### Pácticas de Análisis Matemático con Julia





### Tabla de contenidos

### **Prefacio**

¡Bienvenido a Prácticas de Análisis Matemático con Julia!

Este libro presenta una recopilación de prácticas de Análisis Matemático en una y varias variables reales con el lenguaje de programación Julia, con problemas aplicados a las Ciencias y las Ingenierías.

No es un libro para aprender a programar con Julia, ya que solo enseña el uso del lenguaje y de algunos de sus paquetes para resolver problemas de Cálculo tanto numérico como simbólico. Para quienes estén interesados en aprender a programar en este Julia, os recomiendo leer este manual de Julia.

### Licencia

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 <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/">https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/es/</a>.

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.

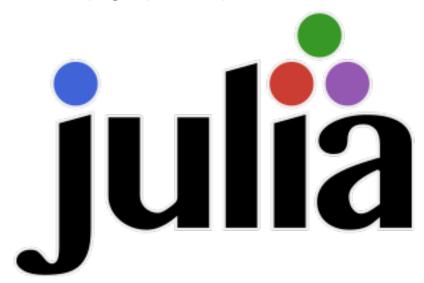
Estas condiciones pueden no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.

Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.

### 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.

Julia es un lenguaje de programación especialmente orientado al cálculo numérico y el análisis de datos. Julia permite además realizar cálculos simbólicos y dispone de una gran biblioteca de paquetes con aplicaciones en muy diversas áreas de las Matemáticas como Cálculo, Álgebra, Geometría, Matemática Discreta o Estadística.



La ventaja de Julia frente a otros programas habituales de cálculo como Mathematica, MATLAB o Sage radica en su potencia de cálculo y su velocidad (equiparable al lenguaje C), lo que lo hace ideal para manejar grandes volúmenes de datos o realizar tareas que requieran largos y complejos cálculos. Además, es software libre por lo que resulta ideal para introducirlo en el aula como soporte computacional para los modelos matemáticos sin coste alguno.

En el siguiente enlace se explica el procedimiento de instalación de Julia.

Existen también varios entornos de desarrollo online que permiten ejecutar código en Julia sin necesidad de instalarlo en nuestro ordenador, como por ejemplo Replit, Cocalc o Codeanywhere.

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

### 1.1 El REPL de Julia

Para arrancar el REPL^(REPL es el acrónimo de Read, Evaluate, Print and Loop, que describe el funcionamiento del compilador de Julia) de julia basta con abrir una terminal y teclear julia.

```
prompt> julia

_____(_)__ | Documentation: https://docs.julialang.org
(_) | (_) (_) |
____ | |___ | Type "?" for help, "]?" for Pkg help.
| | | | | | | | / _ ` | |
| | | | | | | (_| | | | Version 1.7.3 (2022-05-06)
    _/ | \__' | | | Official https://julialang.org/ release
| __/ |
julia>
```

### 1.2 El gestor de paquetes de Julia

Julia viene con varios paquetes básicos preinstalados, como por ejemplo el paquete LinearAlgebra que define funciones básicas del Álgebra Lineal, pero en estas prácticas utilizaremos otros muchos paquetes que añaden más funcionalidades que no vienen instalados por defecto y tendremos que instalarlos aparte. Julia tiene un potente gestor de paquetes que facilita la búsqueda, instalación, actualización y eliminación de paquetes.

Por defecto el gestor de paquetes utiliza el repositorio de paquetes oficial pero se pueden instalar paquetes de otros repositorios.

Para entrar en el modo de gestión de paquetes hay que teclear ]. Esto produce un cambio en el prompt del REPL de Julia.

Los comandos más habituales son:

- add p: Instala el paquete p en el entorno activo de Julia.
- update: Actualiza los paquetes del entorno activo de Julia.
- status: Muestra los paquetes instalados y sus versiones en el entorno activo de Julia.
- remove p: Elimina el paquete p del entorno activo de Julia.

# i Ejemplo Para instalar el paquete SymPy para cálculo simbólico basta con teclear add Sympy. (@v1.7) pkg> add SymPy Updating registry at `~/.julia/registries/General.toml` Resolving package versions... Updating `~/.julia/environments/v1.7/Project.toml` [24249f21] + SymPy v1.1.6 Updating `~/.julia/environments/v1.7/Manifest.toml` [3709ef60] + CommonEq v0.2.0 [38540f10] + CommonSolve v0.2.1 [438e738f] + PyCall v1.93.1 [24249f21] + SymPy v1.1.6

### 1.3 Operadores aritméticos.

El uso más simple de Julia es la realización de operaciones aritméticas como en una calculadora. En Julia se utilizan los siguientes operadores.

	Operador Descripción
x + y	Suma
х - у	Resta
x * y	Producto
х / у	División
х ÷ у	Cociente división entera
х % у	Resto división entera
x ^ y	Potencia

### 1.4 Operadores de comparación

	Operador Descripción
==	Igualdad
!=,	Desigualdad
<	Menor que
<=,	Menor o igual que
>	Mayor que

	Operador Descripción	
>=,	Mayor o igual qu	ιe

### 1.5 Operadores booleanos

Operador	Descripción
!x	Negación
x && y	Conjunción (y)
x II y	Disyunción (o)

Existen también un montón de funciones predefinidas habituales en Cálculo.

### 1.6 Funciones de redondeo

Función	Descripción
round(x)	Devuelve el entero más próximo a x
<pre>round(x, digits = n)</pre>	Devuelve al valor más próximo a $\mathbf{x}$ con $\mathbf{n}$ decimales
floor(x)	Redondea x al próximo entero menor
ceil(x)	Redondea x al próximo entero mayor
trunc(x)	Devuelve la parte entera de $\mathbf{x}$

```
i Ejemplo
  julia> round(2.7)
  3.0
  julia> floor(2.7)
  2.0
  julia> floor(-2.7)
  -3.0
  julia> ceil(2.7)
  3.0
  julia> ceil(-2.7)
  -2.0
  julia> trunc(2.7)
  2.0
  julia> trunc(-2.7)
  -2.0
  julia> round(2.5)
  2.0
  julia> round(2.786, digits = 2)
  2.79
```

### 1.7 Funciones de división

Función	Descripción
div(x,y), x÷y	Cociente de la división entera
fld(x,y)	Cociente de la división entera redondeado hacia abajo
<pre>cld(x,y)</pre>	Cociente de la división entera redondeado hacia arriba
rem(x,y), x%y	Resto de la división entera. Se cumple $x == div(x,y)*y +$
	rem(x,y)
mod(x,y)	Módulo con respecto a y. Se cumple $x == fld(x,y)*y + mod(x,y)$
gcd(x,y)	Máximo común divisor positivo de x, y,

Función	Descripción
lcm(x,y)	Mínimo común múltiplo positivo de x, y,

```
i Ejemplo

julia> div(5,3)
1

julia> cld(5,3)
2

julia> 5%3
2

julia> -5%3
-2

julia> mod(5,3)
2

julia> mod(-5,3)
1

julia> gcd(12,18)
6

julia> lcm(12,18)
36
```

### 1.8 Funciones para el signo y el valor absoluto

Función	Descripción
abs(x)	Valor absoluto de x
sign(x)	Devuelve -1 si $\mathbf{x}$ es positivo, -1 si es negativo y 0 si es 0.

```
i Ejemplo

julia> abs(2.5)
2.5

julia> abs(-2.5)
2.5

julia> sign(-2.5)
-1.0

julia> sign(0)
0

julia> sign(2.5)
1.0
```

### 1.9 Raíces, exponenciales y logaritmos

Función	Descripción
sqrt(x), x	Raíz cuadrada de x
cbrt(x), x	Raíz cúbica de x
exp(x)	Exponencial de $x$
log(x)	Logaritmo neperiano de $x$
log(b,x)	Logaritmo en base b de x
log2(x)	Logaritmo en base 2 de $\mathbf{x}$
log10(x)	Logaritmo en base 10 de ${\tt x}$

```
i Ejemplo
  julia> sqrt(4)
  2.0
  julia> cbrt(27)
  3.0
  julia> exp(1)
  2.718281828459045
  julia> exp(-Inf)
  0.0
  julia> log(1)
  0.0
  julia> log(0)
  -Inf
  julia > log(-1)
  ERROR: DomainError with -1.0:
  log will only return a complex result if called with a complex argument.
  julia > log(-1+0im)
  0.0 + 3.141592653589793im
  julia > log2(2^3)
  3.0
```

### 1.10 Funciones trigonométricas

Función	Descripción
hypot(x,y)	Hipotenusa del triángulo rectángulo con catetos x e y
sin(x)	Seno del ángulo $x$ en radianes
sind(x)	Seno del ángulo x en grados
cos(x)	Coseno del ángulo x en radianes
cosd(x)	Coseno del ángulo x en grados

Función	Descripción
tan(x)	Tangente del ángulo x en radianes
tand(x)	Tangente del ángulo $\mathbf{x}$ en grados
sec(x)	Secante del ángulo $\mathbf{x}$ en radianes
csc(x)	Cosecante del ángulo x en radianes
cot(x)	Cotangente del ángulo $\mathbf{x}$ en radianes

```
i Ejemplo
  julia> sin(/2)
  1.0
  julia> cos(/2)
  6.123233995736766e-17
  julia> cosd(90)
  0.0
  julia> tan(/4)
  0.999999999999999
  julia> tand(45)
  1.0
  julia> tan(/2)
  1.633123935319537e16
  julia> tand(90)
  Inf
  julia> \sin(/4)^2 + \cos(/4)^2
  1.0
```

### 1.11 Funciones trigonométricas inversas

Función	Descripción
asin(x)	Arcoseno (inversa del seno) de x en radianes
asind(x)	Arcoseno (inversa del seno) de x en grados

Función	Descripción
acos(x)	Arcocoseno (inversa del coseno) de x en radianes
acosd(x)	Arcocoseno (inversa del coseno) de x en grados
atan(x)	Arcotangente (inversa de la tangente) de x en radianes
atand(x)	Arcotangente (inversa de la tangente) de x en grados
asec(x)	Arcosecante (inversa de la secante) de x en radianes
acsc(x)	Arcocosecante (inversa de la cosecante) de x en radianes
acot(x)	Arcocotangente (inversa de la cotangente) de ${\tt x}$ en radianes

```
i Ejemplo

julia> asin(1)
1.5707963267948966

julia> asind(1)
90.0

julia> acos(-1)
3.141592653589793

julia> atan(1)
0.7853981633974483

julia> atand(tan(/4))
45.0
```

### 1.12 Precedencia de operadores

A la hora de evaluar una expresión aritmética, Julia evalúa los operadores según el siguiente orden de prioridad (de mayor a menor prioridad).

