_0)}{h}$$

representa la pendiente de la recta tangente a la curva que se obtiene al cortar la gráfica de la función en el punto $(x_0, y_0, z_0 = f(x_0, y_0))$ mediante el plano en el que y permanece constante e igual a y_0 , y tan sólo varía el valor de x . E igualmente, la derivada parcial con respecto a y será la pendiente de la recta tangente a la curva que se obtiene al cortar la gráfica de la función en $(x_0, y_0, z_0 = f(x_0, y_0))$ mediante el plano $x = x_0$.

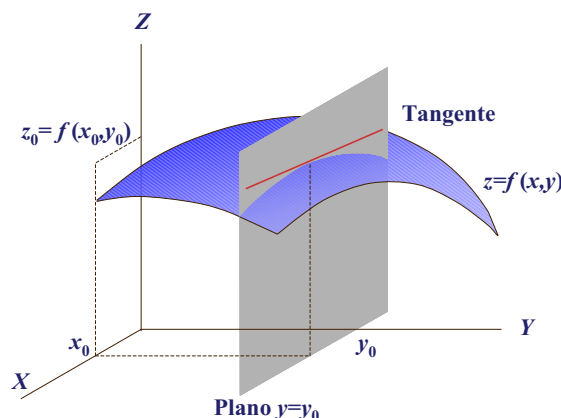


Figura 5.1 – La derivada parcial de una función $f(x, y)$ con respecto a x en el punto (x_0, y_0) , como la pendiente de la recta tangente a la curva descrita por la intersección de la superficie de f y el plano de ecuación $y = y_0$.

1.2 Derivadas parciales sucesivas de una función de n variables

De la misma forma que en las funciones de una variable, mediante los límites que las definen, siempre y cuando existan, obtenemos las segundas, terceras y derivadas de cualquier orden. Es decir, si f es una función real de n variables, con sus correspondientes derivadas parciales, a su vez también las mismas son funciones de n variables que, en determinadas condiciones, podrán derivarse de nuevo con respecto a sus n variables para obtener derivadas parciales segundas, y así sucesivamente hasta órdenes superiores de derivación.

Para la derivada parcial de segundo orden se utiliza la notación $f_{x_i x_j}$ ó $\frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$:

$$f_{x_i x_j} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)$$

Por ejemplo, para una función de dos variables $f(x, y)$, tenemos dos derivadas parciales de primer orden, que siguen siendo funciones de las variables x e y :

$$\frac{\partial f}{\partial x}(x, y) \quad \frac{\partial f}{\partial y}(x, y)$$

5. Derivadas de funciones de varias variables

y cuatro diferentes de segundo orden, que también serán funciones de x e y , aunque ya no se refleje para aligerar la notación:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial y \partial x}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right) = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

La primera y la última reciben el nombre de derivadas segundas, mientras que la segunda y tercera se denominan derivadas cruzadas.

Si procedemos con las derivadas parciales de tercer orden tendríamos ocho diferentes, y el número es más amplio con funciones de tres o más variables. No obstante, el teorema conocido con *Teorema de Schwartz de las Derivadas Cruzadas* reduce el número de derivadas parciales diferentes:

Teorema 5.1 — Schwartz. Si f es una función de n variables con derivadas parciales segundas cruzadas continuas en un conjunto abierto que contiene al punto a , entonces en dicho punto se cumple

$$\frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} = \frac{\partial^2 f}{\partial x_j \partial x_i}$$

e igual con las derivadas cruzadas de tercer y superior orden.

Es decir, si se cumplen las hipótesis del teorema de Schwartz concluimos que, a efectos de cálculo, tan sólo importa el número de veces que se deriva respecto a cada variable, pero no el orden de la derivación.

1.3 Vector gradiente y matriz hessiana

A partir de las derivadas parciales de primer orden de un campo escalar, podemos definir el siguiente vector:

Definición 5.1 — Vector gradiente. Dado un campo escalar $f(x_1, \dots, x_n)$, se llama *gradiente* de f , y se escribe ∇f , a la función que a cada punto $a = (a_1, \dots, a_n)$ le asigna el vector cuyas coordenadas cartesianas son las derivadas parciales de f en a ,

$$\nabla f(a) = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}(a), \dots, \frac{\partial f}{\partial x_n}(a) \right).$$

El vector gradiente en un punto dado tiene la misma magnitud y dirección que la velocidad máxima de variación de la función en ese punto, por lo que $\nabla f(a)$ indica la dirección de máximo crecimiento de f en el punto a , mientras que $-\nabla f(a)$ indica la dirección de máximo decrecimiento.

Y a partir de las derivadas parciales de segundo orden, podemos definir la siguiente matriz:

Definición 5.2 — Matriz hessiana. Dada una función de varias variables $f(x_1, \dots, x_n)$, para la que existen todas sus derivadas parciales de segundo orden en un punto $a = (a_1, \dots, a_n)$, se define la *matriz*

hessiana de f en a , y se nota $\nabla^2 f(a)$, como la matriz cuadrada cuyos elementos son

$$\nabla^2 f(a) = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2}(a) & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2}(a) & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n}(a) \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1}(a) & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2^2}(a) & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n}(a) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1}(a) & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2}(a) & \cdots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n^2}(a) \end{pmatrix}.$$

Al determinante de esta matriz se le llama *hessiano* de f en a , y se nota $Hf(a) = |\nabla^2 f(a)|$.

Entre las utilidades de la matriz Hessiana y el hessiano está la determinación de los extremos relativos y los puntos de silla de una función.

1.4 Derivada direccional

Ya se ha visto que las derivadas parciales miden la tasa de variación instantánea de la función con respecto a cada uno de sus variables, es decir, en la dirección de cada uno de los ejes de coordenadas. Pero, ¿qué pasa si nos movemos en cualquier otra dirección? La tasa de variación instantánea de f en un punto a en la dirección de un vector unitario cualquiera u se conoce como *derivada direccional*.

Definición 5.3 — Derivada direccional. Dado un campo escalar f de \mathbb{R}^n , un punto a y un vector unitario u en ese espacio, el límite

$$f'_u(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a + hu) - f(a)}{h},$$

cuando existe, se llama *derivada direccional* de f en el punto a en la dirección de u .

Se cumple

$$f'_u(a) = \nabla f(a) \cdot u.$$

Obsérvese que las derivadas parciales son las derivadas direccionales en las direcciones de los vectores coordenados.

1.5 Derivación implícita

Si se sabe que la ecuación

$$f(x, y) = 0$$

define a y como función de x , $y = h(x)$, alrededor de cierto valor $x = x_0$ para el que $y = h(x_0) = y_0$, entonces, si se toma la trayectoria $g(x) = (x, h(x))$, la ecuación anterior se puede expresar como

$$(f \circ g)(x) = f(g(x)) = f(x, h(x)) = 0,$$

de modo que usando la regla de la cadena sobre se tiene

$$(f \circ g)'(x) = \nabla f(g(x)) \cdot g'(x) = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y} \right) \cdot (1, h'(x)) = \frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} h'(x) = 0,$$

de donde se deduce

$$y' = h'(x) = -\frac{\frac{\partial f}{\partial x}}{\frac{\partial f}{\partial y}}$$

1.6 Cálculo de extremos

Si a es un extremo de un campo escalar f de \mathbb{R}^n , entonces se cumple que a es un punto crítico de f , es decir,

$$\nabla f(P) = 0,$$

Sin embargo, no todos los puntos críticos son extremos relativos. Existen puntos como el de la figura 5.2 donde se anula el gradiente y que no son puntos de máximo, ni de mínimo. Estos puntos se conocen como *puntos de silla*.

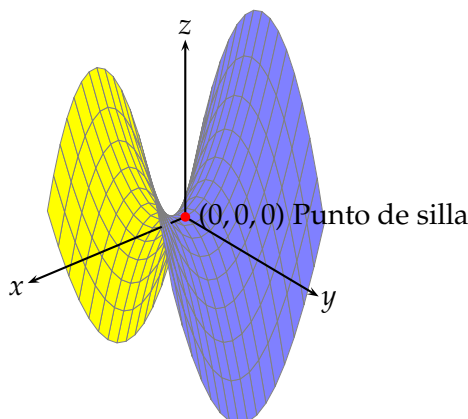


Figura 5.2 – Gráfica de la función $f(x, y) = x^2 - y^2$, que tiene un punto de silla en $(0, 0)$.

