



TALLER 1 ANÁLISIS NÚMÉRICO

Gabriel Niño y Juliana García



14 DE FEBRERO DE 2020

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	1
Lista de Ilustraciones	2
Lista de Tablas.....	3
Problemas AN	4
1. Problema Error de Redondeo	4
2. Problema Raíz Cuadrada de 7.....	5
3. Problema Aproximación Utilizando el Teorema de Taylor	8
4. Error de la Aritmética Computacional.....	10
5. Épsilon de la máquina	11
6. Problema Calcular Tamaño del Error.....	11
7. Problema Evaluar Polinomio(G).....	11
8. Problema Silueta Perrito(G).....	12
Taller Análisis	14
1. Teorema de Horner (3) (G)	14
a. Utilice el método de inducción matemática para demostrar el resultado del método 2.....	14
b. Implemente en R o Python para verificar los resultados del método de Horner	15
c. Evaluar en $x = 1.0001$ con $P(x) = 1+x+x^2 + \dots + x^{50}$. Encuentre el error de cálculo al compararlo con la expresión equivalente $Q(x) = (x^{51} - 1)/(x - 1)$	15
2. Números Binarios (3) (G)	16
a) Encuentre los primeros 15 bits en la representación binaria de π	16
b) Convertir los siguientes números binarios a base 10: 1010101; 1011.101; 10111.010101...; 111.1111...	17
c) Convierta los siguientes números de base 10 a binaria: 11.25; 2/3; 30.6; 99.9	18
3. Épsilon de la máquina	19
4. Raíces de una ecuación.....	22
5. Convergencia Métodos Iterativos (5) (G)	26
6. Convergencia Acelerada (3) (J).....	27
Referencias	32

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1 - Algoritmo Raíz [1]	5
Ilustración 2 - Silueta Perrito [4]	13
Ilustración 3 - Orden de Convergencia n^2	24

Lista de Tablas

Tabla 1 - Raíz de 7	7
Tabla 2 - Teorema Taylor.....	10
Tabla 3 - Número Punto Flotante	20
Tabla 4 - Aritmética Precisión doble 1.....	21
Tabla 5 - Aritmética Precisión doble 2.....	21
Tabla 6 - Aritmética Precisión doble 3.....	22
Tabla 7 -Aritmética Precisión doble 4	22
Tabla 8 - Aritmética Precisión doble 5.....	22
Tabla 9 - coseno Aitken	28
Tabla 10 - Algoritmo de Steffensen.....	31
Tabla 11 - Algoritmo de Aitken.....	32

Problemas AN

1. Problema Error de Redondeo

Suponga que un dispositivo sólo puede almacenar únicamente los cuatro primeros dígitos decimales de cada número real, y trunca los restantes (esto es redondeo inferior). Calcule el error de redondeo si se quiere almacenar el número 536.78.

“Si n es la cantidad de enteros del número normalizado con potencias de 10 y m es la cantidad de cifras decimales que se pueden almacenar en un dispositivo, entonces el error de redondeo absoluto esta acotado por” [1]:

$$|E| < 1 * 10^{n-m}$$

Se procede a resolver el problema por este método. El número debe ser expresado en forma normalizada:

$$x = 536.78 \rightarrow x = 0.53678 \times 10^3$$

Lo siguiente es descomponer el número en dos partes:

$$x = 0.5367 \times 10^3 + 0.00008 \times 10^3$$

El dispositivo almacena:

$$= 0.5367 \times 10^3$$

El error de redondeo sería [1]:

$$E = 0.00008 \times 10^3 = 0.8 \times 10^{3-4} = 0.8 \times 10^{-1}$$

El algoritmo fue implementado en el lenguaje R:

```
#Error de Redondeo
```

```
rm(list=ls())
```

```
valreal<-536.78
```

```
valaprox<-536.7
```

```
E<-abs(valreal-valaprox)
```

```
print(E)
```

```
#-----
```

El resultado del error de redondeo fue:

$$0.08 = 0.8 \times 10^{-1}$$

2. Problema Raíz Cuadrada de 7

Implemente en cualquier lenguaje el siguiente algoritmo que sirve para calcular la raíz cuadrada. Aplíquelo para evaluar la raíz cuadrada de 7, analice su precisión, como podría evaluar la convergencia y validez del algoritmo.

```
Algoritmo: Raíz cuadrada
Entra:      n      Dato
           E      Error permitido
           x      Valor inicial
Sale:      y      Respuesta calculada con error E
 $y \leftarrow \frac{1}{2}(x + \frac{n}{x})$ 
Repetir mientras  $|x - y| > E$ 
    x ← y
     $y \leftarrow \frac{1}{2}(x + \frac{n}{x})$ 
Fin
```

Ilustración 1 - Algoritmo Raíz [1]

Para evaluar la convergencia y validez del algoritmo se puede utilizar la potenciación ya que siendo la operación inversa de la radicación debería dar como resultado el dato inicial al cual se le iba a hallar la raíz, en este caso 7.

El algoritmo fue implementado en el lenguaje R:

```
#Raiz Cuadrada de 7
```

```
#Referencias: Analisis Numerico Con Python, pag 15
```

```
rm(list=ls()) #Borrar los datos guardados en memoria
```

```
x<-3 #Valor Inicial
```

```
n<-7 #Dato
```

```
E<-1e-5 #Error Permitido
```

```
cont<-1 #Contador de iteración
```

```
valit<- c() #Valor de cada iteracion
```

```
valx<-c() #Valores que tomara x en cada iteracion
```

```
valy<-c() #Valores que tomara y en cada iteracion
```

```

valE<-c() #Valores del Error Absoluto en cada iteracion
vale<-c() #Valores del error relativo en cada iteracion
valval<-c() # Validacion de la raiz en en cada iteracion
valaprox<-c() #Valor aproximado que es la media de las diferentes medidas
f<-function(x,n,E){
  1/2*(x+n/x) #Función para calcular la raiz cuadrada
}
y<-f(x,n,E) #Resultado de la funcion
valit<-c(valit,cont)
valx<-c(valx,x)
valy<-c(valy,y)
vale<-c(vale,(abs(y-x)/abs(y))*100)
valval<-c(valval,y^2)
valaprox<-c(valaprox,mean(valy))
precision<-c() #Precision del calculo
repeat{
  cont<-cont+1
  x<-y
  y<-f(x,n,E)
  valit<-c(valit,cont)
  valx<-c(valx,x)
  valy<-c(valy,y)
  valval<-c(valval,y^2)
  vale<-c(vale,(abs(y-x)/abs(y))*100)
  valaprox<-c(valaprox,mean(valy))
  if(abs(x-y)<E) break
}
valE<-abs(y-valaprox)

```

```

precision<-100-vale

#Guardar resultados en una tabla de datos

resultados<-
data.frame("Iteracion"=valit,"X"=valx,"Y"=valy,"Error_Absoluto"=valE,"Error_Rel
ativo"=vale,"Precision"=precision,"Validacion"=valval)

#Exportar los resultados

write.table(resultados,file="ResultadosRaiz7.txt")

#Imprimir resultados

print(resultados)

#-----