Categoría Operadores	Asociatividad
Funciones exp, log, sin, etc.	
Exponenciaĉión	Derecha
Unarios + -	Derecha
Fracciones //	Izquierda
Multiplicación/ % & \ ÷	Izquierda
Adición + -	Izquierda
Comparaciones >= <= == != !==	

Categoría Operadores	Asociatividad
Asignaciones += -= *= /= //= ^= ÷= %=  = &=	Derecha

Cuando se quiera evaluar un operador con menor prioridad antes que otro con mayor prioridad, hay que utilizar paréntesis.

```
i Ejemplo

julia> 1 + 4 ^ 2 / 2 - 3
6.0

julia> (1 + 4 ^ 2) / 2 - 3
5.5

julia> (1 + 4) ^ 2 / 2 - 3
9.5

julia> 1 + 4 ^ 2 / (2 - 3)
-15.0

julia> (1 + 4 ^ 2) / (2 - 3)
-17.0
```

### 1.13 Definición de variables

Para definir variables se pueden utilizar cualquier carácter Unicode. Los nombres de las variables pueden contener más de una letra y, en tal caso, pueden usarse también números, pero siempre debe comenzar por una letra. Así, para Julia, la expresión xy, no se interpreta como el producto de la variable x por la variable y, sino como la variable xy. Además, se distingue entre mayúsculas y minúsculas, así que no es lo mismo xy que xy.

### 2 Sucesiones de números reales

### 2.1 Ejercicios Resueltos

Para la realización de esta práctica se requieren los siguientes paquetes:

```
using SymPy # Para el cálculo simbólico de límites.
using Plots # Para el dibujo de gráficas.
#plotlyjs() # Para obtener gráficos interactivos.
using LaTeXStrings # Para usar código LaTeX en los gráficos.
```

Ejercicio 2.1. Dar los 10 primeros términos de las siguientes sucesiones:

```
a. (2n+1)_{n=1}^{\infty}
```

### i Ayuda

Definir una función para el término general y aplicar la función a los naturales de 1 a 10 usando compresiones de arrays.

```
Solución
x(n) = 2n + 1
print([x(n) for n = 1:10])
[3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21]
```

b. 
$$\left(\frac{1}{n}\right)_{n=1}^{\infty}$$

```
Solución
```

```
# Como reales
x(n) = 1 / n
print([x(n) for n = 1:10])
# Como racionales
x(n) = 1//n
print([x(n) for n = 1:10])
```

Rational{Int64}[1//1, 1//2, 1//3, 1//4, 1//5, 1//6, 1//7, 1//8, 1//9, 1//10]

c. 
$$((-1)^n)_{n=1}^{\infty}$$

### Solución

```
x(n) = (-1)^n
print([x(n) for n = 1:10])
[-1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1]
```

d. 
$$\left(\left(1+\frac{1}{n}\right)^n\right)_{n=1}^{\infty}$$

### Solución

```
x(n) = (1 + 1 / n)^n
print([x(n) for n = 1:10])
```

[2.0, 2.25, 2.3703703703703702, 2.44140625, 2.488319999999994, 2.5216263717421135, 2.5

e. 
$$x_1 = 1 \text{ y } x_{n+1} = \sqrt{1 + x_n} \ \forall n \in \mathbb{N}$$

### Solución

```
x(n) = n == 1 ? 1 : sqrt(1+x(n-1))
print([x(n) for n = 1:10])
```

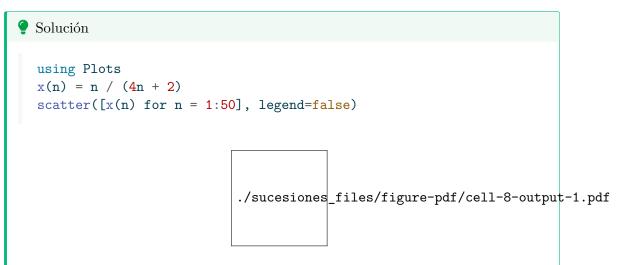
Real[1, 1.4142135623730951, 1.5537739740300374, 1.5980531824786175, 1.6118477541252516]

**Ejercicio 2.2.** Dibujar en una gráfica los 50 primeros términos de las siguientes sucesiones y deducir si son convergentes o no. En el caso de que sean convergentes, dar un valor aproximado de su límite.

### i Ayuda

Definir una función para el término general y aplicar la función a los naturales de 1 a 50 usando compresiones de arrays como en el ejercicio anterior. Después usar la función scatter del paquete Plots para dibujar el array de términos.

a. 
$$\left(\frac{n}{4n+2}\right)_{n=1}^{\infty}$$



La sucesión converge al número 0.25.

b. 
$$\left(\frac{2^n}{n^2}\right)_{n=1}^{\infty}$$

./sucesiones\_files/figure-pdf/cell-9-output-1.pdf

La sucesión diverge.

c. 
$$\left(\frac{(-1)^n}{n}\right)_{n=1}^{\infty}$$

### Solución

```
using Plots x(n) = (-1)^n / n scatter([x(n) for n = 1:50], legend=false)
```

./sucesiones\_files/figure-pdf/cell-10-output-1.pdf

La sucesión converge al 0.

d. 
$$\left(\left(1+\frac{1}{n}\right)^n\right)_{n=1}^{\infty}$$

### Solución

```
using Plots

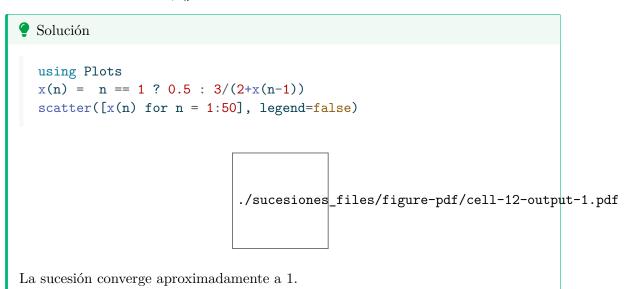
x(n) = (1 + 1 / n)^n

scatter([x(n) for n = 1:50], legend=false)
```

./sucesiones\_files/figure-pdf/cell-11-output-1.pdf

La sucesión converge aproximadamente a 2.7.

e. 
$$x_1 = 0.5$$
 y  $x_{n+1} = \frac{3}{2+x_n} \ \forall n \in \mathbb{N}$ 



Ejercicio 2.3. Calcular el límite, si existe, de las siguiente sucesiones.

```
a. \left(\frac{1}{n}\right)_{n=1}^{\infty}
```

### i Ayuda

Definir una función para el término general usar la función limit del paquete SymPy para calcular el límite de la sucesión.

b. 
$$((-1)^n)_{n=1}^{\infty}$$

```
Solución

@syms n::(integer, positive)
x(n) = (-1)^n
limit(x(n), n=>00)
NaN
```

```
c. \left(\left(1+\frac{1}{n}\right)^n\right)_{n=1}^{\infty}
```

```
Solución

Osyms n::(integer, positive)
x(n) = (1 + 1 / n)^n
limit(x(n), n=>oo)

e
```

**Ejercicio 2.4.** En el siglo III A.C Arquímedes usó el método por agotamiento para calcular el área encerrada por una circunferencia (y de paso el valor de  $\pi$ ). La idea consiste en inscribir la circunferencia en polígonos regulares con un número de lados cada vez mayor.

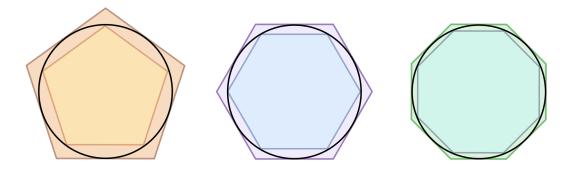


Figura 2.1: Aproximación del área de una circunferencia mediante polígonos regulares

El área de estos polígonos puede calcularse fácilmente descomponiendo los polígonos regulares en triángulos como en el siguiente ejemplo.

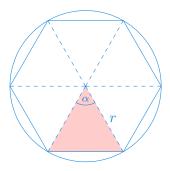


Figura 2.2: Descomposición de un hexágono en triángulos

En el caso de los polígonos inscritos dentro de la circunferencia, como dos de los lados siempre coinciden con el radio de la circunferencia r, el área del polígono de n lados puede calcularse con la fórmula

$$a_n = \frac{1}{2}nr^2 Frsen\left(\frac{360}{n}\right)$$

a. Calcular el área de los polígonos de  $10^i$  lados, para  $i=1,\ldots,6$  tomando r=1.

```
Solución

a(n) = n*sind(360/n)/2
print([a(10^i) for i = 1:6])
```

b. Dibujar con los primeros 50 términos de la sucesión de las areas de los polígonos tomando r=1.

[2.938926261462366, 3.1395259764656687, 3.1415719827794755, 3.141592446881286, 3.141592

Solución

using Plots
a(n) = n\*sind(360/n)/2
scatter([a(n) for n = 1:50], legend=false)

```
./sucesiones_files/figure-pdf/cell-17-output-1.pdf
```

c. Calcular el límite de la sucesión de las areas de los polígonos tomando r=1.

```
Solución

using SymPy
    @syms n::(integer, positive)
    a(n) = n*sin(2pi/n)/2
    limit(a(n), n=>oo)

3.14159265358979
```

d. Usando el resultado anterior, calcular el area del círculo de radio r.

```
Solución

using SymPy
    @syms n::(integer, positive), r
    a(n) = n*r^2*sin(2pi/n)/2
    limit(a(n), n=>oo)

3.14159265358979r²
```

**Ejercicio 2.5.** Dada la sucesión  $x_1 = 1$  y  $x_{n+1} = 1 + \frac{1}{n} \ \forall n \in \mathbb{N}$ , se pide:

a. Dibujar la gráfica de los 10 primeros términos de la sucesión. ¿Es una sucesión monótona?

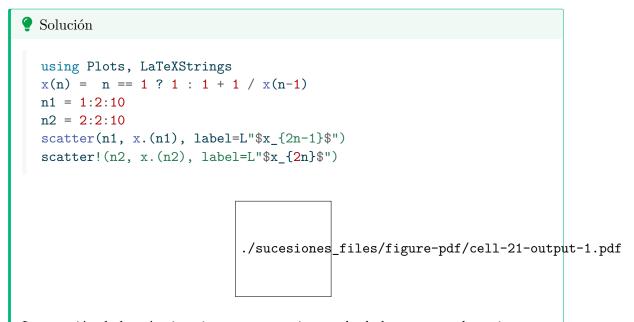
```
Solución

using Plots
    x(n) = n == 1 ? 1 : 1 + 1 / x(n-1)
    scatter([x(n) for n = 1:10], legend=false)
```

./sucesiones\_files/figure-pdf/cell-20-output-1.pdf

La sucesión no es monótona.

b. Dibujar la gráfica de los 5 primeros términos de las subsucesiones con los términos pares e impares. ¿Son monótonas?



La sucesión de los términos impares es creciente y la de los pares es decreciente.