Afortunadamente, es posible determinar si un punto crítico es un extremo relativo o un punto de silla a partir de la matriz Hessiana y el hessiano.

Teorema 5.2 Dado un punto crítico a de un campo escalar f que tiene matriz hessiana $Hf(a)$, se cumple

- Si $\nabla^2 f(a)$ es definido positivo entonces f tiene un mínimo relativo en a .
- Si $\nabla^2 f(a)$ es definido negativo entonces f tiene un máximo relativo en a .
- Si $\nabla^2 f(a)$ es indefinido entonces f tiene un punto de silla en a .

En el caso de que $\nabla^2 f(a)$ sea semidefinido, no se puede obtener ninguna conclusión y hay que recurrir a derivadas parciales de orden superior.

En el caso particular de un campo escalar de dos variables se tiene

Teorema 5.3 Dado un punto crítico $a = (x_0, y_0)$ de un campo escalar $f(x, y)$ que tiene matriz hessiana $\nabla^2 f(a)$, se cumple

- Si $Hf(a) > 0$ y $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(a) > 0$ entonces f tiene un mínimo relativo en a .
- Si $Hf(a) > 0$ y $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}(a) < 0$ entonces f tiene un máximo relativo en a .
- Si $Hf(a) < 0$ entonces f tiene un punto de silla en a .

2 Ejercicios resueltos

1. Dada la función $f(x, y) = y^2 - x^2$, se pide:

a) Dibujar su gráfica.



- 1) Introducir la expresión $f(x, y) := y^2 - x^2$.
- 2) Hacer clic sobre el botón Ventana 3D para pasar a la ventana de gráficas 3D.
- 3) Hacer clic sobre el botón Representar).

b) Dibujar las curvas de nivel $f(x, y) = k$, para valores enteros de k desde 1 hasta 5.



- 1) Introducir la ecuación $f(x, y) = k$ para cada valor de k .
- 2) Hacer clic sobre el botón Ventana 2D para pasar a la ventana de gráficas 2D.
- 3) Hacer clic sobre el botón Representar Expresión).

c) Dibujar el plano $x = 1$. ¿Qué figura forma la intersección de este plano con la gráfica de f ?



- 1) Introducir la ecuación del plano $x=1$.
- 2) Hacer clic sobre el botón Ventana 3D para pasar a la ventana de gráficas 3D.
- 3) Hacer clic sobre el botón Representar).

d) Calcular la derivada de $f(1, y)$ en $y = 2$.



- 1) Introducir la expresión $f(1, y)$.
- 2) Hacer clic sobre el botón Hallar una derivada.
- 3) En el cuadro de diálogo que aparece, hacer clic en el botón Simplificar.
- 4) Hacer clic sobre el botón Sustituir variables.
- 5) En el cuadro de diálogo que aparece introducir el valor 2 y hacer clic en el botón Simplificar.

e) Dibujar el plano $y = 2$. ¿Qué figura forma la intersección de este plano con la gráfica de f ?



- 1) Introducir la ecuación del plano.
- 2) Hacer clic sobre el botón Ventana 3D para pasar a la ventana de gráficas 3D.
- 3) Hacer clic sobre el botón Representar).

f) Calcular la derivada de $f(x, 2)$ en $x = 1$.



- 1) Introducir la expresión $f(x, 2)$.
- 2) Hacer clic sobre el botón Hallar una derivada.
- 3) En el cuadro de diálogo que aparece, hacer clic en el botón Simplificar.
- 4) Hacer clic sobre el botón Sustituir variables.
- 5) En el cuadro de diálogo que aparece introducir el valor 1 y hacer clic en el botón Simplificar.

g) Calcular las derivadas parciales de f en el punto $(1, 2)$. ¿Qué conclusiones sacas?

5. Derivadas de funciones de varias variables



- 1) Introducir la expresión $f(x, y)$ o seleccionarla en la expresión anterior.
- 2) Hacer clic sobre el botón Hallar una derivada.
- 3) En el cuadro de diálogo que aparece, hacer clic en el botón Simplificar.
- 4) Hacer clic sobre el botón Sustituir variables.
- 5) En el cuadro de diálogo que aparece introducir el valor 1 y hacer clic en el botón Simplificar.

2. Calcular las siguientes derivadas parciales:

a) $\frac{\partial}{\partial V} \frac{nRT}{V}$.



- 1) Introducir la expresión en Derive.
- 2) Hacer clic sobre el Hallar una derivada.
- 3) En el cuadro de diálogo que aparece, en la lista de hipotéticas variables en las que podemos derivar (evidentemente, para Derive tanto n como R también son variables), seleccionar la variable V , introducir el orden 1 y hacer clic en el botón Simplificar.

b) $\frac{\partial^2}{\partial x \partial y} e^{x+y} \sin \frac{x}{y}$.



- 1) Introducir la expresión $\sin(x)$.
- 2) Hacer clic sobre el botón Hallar una derivada, y en el cuadro de diálogo que aparece seleccionar la variable y y hacer clic en el botón Simplificar.
- 3) Una vez obtenida primera derivada con respecto a y , para obtener la segunda con respecto a x , seleccionamos la expresión obtenida en el apartado anterior y volvemos a repetir el proceso pero seleccionando la variable x .

3. Dada la función $f(x, y) = 20 - 4x^2 - y^2$, se pide calcular en el punto $(2, -3)$:

a) Vector gradiente.



- 1) Definir la función introduciendo la expresión $f(x, y) := 20 - 4x^2 - y^2$.
- 2) Introducir la expresión $f'(2, -3)$.
- 3) Hacer clic en el botón Simplificar.

b) Matriz hessiana.



- 1) Introducir la expresión $f''(2, -3)$.
- 2) Hacer clic en el botón Simplificar.

c) Calcular el determinante hessiano.



- 1) Introducir la expresión $\text{DET}(f''(2, -3))$.
- 2) Hacer clic sobre el botón Simplificar.

4. Dada la función

$$f(x, y, z) = \sin((x^2 - y^2)z)$$

a) Definir la función.



Introducir la expresión $f(x, y, z) := \sin((x^2 - y^2)z)$.

b) Calcular su vector gradiente en el punto $(0, -1, \pi/2)$.



- 1) Introducir la expresión $f'(0, -1, \pi/2)$.
- 2) Hacer clic sobre el botón Simplificar.

c) Calcular su matriz Hessiana en el punto $(0, -1, \pi/2)$.



- 1) Introducir la expresión $f''(0, -1, \pi/2)$.
- 2) Hacer clic sobre el botón Simplificar.

d) Comprobar que se cumple el teorema Schwartz de las derivadas para las derivas cruzadas:

1) $\frac{\partial^3 f}{\partial x \partial z \partial y}$



- a' Introducir la expresión $f(x, y, z)$.
- b' Hacer clic sobre el botón Hallar una derivada.
- c' En el cuadro de diálogo que aparece seleccionar la variable y y hacer clic en el botón Simplificar.
- d' Repetir el proceso con la expresión resultante, seleccionando esta vez la variables z .
- e' Repetir una vez más el proceso con la expresión resultante, seleccionando esta vez la variables x .

2) $\frac{\partial^3 f}{\partial z \partial x \partial y}$



- a' Introducir la expresión $f(x, y, z)$.
- b' Hacer clic sobre el botón Hallar una derivada.
- c' En el cuadro de diálogo que aparece seleccionar la variable y y hacer clic en el botón Simplificar.
- d' Repetir el proceso con la expresión resultante, seleccionando esta vez la variables x .
- e' Repetir una vez más el proceso con la expresión resultante, seleccionando esta vez la variables z .

¿Puedes predecir el valor de $\frac{\partial^3 f}{\partial y \partial x \partial z}$?

5. Hallar la recta normal y el plano tangente a la superficie $S : x + 2y - \log z + 4 = 0$ en el punto $(0, -2, 1)$ y dibujarlos.



Para dibujar la gráfica de la superficie:

- a) Introducir la expresión $z = \exp(x + 2y + 4)$.
- b) Hacer clic en el botón Ventana 3D para pasar a la ventana gráfica 3D.
- c) Hacer clic en el botón Representar.