```

Estos fueron los resultados de la prueba:

Iteración	X	Y	Error Absoluto	Error Relativo	Precisión	Validación (Y^2)
1	3	2.666666666 66667	0.0209153556020 762	12.5%	87.5%	7.11111111111111
2	2.666666666 66667	2.645833333 33333	0.0104986889354 093	0.78740157480 3172%	99.2125984251 968%	7.00043402777778
3	2.645833333 33333	2.645751312 33596	0.0069991263807 2853	0.00310010230 337531%	99.9968998976 966%	7.00000000672744
4	2.645751312 33596	2.645751311 06459	0.0052493447855 4639	4.80531562566 483e-08%	99.9999999519 468%	7

Tabla 1 - Raíz de 7

El algoritmo convergió al siguiente resultado:

$$y = 2.64575131106459$$

Este resultado se eleva al cuadrado para evaluar la validez de la respuesta, pues puede que el algoritmo llegue a un punto en que converja, pero no necesariamente es correcto:

$$y^2 = 2.64575131106459^2 = 7$$

Se comprueba que el algoritmo converge y es da como resultado una respuesta válida.

El error disminuye con cada iteración mientras la precisión, lo que significa que después de cada iteración el algoritmo se acerca a una respuesta más precisa. El último cálculo de la precisión dio el siguiente resultado:

$$\text{precision} = 99.9999999519468\% \approx 100\%$$

Siendo un valor tan cercano al 100%, esto soporta la conclusión de que la respuesta que da el algoritmo es válida.

3. Problema Aproximación Utilizando el Teorema de Taylor

Utilizando el teorema de Taylor hallar la aproximación de $e^{0.5}$ con cinco cifras significativas.

Primero hay que definir el Teorema de Taylor [2]:

$$f(x) = P_n(x) + R_n(x)$$

Donde $P_n(x)$ es el polinomio de Taylor:

$$P_n(x) = f(0) + f'(0)x + \frac{f''(0)x^2}{2} + \dots + \frac{f^{(n)}(0)x^n}{n!}$$

Y $R_n(x)$ es el error de truncamiento.

Hay que tener en cuenta que la derivada $f(x) = e^x = f'(x)$ y que $e^0 = 1$.

Primero hay que hallar el criterio de error con 5 cifras significativas:

$$E_s = (0.5 \times 10^{-5})\% = 0.0005\%$$

Ahora aplicando el polinomio de Taylor la primera aproximación es:

$$e^{0.5} \approx e^0 = 1 \rightarrow e^{0.5} \approx 1$$

Segunda aproximación:

$$e^{0.5} \approx e^0 + e^0(0.5) \rightarrow e^{0.5} \approx 1 + 0.5 = 1.5$$

Tercera aproximación:

$$e^{0.5} \approx e^0 + e^0(0.5) + \frac{e^0(0.5)^2}{2} \rightarrow e^{0.5} \approx 1 + 0.5 + 0.125 = 1.625$$

Cuarta aproximación:

$$e^{0.5} \approx e^0 + e^0(0.5) + \frac{e^0(0.5)^2}{2} + \frac{e^0(0.5)^3}{3!} \rightarrow$$
$$e^{0.5} \approx 1 + 0.5 + 0.125 + 0.02083333333 = 1.645833333$$

Quinta aproximación:

$$e^{0.5} \approx e^0 + e^0(0.5) + \frac{e^0(0.5)^2}{2} + \frac{e^0(0.5)^3}{3!} + \frac{e^0(0.5)^4}{4!} \rightarrow$$
$$e^{0.5} \approx 1 + 0.5 + 0.125 + 0.02083333333 + 2.604166667 \times 10^{-3}$$
$$= 1.666666666$$

Sexta aproximación:

$$e^{0.5} \approx e^0 + e^0(0.5) + \frac{e^0(0.5)^2}{2} + \frac{e^0(0.5)^3}{3!} + \frac{e^0(0.5)^4}{4!} + \frac{e^0(0.5)^5}{5!}$$

$$e^{0.5} \approx 1 + 0.5 + 0.125 + 0.02083333333 + 2.604166667 \times 10^{-3} + 2.604166667 \times 10^{-4} = 1.666927083$$

El algoritmo fue implementado en el lenguaje R:

#Teorema de Taylor

rm(list=ls()) #Borrar los datos guardados en memoria

n<-0 #Valor Inicial

x<-0.5 #Constante

y<-function(x,n){

 x^n/factorial(n)

}

valx<-c(x)

valy<-c(y(x,n)) #Valores que tomara y en cada iteracion

valtay<-c(sum(valy))#Valores de aproximacion del Teorema de Taylor

temp<-sum(valy) #Auxiliar

valn<-c(n) #Valores de n en cada iteracion

valE<-c(abs(exp(x)-mean(valtay))) #Valores del Error Absoluto en cada iteracion

vale<-c(abs(exp(x)-mean(valtay))/mean(valtay)) #Valores del error relativo en cada iteracion

n<-n+1

repeat{

 valx<-c(valx,x)

 valy<-c(valy,y(x,n))

 valtay<-c(valtay,sum(valy))

 valn<-c(valn,n)

 valE<-c(valE,abs(exp(x)-mean(valtay)))

 vale<-c(vale,abs(exp(x)-mean(valtay))/mean(valtay))

 temp<-sum(valy)

 n<-n+1

 if(n>5) break

```

}

precision<-100-vale

#Guardar resultados en una tabla de datos

resultados<-
data.frame("X"=valx,"N"=valn,"Y"=valy,"Taylor"=valtay,"Error_Absoluto"=valE,"
Error_Relativo"=vale,"Precision"=precision)

#Exportar los resultados

write.table(resultados,file="lol.txt")

#Imprimir resultados

print(resultados,tol=1e-16)

#-----

```

Estos fueron los resultados de la prueba:

X	N	Y	Taylor	Error Absoluto	Error Relativo	Precisión
0.5	0	1.0000000000	1.000000	0.6487213	0.64872127	99.35128
0.5	1	0.5000000000	1.500000	0.3987213	0.31897702	99.68102
0.5	2	0.1250000000	1.625000	0.2737213	0.19907002	99.80093
0.5	3	0.0208333333	1.645833	0.2060129	0.14279597	99.85720
0.5	4	0.0026041667	1.648438	0.1648671	0.11110735	99.88889
0.5	5	0.0002604167	1.648698	0.1373931	0.09090888	99.90909

Tabla 2 - Teorema Taylor

La precisión de la aproximación se va aumentando con cada iteración, se puede deducir que si el algoritmo continua, posiblemente se llegue a una aproximación que tenga una precisión casi del 100%.

4. Error de la Aritmética Computacional

El error de redondeo en la aritmética computacional se debe a que los datos pueden llegar a ser inexactos ya que los dispositivos no pueden almacenar todas las cifras [1]. Las operaciones aritméticas pueden producir resultados que no se pueden guardar ni representar en dispositivos de almacenamiento, y a medida que se ejecutan las operaciones aritméticas el error puede llegar a crecer de manera muy significativa [1].