### 2.2 Ejercicios propuestos

**Ejercicio 2.6.** Calcular el décimo término de la sucesión  $\left(\frac{3n^2+n}{6n^2-1}\right)_{n=1}^{\infty}$ .

\*Hint: \*

Introducir hasta 5 decimales

<b>Ejercicio 2.7.</b> Calcular los 10 primeros términos de la sucesión $\left(\frac{3n^2+n}{6n^2-1}\right)_{n=1}^{\infty}$ y averigua hacia dónde converge.
$\square$ No converge
$\square \ 0$
$\square \ 0.5$
$\square$ 1.5
<b>Ejercicio 2.8.</b> ¿Cuál de las siguientes gráficas corresponde a la sucesión $x_1=3$ $x_{n+1}=\sqrt{2x_n} \ \forall n\in\mathbb{N}.$
insert image here
<b>Ejercicio 2.9.</b> A la vista de la gráfica de los 20 primeros términos de la sucesión $\left(\frac{2^n}{n!}\right)_{n=1}^{\infty}$ ¿crees que la sucesión converge?
$\square$ Si
$\square$ No
<b>Ejercicio 2.10.</b> A la vista de la gráfica de los 10 primeros términos de la sucesión $\left(\frac{n^n}{n!}\right)_{n=1}^{\infty}$ , ¿crees que la sucesión converge? $\square$ Si $\square$ No
<b>Ejercicio 2.11.</b> A la vista de la gráfica de los 20 primeros términos de la sucesión dad por $x_1 = 1$ y $x_{n+1} = \sqrt{x_n + 2} \ \forall n \in \mathbb{N}$ , ¿crees que la sucesión converge? $\square$ Si $\square$ No

**Ejercicio 2.12.** ¿Cuál es el límite de la sucesión  $\left(\left(1+\frac{2}{n}\right)^n\right)_{n=1}^{\infty}$ 

\*Hint: \*

Introducir hasta 5 decimales

### 3 Funciones elementales

### 3.1 Ejercicios Resueltos

Para la realización de esta práctica se requieren los siguientes paquetes:

```
using Plots # Para el dibujo de gráficas.
#plotlyjs() # Para obtener gráficos interactivos.
using SymPy # Para el cálculo simbólico.
using MTH229 # Para restringir la gráfica de una función a su dominio.
using LaTeXStrings # Para usar código LaTeX en los gráficos.
```

Ejercicio 3.1. La siguiente tabla contiene el número de bacterias en un cultivo cada hora que pasa.

Horas	Bacterias
0	1
1	2
2	4
3	8
4	16
5	32
6	64
7	128

Dibujar una gráfica con la evolución del la población de bacterias.

### i Ayuda

Definir los valores de las horas en un vector x y el número de bacterias en otro y y luego utilizar la función scatter(x,y) del paquete Plots para dibujar una gráfica de puntos.

```
wsing Plots
horas = 0:7
bacterias = [1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128]
scatter(horas, bacterias, xlab="Horas", ylab="Bacterias", title="Evolución de la pob"

./funciones-elementales_files/figure-pdf/cell-3-output-1.p
```

¿Los pares dados en la tabla forman una función?

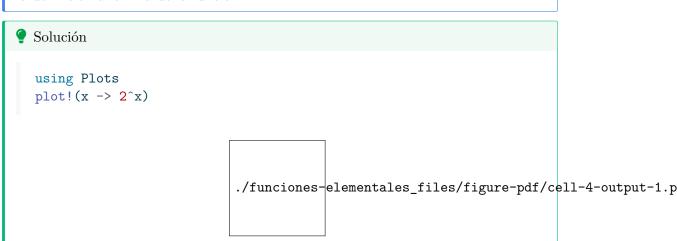
### Solución

Si, porque para cada hora hay a lo sumo un número de bacterias con el que se relaciona.

¿Qué fórmula crees que explica la evolución del número de bacterias en función de las horas que pasan? Dibuja en la gráfica anterior la función con esa fórmula.

### i Ayuda

Para añadir una nueva gráfica a una anterior se añade un signo de exclamación! a la función de graficación. Para una gráfica de líneas, utilizar la función plot! del paquete Plots, pasándole el nombre de la función si se ha definido previamente o la definición anónima de la función



**Ejercicio 3.2.** En el lanzamiento vertical de un objeto, la posición que ocupa el objeto en cada instante t, viene dado por la función

$$y(t) = y_0 + v_0 t + \frac{1}{2}gt^2$$

donde  $y_0$  es la altura inicial del objeto,  $v_0$  la velocidad inicial con que se lanza, y g es la aceleración de la gravedad. Una pelota se lanza verticalmente desde la ventada de un edificio a 5 m de altura, con una velocidad inicial de 10 m/s. Dibujar la gráfica de la posición de la pelota en función del tiempo, tomando una aceleración de la gravedad  $g = -9.8 \text{ m/s}^2$ .

### Ayuda

Declarar t como una variable simbólica usando el paquete  $\operatorname{SymPy}$ , definir después las constantes  $y_0, v_0$  y g, y luego definir la función y(t) mediante la fórmula dada. Para dibujar la gráfica de la función, usar la función plot pasándole el nombre de la función. Como no tienen sentido los instantes negativos, ni las posiciones negativas, restringir la ventana de graficación a valores de t y de y positivos usando los parámetros xlim e ylim.



Al mismo tiempo que se lanza la pelota, un ascensor exterior baja por la fachada del mismo edificio desde una altura de 8 m con una velocidad constante de 5 m/s. Dibujar la gráfica de la posición del ascensor junto a la gráfica de la pelota.

### i Ayuda

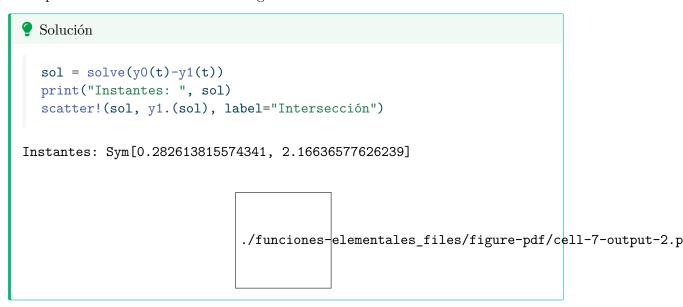
La función que define la posición del ascensor que baja desde una altura  $y_1$  con una velocidad constante  $v_1$  en cada instante t es  $y(t) = y_1 - v_1 t$ .

```
Solución

y = 8
v = 2
y1(t) = y-v*t
plot!(y1, label="Ascensor")

./funciones-elementales_files/figure-pdf/cell-6-output-1.pdf
```

¿En qué instantes el ascensor estará a la misma altura de la pelota? Dibujar los puntos correspondientes a esos instantes en la gráfica anterior.



**Ejercicio 3.3.** El volumen de un globo esférico depende del radio según la función  $v(r) = \frac{4}{3}\pi r^3$ . Calcular la función que expresa el radio en función del volumen y dibujar

su gráfica.

### i Ayuda

Declarar las variables simbólicas  $\mathbf{r}$  y  $\mathbf{v}$  usando el paquete  $\mathsf{SymPy}$  y definir la función  $\mathsf{vol}(\mathbf{r})$  que expresa el volumen del globo en función del radio.

Después utilizar la función solve del paquete SymPy para despejar r de la ecuación v-vol(r)=0.

```
Solución

using Plots, SymPy
@vars r v
vol(r) = 4/3*pi*r^3
rad = solve(v-vol(r),r)[1]
plot(rad, xlab="Volumen (m³)", ylab="Radio (m)", legend=false)

./funciones-elementales_files/figure-pdf/cell-8-output-1.p
```

Si empezamos a introducir helio en el globo de manera que su volumen a los t minutos viene dado por la función  $v(t) = t^2 + 2t$ , dibujar la gráfica de la función que da el radio en cada instante.

### i Ayuda

Declarar las variables simbólicas t usando el paquete SymPy y definir la función vol(t) que expresa el volumen del globo en función del tiempo.

Después utilizar a el operador de composición  $\circ$  para componer la función del volumen con la función del radio.

./funciones-elementales\_files/figure-pdf/cell-9-output-1.p

Si el globo explota cuando el radio alcanza los 3 m, ¿cuándo explotará el globo?

### Ejercicio 3.4. Dibujar la gráfica de la función

$$f(x) = 2x^3 - 3x^2 - 12x + 4$$

en el intervalo [-3,4] y determinar, observando la gráfica, lo siguiente:

### i Ayuda

Definir la función y usar la función plot del paquete Plots.

a. Dominio

Solución

 $Dom(f) = \mathbb{R}$ 

- b. Imagen
- Solución

 $Im(f) = \mathbb{R}$ 

- c. Raíces
- Solución

```
using SymPy
@syms x
f(x) = 2x^3-3x^2-12x+4
raices = solve(f(x)) # Solución exacta
print(raices)
N(raices) # Solución aproximada con decimales

Sym[-2, 7/4 - sqrt(33)/4, sqrt(33)/4 + 7/4]
```

- 3-element Vector{Real}:
  - -2

  - 3.186140661634507164962652867054732329555066114495698091924969367641475180364343

Hay tres raíces en x = -2, x = 0.31 y x = 3.19 aproximadamente.

d. Signo

Solución

Intervalos con f(x) negativa:  $(-\infty, -2) \cup (0.31, 3.19)$ . Intervalos con f(x) positiva:  $(-2, 0.31) \cup (3.19, \infty)$ .

e. Crecimiento

### Solución

Intervalos con f(x) creciente:  $(-\infty, -1) \cup (2, \infty)$ . Intervalos con f(x) decreciente: (-1, 2).

### f. Extremos

### Solución

Máximo relativo en x = -1 y el valor máximo es f(-1) = 11. Mínimo relativo en x = 2 y el valor del mínimo es f(2) = -16.

### g. Concavidad

### Solución

Intervalos de concavidad hacia arriba:  $(0.5, \infty)$ . Intervalos de concavidad hacia abajo:  $(-\infty, 0.5)$ .

### h. Puntos de inflexión

### Solución

Punto de inflexión en x = 0.5.

### Ejercicio 3.5. Dibujar la gráfica de la función

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

en el intervalo [-8, 8] y determinar, observando la gráfica, lo siguiente:

### i Ayuda

Usar la función plot como en el ejercicio anterior con el parámetro aspect\_ratio=1.0 para que los ejes tengan la misma escala.

Para respetar las discontinuidades autilizar la función rangeclamp() del paquete MTH229.

## Solución $g(t) = (t^4+19t^2-5) / (t^4+9t^2-10)$ $plot(rangeclamp(g), -8, 8, aspect_ratio=1.0, ylims=(-5,5), xticks = Vector(-10:10),$ $./funciones-elementales_files/figure-pdf/cell-14-output-1.$

a. Dominio. ¿Qué pasa si aplicamos la función a algún valor fuera de su dominio?

### § Solución $Dom(f) = \mathbb{R} \setminus \{-1, 1\}$ $g(-1), \ g(1)$ (Inf, Inf) Como se observa, al aplicar la función a <math>-1 y 1 se obtiene $\infty$ .

b. Imagen

### Solución

 $Im(f) = \mathbb{R} \setminus (0.5, 1]$ 

c. Asíntotas. Dibujarlas.

### i Ayuda

Buscar las asíntotas verticales en los puntos fuera del dominio de la función. Para dibujar asíntotas verticales usar la función vline del paquete Plots, y para dibujar las asíntotas horizontales usar la función hline.

### Solución

```
vline!([-1,1], label="Asíntotas verticales")
hline!([1], label="Asíntotas horizontales", legend=:bottomright)
```

./funciones-elementales\_files/figure-pdf/cell-16-output-1.

Asíntotas verticales en x = -1 y x = 1.

Asíntotas horizontales en y = 1.

No hay asíntotas oblicuas.

### d. Raíces

### Solución

Hay dos raíces en x = -0.5 y x = 0.5 aproximadamente.

### e. Signo

### Solución

Intervalos con f(x) positiva:  $(-\infty, -1) \cup (-0.5, 0.5) \cup (1, \infty)$ . Intervalos con f(x) negativa:  $(-1, -0.5) \cup (0.5, 1)$ .