5. Derivadas de funciones de varias variables

Para dibujar la gráfica de la recta normal:

- d) Hacer clic en el botón **Activar la ventana de Álgebra** para pasar a la ventana de expresiones.
- e) Definir la función introduciendo la expresión $f(x, y, z) := x + 2y - \log z + 4$.
- f) Introducir la expresión $[0, -2, 1] + t f'(0, -2, 1)$.
- g) Hacer clic en botón **Simplificar**.
- h) Hacer clic en el botón **Ventana 3D** para pasar a la ventana gráfica 3D.
- i) Hacer clic en el botón **Representar**.

Para dibujar el plano tangente:

- j) Introducir la expresión $([x, y, z] - [0, -2, 1]) f'(0, -2, 1) = 0$.
- k) Hacer clic en botón **Simplificar**.
- l) Hacer clic en el botón **Ventana 3D** para pasar a la ventana gráfica 3D.
- m) Hacer clic en el botón **Representar**.

6. La ecuación $x + y - 2e^y + 2 = 0$ define implícitamente una función $y = f(x)$ alrededor del punto $(0, 0)$. Calcular $f'(0)$.



- a) Introducir la expresión $x + y - 2e^y + 2$.
- b) Hacer clic sobre el botón **Hallar una derivada**.
- c) En el cuadro de diálogo que aparece seleccionar la variable x y hacer clic en el botón **Simplificar**.
- d) Seleccionar de nuevo la expresión inicial.
- e) Hacer clic sobre el botón **Hallar una derivada**.
- f) En el cuadro de diálogo que aparece seleccionar la variable y y hacer clic en el botón **Simplificar**.
- g) Introducir la expresión $-i/j$ donde i es la etiqueta de la expresión de la derivada parcial con respecto a x y j es la etiqueta de la expresión de la derivada parcial con respecto a y .
- h) Hacer clic sobre el botón **Sustituir**.
- i) En el cuadro de diálogo que aparece, seleccionar x e introducir el valor 0, seleccionar y e introducir el valor 0, y hacer clic en el botón **Simplificar**.

7. Calcular la derivada direccional de la función $h(x, y) = 3x^2 + y$ en el punto $(0, 0)$, en la dirección del vector $(1, 1)$.



- a) Definir la función introduciendo la expresión $h(x, y) := 3x^2 + y$.
- b) Introducir la expresión $h'(0, 0) \text{SIGN}([1, 1])$.
- c) Hacer clic en el botón **Simplificar**.

8. Dada la función $f(x, y) = x^3 + y^3 - 3xy$, se pide:

- a) Definirla y dibujar su gráfica. ¿Puedes identificar a simple vista sus extremos relativos?



- 1) Definir la función introduciendo la expresión $f(x, y) := x^3 + y^3 - 3xy$.
- 2) Hacer clic sobre el botón **Ventana 3D** para pasar a la ventana de gráficas 3D.

- 3) Hacer clic sobre el botón Representar).

b) Calcular los puntos críticos que anulan el vector gradiente de f .



- 1) Introducir la expresión $f'(x, y)$.
- 2) Hacer clic en el botón Simplificar.
- 3) Hacer clic en el botón Resolver o despejar.
- 4) Seleccionar ambas variables x e y , seleccionar el dominio Real y hacer clic en el botón Resolver.

c) Determinar los extremos relativos y los puntos de silla de f .



- 1) Introducir la expresión $f''(x, y)$, para (x, y) el primer punto crítico.
- 2) Hacer clic en el botón Simplificar.
- 3) Introducir la expresión $\text{DET}(\#i)$, donde $\#i$ es la etiqueta de la expresión de la matriz hessiana anterior.
- 4) Hacer clic sobre el botón Simplificar.
- 5) Repetir el mismo procedimiento con el segundo punto crítico.

3 Ejercicios propuestos

1. Una nave espacial está en problemas cerca del sol. Se encuentra en la posición $(1, 1, 1)$ y la temperatura de la nave cuando está en la posición (x, y, z) viene dada por $T(x, y, z) = e^{-x^2-2y^2-3z^2}$ donde x, y, z se miden en metros. ¿En qué dirección debe moverse la nave para que la temperatura decrezca lo más rápidamente posible?
2. Calcular el vector gradiente, la matriz hessiana y el hessiano de la función

$$g(x, y, z) = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}$$

en el punto $(1, 1, 1)$ y en el punto $(0, 3, 4)$.

3. Obtener los puntos del elipsoide $S : x^2 + 2y^2 + z^2 = 1$ en los que el plano tangente es paralelo al plano $\Pi : x - y + 2z^2 = 0$.
4. Estudiar los extremos relativos de la función

$$f(x) = -\frac{y}{9 + x^2 + y^2}.$$

5. Calcular la derivada direccional del campo escalar $f(x, y, z) = x^2 - y^2 + xyz^3 - zx$ en el punto $(1, 2, 3)$ y en la dirección del vector $(1, -1, 0)$.

Polinomios de Taylor

1 Fundamentos teóricos

A veces, las funciones elementales como las trigonométricas, las exponenciales y las logarítmicas, o composiciones de las mismas, son difíciles de tratar y suelen aproximarse mediante polinomios que son funciones mucho más simples y con muy buenas propiedades, ya que son continuas y derivables (a cualquier orden) en todos los reales.

1.1 Polinomios de Taylor de funciones de una variable

Definición 6.1 — Polinomio de Taylor. Dada una función $f(x)$, n veces derivable en un punto a , se llama *polinomio de Taylor* de orden n para f en a , al polinomio

$$P_{n,f,a}(x) = f(a) + f'(a)(x-a) + \frac{f''(a)}{2!}(x-a)^2 + \cdots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!}(x-a)^n = \sum_{i=0}^n \frac{f^{(i)}(a)}{i!}(x-a)^i.$$

Este polinomio es el polinomio de grado menor o igual que n que mejor aproxima a f en un entorno del punto a , y por tanto, si x está próximo a a , $f(x) \approx P_{n,f,a}(x)$. Además, cuanto mayor es el grado del polinomio, mejor es la aproximación, tal y como se muestra en el ejemplo de la figura 6.1.

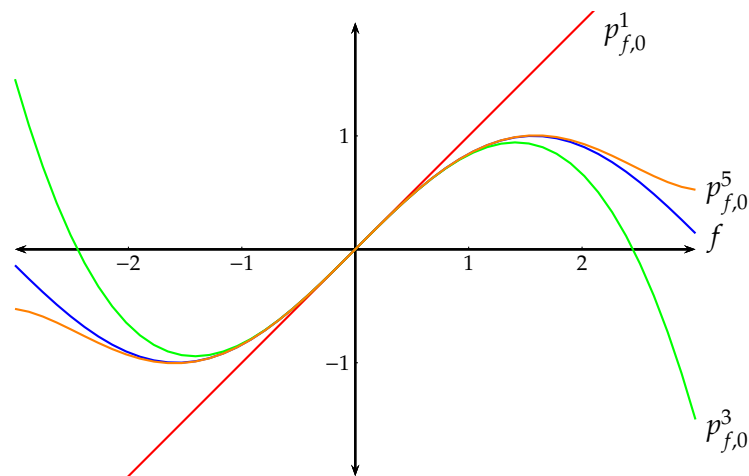


Figura 6.1 – Polinomios de Taylor de distintos grados para la función $\sin x$ en el punto 0.

Polinomio de Mc Laurin

Cuando nos interesa aproximar una función en un entorno del 0, la ecuación del polinomio de Taylor resulta especialmente simple:

$$P_{n,f,0}(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \cdots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!}x^n = \sum_{i=0}^n \frac{f^{(i)}(0)}{i!}x^i,$$

y este polinomio se conoce como *polinomio de Mc Laurin* de orden n de f .