Hay 3 fuentes de error en la aritmética computacional:

- **Análisis:** Se producen errores inherentes que son provocados por suposiciones, omisiones o simplificaciones mal hechas.
- **Diseño:** Se producen errores de truncamiento que son provocados utilizar procedimientos simplificados dentro de los métodos numéricos establecidos o al utilizar algoritmos iterativos.

- **Instrumentación:** Se producen errores de redondeo en dispositivos que no tengan la capacidad de almacenamiento para procesar datos reales con muchas cifras decimales.

5. Épsilon de la máquina

El épsilon de la máquina es la distancia entre 1 y el número de punto flotante mayor que 1. Para el punto flotante de precisión doble se tiene que:

$$\epsilon_{maq} = 2^{-52}$$

Donde ϵ_{maq} representa épsilon [3].

6. Problema Calcular Tamaño del Error

Calcule el tamaño del error dado por las operaciones aritméticas, para la solución del siguiente problema:

La velocidad de una partícula es constante e igual a 4m/s, medida con un error de 0.1m/s durante un tiempo recorrido de 5seg medido con un error de 0.1seg. Determine el error absoluto y el error relativo en el valor de la distancia recorrida.

Velocidad: $v = 4, E_v = 0.1$

Tiempo: $t = 5, E_t = 0.1$

Distancia: $d = vt = 4 \times 5 = 20$

Error absoluto: $E_d = \bar{v}E_t + \bar{t}E_v = 4(0.1) + 5(0.1) = 0.9$

Rango de variación de la distancia: $20 - 0.9 \leq d \leq 20 + 0.9 \rightarrow 19.1 \leq d \leq 20.9$

Error relativo: $e_d = \frac{E_v}{\bar{v}} + \frac{E_t}{\bar{t}} = \frac{0.1}{4} + \frac{0.1}{5} = 0.045 = 4.5\%$

7. Problema Evaluar Polinomio(G)

Evaluar el valor de un polinomio es una tarea que involucra para la maquina realizar un número de operaciones la cual debe ser mínimas. Como se puede evaluar el siguiente polinomio con el número mínimo de multiplicaciones. Teorema de horner

$$P(x) = 2x^4 - 3x^2 + 3x - 4 \text{ en } x_0 = -2$$

Para encontrar la solución a este problema deberemos de usar el Teorema de Horner. Este es un método que consiste en determinar de manera eficaz el valor del polinomio de grado n utilizando el menor número de productos.

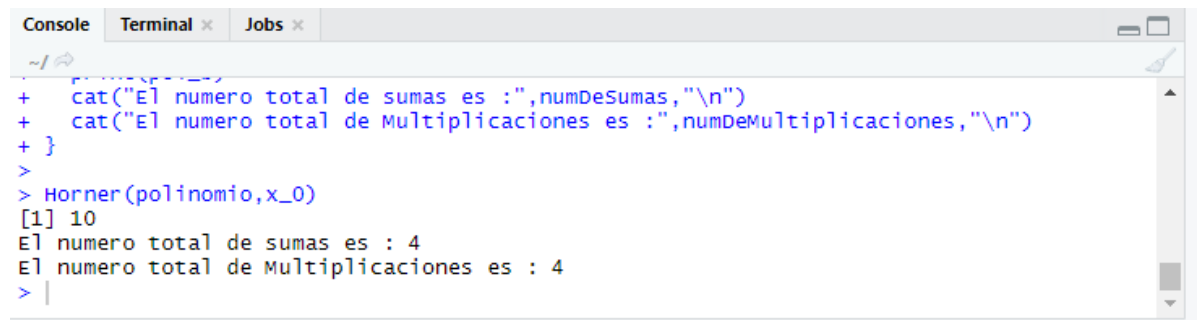
Código Implementado:

```

1 #Teorema de Horner
2
3 polinomio = c(-4,3,-3,0,2)
4 x_0 = -2
5 pol_b = polinomio[length(polinomio)]
6 numDeSumas = 0
7 numDeMultiplicaciones = 0
8 ultimaPos = length(polinomio)-1
9
10 Horner = function(polinomio,x_0)
11 {
12
13   for (i in seq(end,1,-1))
14   {
15     pol_b = polinomio[i] + pol_b*x_0
16     numDeSumas = numDeSumas + 1
17     numDeMultiplicaciones = numDeMultiplicaciones + 1
18   }
19
20   print(pol_b)
21   cat("El numero total de sumas es :",numDeSumas,"\n")
22   cat("El numero total de Multiplicaciones es :",numDeMultiplicaciones,"\n")
23 }
24 Horner(polinomio,x_0)

```

Resultado por consola:



```

+ cat("El numero total de sumas es :",numDeSumas,"\n")
+ cat("El numero total de Multiplicaciones es :",numDeMultiplicaciones,"\n")
+ }
>
> Horner(polinomio,x_0)
[1] 10
El numero total de sumas es : 4
El numero total de Multiplicaciones es : 4
> |

```

8. Problema Silueta Perrito(G)

Reconstruir la silueta del perrito utilizando la menor cantidad de puntos para reproducir el dibujo del contorno completo del perrito sin bigotes, con la información dada:

Coordenadas:

$$y = c(3,3.7,3.9,4.5,5.7,6.69,7.12,6.7,4.45,7,6.1,5.6,5.87,5.15,4.1,4.3,4.1,3)$$

$$x = c(1,2,5,6,7.5,8.1,10,13,17.6,20,23.5,24.5,25,26.5,27.5,28,29,30)$$

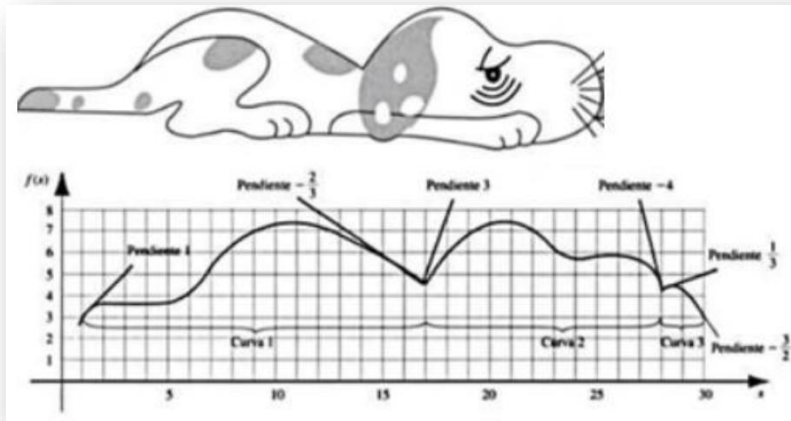


Ilustración 2 - Silueta Perrito [4]

Solución: Para la correcta realización de este punto del taller fue necesario aplicar ciertos conocimientos adquiridos en la clase de Análisis Numérico, específicamente el de interpolación con splines[13]. Es importante destacar que para realizar este ejercicio en primera instancia se siguieron las instrucciones del problema (utilizar las coordenadas dadas por la profesora). Sin embargo, el grupo llegó a la conclusión de crear las coordenadas para de esta manera aproximarnos lo máximo posible a la figura original [Ilustración 2]. Dicho resultado se ve reflejado en la ilustración 3.