### e. Crecimiento

### Solución

Intervalos con f(x) creciente:  $(-\infty, -1) \cup (-1, 0)$ . Intervalos con f(x) decreciente:  $(0, 1) \cup (1, \infty)$ .

### f. Extremos

### Solución

Máximo relativo en x=0 y el valor máximo es g(0)=0.5. No hay mínimos relativos. g. Concavidad



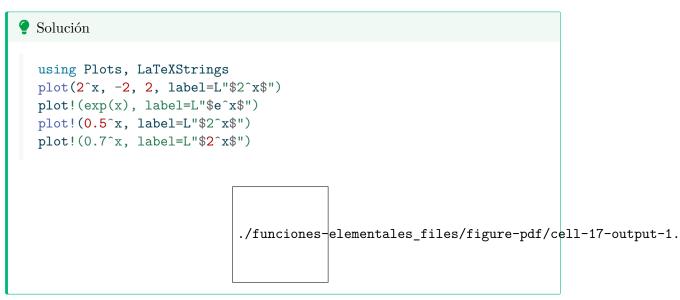
Intervalos de concavidad hacia arriba:  $(-\infty, -1) \cup (1, \infty)$ . Intervalos de concavidad hacia abajo: (-1, 1).

h. Puntos de inflexión



No hay puntos de inflexión.

**Ejercicio 3.6.** Dibujar la gráficas de las siguientes funciones exponenciales  $2^x$ ,  $e^x$ ,  $0.5^x$ ,  $0.7^x$  y responder a las siguientes preguntas comparando las gráficas.



a. ¿Cuál es el dominio de una función exponencial?



b. ¿Cuál es la imagen de una función exponencial?

Solución

 $\mathbb{R}^{+}$ .

c. ¿Cómo es el crecimiento de una función exponencial?

Solución

 $a^x$  es creciente si a > 1 y decreciente si 0 < a < 1.

d. ¿Tienen extremos una función exponencial?

Solución

No

e. ¿Cómo es la curvatura de una función exponencial?

Solución

Es cóncava hacia arriba.

**Ejercicio 3.7.** Dibujar la gráficas de las funciones trigonométricas Frsen(x), Frsen(x+2), Frsen(x)+2, Frsen(2x) y 2Frsen(x), y completar la siguiente tabla estudiando su periodo y amplitud.

Función	Periodo	Amplitud		
Frsen(x)				
Frsen(x+2)				
Frsen(x) + 2				
Frsen(2x)				
2Frsen(x)				

¿Qué conclusiones sacas?

i Ayuda

El periodo es el mínimo intervalo en el que la gráfica de la función se repite, y la amplitud es la mitad de la diferencia entre el máximo y el mínimo de la función.

# Solución using Plots, LaTeXStrings $plot(sin(x), -2*pi, 2*pi, label=L"$\operatorname{cen}(x)$")$ $plot!(sin(x+2), label=L"\$\operatorname{corname}\{sen\}(x+2)\$")$ plot! $(\sin(x)+2, label=L"\$\operatorname{cont}(x)+2\$")$ plot!(sin(2x), label=L"\$\operatorname{sen}(2x)\$") plot!(2sin(x), label=L"\$2\operatorname{sen}(x)\$") ./funciones-elementales\_files/figure-pdf/cell-18-output-1. Función Periodo Amplitud Frsen(x) $2\pi$ Frsen(x+2) $2\pi$ 1 Frsen(x) + 2 $2\pi$ 1 Frsen(2x)1 $\pi$ 2 2Frsen(x) $2\pi$

Se observa que al sumar una constante a la función seno o a su argumento, el periodo y la amplitud no cambian. Sin embargo, si se multiplica por una constante el seno, cambia la amplitud, y si se multiplica su argumento, cambia el periodo.

# Ejercicio 3.8. Dibujar la gráfica de la función a trozos

$$h(x) = \begin{cases} -2x & \text{si } x \le 0; \\ x^2 & \text{si } 0 < x \le 2; \\ 4 & \text{si } 2 < x \end{cases}$$

# i Ayuda

Usar el operador condicional anidado.

```
Solución

using Plots
h(x) = x<=0 ? -2x : x<=2 ? x^2 : 4
plot(h, legend = false)

./funciones-elementales_files/figure-pdf/cell-19-output-1.</pre>
```

**Ejercicio 3.9.** Una hormiga se mueve sobre el plano real de manera que en cada instante t su posición viene dada por las funciones

$$\begin{cases} x = Frsen(t) \\ y = Frsen(2t) \end{cases}$$

Dibujar la gráfica de la trayectoria de la hormiga.

```
Solución

using Plots
u1(t)=sin(t)
v1(t)=sin(2t)
plot(u1, v1, 0, 4pi, aspect_ratio=1.0, legend = false)

./funciones-elementales_files/figure-pdf/cell-20-output-1.
```

# 3.2 Ejercicios propuestos

<b>Ejercicio 3.10.</b> ¿Cuales de las siguientes funciones tienen dominio $\mathbb{R}$ e imagen $\mathbb{R}^+ \cup \{0\}$	)}:
$\square$ 1/ $x^2$	
x	
$2^x$	
$x^4 - 2x^3 + 4x$	
(Select one or more)	
<b>Ejercicio 3.11.</b> Dibujar las gráficas de las funciones logarítmicas $\ln(x)$ , $\log_2(x)$ y $\log_{0.5}(x)$ y contestar a las siguientes preguntas.	(x)
a. ¿Cuál es el dominio de una función logarítmica?	
$\square$ Las otras opciones son falsas.	
$\square$ $\mathbb{R}\setminus\{0\}$	
$\square$ $\mathbb{R}^+$	
$\square$	
$\square$ $\mathbb{R}^+ \cup \{0\}$	
b. ¿Cuál es la imagen de una función logarítmica?	
$\square$ $\mathbb{R}^+$	
$\square$ $\mathbb{R}\setminus\{0\}$	
$\square$	
${\Bbb R}$ $\square$ Las otras opciones son falsas.	

c. ¿Cómo es el crecimiento la función logarítmica $\log_a(x)$ ?
$\square$ Creciente si $a < 1$
$\square$ Creciente si $a > 1$
$\Box$ Decreciente si $0 < a < 1$
$\Box$ Creciente si $0 < a < 1$
(Select one or more)
d. ¿Cómo es la concavidad la función logarítmica $\log_a(x)$ ?
$\Box$ Cóncava hacia abajo si $0 < a < 1$
$\Box$ Cóncava hacia arriba si $0 < a < 1$
$\Box$ Cóncava hacia abajo si $a<1$
$\Box$ Cóncava hacia arriba si $a>1$
(Select one or more)
<b>Ejercicio 3.12.</b> ¿Cuál es el periodo y la amplitud de la función $2\cos(x/2)$ ?
$\square \ 2 \ \mathrm{y} \ 1$
□ y 2
$\square \ 2 \ \mathrm{y} \ 2$
$\square$ 4 y 2
$\square$ 4 y 1

Ejercicio 3.13. ¿Cuál de las gráficas corresponde a la siguiente función paramétrica?

$$f(t) = \begin{cases} Frsen(2t) - \cos(t) \\ Frsen(t) + \cos(t) \end{cases}$$

insert image here

# 4 Límites de funciones reales

# 4.1 Ejercicios Resueltos

Para la realización de esta práctica se requieren los siguientes paquetes:

```
using SymPy # Para el cálculo simbólico de límites.
using Plots # Para el dibujo de gráficas.
#plotlyjs() # Para obtener gráficos interactivos.
using MTH229 # Para restringir la gráfica de una función a su dominio.
using LaTeXStrings # Para usar código LaTeX en los gráficos.
```

**Ejercicio 4.1.** Sea la función  $f(x) = x^2$ .

a. Estudiar la tendencia de f cuando x se aproxima a 3 por la derecha, evaluando la función en  $x=3+\frac{1}{10i}$  para  $i=1,\ldots,10$ .

# i Ayuda

Definir la función y aplicar la función a los valores de x indicados usando compresiones de arrays.

```
Solución
```

```
f(x) = x<sup>2</sup>
a = 3
print([f(a+1/10i) for i = 1:10])
```

[9.6100000000001, 9.3024999999998, 9.20111111111111, 9.150625, 9.1204, 9.100277777

La función tiende a 9.

b. Estudiar la tendencia de f cuando x se aproxima a 3 por la izquierda, evaluando la función en  $x=3-\frac{1}{10i}$  para  $i=1,\ldots,10$ .

### Solución

```
print([f(a-1/10i) for i = 1:10])
```

[8.41, 8.7025, 8.801111111111112, 8.850625, 8.8804, 8.90027777777777, 8.91448979591836

La función también tiende a 9.

c. Dibujar la gráfica de los valores de f evaluados en los apartados anteriores diferenciando la tendencia por la izquierda de la tendencia por la derecha.

# i Ayuda

Definir un vector con los valores de x y otro con los valores correspondientes de f(x) y usar la función scatter del paquete Plots, pasandole los dos vectores.

## Solución

```
xd = [a+1/10i for i=1:10]
scatter(xd, f.(xd), label="Aproximación por la derecha")
xi = [a-1/10i for i=1:10]
scatter!(xi, f.(xi), label="Aproximación por la izquierda", legend=:topleft)
```

./limites\_files/figure-pdf/cell-5-output-1.pdf

d. Calcular el límite por la izquierda y por la derecha de f en x=3.

# i Ayuda

Declarar la variable simbólica x con @vars imponiento la restricción real=true, definir la función y usar la función limit del paquete SymPy para calcular los límites laterales de la función. Para el límite por la izquierda indicar el parámetro dir="-" y para el límite por la derecha dir="+".

# @vars x real=true li = limit(f(x), x=>3, dir="-") println("Limite por la izquierda: ", li) ld = limit(f(x), x=>3, dir="+") println("Limite por la derecha: ", ld) Limite por la izquierda: 9 Limite por la derecha: 9

**Ejercicio 4.2.** Sea la función  $g(x) = (1+x)^{1/x}$ .

a. Estudiar la tendencia de g cuando x se aproxima a 0 por la derecha, evaluando la función en  $x=\frac{1}{10^i}$  para  $i=1,\ldots,10$ .

```
    Solución

g(x) = (1+x)^(1/x)
a = 0
print([g(a+1/10^i) for i = 1:10])
```

La función tiende a e.

b. Estudiar la tendencia de g cuando x se aproxima a 0 por la izquierda, evaluando la función en  $x=-\frac{1}{10^i}$  para  $i=1,\ldots,10$ .

```
Solución

print([g(a-1/10^i) for i = 1:10])
```

[2.867971990792441, 2.7319990264290284, 2.7196422164428524, 2.71841775501015, 2.7182954

La función también tiende a e.

c. Calcular el límite por la izquierda y por la derecha de g en x=0.