Resto de Taylor

Los polinomios de Taylor nos permiten calcular el valor aproximado de una función en un entorno de un punto, pero normalmente el valor que proporciona el polinomio de Taylor difiere del valor real de la función, es decir, se comete un error en la aproximación. Dicho error se conoce como el *resto de Taylor* de orden n para f en a , y es

$$R_{n,f,a}(x) = f(x) - P_{n,f,a}(x).$$

El resto mide el error cometido al aproximar $f(x)$ mediante $P_{n,f,a}(x)$ y nos permite expresar la función f como la suma de un polinomio de Taylor más su resto correspondiente:

$$f(x) = P_{n,f,a}(x) + R_{n,f,a}(x).$$

Esta última expresión se conoce como *fórmula de Taylor* de orden n para f en el punto a .

Forma de Lagrange del resto

Normalmente, cuando se aproxima una función mediante un polinomio de Taylor, no se conoce el error cometido en la aproximación. No obstante, es posible acotar dicho error de acuerdo al siguiente teorema.

Teorema 6.1 — Resto de Lagrange. Sea f una función para la que las $n+1$ primeras derivadas están definidas en el intervalo $[a, x]$. Entonces existe un $t \in (a, x)$ tal que el resto de Taylor de orden n para f en el punto a viene dado por

$$R_{n,f,a}(x) = \frac{f^{(n+1)}(t)}{(n+1)!}(x-a)^{n+1}.$$

Esta expresión se conoce como *forma de Lagrange del resto*.

Este teorema nos permite acotar el resto en valor absoluto, ya que una vez fijado el valor de x donde queremos aproximar el valor de la función, el resto en la forma de Lagrange es una función que sólo depende de t . Puesto que $t \in (a, x)$, basta con encontrar el máximo del valor absoluto de esta función en dicho intervalo para tener una cota del error cometido.

1.2 Polinomios de Taylor de funciones de varias variables

Los polinomios de Taylor pueden generalizarse a funciones de más de una variable. Así, por ejemplo, si f es un campo escalar, el *polinomio de Taylor* de primer grado de f alrededor de un punto a es

$$P_{f,a}^2(\mathbf{v}) = f(a) + \nabla f(a)\mathbf{v},$$

y el de segundo grado es

$$P_{f,a}^2(\mathbf{v}) = f(a) + \nabla f(a)\mathbf{v} + \frac{1}{2}\mathbf{v}\nabla^2 f(a)\mathbf{v}.$$

6. Polinomios de Taylor

Para el caso particular de funciones de dos variables $f(x, y)$ y un punto $a = (x_0, y_0)$,

$$P_{f,a}^2(x, y) = f(a) + \frac{\partial f(a)}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial f(a)}{\partial y}(y - y_0) + \\ + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 f(a)}{\partial x^2}(x - x_0)^2 + 2 \frac{\partial^2 f(a)}{\partial y \partial x}(x - x_0)(y - y_0) + \frac{\partial^2 f(a)}{\partial y^2}(y - y_0)^2 \right)$$

2 Ejercicios resueltos

1. Calcular los polinomios de Taylor de la función $f(x) = \log x$ en el punto 1, hasta el grado 4 y representarlos junto a la función en la misma gráfica. ¿Qué polinomio aproxima mejor a la función en un entorno del punto 1?



- Definir la función introduciendo la expresión $f(x) := \log(x)$.
- Hacer clic en el botón **Ventana 2D** para pasar a la venta gráfica 2D y hacer clic en el botón **Representar expresión**.
- Hacer clic en el botón **Activar la ventana de algebra** para volver a la ventana de expresiones, marcar el nombre de la función $f(x)$ y seleccionar el menú **Cálculo** ▶ **Polinomios de Taylor**.
- En el cuadro que aparece, introducir 1 en el campo **Punto**, introducir 1 en el campo **Grado** y hacer clic en el botón **Simplificar**.
- Introducir la expresión $p1(x) := \#i$, donde $\#i$ es la etiqueta correspondiente a la expresión del polinomio de grado 1.
Nota: Un procedimiento más rápido para obtener el polinomo de grado uno es introducir directamente la expresión $p1(x) := \text{TAYLOR}(f(x), x, 1, 1)$.
- Hacer clic en el botón **Ventana 2D** para pasar a la venta gráfica 2D y hacer clic en el botón **Representar expresión**.
- Hacer clic en el botón **Activar la ventana de algebra** para volver a la ventana de expresiones, marcar la expresión de la función $\log(x)$ y repetir el proceso anterior introduciendo sucesivamente 2, 3 y 4 como los grados del polinomio.

2. Dar el valor aproximado de $\log 1,2$ utilizando los polinomios del ejercicio anterior y calcular el error cometido en cada caso. Rellenar la siguiente tabla.

Punto	Grado	Aproximación	Error Cometido



- Introducir la expresión $p1(1.2)$.
- Hacer clic en el botón **Aproximar** para obtener el valor aproximado de $\log(1,2)$ con el polinomio de grado 1.
- Introducir la expresión $\text{ABS}(p1(1.2) - f(1.2))$.
- Hacer clic en el botón **Aproximar** para obtener el error cometido en la aproximación.
- Repetir el procedimiento para cada uno de los polinomios calculados en el ejercicio anterior.

3. Calcular el polinomio de Mc Laurin de orden 3 para la función $\sin(x)$, y utilizarlo para aproximar el valor de $\sin 1/2$. Calcular el error cometido.



- Definir la función introduciendo la expresión $f(x) := \sin(x)$.
- Introducir la expresión $p3(x) := \text{TAYLOR}(f(x), x, 0, 3)$.
- Hacer clic en el botón **Simplificar**.

- d) Introducir la expresión $p_3(1/2)$.
- e) Hacer clic en el botón **Aproximar** para obtener la aproximación de $\sin(1/2)$ con el polinomio de Mc Laurin de grado 3.
- f) Introducir la expresión $\text{ABS}(p_3(1/2) - f(1/2))$.
- g) Hacer clic en el botón **Aproximar** para obtener el error en la aproximación.

4. Dada la función $f(x, y) = \sqrt{xy}$, se pide:

a) Definir la función y dibujar su gráfica.



- 1) Definir la función introduciendo la expresión $f(x, y) := \text{sqrt}(xy)$.
- 2) Hacer clic en el botón **Ventana 3D** para pasar a la ventana de representación de gráficas 3D.
- 3) Hacer clic en el botón **Representar**.

b) Calcular el polinomio de Taylor de primer grado de f en el punto $(8, 2)$.



- 1) Introducir la expresión $p_1(x, y) := f(8, 2) + f'(8, 2)[x - 8, y - 2]$.
- 2) Hacer clic en el botón **Simplificar**.

c) Representar gráficamente el polinomio anterior.



- 1) Seleccionar la expresión correspondiente al polinomio.
- 2) Hacer clic en el botón **Ventana 3D** para pasar a la ventana de representación de gráficas 3D.
- 3) Hacer clic en el botón **Representar**.

d) Utilizar el polinomio anterior para calcular el valor aproximado de $\sqrt{8,02 \cdot 1,99}$.



- 1) Introducir la expresión $p_1(8.02, 1.99)$.
- 2) Hacer clic en el botón **Aproximar**.

e) Calcular el error cometido en la aproximación anterior.



- 1) Introducir la expresión $\text{abs}(p_1(8.02, 1.99) - f(8.02, 1.99))$.
- 2) Hacer clic en el botón **Aproximar**.

f) Calcular el polinomio de Taylor de segundo grado de f en el punto $(8, 2)$.



- 1) Introducir la expresión $p_2(x, y) := p_1(x, y) + 1/2[x - 8, y - 2] f''(8, 2)[x - 8, y - 2]$.
- 2) Hacer clic en el botón **Simplificar**.

g) Representar gráficamente el polinomio anterior.



- 1) Seleccionar la expresión correspondiente al polinomio.
- 2) Hacer clic en el botón **Ventana 3D** para pasar a la ventana de representación de gráficas 3D.

- 3) Hacer clic en el botón Representar.

h) Utilizar el polinomio anterior para calcular el valor aproximado de $\sqrt{8,02 \cdot 1,99}$.



- 1) Introducir la expresión $p2(8.02, 1.99)$.
- 2) Hacer clic en el botón Aproximar.

i) Calcular el error cometido en la aproximación anterior. ¿Qué polinomio da una aproximación mejor?



- 1) Introducir la expresión $\text{abs}(p2(8.02, 1.99) - f(8.02, 1.99))$.
- 2) Hacer clic en el botón Aproximar.