Código implementado:

```
1 #Silueta Perro
2 rm(list=ls())
3
4 x = c(0.5, 1.1, 5.4, 7.5, 10.6, 16, 17.8, 21, 24, 27, 30, 32, 31.2, 30, 27.5, 26.5, 24.7, 22, 20.5, 18, 14, 12.5, 11.5, 9.55, 8.5, 9, 8.8, 6.96, 3.3, 0.5)
5 y = c(2.1, 3, 3.8, 05.5, 7.5, 6, 5.2, 7.2, 6.9, 5.4, 5.2, 4.3, 2.5, 1.50, 0.95, 00.55, 00.52, 1, 00.90, 0.97, 0.9, 1, 1.4, 1, 1.5, 2.5, 2.67, 2.2, 2.1, 2.1)
6 y_1= y[1:7]; x_1 = x[1:7]
7 y_2= y[7:12]; x_2 = x[7:12]
8 y_3= y[12:14]; x_3 = x[12:14]
9 y_4= y[14:15]; x_4 = x[14:15]
10 y_5= y[15:18]; x_5 = x[15:18]
11 y_6= y[18:20]; x_6 = x[18:20]
12 y_7= y[20:25]; x_7 = x[20:25]
13 y_8= y[25:27]; x_8 = x[25:27]
14 y_9= y[27:28]; x_9 = x[27:28]
15 y_10= y[28:30]; x_10 = x[28:30]
16
17 num_puntos = length(y)
18 color = 1
19 linea = spline(y_3,x_3)
20 lin = linea$x
21 linea$x = linea$y
22 linea$y = lin
23 plot(x, y, main = paste("Silueta Perrito: ", num_puntos, "puntos"),xlim=c(0,35),ylim=c(0,10))
24 lines(spline(x_1, y_1), col = color)
25 lines(spline(x_2, y_2), col = color)
26 lines(spline(x_4, y_4), col = color)
27 lines(spline(x_5, y_5), col = color)
28 lines(spline(x_6, y_6), col = color)
29 lines(spline(x_7, y_7), col = color)
30 lines(spline(x_8, y_8), col = color)
31 lines(spline(x_9, y_9), col = color)
32 lines(spline(x_10, y_10), col = color)
33 lines(linea, col = color)
```

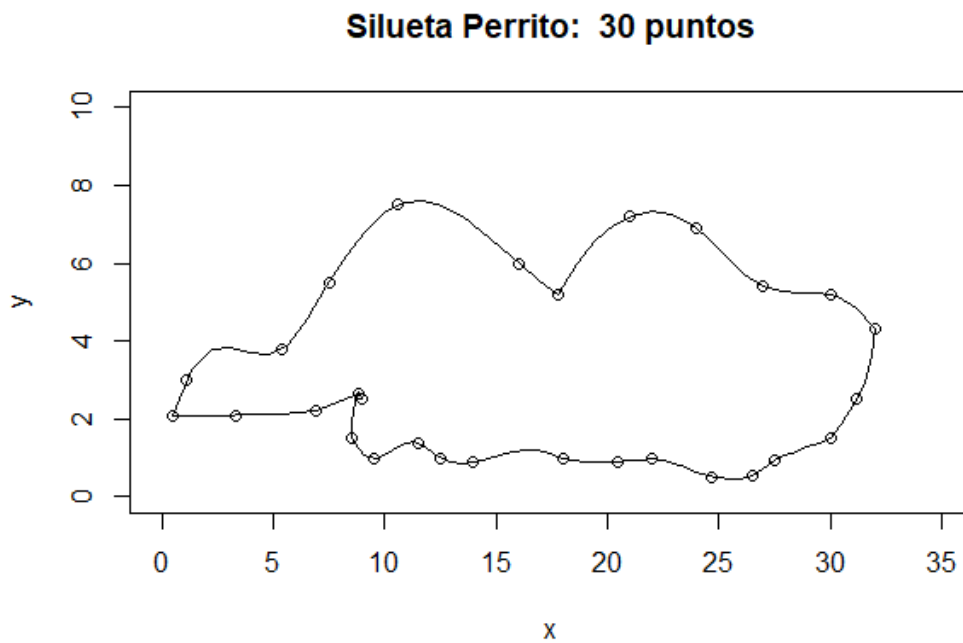


Ilustración 3 - Silueta Perrito Terminada [4]

Taller Análisis

1. Teorema de Horner (3) (G)

- a. Utilice el método de inducción matemática para demostrar el resultado del método 2

b. Implemente en R o Python para verificar los resultados del método de Horner

```

1 #Teorema de Horner
2
3 polinomio = c(-4,3,-3,0,2)
4 x_0 = -2
5 pol_b = polinomio[length(polinomio)]
6 numDeSumas = 0
7 numDeMultiplicaciones = 0
8 ultimaPos = length(polinomio)-1
9
10 Horner = function(polinomio,x_0)
11 {
12
13   for (i in seq(end,1,-1))
14   {
15     pol_b = polinomio[i] + pol_b*x_0
16     numDeSumas = numDeSumas + 1
17     numDeMultiplicaciones = numDeMultiplicaciones + 1
18   }
19
20   print(pol_b)
21   cat("El numero total de sumas es :",numDeSumas,"\n")
22   cat("El numero total de Multiplicaciones es :",numDeMultiplicaciones,"\n")
23 }
24 Horner(polinomio,x_0)

```

c. Evaluar en $x = 1.0001$ con $P(x) = 1+x+x^2+\dots+x^{50}$. Encuentre el error de cálculo al compararlo con la expresión equivalente $Q(x) = (x^{51}-1)/(x-1)$

Código implementado:

```

1 #Numero De Operaciones|
2
3 P_x = function(x)
4 {
5   return (1 + x + x^3 + x^4 + x^5 + x^6 + x^7 + x^8 + x^9 + x^10
6         + x^11 + x^12 + x^13 + x^14 + x^15 + x^16 + x^17 + x^18 + x^19 +
7         x^20 + x^21 + x^22 + x^23 + x^24 + x^25 + x^26 + x^27 + x^28 + x^29 +
8         x^30 + x^31 + x^32 + x^33 + x^34 + x^35 + x^36 + x^37 + x^38 + x^39 +
9         x^40 + x^41 + x^42 + x^43 + x^44 + x^45 + x^46 + x^47 + x^48 + x^49 +
10        x^50)
11 }
12
13
14 cat("Este es el resultado por P(x):",
15     round(P_x(1.0001), 4),
16     "\n")
17
18 Q_x = function(x)
19 {
20   return((x^51-1)/(x-1))
21 }
22
23
24 cat("Este es el resultado por Q(x):",
25     round(Q_x(1.0001), 4),
26     "\n")
27
28 valor_real = round(P_x(1.0001), 4)
29 valor_exp = round(Q_x(1.0001), 4)
30
31 cat("El error absoluto del calculo es de: ", abs(valor_exp - valor_real), ".\n")