# Solución

```
@vars x real=true
li = limit(g(x), x=>0, dir="-")
println("Límite por la izquierda: ", li)
ld = limit(g(x), x=>0, dir="+")
println("Límite por la derecha: ", ld)
Límite por la izquierda: E
Límite por la derecha: E
```

# Ejercicio 4.3. Considérese la función

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

- a. Dibujar su gráfica, y a la vista de misma conjeturar el resultado de los siguientes límites:
- b.  $\lim_{x \to -2^{-}} f(x)$
- c.  $\lim_{x \to -2^+} f(x)$
- d.  $\lim_{x\to-\infty} f(x)$
- e.  $\lim_{x\to+\infty} f(x)$
- f.  $\lim_{x\to 2} f(x)$
- g.  $\lim_{x\to 0} f(x)$

# i Ayuda

Utilizar la función plot! del paquete Plots. Usar los parámetros xlims=(a,b) para restringir la región de dibujo al intervalo (a,b) del eje x, y ylims=(c,d) para restringir la región de dibujo al intervalo (c,d) del eje y.

# Solución

```
using Plots

f(x) = (1+2/x)^(x/2)

plot(f, xlims=(-10,10), ylims=(0,6))
```

```
./limites_files/figure-pdf/cell-10-output-1.pdf A la vista de la gráfica, se puede concluir que  \begin{array}{l} \mathrm{i.} \ \lim_{x \to -2^-} f(x) = -\infty. \\ \mathrm{ii.} \ \lim_{x \to -2^+} f(x) \ \mathrm{no} \ \mathrm{existe}. \\ \mathrm{iii.} \ \lim_{x \to -\infty} f(x) \approx 2.7. \\ \mathrm{iv.} \ \lim_{x \to +\infty} f(x) \approx 2.7. \\ \mathrm{v.} \ \lim_{x \to 2} f(x) = 2. \\ \mathrm{vi.} \ \lim_{x \to 0} f(x) \ \mathrm{no} \ \mathrm{existe}. \end{array}
```

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

```
wsing SymPy
vars x real=true
println("Límite por la izquieda en -2: ", limit(f(x), x=>-2, dir="-"))
println("Límite por la izquieda en -2: ", limit(f(x), x=>-2, dir="+"))
println("Límite en -: ", limit(f(x), x=>-00))
println("Límite en : ", limit(f(x), x=>00))
println("Límite en 2: ", limit(f(x), x=>2))
println("Límite en 0: ", limit(f(x), x=>0))
Límite por la izquieda en -2: oo
Límite por la izquieda en -2:
-oo
Límite en -: E
Límite en 2: 2
Límite en 0:
1
```

# Precaución

Aunque Julia calcula el límite en -2 por la derecha y el límite en 0, a la vista de la gráfica, estos límites en realidad no existen, ya que la función no está definida en el intervalo de [-2,0].

# Ejercicio 4.4. Calcular los siguientes límites

a.  $\lim_{x\to 0} Frsen\left(\frac{1}{x}\right)$ 

# Solución

```
using SymPy
   @vars x real=true
   limit(sin(1/x), x=>0)
<-1,1>
```

Como no se obtiene un valor concreto, sino un rango de valores, el límite no existe.

b.  $\lim_{x\to 0} xFrsen\left(\frac{1}{x}\right)$ 

# Solución

```
limit(x*sin(1/x), x=>0)
```

c.  $\lim_{x\to\infty} e^{-x} Frsen(x)$ 

# Solución

0

```
limit(^(-x)*sin(x), x=>oo)
0
```

c.  $\lim_{x\to a} \frac{Frsen(x) - Frsen(a)}{x-a}$ 

```
    Solución

    @vars a real=true
    limit((sin(x)-sin(a))/(x-a), x=>a)

cos(a)
```

**Ejercicio 4.5.** Calcular el valor de las siguientes funciones en los puntos dados y su límite. Corroborar los límites obtenidos gráficamente.

```
a. f(x) = \frac{Frsen(x)}{x} en x = 0.
```

# Solución

La función f no está definida en x=0 de manera que al evaluarla en 0 obtenemos un valor indeterminado.

```
f(x)=\sin(x)/x
f(0)
```

NaN

Ahora calculamos el límite de f en 0.

```
Ovars x real=true
f(x)=sin(x)/x
limit(f(x), x=>0)
```

1

Para corroborar el límite dibujamos la gráfica de f en un entorno de 0.

```
using Plots
plot(f)
```

./limites\_files/figure-pdf/cell-18-output-1.pdf

b. 
$$g(x) = \frac{\cos(x)}{x - \pi/2}$$
 en  $x = \pi/2$ .

# Solución

La función f no está definida en x=0 de manera que al evaluarla en 0 obtenemos un valor indeterminado.

```
g(x) = \cos(x)/(x-pi/2)g(pi/2)
```

Inf

Como se puede observar, se obtiene  $\infty$  en lugar de indeterminado. La razón está en la representación de los números reales mediante números con coma flotante, de manera que  $\pi/2$  se redondea al número de coma flotante más próximo, y al aplicar el coseno se obtiene un número muy próximo a 0 pero distinto de 0. Ahora calculamos el límite de g en  $\pi/2$ .

```
limit(g(x), x=>pi/2)
```

 $\infty$ 

Para corroborar el límite dibujamos la gráfica de g en un entorno de  $\pi/2$ .

```
using Plots
plot(g)
```

./limites\_files/figure-pdf/cell-21-output-1.pdf

Como se puede apreciar gráficamente el la tendencia de g en  $\pi/2$  es -1 y no el valor obtenido con el cálculo del límite. De nuevo el problema está en la aproximación de pi como un real en coma flotante. Afortunadamente el paquete SymPy permite definir una constante como simbólica para evitar su conversión a número en coma flotante, usando la función Sym(). Repetimos la definición de la función y el cálculo de nuevo convirtiendo  $\pi$  en una constante simbólica.

```
g(x)=cos(x)/(x-Sym(pi)/2)
limit(g(x), x=>Sym(pi)/2)
```

# Ejercicio 4.6. Considérese la función

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

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

# i Ayuda

Para respetar las discontinuidades utilizar la función rangeclamp() del paquete MTH229.

# Solución

```
using Plots, MTH229, LaTeXStrings 

<code>@vars</code> x real=true 

g1(x) = x/(x-2) 

g2(x) = x^2/(2x-6) 

g(x) = x <= 0 ? g1(x) : g2(x) 

plot(rangeclamp(g), xlims=(-5,10), ylims=(-5,10), xticks=-5:10, label = L"g(x)", leg
```

./limites\_files/figure-pdf/cell-23-output-1.pdf

A la vista de la gráfica, se observa que g tiene una asíntota vertical en x=3, una asíntota horizontal y=1 en  $-\infty$  y parece que también hay una asíntota oblicua en  $\infty$ .

b. Calcular las asíntotas verticales de g y dibujarlas.

### Solución

Estudiamos primero el dominio para ver dónde no está definida la función. Como tanto la rama negativa como la positiva son funciones racionales, hay que ver los puntos que anulan el denominador.

```
println("Puntos fuera del dominio de la rama negativa: ", solve(x-2)) println("Puntos fuera del dominio de la rama positiva: ", solve(2x-6))
```

Puntos fuera del dominio de la rama negativa: Sym[2] Puntos fuera del dominio de la rama positiva: Sym[3]

Así pues la rama negativa está definida en todos  $\mathbb{R}^-$  y la rama positiva en  $\mathbb{R}^+ \setminus \{3\}$ . Es en este último punto donde g puede tener asíntota vertical, así que estudiamos los límites laterales.

```
println("Límte en 3 por la izquierda: ", limit(g(x), x=>3, dir="-")) println("Límte en 3 por la derecha: ", limit(g(x), x=>3, dir="+"))
```

Límte en 3 por la izquierda: -oo Límte en 3 por la derecha: oo

Por tanto, g tiene una asíntota vertical en x = 3.

```
vline!([3], label = L"Asíntota vertical $x=3$")
```

./limites\_files/figure-pdf/cell-26-output-1.pdf

c. Calcular las asíntotas horizontales de g.

# Solución

Estudiamos los límites en el infinito.

```
println("Límite en -: ", limit(g1(x), x=>-oo))
println("Límite en : ", limit(g2(x), x=>oo))
```

d. Calcular las asíntotas oblicuas de g.

# Solución

Estudiamos el límite en  $\infty$  de  $\frac{f(x)}{x}$  (en  $-\infty$  no puede haber asíntota oblicua al haber asíntota horizontal).

```
limit(g2(x)/x, x=>00)
```

 $\frac{1}{2}$ 

Por tanto, g tiene una asíntota oblicua con pendiente b=1/2 en  $\infty$ . Para obtener el término independiente de la asíntota calculamos el límite en  $\infty$  de  $f(x)-\frac{1}{2}x$ .

```
limit(g2(x)-x/2, x=>00)
```

 $\frac{3}{2}$ 

Por tanto, g tiene una asíntota oblicua  $y = \frac{3}{2} + \frac{1}{2}x$ .

```
plot!(3/2+x/2, label = L"Asíntota oblicua $y=\frac{3}{2}+\frac{1}{2}x$")
```

./limites\_files/figure-pdf/cell-31-output-1.pdf

### Ejercicio 4.7. Dada la función

$$h(x) = \begin{cases} \frac{2x^2 - 2x}{3x^2 + x} & \text{si } x \le 0, \\ \frac{Frtg(x) + a}{x} & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

i.Qué valor debe tomar a para que la función sea continua en todo su dominio?

# i Ayuda

Calcular el límite en 0 por la izquierda de la función de la rama negativa, y el límite en 0 por la derecha de la función de la rama positiva. Después resolver la ecuación simbólica que resulta de igualar los dos límites. Para crear la ecuación simbólica debe utilizarse la función Eq() del paquete SymPy y después resolverla con la función solve().

# ② Solución ②vars x a real=true h1(x) = (2x^2-2x)/(3x^2+x) h2(x) = (tan(x)-a\*x)/x 11 = limit(h1(x), x=>0, dir="-") 12 = limit(h2(x),x=>0, dir="+") solve(Eq(11,12)) [ 3 ]

Ejercicio 4.8. Representar gráficamente y clasificar las discontinuidades de la función

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

# Solución

Para estudiar las discontinuidades de una función tenemos que estudiar los puntos que no están en el dominio y los puntos donde cambia la definición de la función en el caso de una función definida a trozos.

```
using Plots, MTH229, LaTeXStrings
  @syms x::real
  f1(x) = (x+1)/(x^2-1)
  f2(x) = 1/exp(1/(x^2-1))
  plot(f1, -4, 0, ylim=(-2,8), legend=false)
  plot!(rangeclamp(f2), 0, 4)
                               ./limites_files/figure-pdf/cell-33-output-1.pdf
Para determinar el dominio de la rama negativa, al ser una función racional, tenemos
que ver los puntos que anulan el denominador.
  solve(x^2-1)
 -1
Así pues, la función no está definida en x = -1 (la otra raíz queda fuera de la rama
negativa). Para ver el tipo de discontinuidad estudiamos los límites laterales en
x = -1.
  println("Límite en -1 por la izquierda: ", limit(f1(x), x=> -1, dir=|-"))
  println("Límite en -1 por la derecha: ", limit(f1(x), x=> -1, dir="+"))
Límite en -1 por la izquierda: -1/2
Límite en -1 por la derecha: -1/2
Como el límite existe, f tiene una discontinuidad evitable en x = -1.
Del mismo modo la rama positiva no está definida en x = 1 ya que se anula
el denominador del exponente de la función exponencial. Para ver el tipo de
discontinuidad estudiamos los límites laterales en x=1.
  println("Límite en 1 por la izquierda: ", limit(f2(x), x=>1, dir="-"))
  println("Límite en 1 por la derecha: ", limit(f2(x), x=>1, dir="+"))
Límite en 1 por la izquierda: oo
```

Límite en 1 por la derecha:

0

Como los límites laterales son distintos, f tiene una discontinuidad de salto infinito en x = 1.