3 Ejercicios propuestos

1. Dada la función $f(x) = \sqrt{x+1}$ se pide:

- a) El polinomio de Taylor de cuarto grado de f en $x = 0$.
- b) Calcular un valor aproximado de $\sqrt{1,02}$ utilizando un polinomio de segundo grado y otro utilizando un polinomio de cuarto grado. Dar una cota del error cometido en cada caso.

2. Dadas las funciones $f(x) = e^x$ y $g(x) = \cos x$, se pide:

- a) Calcular los polinomios de McLaurin de segundo grado para f y g .
- b) Utilizar los polinomios anteriores para calcular

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{e^x - \cos x}{x}.$$

3. Calcular de manera aproximada el valor de $\log(0,09^3 + 0,99^3)$ usando:

- a) Un polinomio de Taylor adecuado de primer orden.
- b) Un polinomio de Taylor adecuado de segundo orden.

Integrales

1 Fundamentos teóricos

Junto al concepto de derivada, el de integral es otro de los más importantes del cálculo matemático. Aunque dicho concepto surge en principio, como técnica para el cálculo de áreas, el teorema fundamental del cálculo establece su relación con la derivada, de manera que, en cierto sentido, la diferenciación y la integración son operaciones inversas.

En esta práctica se introduce el concepto de integral como antiderivada, y también el de integral de Riemann, que permite calcular áreas por debajo de funciones acotadas en un intervalo.

1.1 Primitivas e Integrales

Función Primitiva

Se dice que la función $F(x)$ es una *función primitiva* de $f(x)$ si se verifica que $F'(x) = f(x) \forall x \in \text{Dom } f$.

Como dos funciones que difieran en una constante tienen la misma derivada, si $F(x)$ es una función primitiva de $f(x)$ también lo será toda función de la forma $F(x) + k \forall k \in \mathbb{R}$.

Función integral indefinida

Se llama *función integral indefinida* de la función $f(x)$ al conjunto de todas sus funciones primitivas y se representa como:

$$\int f(x) dx = F(x) + C$$

siendo $F(x)$ una función primitiva de $f(x)$ y C una constante arbitraria.

Linealidad de la integral

Dadas dos funciones $f(x)$ y $g(x)$ que admiten primitiva, y una constante $k \in \mathbb{R}$ se verifica que:

$$\int (f(x) + g(x)) dx = \int f(x) dx + \int g(x) dx$$

y:

$$\int kf(x) dx = k \int f(x) dx$$

1.2 Integral de Riemann

Se llama *partición* de un intervalo $[a, b] \subset \mathbb{R}$, a una colección finita de puntos del intervalo, $P = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$, tales que $x_0 = a < x_1 < \dots < x_n = b$, con lo que el intervalo $[a, b]$ queda dividido en n subintervalos $[x_i, x_{i+1}]$, $i = 0, \dots, n-1$.

Dada una función $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ acotada y una partición $P = \{x_0, x_1, \dots, x_n\}$ de $[a, b]$, se llama *suma inferior* de f en relación a P , y se designa por $L(P, f)$, a:

$$L(P, f) = \sum_{i=1}^n m_i(x_i - x_{i-1})$$

donde $m_i = \inf\{f(x) : x_{i-1} \leq x \leq x_i\}$.

Análogamente se llama *suma superior* de f en relación a P , y se designa por $U(P, f)$, a:

$$U(P, f) = \sum_{i=1}^n M_i(x_i - x_{i-1})$$

donde $M_i = \sup\{f(x) : x_{i-1} \leq x \leq x_i\}$.

La *suma inferior* y la *suma superior* así definidas representan las sumas de las áreas de los rectángulos que tienen por bases los subintervalos de la partición, y por alturas los valores mínimo y máximo respectivamente de la función f en los subintervalos considerados, tal y como se muestra en la figura 7.1. Así, los valores de $L(P, f)$ y $U(P, f)$ serán siempre menores y mayores respectivamente, que el área encerrada por la función f y el eje de abscisas en el intervalo $[a, b]$.

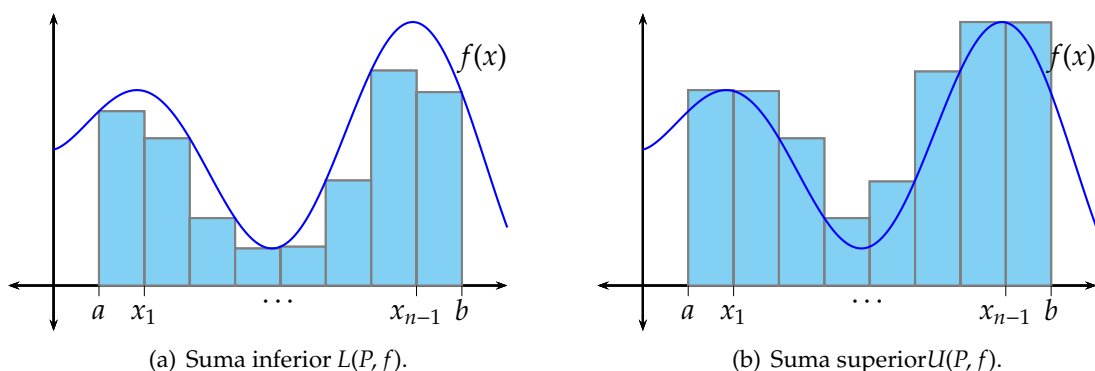


Figura 7.1 – Áreas medidas por las sumas superior e inferior correspondientes a una partición.

Una función $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ acotada es *integrable* en el intervalo $[a, b]$ si se verifica que:

$$\sup\{L(P, f) : P \text{ partición de } [a, b]\} = \inf\{U(P, f) : P \text{ partición de } [a, b]\}$$

y ese número se designa por $\int_a^b f(x) dx$ o simplemente por $\int_a^b f$.

Propiedades de la Integral

1. Linealidad

Dadas dos funciones f y g integrables en $[a, b]$ y $k \in \mathbb{R}$ se verifica que:

$$\int_a^b (f(x) + g(x)) dx = \int_a^b f(x) dx + \int_a^b g(x) dx$$

y

$$\int_a^b kf(x) dx = k \int_a^b f(x) dx$$

2. Monotonía

Dadas dos funciones f y g integrables en $[a, b]$ y tales que $f(x) \leq g(x) \forall x \in [a, b]$ se verifica que:

$$\int_a^b f(x) dx \leq \int_a^b g(x) dx$$

3. Acotación

Si f es una función integrable en el intervalo $[a, b]$, existen $m, M \in \mathbb{R}$ tales que:

$$m(b-a) \leq \int_a^b f(x) dx \leq M(b-a)$$

4. Aditividad

Si f es una función acotada en $[a, b]$ y $c \in (a, b)$, entonces f es integrable en $[a, b]$ si y sólo si lo es en $[a, c]$ y en $[c, b]$, verificándose además:

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx$$

Teorema Fundamental del Cálculo

Sea $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ continua y sea G una función continua en $[a, b]$. Entonces G es derivable en (a, b) y $G'(x) = f(x)$ para todo $x \in (a, b)$ si y sólo si:

$$G(x) - G(a) = \int_a^x f(t) dt$$

Regla de Barrow

Si f es una función continua en $[a, b]$ y G es continua en $[a, b]$, derivable en (a, b) y tal que $G'(x) = f(x)$ para todo $x \in (a, b)$ entonces:

$$\int_a^b f = G(b) - G(a)$$

De aquí se deduce que:

$$\int_a^b f = - \int_b^a f$$

1.3 Integrales impropias

La integral $\int_a^b f(x) dx$ se llama *impropia* si el intervalo (a, b) no está acotado o si la función $f(x)$ no está acotada en el intervalo (a, b) .

Si el intervalo (a, b) no está acotado, se denomina integral impropia de primera especie mientras que si la función no está acotada en el intervalo se denomina integral impropia de segunda especie.

1.4 Cálculo de áreas

Una de las principales aplicaciones de la integral es el cálculo de áreas.