```



```
Console Terminal Jobs
C:/Users/gabri/Desktop/Analisis Numérico/Talleres/
+ \n )
Este es el resultado por P(x): 50.1275
>
> Q_x = function(x)
+ {
+   return((x^51-1)/(x-1))
+ }
>
> cat("Este es el resultado por Q(x):",
+   round(Q_x(1.0001), 4),
+   "\n")
Este es el resultado por Q(x): 51.1277
>
> valor_real = round(P_x(1.0001), 4)
> valor_exp = round(Q_x(1.0001), 4)
>
> cat("El error absoluto del calculo es de: ", abs(valor_exp - valor_real), ".\n")
El error absoluto del calculo es de: 1.0002 .
> |
```

2. Números Binarios (3) (G)

a) Encuentre los primeros 15 bits en la representación binaria de π

Código implementado:

```
Pi_a_Binario.R
1 #Numeros Binarios
2 cat("Numero Pi en binario")
3
4 varPi = pi - 3
5 for (i in 1:14)
6 {
7   varPi = varPi*2;
8
9   if(varPi >= 1){
10     cat("1")
11     varPi = varPi - 1;}
12   else{
13     cat("0")}
14 }
15
16
17 |

17:1 (Top Level) R Script

Console Terminal Jobs
~/
+ if(varPi >= 1){
+   cat("1")
+   varPi = varPi - 1;}
+ else{
+   cat("0")}
+ }
00100100001111
> |
```

- b) Convertir los siguientes números binarios a base 10: 1010101; 1011.101;
10111.010101...; 111.1111...

Código Implementado

```
1 #De Binario a base 10
2
3 calcular_la_parte_entera = function(x){
4     cont_potencias = 0
5     digito = 0
6     num=0
7
8     while(x > 0){
9         digito = x %% 10
10
11         num = num + (digito*(2^cont_potencias))
12
13         cont_potencias = cont_potencias + 1
14
15         x = x %% 10
16     }
17     return(num)}
18
19 calcular_la_parte_decimal = function(x){
20     x_2 = x
21     x_2
22     cont_potencias_2 = 0
23     nums = 0
24     digito = 0
25     total=0
26
27     while(x > 0){
28         nums = nums+1
29
30         x = x %% 10
31     }
32     cont_potencias_2 =-nums;
33
34     while(x_2 > 0){
35         digito = x_2 %% 10
36
37         total = total + (digito*(2^cont_potencias_2))
38
39         cont_potencias_2 = cont_potencias_2 + 1
40
41         x_2 = x_2 %% 10
42     }
43     return(total)}
44 cat("Numero 1: ",calcular_la_parte_entera(10111) + calcular_la_parte_decimal(010101))
45 cat("Numero 2: ",calcular_la_parte_entera(1011) + calcular_la_parte_decimal(101),"n")
46 cat("Numero 3: ",calcular_la_parte_entera(111) + calcular_la_parte_decimal(11111))
47 cat("Numero 4: ",calcular_la_parte_entera(101010101),"n")
```

Respuesta por consola:

```
Console Terminal x Jobs x
~/
+ return(total)}
> cat("Numero 1: ",calcular_la_parte_entera(10111) + calcular_la_parte_decimal(010101))
Numero 1: 23.65625> cat("Numero 2: ",calcular_la_parte_entera(1011) + calcular_la_parte_decimal(101),"\n")
Numero 2: 11.625
> cat("Numero 3: ",calcular_la_parte_entera(111) + calcular_la_parte_decimal(111111))
Numero 3: 7.984375> cat("Numero 4: ",calcular_la_parte_entera(101010101),"\n")
Numero 4: 341
> |
```

c) Convierta los siguientes números de base 10 a binaria: 11.25;2/3; 30.6; 99.9

Código implementado:

```
1 #De Base 10 a binaria
2
3 calcular_numero_entero_a_binario = function(x)
4 {
5   binario=0
6   expo=1
7   while(x>0)
8   {
9
10    digito = x%%2
11    binario = binario+expo*digito
12    expo=expo*10
13    x = x%%2
14  }
15  }
16  return (binario)
17 }
18
19
20 calcular_numero_decimal_a_binario = function(x,numero_de_bits)
21 {
22   num=""
23   for (i in 1:numero_de_bits)
24   {
25     x = 2*x;
26
27
28     if(x < 1)
29     {
30       num = paste(num,"0",sep="")
31     }
32     else
33     {
34       num = paste(num,"1",sep="")
35       x = x - 1;
36     }
37   }
38   return(num)
39 }
40
41
42 cat("1er numero en binario: ", calcular_numero_entero_a_binario(11),".",calcular_numero_decimal_a_binario(0.25,08), "\n")
43 cat("2do numero en binario: ",calcular_numero_decimal_a_binario(0.6666666666,08), "\n")
44 cat("3er numero en binario: ", calcular_numero_entero_a_binario(30),".",calcular_numero_decimal_a_binario(0.6,08), "\n")
45 cat("4to numero en binario: ", calcular_numero_entero_a_binario(99),".",calcular_numero_decimal_a_binario(0.9,08), "\n")
34:6 calcular_numero_decimal_a_binario(x, numero_de_bits) R Script
```

Respuesta por consola:

```
Console Terminal Jobs x
~/
1er numero en binario: 1011 . 001000000
> cat("2do numero en binario: ", calcular_numero_decimal_a_binario(0.6666666666,08), "\n")
2do numero en binario: 010101010
> cat("3er numero en binario: ", calcular_numero_entero_a_binario(30), ".", calcular_numero_decimal_a_binario(0.6,08), "\n")
3er numero en binario: 11110 . 010011001
> cat("4to numero en binario: ", calcular_numero_entero_a_binario(99), ".", calcular_numero_decimal_a_binario(0.9,08), "\n")
4to numero en binario: 1100011 . 011100110
> |
```

3. Épsilon de la máquina

1. ¿Cómo se ajusta un número binario infinito en un número finito de bits?

Con el método de punto flotante donde los números se expresan en la siguiente notación:

$$n = fx10^e$$

Donde f es la fracción o mantisa y e es un entero positivo o negativo conocido como exponente. “El intervalo está determinado por el número de dígitos del exponente y la precisión esta determinada por el número de dígitos de la fracción” [5].

Cuando el número binario infinito se quiere representar en un número finito de bits es necesario truncarlo o redondearlo, pero siempre teniendo en cuenta el error que estas operaciones pueden generar. Este error se conoce como error de redondeo tanto para aproximación por truncamiento como por redondeo [6].

“En el modelo de la aritmética de computadora IEEE, el error de redondeo relativo no es más de la mitad del epsilon de la máquina” [3]:

$$\frac{|fl(x) - x|}{|x|} \leq \frac{1}{2} \epsilon_{maq}$$

2. ¿Cuál es la diferencia entre redondeo y recorte?

El recorte consiste en eliminar los bits que están más allá de cierto umbral [3] mientras que el redondeo aproxima el número que no puede ser representado al número más cercano que puede ser representado [5].

3. ¿Cómo se ajusta un número binario infinito en un número finito de bits?