Finalmente, estudiamos los límites laterales en x=0, que es donde cambia la definición de la función.

```
println("Límite en 1 por la izquierda: ", limit(f1(x), x=>0, dir="-")) println("Límite en 1 por la derecha: ", limit(f2(x), x=>0, dir="+"))
```

```
Límite en 1 por la izquierda: -1
Límite en 1 por la derecha: E
```

Como los límites laterales son distintos, f tiene una discontinuidad de salto finito en x=0.

**Ejercicio 4.9.** El teorema de Bolzano permite construir un algoritmo para encontrar raíces de una función continua en un intervalo [a,b] cuando f(a)f(b) < 0. Este algoritmo se conoce como el algoritmo de bisección y básicamente consiste en repetir los siguientes pasos:

- 1. Calcular el centro del intervalo  $c = \frac{a+b}{2}$ .
- 2. Si f(c) = 0, c es una raíz y se termina la búsqueda.
- 3. En caso contrario, si f(a)f(c) < 0 hacer b = c, y si no, hacer a = c.
- 4. Repetir la búsqueda.

Construir una función que implemente este algoritmo y utilizarlo para calcular una raíz de la función  $f(x) = x^5 + 3x^4 - 2x^3 + 6x - 2$  en el intervalo [0, 1].

```
Solución
  function raices_biseccion(f, a, b, error=1e-10)
    if f(a) == 0 return(a) end
    if f(b) == 0 return(b) end
    if f(a) * f(b) > 0 error("Las imágenes de los extremos del intervalo no tienen sig
    c = (a+b)/2
    while abs(b-a) > error
      if f(c) == 0 return(c) end
      if f(a) * f(c) < 0
         b = c
      else
         a = c
      c = (a+b)/2
    end
    С
  end
  f(x)=x^5+3x^4-2x^3+6x-4
  print(raices_biseccion(f, 0, 1))
0.6496996753558051
```

# 4.2 Ejercicios propuestos

**Ejercicio 4.10.** En 1683 Jacob Bernouilli estudió la evolución del interés compuesto cuando el periodo de actualización se hacía cada vez más pequeño.

Si disponemos de  $1 \in$  en una cuenta corriente que ofrece un 100% de interés anual, al cabo de un año tendremos  $2 \in$  en la cuenta. Si la cuenta ofrece un interés del 50% cada 6 meses, al final del año tendremos

$$1 \cdot \left(1 + \frac{1}{2}\right) \left(1 + \frac{1}{2}\right) = \left(1 + \frac{1}{2}\right)^2 = 2.25$$
€.

Si la cuenta ofrece un interés del 25% cada trimestre, al final del año tendremos

$$1 \cdot \left(1 + \frac{1}{4}\right) \left(1 + \frac{1}{4}\right) \left(1 + \frac{1}{4}\right) \left(1 + \frac{1}{4}\right) = \left(1 + \frac{1}{4}\right)^4 = 2.44140625 \in.$$

¿Qué cantidad habrá en la cuenta al cabo de un año si la cuenta ofrece un interés del 1/12% mensual?

\*Hint: \*

Introducir hasta 10 decimales

¿Qué cantidad habrá en la cuenta al cabo de un año si la cuenta ofrece un interés del 1/365% diario?

\*Hint: \*

Introducir hasta 10 decimales

¿Qué cantidad habrá en la cuenta al cabo de un año si la cuenta se actualiza de manera continua con un interés 1/x% cuando  $x \to \infty$ ?

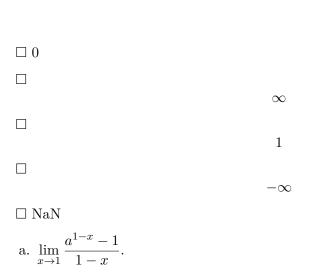
- □ e
- $\Box$   $e^2$
- $\square \ 2.7182818284590$

Ejercicio 4.11. Calcular los siguientes límites.

a. 
$$\lim_{x \to \pi/4} \frac{Frsen(x) - \cos(x)}{1 - Frtg(x)}.$$

b. 
$$\lim_{x \to \infty} \sqrt{x^2 + x + 1} - \sqrt{x^2 - 2x - 1}$$
.

$$c. \lim_{x \to 0^+} \frac{x^x - 1}{x}$$



1/a

 $\square$  Las otras opciones son falsas.  $\sqrt{a}$ 

ln(a) $e^a$ 

**Ejercicio 4.12.** ¿Cuáles de las siguientes rectas son asíntotas de la función  $f(x) = \frac{x^2+1}{3x+3}$ ?

 $y = \frac{x - 1}{3}$ 

 $y = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}x$ 

y = 1

x = -1

y = 3x + 1

 $(Select\ one\ or\ more)$ 

**Ejercicio 4.13.** ¿Cuándo debería valer la función  $h(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{x}$  para que fuese continua en x = 0.

# Ejercicio 4.14. Dada la función

$$h(x) = \begin{cases} x^3 - x - 2 & \text{si } x \le 0, \\ \cos(x - \pi/2) + a & \text{si } x > 0 \end{cases}$$

uuQué valor debe tomar a para que la función sea continua en todo su dominio?

- $-2 + \frac{\sqrt{2}}{2}$
- $\square$  2  $\sqrt{2}$
- $\square$  No hay ningún valor de de a que haga la función continua
- $\Box$   $-2 \frac{\sqrt{2}}{2}$

 $\begin{array}{c}
-2 - \frac{1}{2} \\
\hline
-2
\end{array}$ 

**Ejercicio 4.15.** ¿Qué tipo de discontinuidad presenta la función  $g(x) = \frac{1}{e^{1/(x^2-1)}}$  en x = -1?

- ☐ Salto infinito
- ☐ Es continua
- □ Segunda especie
- □ Salto finito
- $\square$  Evitable

**Ejercicio 4.16.** Calcular de forma aproximada con el algoritmo de bisección una solución de la ecuación  $e^{-x} = \cos(x)$  en el intervalo [1, 2] con un error menor de  $10^{-15}$ .

# 5 Derivadas de funciones reales

# 5.1 Ejercicios Resueltos

Para la realización de esta práctica se requieren los siguientes paquetes:

```
using SymPy # Para el cálculo simbólico de límites.
using Plots # Para el dibujo de gráficas.
#plotlyjs() # Para obtener gráficos interactivos.
using ImplicitPlots # Para dibujar curvas implícitas.
using MTH229 # Para restringir la gráfica de una función a su dominio.
using LaTeXStrings, Latexify # Para usar código LaTeX en los gráficos.
```

Ejercicio 5.1. Galileo Galilei trató de estudiar el movimiento de un cuerpo en caída libre con un experimento en el que midió la distancia recorrida cada segundo por una bola que caía por un plano inclinado.



Figura 5.1: Plano inclinado de Galileo.

La siguiente tabla recoge sus mediciones.

Tiempo (s)	Distancia (cm)
0	0
1	1
2	4
3	9
4	16

Tiempo (s)	Distancia (cm)
5	25

a. Dibujar la gráfica que resulta de unir los puntos correspondientes a los pares de la tabla con segmentos. ¿Qué forma tiene la gráfica?

# i Ayuda

Definir dos arrays con los valores del tiempo y la distancia y usar la función scatter del paquete Plots para dibujar los puntos y la función plots del paquete Plots para dibujar un diagrama de líneas uniendo los puntos.



```
using Plots
t = [0, 1, 2, 3, 4, 5, 6]
d = [0, 1, 4, 9, 16, 25, 36]
scatter(t, d, legend=false)
plt = plot!(t, d, linecolor="blue", xlab="Tiempo (s)", ylab="Distancia recorrida (cm
```

./derivadas\_files/figure-pdf/cell-3-output-1.pdf

Se aprecia que una forma parabólica.

b. Calcular la velocidad media (tasa de variación media) desde los instantes t=0,1,2 hasta el instante t=3 y dibujar la rectas secantes a la gráfica anterior en esos instantes. ¿Cómo es la tendencia de las velocidades medias?

# Ayuda

La tasa de variación media de una función f en un intervalo [a,b] viene dada por la fórmula

$$TVM(f, [a, b]) = \frac{f(b) - f(a)}{b - a},$$

y la recta secante a la función f en el intervalo [a, b] tiene ecuación

$$y = f(a) + TVM(f, [a, b])(x - a).$$

# Solución

```
# Función para el cálculo de la velocidad media en del instante i al instante j.
  tvm(i, j) = (d[j]-d[i])/(t[j]-t[i])
  j = 4
  # Cálculo de las velocidades medias.
  for i in 1:3
      println("Velocidad media desde el instante $(t[i]) al instante $(t[j]): $(tvm(i,
  end
  # Función para calcular la ecuación de la recta secante en los instantes i y j.
  secante(x, i, j) = d[i] + tvm(i, j) * (x - t[i])
  # Dibujo de las rectas secantes
  for i in 1:3
       plt = plot!(x -> secante(x,i,j))
  end
  plt
Velocidad media desde el instante 0 al instante 3: 3.0 cm/s
Velocidad media desde el instante 1 al instante 3: 4.0 cm/s
Velocidad media desde el instante 2 al instante 3: 5.0 cm/s
                             ./derivadas_files/figure-pdf/cell-4-output-2.pdf
```

Las velocidades medias crecen a medida que pasa el tiempo.

c. Calcular la velocidad media desde el instante t=3 hasta los instantes t=6,5,4 y dibujar la rectas secantes a la gráfica anterior en esos instantes. ¿Cómo es la tendencia de las velocidades medias? ¿Hacia dónde tiende la velocidad media cuando los aproximamos al instante t=3 con instantes menores y mayores?

```
Solución
  i = 4
  # Cálculo de las velocidades medias.
  for j in 7:-1:5
      println("Velocidad media desde el instante $(t[i]) al instante $(t[j]): $(tvm(i,
  end
  # Dibujo de las rectas secantes.
  for j in 7:-1:5
       plt = plot!(x -> secante(x,i,j))
  end
  plt
Velocidad media desde el instante 3 al instante 6: 9.0 cm/s
Velocidad media desde el instante 3 al instante 5: 8.0 cm/s
Velocidad media desde el instante 3 al instante 4: 7.0 cm/s
                              ./derivadas_files/figure-pdf/cell-5-output-2.pdf
Las velocidades medias decrecen a medida que el tiempo decrece.
Se puede deducir que las velocidades medias tienden a 6 cm/s cuando los instantes
se aproximan a 3 s.
```

d. Calcular la variación en la distancia recorrida cada segundo que pasa. ¿Cómo evoluciona la velocidad de la bola?

```
V = []
for i in 2:length(d)
    push!(v, d[i]-d[i-1])
    println("Velocidad media desde el instante $(t[i-1]) al instante $(t[i]): $(v[i-1])
end

Velocidad media desde el instante 0 al instante 1: 1 cm/s
Velocidad media desde el instante 1 al instante 2: 3 cm/s
```

```
Velocidad media desde el instante 2 al instante 3: 5 cm/s
Velocidad media desde el instante 3 al instante 4: 7 cm/s
Velocidad media desde el instante 4 al instante 5: 9 cm/s
Velocidad media desde el instante 5 al instante 6: 11 cm/s
```

e. Calcular la variación en la velocidad cada segundo que pasa. ¿Cómo evoluciona la aceleración de la bola? ¿Qué conclusiones sacó Galileo sobre la aceleración de la bola?

```
for i in 2:length(v)
    println("Aceleración media desde el instante $(t[i-1]) al instante $(t[i]): $(v[end))

Aceleración media desde el instante 0 al instante 1: 2 cm/s
Aceleración media desde el instante 1 al instante 2: 2 cm/s
Aceleración media desde el instante 2 al instante 3: 2 cm/s
Aceleración media desde el instante 3 al instante 4: 2 cm/s
Aceleración media desde el instante 4 al instante 5: 2 cm/s
Se observa que la aceleración es la misma. Galileo concluyó que la aceleración de un cuerpo en caída libre era uniforme.
```