Área de una región plana encerrada por dos curvas

Si f y g son dos funciones integrables en el intervalo $[a, b]$ y se verifica que $g(x) \leq f(x) \forall x \in [a, b]$, entonces el área de la región plana limitada por las curvas $y = f(x)$, $y = g(x)$, y las rectas $x = a$ y $x = b$ viene dada por:

$$A = \int_a^b (f(x) - g(x)) dx$$

Observaciones

1. El intervalo (a, b) puede ser infinito y la definición sería análoga, pero en ese caso es preciso que la integral impropia sea convergente.
2. Si $f(x) \geq 0$ y $g(x) = 0$ al calcular la integral entre a y b se obtiene el área encerrada por la función $f(x)$ y el eje de abscisas entre las rectas verticales $x = a$ y $x = b$ (figura 7.2).

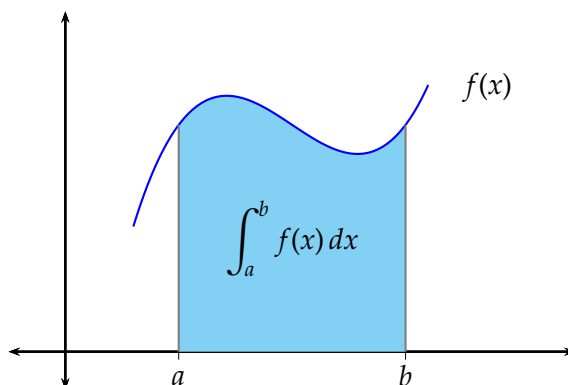


Figura 7.2 – Cálculo de área encerrada por la función $f(x)$ y el eje de abscisas entre las rectas verticales $x = a$ y $x = b$ mediante la integral definida.

3. Si $f(x) \geq 0 \forall x \in [a, c]$ y $f(x) \leq 0 \forall x \in [c, b]$, el área de la región plana encerrada por f , las rectas verticales $x = a$ y $x = b$ y el eje de abscisas se calcula mediante:

$$A = \int_a^c f(x) dx - \int_c^b f(x) dx.$$

4. Si las curvas $y = f(x)$ e $y = g(x)$ se cortan en los puntos de abscisas a y b , no cortándose en ningún otro punto cuya abscisa esté comprendida entre a y b , el área encerrada por dichas curvas entre esos puntos de corte puede calcularse mediante:

$$A = \int_a^b |f(x) - g(x)| dx$$

1.5 Cálculo de Volúmenes

Volumen de un sólido

Si se considera un cuerpo que al ser cortado por un plano perpendicular al eje OX da lugar, en cada punto de abscisa x , a una sección de área $A(x)$, el volumen de dicho cuerpo comprendido entre los planos perpendiculares al eje OX en los puntos de abscisas a y b es:

$$V = \int_a^b A(x) dx$$

Volumen de un cuerpo de revolución

Si se hace girar la curva $y = f(x)$ alrededor del eje OX se genera un sólido de revolución cuyas secciones perpendiculares al eje OX tienen áreas $A(x) = \pi(f(x))^2$, y cuyo volumen comprendido entre las abscisas a y b será:

$$V = \int_a^b \pi(f(x))^2 dx = \pi \int_a^b (f(x))^2 dx$$

En general, el volumen del cuerpo de revolución engendrado al girar alrededor del eje OX la región plana limitada por las curvas $y = f(x)$, $y = g(x)$ y las rectas verticales $x = a$ y $x = b$ es:

$$V = \int_a^b \pi|(f(x))^2 - (g(x))^2| dx$$

De manera análoga se calcula el volumen del cuerpo de revolución engendrado por la rotación de una curva $x = f(y)$ alrededor del eje OY , entre los planos $y = a$ e $y = b$, mediante:

$$V = \int_a^b \pi(f(y))^2 dy = \pi \int_a^b (f(y))^2 dy$$

2 Ejercicios resueltos

1. Calcular las siguientes integrales:

a) $\int x^2 \log x dx$



Introducir $x^2 \log(x)$ en la línea de edición. Utilizar el menú Cálculo ▶ Integrales, eligiendo Integral Indefinida, Constante c y pinchar en el botón Simplificar.

b) $\int \frac{5x^2 + 4x + 1}{x^5 - 2x^4 + 2x^3 - 2x^2 + x} dx$



Introducir la expresión $(5x^2+4x+1)/(x^5-2x^4+2x^3-2x^2+x)$ en la línea de edición y proceder de la forma indicada en el apartado anterior.

c) $\int \frac{6x + 5}{(x^2 + x + 1)^2} dx$



Introducir la expresión $(6x+5)/((x^2+x+1)^2)$ en la línea de edición y proceder de la forma indicada en el apartado anterior.

2. Calcular las siguientes integrales:

a) $\int_{-\frac{1}{2}}^0 \frac{x^3}{x^2 + x + 1} dx$



Introducir $x^3/(x^2+x+1)$ en la línea de edición. Utilizar el menú Cálculo ▶ Integrales y elegir Integral Definida. Introducir $-1/2$ en Límite Inferior y 0 en Límite Superior, y pinchar en Simplificar.

$$b) \int_2^4 \frac{\sqrt{16-x^2}}{x} dx$$



Introducir la expresión $\text{sqrt}(16-x^2)/x$ en la línea de edición y proceder de la forma indicada en el apartado anterior, introduciendo los valores 2 y 4 en Límite Inferior y Límite Superior respectivamente.

$$c) \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{dx}{3 + \cos(2x)}$$



Introducir la expresión $1/(3+\cos(2x))$ y proceder de la forma indicada en el apartado anterior, introduciendo los valores 0 y $\pi/2$ en Límite Inferior y Límite Superior respectivamente.

3. Calcular la siguiente integral

$$\int_2^{\infty} x^2 e^{-x} dx.$$



Introducir la expresión $x^2 \exp(-x)$ en la línea de edición y seguir las indicaciones del primer apartado del ejercicio anterior, introduciendo los valores 2 e ∞ en Límite Inferior y Límite Superior respectivamente.

4. Representar la parábola $y = x^2 - 7x + 6$, y calcular el área limitada por dicha parábola, el eje de abscisas y las rectas $x = 2$ y $x = 6$.



- Introducir la expresión $x^2 - 7x + 6$ en la línea de edición, se pincha en el botón Ventana 2D de la barra de botones para acceder al entorno de gráficos de dos dimensiones, y una vez allí se pincha en el botón Representar Expresión.
- Para volver a la Ventana de Álgebra se pincha en el botón Activar la Ventana de Álgebra, y una vez en ella se realiza lo indicado en el apartado anterior sucesivamente con las expresiones $x=2$ y $x=6$ para obtener sus representaciones gráficas.
- Puede observarse en la gráfica que, entre $x = 2$ y $x = 6$, la parábola $y = x^2 - 7x + 6$ se encuentra por debajo del eje de abscisas, por lo que si se calcula el valor de la integral definida de $x^2 - 7x + 6$ entre esos límites el resultado será negativo. Para hallar el área encerrada habrá que cambiar el signo al resultado.
- Seleccionar la expresión de la parábola, el menú Cálculo ▶ Integrales y elegir Integral Definida. Introducir 2 en Límite Inferior y 6 en Límite Superior, y pinchar en Simplificar. El área buscada será el número obtenido cambiado de signo.
- También podría haberse hallado el área pedida calculando la integral definida de $-(x^2 - 7x + 6)$, o la de $|x^2 - 7x + 6|$, entre $x = 2$ y $x = 6$.

5. Representar gráficamente la región del primer cuadrante limitada por la parábola $y^2 = 8x$, la recta $x = 2$ y el eje OX, y hallar el volumen generado en la rotación alrededor del eje OX de la región anterior.



- a) Se introduce $y^2=8x$ en la línea de edición, se pincha en el botón Ventana 2D de la barra de botones para acceder al entorno de gráficos de dos dimensiones, y una vez allí se pincha en el botón Representar Expresión.
- b) Para volver a la Ventana de Álgebra se pincha en el botón Activar la Ventana de Álgebra, y una vez en ella se realiza lo indicado en el apartado anterior con la expresión $x=2$ y se observa en la gráfica la región del primer cuadrante limitada por la parábola $y^2 = 8x$, la recta $x = 2$ y el eje OX .
- c) Para calcular el volumen generado en la rotación alrededor del eje OX de la región anterior, se calcula la integral de $\pi 8x$ entre 0 y 2, siguiendo las indicaciones incluidas en el primer apartado del segundo ejercicio.