Con el método de punto flotante donde los números se expresan en la siguiente notación:

$$n = fx10^e$$

Donde f es la fracción o mantisa y e es un entero positivo o negativo conocido como exponente. “El intervalo está determinado por el número de dígitos del exponente y la precisión está determinada por el número de dígitos de la fracción” [5].

Cuando el número binario infinito se quiere representar en un número finito de bits es necesario truncarlo o redondearlo, pero siempre teniendo en cuenta el error que estas operaciones pueden generar. Este error se conoce como error de redondeo tanto para aproximación por truncamiento como por redondeo [6].

“En el modelo de la aritmética de computadora IEEE, el error de redondeo relativo no es más de la mitad del épsilon de la máquina” [3]:

$$\frac{|fl(x) - x|}{|x|} \leq \frac{1}{2} \epsilon_{maq}$$

4. Indique el número de punto flotante (IEEE) de precisión doble asociado a x , el cual se denota como $fl(x)$; para $x(0.4)$.

Parte Entera	Mantisa	Exponente
4	0	-1

Tabla 3 - Número Punto Flotante

La notación científica sería [7]:

$$4 \times 10^{-1}$$

5. Error de redondeo En el modelo de la aritmética de computadora IEEE, el error de redondeo relativo no es más de la mitad del épsilon de máquina:

$$\frac{|fl(x) - x|}{|x|} \leq \frac{1}{2} \epsilon_{maq}$$

Teniendo en cuenta lo anterior, encuentre el error de redondeo para $x = 0.4$

$$\frac{|4 \times 10^{-1} - 0.4|}{|0.4|} = 0$$

6. Verificar si el tipo de datos básico de R y Python es de precisión doble IEEE y revisar en R y Python el formato long.

R maneja un tipo de atributo conocido como numérico que son números de punto flotante de precisión doble y se escriben en la siguiente notación [8]:

$$4e - 1$$

En este caso el $\times 10$ es reemplazado por e y el número que viene después de este es el exponente.

R no maneja un tipo de dato long, sino que representa los números muy grandes con notación de punto flotante. Ejemplo: $4e+1$ donde e es $\times 10$

Python maneja un tipo de dato conocido como float que son números de punto flotante de precisión doble. También se puede utilizar notación científica, y añadir una e (de exponente) para indicar un exponente en base 10 [9]. Ejemplo: $0.1e-3$

Python maneja un tipo de dato conocido como long que es un número entero en caso de desbordamiento que permite almacenar números muy grandes. Un número puede almacenarse como long poniendo una L al final del número [9]. Ejemplo: 23L

7. Encuentre la representación en número de máquina hexadecimal del número real 9.4.

La representación hexadecimal de 9.4 es 9.66666666666668

8. Encuentre las dos raíces de la ecuación cuadrática $x^2 + 9^{12}x = 3$. Intente resolver el problema usando la aritmética de precisión doble, tenga en cuenta la pérdida de significancia y debe contrarrestarla.

Para resolver el problema se va a utilizar la ecuación cuadrática:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

Donde:

$$a = 1 = 1 \times 10^0, b = 9^{12} = 2.82 \times 10^{11}, c = -3 = -3 \times 10^0$$

El procedimiento es:

$$x = \frac{-(2.82 \times 10^{11}) \pm \sqrt{(2.82 \times 10^{11})^2 - 4(1)(-3)}}{2(1)}$$

Valor Real	Valor aproximado	Error Absoluto	Error Relativo
9^{12}	2.82×10^{11}	429536481	0.1523179%

Tabla 4 - Aritmética Precisión doble 1

Valor Real	Valor aproximado	Error Absoluto	Error Relativo
$(9^{12})^2$	$(2.82 \times 10^{11})^2$	2.424431×10^{20}	0.3048678%

Tabla 5 - Aritmética Precisión doble 2

$$x = \frac{-(2.82 \times 10^{11}) \pm \sqrt{(7.95 \times 10^{22}) + 12}}{2}$$

Para la suma [10]:

$$12 \times 10^0 + 7.95 \times 10^{22} = (12 \times 10^{0-22} + 7.95) * 10^{22}$$

$$(12 \times 10^{-22} + 7.95) * 10^{22} = (12 \times 10^{-22} + 7.95) * 10^{22} = 7.95 \times 10^{22}$$

Volviendo a la ecuación:

Valor Real	Valor aproximado	Error Absoluto	Error Relativo
$(9^{12})^2 + 12$	$(2.82 \times 10^{11})^2 + 12$	2.424431×10^{20}	0.3048678%

Tabla 6 - Aritmética Precisión doble 3

$$x = \frac{-(2.82 \times 10^{11}) \pm \sqrt{7.95 \times 10^{22}}}{2} = \frac{-(2.82 \times 10^{11}) \pm 2.82 \times 10^{11}}{2}$$

Valor Real	Valor aproximado	Error Absoluto	Error Relativo
$\text{Sqrt}((9^{12})^2 + 12)$	$\text{Sqrt}((2.82 \times 10^{11})^2 + 12)$	429536481	0.1523179%

Tabla 7 - Aritmética Precisión doble 4

$$x_1 = 0 ; x_2 = -9^{12} \approx -2.82 \times 10^{11}$$

Las raíces de la ecuación son 0 y -b, donde b maneja los siguientes valores:

Valor Real	Valor aproximado	Error Absoluto	Error Relativo
-9^{12}	-2.82×10^{11}	429536481	0.1523179%

Tabla 8 - Aritmética Precisión doble 5

9. Explique cómo calcular con mayor exactitud las raíces de la ecuación:

$$x^2 + bx - 10^{-12} = 0$$

Donde b es un número mayor que 100.

Tomando como referencia el punto 8, las raíces serían 0 y -b ya que $-10^{(-12)}$ es un número bastante pequeño.

$$x = \frac{-(b) \pm \sqrt{(b)^2 - 4(1)(-10^{-12})}}{2(1)}$$

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{(b)^2}}{2}$$

$$x = \frac{-b \pm b}{2} \rightarrow x_1 = 0 ; x_2 = -b$$

4. Raíces de una ecuación

1. Ll

2. Implemente en R o Python un algoritmo que le permita sumar los n^2 primeros números naturales al cuadrado. Imprima varias pruebas, para diferentes valores de n y exprese $f(n)$ en notación $O()$ con una gráfica que muestre su orden de convergencia.