**Ejercicio 5.2.** Representar gráficamente la función f(x) = |x - 1| y estudiar su derivabilidad en el punto x = 1 haciendo uso de la definición de derivada.

```
Solución

using Plots, SymPy, LaTeXStrings
    @vars x real=true
    f(x) = abs(x-1)
    display(plot(f(x), label=L"f(x)=|x-1|"))
    println("Derivada por la izquierda: ", limit((f(x)-f(1))/(x-1), x=>1, dir="-"))
    println("Derivada por la derecha: ", limit((f(x)-f(1))/(x-1), x=>1, dir="+"))
```

./derivadas\_files/figure-pdf/cell-8-output-1.pdf

Derivada por la izquierda: -1 Derivada por la derecha: 1

Como la derivada por la izquierda y por la derecha no son iguales, la función no es derivable en x=1.

Ejercicio 5.3. Sea  $f(x) = \sqrt{x}$ .

a. Dibujar la gráfica de f y dibujar las rectas secantes a f en los intervalos  $[\frac{i}{10},1]$  para  $i=0,\ldots,9$ . ¿Hacia dónde tienden las pendientes de las rectas secantes?



Se deduce que las pendientes de las rectas secantes tienen a 0.5.

b. Dibujar la recta tangente a la gráfica de f en x = 1.

# i Ayuda

La ecuación de la recta tangente a la función f(x) en el punto a es y = f(a) + f'(a)(x-a).

Usar la función diff(f) del paquete SymPy para calcular simbólicamente la derivada de la función f.

# Solución tg = f(1) + diff(f)(1) \* (x-1) plot!(tg, linewidth = 2, color = "red", label="Tangente " \* L"y=" \* latexify(tg)) ./derivadas\_files/figure-pdf/cell-10-output-1.pdf

**Ejercicio 5.4.** Calcular las derivadas de las siguientes funciones hasta el orden 4 y deducir la expresión de la derivada de orden n.

```
a. f(x) = \ln(x+1)
```

# i Ayuda

Usar la función diff(f,n) del paquete SymPy para calcular simbólicamente la derivada de grado n de la función f.

# Solución

```
using SymPy
@vars x real=true
f(x) = log(x+1)
println("Primera derivada: ", diff(f))
println("Segunda derivada: ", diff(f,2))
println("Tercera derivada: ", diff(f,3))
println("Cuarta derivada: ", diff(f,4))
```

```
Primera derivada: 1/(x + 1)
Segunda derivada: -1/(x + 1)^2
Tercera derivada: 2/(x + 1)^3
Cuarta derivada: -6/(x + 1)^4
La derivada de orden n es f^{(n)} = \frac{(-1)^{n-1}(n-1)!}{(x+1)^n}.
```

b.  $f(x) = a^x$ 

```
using SymPy
    Ovars x a real=true
    g(x) = a^x
    println("Primera derivada: ", diff(g(x),x))
    println("Segunda derivada: ", diff(g(x),x,2))
    println("Tercera derivada: ", diff(g(x),x,3))
    println("Cuarta derivada: ", diff(g(x),x,3))
    println("Cuarta derivada: ", diff(g(x),x,4))

Primera derivada: a^x * \log(a)
Segunda derivada: a^x * \log(a)^2
Tercera derivada: a^x * \log(a)^3
Cuarta derivada: a^x * \log(a)^4
La derivada de orden n es g^n = a^x \ln(a)^n.
```

c. h(x) = Frsen(x) + cos(x)

```
wsing SymPy
vsars x real=true
h(x) = sin(x)+cos(x)
println("Primera derivada: ", diff(h))
println("Segunda derivada: ", diff(h,2))
println("Tercera derivada: ", diff(h,3))
println("Cuarta derivada: ", diff(h,4))
Primera derivada: -sin(x) + cos(x)
```

Segunda derivada:  $-(\sin(x) + \cos(x))$ Tercera derivada:  $\sin(x) - \cos(x)$ Cuarta derivada:  $\sin(x) + \cos(x)$ 

La derivada de orden n es

$$h^{(n)} = \begin{cases} Frsen(x) + \cos(x) & \text{si } n = 4k \\ \cos(x) - Frsen(x) & \text{si } n = 4k + 1 \\ -Frsen(x) - \cos(x) & \text{si } n = 4k + 2 \\ -\cos(x) + Frsen(x) & \text{si } n = 4k + 3 \end{cases} \quad k \in \mathbb{N}$$

**Ejercicio 5.5.** Calcular y dibujar las rectas tangente y normal a la gráfica de la función  $f(x) = \ln(\sqrt{x+1})$  en x = 1.

# i Ayuda

La ecuación de la recta tangente a una función f en el punto a es

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

y la de la recta normal

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

```
Solución
```

```
using Plots, SymPy, LaTeXStrings, Latexify  
@vars x real=true  
f(x) = \log(\operatorname{sqrt}(x+1))  
plot(f, -1, 3, x \lim_{x \to 1} (-1,3), y \lim_{x \to 1} (-1,2), aspect_{ratio} = 1, label = L''f(x) = \ln(\operatorname{sqrt}\{x+tg = f(1) + \operatorname{diff}(f)(1) * (x-1)  
plot!(tg, label = "Tangente "*L"y = "*latexify(tg))  
nm = f(1) - 1/\operatorname{diff}(f)(1) * (x-1)  
plot!(nm, label = "Normal "*L"y = "*latexify(nm))
```

./derivadas\_files/figure-pdf/cell-14-output-1.pdf

**Ejercicio 5.6.** Sea la función  $g(x) = \frac{2x^3 - 3x}{x^2 + 1}$ .

a. Dibujar la gráfica de g.

```
Solución

using Plots, SymPy, LaTeXStrings, Latexify
@vars x real=true
g(x)=(2x^3-3x)/(x^2+1)
plot(g, -2, 2, label=L"g(x)=\frac{2x^3-3x}{x^2+1}", legend=:topleft)

./derivadas_files/figure-pdf/cell-15-output-1.pdf
```

b. Calcular la derivada de g y dibujar su gráfica en la misma gráfica que la de g.

```
Plot!(diff(g), label=L"g'(x)="*latexify(simplify(diff(g))))

./derivadas_files/figure-pdf/cell-16-output-1.pdf
```

c. Calcular los puntos críticos de g.

# i Ayuda

Los puntos críticos de una función son los puntos donde se anula la derivada.

# Solución

N.(solve(diff(g)))

### 4-element Vector{Number}:

- $0.0 2.19356734373255556901966105000236220542150362773321609753021007\\ 20838549269230762201007$

Existen dos puntos críticos en x = -0.55 y x = 0.55 aproximadamente.

d. A la vista de los puntos críticos y de la gráfica de la función derivada, determinar los intervalos de crecimiento y los extremos relativos de la función.

# i Ayuda

Una función f derivable en el punto a es creciente si y solo si f'(a) > 0 y decrecientes si y solo si f'(a) < 0.

# Solución

La derivada es positiva en los intervalos  $(-\infty, -0.55)$  y  $(0.55, \infty)$ , por lo que la función g es creciente en estos intervalos, y la derivada es negativa en el intervalo (-0.55, 0.55), por lo que la función g es decreciente en este intervalo.

En el punto crítico x = -0.55 la derivada es positiva a la izquierda y negativa a la derecha, por lo que, según el criterio de la primera derivada, la función g tiene un máximo relativo.

En el punto crítico x=0.55 la derivada es negativa a la izquierda y positiva a la derecha, por lo que, según el criterio de la primera derivada, la función g tiene un mínimo relativo.

e. Calcular segunda la derivada de g y dibujar su gráfica en la misma gráfica que la de g.

# Solución plot!(diff(g,2), label=L"g''(x)="\*latexify(simplify(diff(g(x),x,2)))) ./derivadas\_files/figure-pdf/cell-18-output-1.pdf

f. Calcular los puntos que anulan la segunda derivada de g.

# Solución

```
N.(solve(diff(g,2)))
```

3-element Vector{Real}:

0

Existen tres puntos donde se anula g''(x), en x = -1.73, x = 0 y x = 1.73 aproximadamente.

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

# i Ayuda

Una función f dos veces derivable en el punto a es cóncava hacia arriba si y solo si f''(a) > 0 y cóncava hacia abajo si y solo si f''(a) < 0. Los puntos de inflexión de una función son los puntos donde cambia la concavidad.

# Solución

La segunda derivada es positiva en los intervalos  $(-\infty, -1, 73)$  y (0, 1.73), por lo que la función g es cóncava hacia arriba en esos intervalos, y la segunda derivada es negativa en los intervalos (-1.73, 0) y  $(1.73, \infty)$ , por lo que la función g es cóncava hacia abajo en esos intervalos.

g tiene tres puntos de inflexión en x = 1.73, x = 0 y x = 1.73, donde cambia la

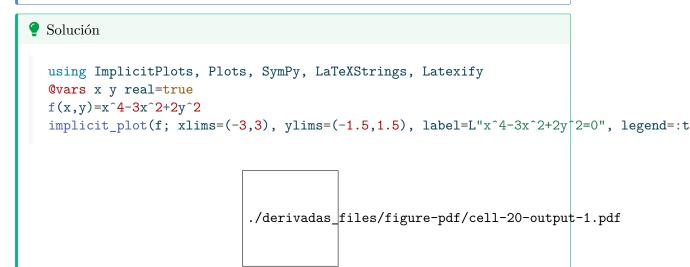
concavidad de la función.

**Ejercicio 5.7.** Considérese la curva con ecuación  $x^4 - x^2 + y^2 = 0$ .

a. Dibujar la gráfica de la curva.

# i Ayuda

Para dibujar curvas implícitas utilizar la función implicit\_plot del paquete ImplicitPlots.



b. Calcular la tasa de variación de y con respecto a x en el punto (1,1).

# i Ayuda

Para realizar derivadas implícitas simbólicamente hay que definir una función simbólica con el comando @syms u() del paquete SymPy y reemplazar y por u(x) en la ecuación de la curva implícita.