3 Ejercicios propuestos

1. Calcular las siguientes integrales:

$$a) \int \frac{2x^3 + 2x^2 + 16}{x(x^2 + 4)^2} dx$$

$$b) \int \frac{1}{x^2 \sqrt{4 + x^2}} dx$$

2. Hallar el área encerrada la parábola $y = 9 - x^2$ y la recta $y = -x$.
3. Hallar el área encerrada por la curva $y = e^{-|x|}$ y su asíntota.
4. Hallar el volumen generado en la rotación alrededor del eje OX de la región plana limitada por la parábola $y = 2x^2$, las rectas $x = 0$, $x = 5$ y el eje OX , representando previamente dicha región plana.
5. Hallar el volumen generado en la rotación alrededor del eje OY del área limitada por la parábola $y^2 = 8x$ y la recta $x = 2$.

Ecuaciones Diferenciales Ordinarias

1 Fundamentos teóricos

Muchos fenómenos de la naturaleza como la desintegración radiactiva, algunas reacciones químicas, el crecimiento de poblaciones o algunos problemas gravitatorios responden a determinadas ecuaciones en las que se relaciona una función con sus derivadas. Este tipo de ecuaciones se conocen como *ecuaciones diferenciales* y en esta práctica estudiaremos cómo resolverlas.

1.1 Ecuaciones diferenciales ordinarias (E.D.O.)

Se llama *ecuación diferencial ordinaria* (E.D.O.) a una relación entre una variable independiente x , una función desconocida $y(x)$, y alguna de las derivadas de y con respecto a x . Esto es, a una expresión de la forma

$$F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0.$$

Llamaremos *orden de la ecuación diferencial ordinaria* al mayor orden de las derivadas que aparezcan en la ecuación. Así, la forma más general de una E.D.O. de primer orden es $F(x, y, y') = 0$, que puede quedar de la forma $y' = G(x, y)$ si se puede despejar y' .

Solución de una E.D.O.

Diremos que una función $f(x)$ es *solución* o *integral* de la EDO $F(x, y, y', y'', \dots, y^{(n)}) = 0$, si al sustituir en ella y y sus derivadas por $f(x)$ y sus derivadas respectivas, la ecuación se satisface, es decir $F(x, f(x), f'(x), f''(x), \dots, f^{(n)}(x)) = 0$.

En general una ecuación diferencial admite infinitas soluciones, y se limita su número imponiendo condiciones iniciales.

1.2 Ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden

Una ecuación diferencial ordinaria de primer orden es una ecuación de la forma

$$y' = F(x, y).$$

Esta es la forma estándar de escribir la ecuación, aunque a veces, también se suele representar en la forma diferencial como

$$M(x, y)dx + N(x, y)dy = 0.$$

Soluciones general y particular de una E.D.O. de primer orden

Se llama *solución general* o *integral general* de una ecuación diferencial ordinaria de primer orden a una función $y = f(x, c)$, donde c es una constante real, tal que para cada valor de c , la función $y = f(x, c)$

es una solución de la ecuación diferencial. A esta solución así obtenida para un valor concreto de c se le denomina *solución particular* o *integral particular* de la ecuación diferencial.

En la práctica, la determinación de las constantes que conducen a una solución particular se realiza imponiendo ciertas condiciones iniciales en el problema, que son los valores que debe tomar la solución en determinados puntos. Así, para una ecuación diferencial ordinaria de primer orden $y' = F(x, y)$, una condición inicial se expresaría de la forma $y(x_0) = y_0$, y la solución particular sería una función $y = f(x)$ tal que $f'(x) = F(x, f(x))$, y $f(x_0) = y_0$.

Por ejemplo, si consideramos la ecuación diferencial $y' = y$, resulta sencillo comprobar que su solución general es $f(x) = ce^x$, ya que $f'(x) = ce^x$ y se cumple la ecuación. Si para esta misma ecuación tenemos la condición inicial $y(0) = 1$, entonces, al imponer dicha condición a la solución general, se tiene $f(0) = ce^0 = 1$, de donde se deduce que $c = 1$, y por tanto la solución particular sería $f(x) = e^x$.

Geométricamente, la solución general de una ecuación diferencial de primer orden representa una familia de curvas, denominadas *curvas integrales*, una para cada valor concreto asignado a la constante arbitraria. En la figura 8.1 se muestran las curvas integrales de la ecuación diferencial $y' = y$.

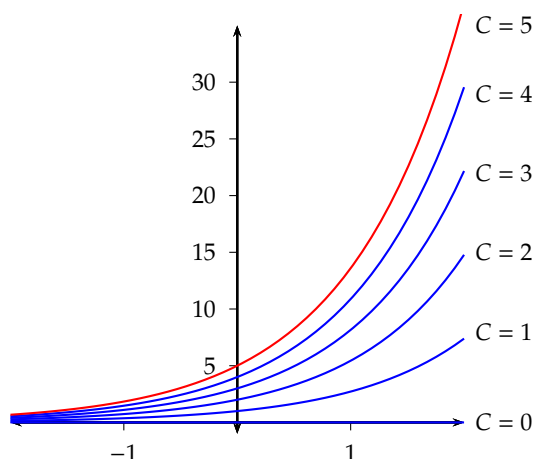


Figura 8.1 – Familia de curvas integrales que son solución de la ecuación $y' = y$.

Existencia y unicidad de soluciones

El siguiente teorema aporta una condición suficiente, aunque no necesaria, para la existencia y la unicidad de la solución de una ecuación diferencial ordinaria de primer orden.

Si $F(x, y)$ y $\partial F / \partial y$ son funciones continuas en un entorno del punto (x_0, y_0) , entonces la ecuación diferencial $y' = F(x, y)$ tiene una solución $y = f(x)$ que verifica $f(x_0) = y_0$, y además esa solución es única. Cuando no se cumplen las condiciones del teorema hay que tener cuidado porque la ecuación puede no tener solución, o bien tener soluciones múltiples como ocurre con la ecuación $y' = 3\sqrt[3]{y^2}$, que tiene dos soluciones $y = 0$ y $y = x^3$ que pasan por el punto $(0, 0)$, ya que $\frac{\partial}{\partial y}(3\sqrt[3]{y^2}) = 2/\sqrt[3]{y}$ que no existe en $(0, 0)$.

Desafortunadamente, el teorema anterior sólo nos habla de la existencia de una solución pero no nos proporciona la forma de obtenerla. En general, no existe una única técnica de resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden $M(x, y)dx + N(x, y)dy = 0$, sino que dependiendo de la forma que tengan $M(x, y)$ y $N(x, y)$, se utilizan distintas técnicas.

1.3 EDO de variables separables

Una E.D.O. de primer orden es de *variables separables* si se puede poner de la forma $y'g(y) = f(x)$ o bien $M(x)dx + N(y)dy = 0$, donde $M(x)$ es una función que sólo depende de x y $N(y)$ sólo depende de y .

La solución de una ecuación de este tipo se obtiene fácilmente integrando $M(x)$ y $N(y)$ por separado, es decir

$$\int M(x) dx = - \int N(y) dy.$$

1.4 EDO Homogéneas

Se dice que una función $F(x, y)$ es *homogénea* de grado n si se cumple $F(kx, ky) = k^n F(x, y)$.

Una E.D.O. de primer orden es *homogénea* si se puede poner de la forma $y' = f\left(\frac{y}{x}\right)$ o bien $M(x, y)dx + N(x, y)dy = 0$ donde $M(x, y)$ y $N(x, y)$ son funciones homogéneas del mismo grado.

Las ecuaciones homogéneas son fácilmente reducibles a ecuaciones de variables separables mediante el cambio $y = ux$, siendo u una función derivable de x .

1.5 EDO Lineales

Una E.D.O. de primer orden es *lineal* si se puede poner de la forma $y' + P(x)y = Q(x)$, donde P y Q son funciones continuas de x .