El algoritmo fue implementado en R:

```
#Raices de una Ecuacion 2
rm(list=ls())
n<-100000
valn<-c()
valn2<-c()
cont<-1000
tiempos<-c()
repeat{
  t<-proc.time()
  cont2<-1
  acum<-0
  repeat{
    acum<-acum+cont2^2
    cont2<-cont2+1
    if(cont2>cont) break
  }
  valn<-c(valn,cont)
  valn2<-c(valn2,acum)
  temp<-proc.time()-t
  tiempos<-c(tiempos,temp[["elapsed"]])
  cont<-cont+1000
  if(cont>n) break
}
datos<-data.frame("n"=valn,"Tiempos"=tiempos)
```



```
print(datos)

plot(valn,tiempos,main="Orden_Convergencia",xlab="n",ylab="Tiempo",ylim=c(0,
0.05),type="l",col="red")

#-----
```

Con los datos obtenidos se hizo una tabla del valor n contra el tiempo de ejecución para ver el orden de convergencia. La variable n tuvo distintos valores avanzando de 1000 en 1000 hasta llegar a 1000000:

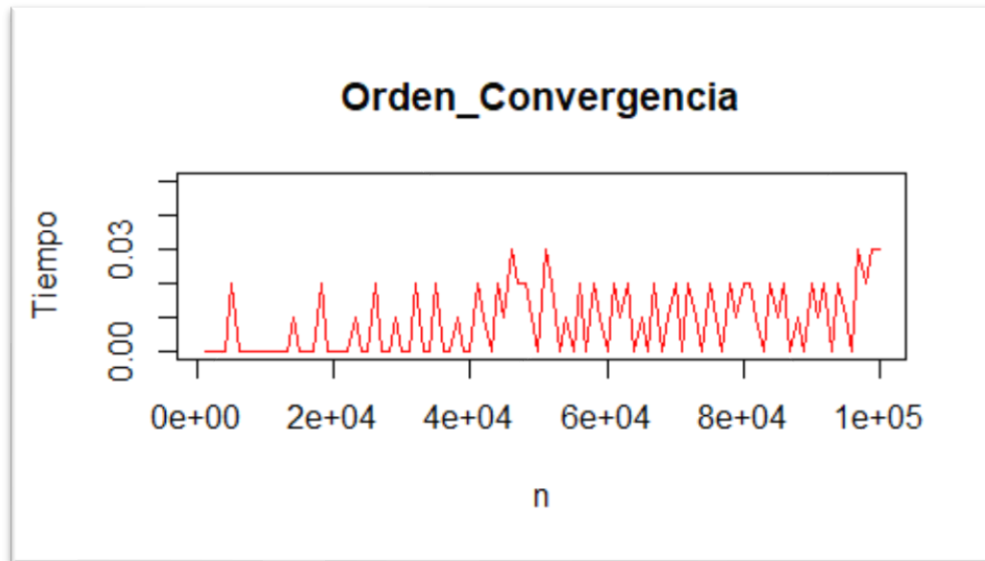


Ilustración 3 - Orden de Convergencia n^2

Se puede observar que en las primeras pruebas el tiempo de ejecución no fue muy largo pero a medida que n incrementa el tiempo de ejecución comienza a elevarse, se puede deducir que si n tomara valores más grandes de 1000000 el tiempo también aumentaría.

3. Para describir la trayectoria de un cohete se tiene el modelo:

$$y(t) = 6 + 2.13t^2 - 0.0013t^4$$

Donde, y es la altura en [m] y t tiempo en [s]. El cohete está colocado verticalmente sobre la tierra. Utilizando dos métodos de solución de ecuación no lineal, encuentre la altura máxima que alcanza el cohete.

Primero se utilizo el método de bisección, el algoritmo fue implementado en R:

```
#Encontrar la altura maxima usando metodos de ecuaciones no lineales

rm(list=ls())

E<-1e-6
```

```

t<-1
f<-function(t){
  6+2.13*t^2-0.0013*t^4
}
#Metodo de Biseccion
a<-1
b<-100
n<-0
nmax<-floor(1/log(2)*log(abs(a-b)/E))
x0<-a
x1<-b
repeat{
  x2<-(x0+x1)/2
  if(f(x0)*f(x2) < 0){
    x0<-x2
    x1<-x1
  }
  else{
    x0<-x0
    x1<-x2
  }
  n<-n+1
  if((abs(a-b)/(2^n))<=E) break
}
print(x2)
#-----

```

La altura máxima fue:

$$y = 40.51263 \text{ m}$$

Luego se utilizo el método de Newton, el algoritmo fue implementado en R:

#Encontrar la altura maxima usando metodos de ecuaciones no lineales

```
rm(list=ls())
```

```
E<-1e-6
```

```
t<-1
```

```
f<-function(t){
```

```
  6+2.13*t^2-0.0013*t^4
```

```
}
```

```
#Metodo de Newton
```

```
df<-function(t){
```

```
  4.26*t-(0.0052)*t^3
```

```
}
```

```
xk<-1
```

```
repeat{
```

```
  dx<-f(xk)/df(xk)
```

```
  xk1<-xk-dx
```

```
  xk<-xk1
```

```
  if(dx<=E) break
```

```
}
```

```
print(xk1)
```

```
#-----
```

El resultado fue:

$$y = 1.093 \text{ m}$$

El motivo por el cual los dos algoritmos no dan el mismo resultado puede deberse al hecho de que la ecuación no da una única respuesta, al ser una ecuación de grado 4 debe tener 4 respuestas posibles.

5. Convergencia Métodos Iterativos (5) (G)

Para cada uno de los siguientes ejercicios implemente en R o Python, debe determinar el número de iteraciones realizadas, una grafica que evidencie el tipo de convergencia del método y debe expresarla en notación $O()$

1. Sean $f(x) = \ln(x + 2)$ y $g(x) = \sin(x)$ dos funciones de valor real.
 - a) Utilice la siguiente formula recursiva con $E = 10^{-8}$ para el punto de intersección.
 - b) Aplicar el método iterativo siguiente con $E = 10^{-8}$ para encontrar el punto de intersección:
2. Newton: Determine el valor de los coeficientes a y b tal que $f(1) = 3$ y $f(2) = 4$ con $f(x) = a + (ax + b)e^{ax+b}$. Obtenga la respuesta con $E = 10^{-6}$

Ejercicio Sea $f(x) = e^x - x - 1$

1. Demuestre que Tiene un cero de multiplicidad 2 en $x = 0$
2. Utilizando el método de Newton con $p_0 = 1$ verifique que converge a cero pero no de forma cuadrática
3. Utilizando el método de Newton generalizado, mejora la tasa de rendimiento

6. Convergencia Acelerada (3) (J)

Dada la sucesión $\{x_n\}_{n=0}^{\infty}$ con $x_n = \cos\left(\frac{1}{n}\right)$

1. Verifique el tipo de convergencia en $x = 1$ independiente del origen.

$\cos\left(\frac{1}{n}\right)$ converge linealmente a 1 [11]. Primero hay que calcular el límite:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\cos\left(\frac{1}{n+1}\right) - 1}{\cos\left(\frac{1}{n}\right) - 1} = \frac{0}{0}$$

Da una indeterminación, es necesario utilizar l'Hôpital:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left[-\frac{1}{(n+1)^2}\right] \sin\left(\frac{1}{n+1}\right)}{\left[-\frac{1}{n^2}\right] \sin\left(\frac{1}{n}\right)} =$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{(n+1)^2}{n^2}\right] \frac{\sin\left(\frac{1}{n+1}\right)}{\sin\left(\frac{1}{n}\right)} =$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{n}{n+1}\right]^2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sin\left(\frac{1}{n+1}\right)}{\sin\left(\frac{1}{n}\right)} =$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{n}{n+1} \right]^2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\left[-\frac{1}{(n+1)^2} \right] \cos\left(\frac{1}{n+1}\right)}{\left[-\frac{1}{n^2} \right] \cos\left(\frac{1}{n}\right)} =$$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{n}{n+1} \right]^2 \lim_{n \rightarrow \infty} \left[\frac{n}{n+1} \right]^2 \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\cos\left(\frac{1}{n+1}\right)}{\cos\left(\frac{1}{n}\right)} =$$

$$= 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1$$

2. Compare los primeros términos con la sucesión $\{A_n\}_{n=0}^{\infty}$

Valores de n	Cos(1/n)	Aitken
1	0.5403023	0.9617751
2	0.8775826	0.9821294
3	0.9449569	0.9897855
4	0.9689124	0.9934156
5	0.9800666	0.9954099
6	0.9861432	0.9966200
7	0.9898133	0.9974083
8	0.9921977	0.9979502
9	0.9938335	0.9983384
10	0.9950042	0.9986261

Tabla 9 - coseno Aitken

En los primeros valores de n (1, 2, 3) se puede ver como el método de Aitken converge más rápido a 1.