Después hay que hacer la derivada de ambos lados de la ecuación y finalmente hay que resolver la ecuación despejando la derivada de u(x).

```
# Declaramos una función simbólica
@syms u()
# Reemplazamos y por una función simbólica u(x).
ex1 = f(x,y)(y=>u(x))
# Calculamos la derivada de ambos lados de la ecuación y la resolvemos para la deriv
du_dx = solve(diff(ex1,x), diff(u(x),x))[1]
# Deshacemos el cambio y=u(x).
dy_dx = du_dx(u(x)=>y)
println("y'=", dy_dx)

y'=x*(3 - 2*x^2)/(2*y)
```

c. Dibujar la recta tangente a la curva anterior en el punto (1,1).



**Ejercicio 5.8.** Crear una función para calcular el polinomio de Taylor de grado n una función f en un punto a y utilizarla para dibujar los polinomios de Taylor de la función f(x) = Frsen(x) en a = 0 hasta el grado 5.

# i Ayuda

La fórmula del polinomio de Taylor de gardo n de la función f en el punto a es

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

# Solución

```
using Plots, SymPy, LaTeXStrings, Latexify
@vars x real=true
function taylor(f, a=0, n=2)
        sum(diff(f, x, i)(a)/factorial(i)*(x-a)^i for i=0:n)
end
f(x)=sin(x)
plt = plot(f, ylims=(-2,2), linewidth=3, label=L"f(x)=\operatorname{sen}(x)")
for i in 1:5
    pol = taylor(f(x), 0, i)
    plt = plot!(pol, label=latexstring("P^{{(i)}(x)=$(pol)"))
end
plt
```

./derivadas\_files/figure-pdf/cell-23-output-1.pdf

**Ejercicio 5.9.** Calcular los polinomios de taylor hasta grado 10 de las siguientes funciones en los puntos indicados.

a. 
$$f(x) = \cos(x)$$
 en  $x = \pi/2$ .

# i Ayuda

Para calcular polinomios de Taylor utilizar la función series del paquete SymPy.

# Solución using SymPy @vars x real=true f(x) = cos(x) series(f(x), x, Sym(pi)/2, 10) $\frac{\pi}{2} + \frac{\left(x - \frac{\pi}{2}\right)^{3}}{6} - \frac{\left(x - \frac{\pi}{2}\right)^{5}}{120} + \frac{\left(x - \frac{\pi}{2}\right)^{7}}{5040} - \frac{\left(x - \frac{\pi}{2}\right)^{9}}{362880} - x + O\left(\left(x - \frac{\pi}{2}\right)^{10}; x \to \frac{\pi}{2}\right)$

b. 
$$g(x) = \ln(x) \text{ en } x = 1$$

# Solución

$$\begin{split} & g(\mathbf{x}) = \log(\mathbf{x}) \\ & \text{series}(g(\mathbf{x}), \mathbf{x}, \mathbf{1}, \mathbf{10}) \\ & -1 - \frac{(x-1)^2}{2} + \frac{(x-1)^3}{3} - \frac{(x-1)^4}{4} + \frac{(x-1)^5}{5} - \frac{(x-1)^6}{6} + \frac{(x-1)^7}{7} - \frac{(x-1)^8}{8} + \frac{(x-1)^9}{9} + x + O\left((x-1)^{10}; x \to 1\right) \end{split}$$

c. 
$$h(x) = e^{Frsen(x)}$$
 en  $x = 0$ 

```
Solución
h(x) = \exp(\sin(x))
\text{series}(h(x), x, 0, 10)
1 + x + \frac{x^2}{2} - \frac{x^4}{8} - \frac{x^5}{15} - \frac{x^6}{240} + \frac{x^7}{90} + \frac{31x^8}{5760} + \frac{x^9}{5670} + O(x^{10})
```

**Ejercicio 5.10.** Aproximar el número  $\ln(1.2)$  mediante un polinomio de Taylor de grado 8 y dar una cota del error cometido. ¿Hasta qué grado habría que llegar para obtener un error menor de  $10^{-10}$ ?

# i Ayuda

El error en la aproximación de una función f(b) mediante un polinomio de Taylor de grado n en el punto a viene dado por el resto de Taylor, que en la forma de Lagrange es

$$R_{f,a}^n(x) = \frac{f^{(n+1)}(x)}{(n+1)!}(x-a)^{n+1} \text{ con } x \in [a,b].$$

## Solución

Utilizaremos un polinomio de MacLaurin de grado 5 para la función  $f(x) = \ln(1+x)$ .

```
using SymPy
    @vars x real=true
pol = series(log(1+x), x, 0, 6).removeO()
println("Aproximación de ln(1.2): ", N(pol(0.2)))
```

Aproximación de ln(1.2): 0.1823306666666667

Para dar una cota del error cometido calculamos el resto de Taylor en la forma de Lagrange.

```
resto = diff(log(1+x), x, 6)/factorial(6)*0.2^6
println("Resto de Taylor de orden 6: ", resto)
println("Derivada del resto : ", diff(resto))
```

Como la derivada no se anula en el intervalo [1, 2], no hay extremos relativos, y al ser una función continua en un intervalo cerrado, alcanza el máximo y mínimos absolutos en los extremos.

```
println("Cota del error: " , maximum(N(abs.([resto(0), resto(0.2)]))))
println("Error: ", abs(log(1.2)-pol(0.2)))
```

Cota del error: 1.0666666666666667e-5 Error: 9.10987271207642e-6

Así pues, el error en la aproximación de  $\ln(1.2)$  es menor que  $1.06 \cdot 10^{-5}$ . Para ver la fórmula general del resto de Taylor en la forma de Lagrange para un polinomio de Taylor de orden n, calculamos las primeras derivadas sucesivas.

```
println("Primera derivada: ", diff(log(1+x)))
println("Segunda derivada: ", diff(log(1+x), x, 2))
println("Tercera derivada: ", diff(log(1+x), x, 3))
println("Cuarta derivada: ", diff(log(1+x), x, 4))
```

Primera derivada: 1/(x + 1)Segunda derivada:  $-1/(x + 1)^2$ Tercera derivada:  $2/(x + 1)^3$ Cuarta derivada:  $-6/(x + 1)^4$ 

Así pues, se deduce que la derivada de orden n es  $f^{(n)}(x) = (-1)^{n-1} \frac{(n-1)!}{(x+1)^n}$ , de manera que el resto de Taylor de orden n es

$$|R_{f,0}^n(x)| = \left| (-1)^{n-1} \frac{(n-1)!}{(n+1)!(x+1)^n} 0.2^{n+1} \right| = \left| \frac{0.2^{n+1}}{(n+1)n(x+1)^n} \right| \ x \in [0, 0.2].$$

Como se trata de una función positiva y decreciente en el intervalo [0, 0.2], alcanza el máximo absoluto en el extremo inferior del intervalo, es decir, en x = 0, y por tanto se tiene,

$$|R_{f,1}^n(x)| \le \left| \frac{0.2^{n+1}}{(n+1)n} \right|.$$

Finalmente calculamos el primer número natural n tal que  $|R_{f,1}^n(x)| < 10^{-10}$ .

```
n=6
while 0.2^(n+1)/(n*(n+1)) > 10^-10
    n += 1
end
print(n)
```

11

Así pues, habría que llegar al grado 11.

# 5.2 Ejercicios propuestos

Ejercicio 5.11. Dada la función

$$f(x) = \begin{cases} Frsen(x)^2 & \text{si } x \le 0, \\ ax^2 + b & \text{si } 0 < x \le c, \\ \ln(x) & \text{si } c < x, \end{cases}$$

¿Para qué valores de a, b y c la función es derivable en todo  $\mathbb{R}$ ?

 $\square$  Para ningún valor.

$$a=\frac{1}{2e},b=0,c=e^{1/2}.$$
 
$$a=1,b=1,c=1.$$
 
$$a=1,b=0,c=e.$$
 
$$a=\sqrt{e},b=0,c=\frac{1}{e}.$$

**Ejercicio 5.12.** ¿Cuál es la derivada de orden n de la función  $f(x) = \frac{1}{\sqrt{x+1}}$ ?

$$\frac{(-1)^n \prod_{i=1}^n 2i}{2^n} (x+1)^{-(2n+1)/2}.$$

$$\frac{(-1)^n n!}{2^n} (x+1)^{-n/2}.$$

$$\frac{(-1)^n \prod_{i=1}^n 2i - 1}{2^n} (x+1)^{-(2n+1)/2}.$$

$$\frac{(-1)^n \prod_{i=1}^n 2i + 1}{2^n} (x+1)^{-(2n+1)/2}.$$

$$\frac{(-1)^n (2n-1)!}{2^n} (x+1)^{-(2n-1)/2}.$$

**Ejercicio 5.13.** Dadas las funciones  $f(x) = \ln\left(\sqrt{\frac{x^2}{2}}\right)$  y  $g(x) = x^3 + 1$ , ¿en qué puntos la recta normal a f y la recta tangente a g con paralelas?

**Ejercicio 5.14.** Calcular el máximo y el mínimo absoluto de la función  $g(x)=\sqrt{x^4-3x^3+\frac{5}{2}x^2}$  en el intervalo [-0.5,1.5].

- a. Mínimo absoluto
- b. Máximo absoluto

**Ejercicio 5.15.** ¿Cuáles de las siguientes afirmaciones son ciertas sobre la función  $h(x) = \frac{x^2 + 1}{e^x}$ ?

- $\square$  Es decreciente en todo  $\mathbb{R}$ .
- $\square$  Tiene un máximo en x=1.
- $\square$  Es cóncava hacia abajo en (1,3).
- $\square$  Tiene un punto de inflexión en x=3.
- $\square$  Tiene un mínimo en x=1.

(Select one or more)

**Ejercicio 5.16.** Una cuerda de longitud l está sujeta en sus extremos en los puntos (0,0) y (a,b). De la cuerda cuelga un anillo. ¿En qué posición estará el anillo debido a la fuerza de gravedad suponiendo que l=10, a=3 y b=2?

# i Ayuda

Puesto que la longitud de la cuerda es fija, del siguiente diagrama se deduce que las las posiciones (x, y) que puede ocupar el anillo vienen dadas por la ecuación

$$l = \sqrt{x^2 + y^2} + \sqrt{(a-x)^2 + (b-y)^2}$$

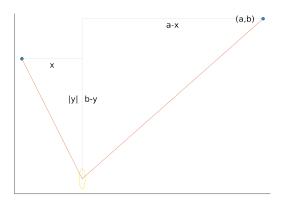


Figura 5.2: Descomposición en triángulos rectángulos de la posición que ocupa un anillo suspendido de una cuerda de tamaño l sujeta en sus extremos en los puntos (0,0) y (a,b).

Coordenada  $\mathbf x$ 

Coordenada y

**Ejercicio 5.17.** Calcular de manera aproximada el valor de Frsen(1/2) usando los siguientes polinomios de Taylor de la función f(x) = Frsen(x).

- a. Polinomio de Taylor de grado 20 en el punto  $\pi/6$ .
- b. Polinomio de MacLaurin de grado 100.
- c. ¿Qué polinomio da una mejor aproximación?
- $\square$  El polinomio de MacLaurin de grado 100.
- $\square$  El polinomio de Taylor de grado 20 en  $\pi/6$ .