Para resolver este tipo de ecuaciones se utiliza la técnica de los factores integrantes. Un factor integrante es una función $u(x)$ cuya derivada sea $P(x)u(x)$, con lo que al multiplicar $u(x)$ por el lado izquierdo de la ecuación, el resultado es la derivada del producto $u(x)y$, es decir

$$u(x)y' + u(x)P(x)y = \frac{d}{dx}(u(x)y).$$

A partir de aquí, si también multiplicamos por $u(x)$ el lado derecho de la ecuación tenemos

$$\frac{d}{dx}(u(x)y) = Q(x)u(x),$$

por lo que integrando, resulta

$$u(x)y = \int Q(x)u(x) dx$$

de donde se puede despejar fácilmente y .

Por último, resulta fácil comprobar que un factor integrante de esta ecuación es $u(x) = e^{\int P(x) dx}$, de manera que la solución quedaría

$$y = e^{-\int P(x) dx} \int Q(x)e^{\int P(x) dx} dx + C.$$

2 Ejercicios resueltos



Para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden utilizaremos los comandos

`DSOLVE1_GEN(p, q, x, y, c)` proporciona la solución general de $p(x, y) + q(x, y)y' = 0$.

`DSOLVE1(p, q, x, y, x0, y0)` proporciona la solución particular de $p(x, y) + q(x, y)y' = 0$, con la condición inicial $y_0 = y(x_0)$.

1. Resolver las siguientes ecuaciones diferenciales de variables separables y dibujar sus curvas integrales para las constantes de integración $c = -1$, $c = -2$ y $c = -3$:

a) $-2x(1 + e^y) + e^y(1 + x^2)y' = 0$.



Para resolver la ecuación diferencial observamos que ya está escrita en la forma $p(x, y) + q(x, y)y' = 0$, con $p(x, y) = -2x(1 + e^y)$ y $q(x, y) = e^y(1 + x^2)$.

- 1) Introducir la expresión `DSOLVE1_GEN(-2x(1+e^y), e^y(1+x^2), x, y, c)`.
- 2) Hacer clic en el botón Simplificar.

Para dibujar las curvas integrales:

- 3) Hacer clic en el botón Sustituir, seleccionar la variable c , introducir el valor -1 y hacer clic en el botón Simplificar.
- 4) Hacer clic en el botón Ventana 2D para pasar a la ventana gráfica 2D.
- 5) Hacer clic en el botón Representar expresión.
- 6) Repetir el mismo procedimiento introduciendo los valores -2 y -3 para el valor de c .

b) $y - xy' = 1 + x^2y'$.



Para resolver la ecuación diferencial primero hay que ponerla en la forma $p(x, y) + q(x, y)y' = 0$,

$$y - xy' = 1 + x^2y' \Leftrightarrow 1 + x^2y' - y + xy' = 0 \Leftrightarrow 1 - y + (x^2 + x)y' = 0$$

de manera que $p(x, y) = 1 - y$ y $q(x, y) = x^2 + x$.

- 1) Introducir la expresión `DSOLVE1_GEN(1-y, x^2+x, x, y, c)`.
- 2) Hacer clic en el botón Simplificar.

Para dibujar las curvas integrales:

- 3) Hacer clic en el botón Sustituir, seleccionar la variable c , introducir el valor -1 y hacer clic en el botón Simplificar.
- 4) Hacer clic en el botón Ventana 2D para pasar a la ventana gráfica 2D.
- 5) Hacer clic en el botón Representar expresión.
- 6) Repetir el mismo procedimiento introduciendo los valores -2 y -3 para el valor de c .

2. Resolver las siguientes ecuaciones diferenciales con las condiciones iniciales dadas.

a) $x\sqrt{1-y^2} + y\sqrt{1-x^2}y' = 0$, con la condición inicial $y(0) = 1$.



Para resolver la ecuación diferencial observamos que ya está escrita en la forma $p(x, y) + q(x, y)y' = 0$, con $p(x, y) = x\sqrt{1-y^2}$ y $q(x, y) = y\sqrt{1-x^2}$.

- 1) Introducir la expresión `DSOLVE1(xsqrt(1-y^2), ysqrt(1-x^2), x, y, 0, 1)`.

- 2) Hacer clic en el botón Simplificar.

b) $(1 + e^x)yy' = e^y$, con la condición inicial $y(0) = 0$.



Para resolver la ecuación diferencial primero hay que ponerla en la forma $p(x, y) + q(x, y)y' = 0$,

$$(1 + e^x)yy' = e^y \Leftrightarrow -e^y + (1 + e^x)yy' = 0,$$

de manera que $p(x, y) = -e^y$ y $q(x, y) = (1 + e^x)y$.

- 1) Introducir la expresión DSOLVE1(-#e^y, (1+#e^x)y, x, y, 0, 0).
- 2) Hacer clic en el botón Simplificar.

c) $y' + y \cos x = \sin x \cos x$ con la condición inicial $y(0) = 1$.



Para resolver la ecuación diferencial primero hay que ponerla en la forma $p(x, y) + q(x, y)y' = 0$,

$$y' + y \cos x = \sin x \cos x \Leftrightarrow -\sin x \cos x + y \cos x + y' = 0,$$

de manera que $p(x, y) = -\sin x \cos x + y \cos x$ y $q(x, y) = 1$.

- 1) Introducir la expresión DSOLVE1(-sinxcosx+ycosx, 1, x, y, 0, 1).
- 2) Hacer clic en el botón Simplificar.

3. El azúcar se disuelve en el agua con una velocidad proporcional a la cantidad que queda por disolver. Si inicialmente había 13,6 kg de azúcar y al cabo de 4 horas quedan sin disolver 4,5 kg, ¿cuánto tardará en disolverse el 95 % del azúcar contando desde el instante inicial?



La ecuación diferencial que explica la disolución del azúcar es $y' = ky$, donde y es la cantidad de azúcar que queda por disolver, x es el tiempo y k es la constante de disolución del azúcar. Para resolver la ecuación diferencial primero hay que ponerla en la forma $p(x, y) + q(x, y)y' = 0$,

$$y' = ky \Leftrightarrow -ky + y' = 0,$$

de manera que $p(x, y) = -ky$ y $q(x, y) = 1$.

- a) Introducir la expresión DSOLVE1(-ky, 1, x, y, 0, 13.6).
- b) Hacer clic en el botón Simplificar.

Para obtener la constante de disolución se impone la otra condición $y(4) = 4,5$:

- c) Hacer clic en el botón Sustituir, seleccionar la variable x e introducir el valor 4, seleccionar la variable y e introducir el valor 4,5, y hacer clic en el botón Simplificar y después en el botón Aproximar.

Finalmente, para obtener el tiempo que tiene que pasar hasta que quede un 5 % del azúcar inicial, es decir $13,6 \cdot 0,05 = 0,68$ kg:

- d) Seleccionar la expresión correspondiente a la solución general de la ecuación diferencial.
- e) Hacer clic en el botón Sustituir, seleccionar la variable k e introducir el valor de la constante calculado antes, seleccionar la variable y e introducir el valor 0,68, y hacer clic en el botón Simplificar y después en el botón Aproximar.

3 Ejercicios propuestos

1. Resolver las siguientes ecuaciones diferenciales:

a) $(1 + y^2) + xyy' = 0$.

b) $xy' - 4y + 2x^2 + 4 = 0$.

c) $(y^2 + xy^2)y' + x^2 - yx^2 = 0$.

d) $(x^3 - y^3)dx + 2x^2ydy = 0$.

e) $(x^2 + y^2 + x) + xydy = 0$.

2. Hallar las curvas tales que en cada punto (x, y) la pendiente de la recta tangente sea igual al cubo de la abscisa en dicho punto. ¿Cuál de estas curvas pasa por el origen?
3. Al introducir glucosa por vía intravenosa a velocidad constante, el cambio de concentración global de glucosa con respecto al tiempo $c(t)$ se explica mediante la siguiente ecuación diferencial

$$\frac{dc}{dt} = \frac{G}{100V} - kc,$$

donde G es la velocidad constante a la que se suministra la glucosa, V es el volumen total de la sangre en el cuerpo y k es una constante positiva que depende del paciente. Se pide calcular $c(t)$.

4. En una reacción química, un cierto compuesto se transforma en otra sustancia a un ritmo proporcional a la cantidad no transformada. Si había inicialmente 100 gr de sustancia original y 60 gr tras una hora, ¿cuanto tiempo pasará hasta que se haya transformado el 80 % del compuesto?