3. Sean $f(t) = 3\sin^3 t - 1$ y $g(t) = 4\sin(t)\cos(t)$ para $t \geq 0$ las ecuaciones paramétricas que describen el movimiento en una partícula. Utilice un método de solución numérico con error de 10^{-6} para determinar donde las coordenadas coinciden.

Hay que pasar de ecuaciones paramétricas a ecuaciones cartesianas:

$$y = 3\sin^3 t - 1 \rightarrow \left(\frac{y+1}{3} \right)^{\frac{2}{3}} = \sin^2 t$$

$$x = 4\sin(t)\cos(t) \rightarrow \frac{x^2}{16} = \sin^2(t)\cos^2(t)$$

4. Utilice el algoritmo de Steffensen para resolver $x^2 - \cos x$ y compararlo con el método de Aitken. Nota: Debe implementar los códigos en R, utilice Rcpp para mejorar el rendimiento.

Se implementó el algoritmo de Steffensen en R:

```
#Steffensen vs Aitken
```

```
rm(list=ls())
```

```
x<-1
```

```
E<-1e-6
```

```
f<-function(x){
```

```
  x^2-cos(x)
```

```
}
```

```
valx<-c(x)
```

```
steff<-c()
```

```
esteff<-c()
```

```
Esteff<-c()
```

```
cont<-1
```

```
maxi<-300
```

```
repeat{
```

```
  y<-x-(f(x))^2/(f(x+f(x))-f(x))
```

```
  steff<-c(steff,y)
```

```
  Esteff<-c(Esteff,abs(x-y))
```

```
  esteff<-c(esteff,abs(x-y)/abs(y)*100)
```

```
  x<-y
```

```
  valx<-c(valx,x)
```

```
  cont<-cont+1
```

```
  if(abs(x-y)<E) break
```

```
}
```

```
datosSteff<-data.frame("x"=valx,"y"=steff,"E"=Esteff,"e"=esteff)
```

```
print(datosSteff)
```

```
#-----
```

Los resultados fueron los siguientes:

x	y	Error Absoluto	Error relativo
1.0000000	0.8645502	0.1354498	15.66709%
0.8645502	0.8645502	0.1354498	15.66709%

Tabla 10 - Algoritmo de Steffensen

Se implementó el algoritmo de Aitken en R:

#Steffensen vs Aitken

#Steffensen

rm(list=ls())

x<-1

E<-1e-6

f<-function(x){

 x^2-cos(x)

}

#Aitken-----

x<-1

val2x<-c(x)

ait<-c()

eait<-c()

Eait<-c()

cont<-1

maxi<-300

a<-c()

repeat{

 a<-c(a,f(cont))

 cont<-cont+1

 if(cont>maxi) break

}

cont<-1

repeat{

 y<-a[cont+2]-((a[cont+2]-a[cont+1])^2)/(a[cont+2]-2*a[cont+1]+a[cont])

 ait<-c(ait,y)


```

Eait<-c(Eait,abs(x-y))

eait<-c(eait,abs(x-y)/abs(y)*100)

x<-y

val2x<-c(val2x,x)

cont<-cont+1

if(abs(x-y)<E) break

}

datosait<-data.frame("x"=val2x,"y"=ait,"E"=Eait,"e"=eait)

print(datosait)

#-----

```

Los resultados fueron los siguientes:

x	y	Error Absoluto	Error Relativo
1.000000	-9.218504	10.2185	110.8477%
-9.218504	-9.218504	10.2185	110.8477%

Tabla 11 - Algoritmo de Aitken

Referencias

- [1] Rodríguez Ojeda, Luis; Escuela Superior Politécnica del Litoral, Análisis Numérico un enfoque algorítmico con el soporte de Python, 2014.
- [2] Herrera, Eddy; Pontificia Universidad Javeriana, Clase Análisis Numérico 1930, Bogotá, 2019.
- [3] E. Herrera Daza, Análisis Numérico Primera Parte, Bogotá, 2020.
- [4] Herrera, Eddy; Pontificia Universidad Javeriana, Problemas Análisis Numérico, Bogotá, 2020.
- [5] B, «Números de Punto Flotante,» [En línea]. Available: <http://materias.fi.uba.ar/6601/comaflotante.pdf>. [Último acceso: 13 febrero 2020].
- [6] «ERRORES DE REDONDEO Y ARITMÉTICA DE PRECISIÓN FINITA,» [En línea]. Available: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/16373/1/Microsoft%20Word%20-%201.REDONDEO%20Y%20PRECISION.pdf>. [Último acceso: 13 febrero 2020].

- [7] Matemáticas Discretas, «Capítulo 3: PUNTO FLOTANTE,» 22 noviembre 2017. [En línea]. Available: <https://medium.com/@matematicasdiscretaslibro/cap%C3%ADtulo-3-punto-flotante-c689043db98b>. [Último acceso: 13 febrero 2020].
- [8] J. Ortega Sánchez, «Introducción a R Sesión 2 Nociones Básicas,» Julio 2009. [En línea]. Available: <https://www.cimat.mx/~jortega/MaterialDidactico/TallerR09/VeranoClase2.pdf>. [Último acceso: 13 febrero 2020].
- [9] COVANTEC, «3.6. Tipo números,» [En línea]. Available: https://entrenamiento-python-basico.readthedocs.io/es/latest/leccion3/tipo_numericos.html. [Último acceso: 13 febrero 2020].
- [1 «Aritmética en coma flotante.,» 2010. [En línea]. Available:
0] https://www.uv.es/varnau/AEC_520.pdf. [Último acceso: 14 febrero 2020].
- [1 T. Uscanga, «Aikten - Método de Aceleración,» 13 diciembre 2017. [En línea].
1] Available: <https://www.youtube.com/watch?v=fw5CFAFNQFs>. [Último acceso: 14 febrero 2020].
- [12]«Interpolacion Splines», *Interpolacion Splines*. [En línea]. Disponible en: <https://www.ugr.es/~prodelas/AnNumCaminos/ftp/Tema6.htm>. [Accedido: 14-feb-2020].
- [13]rvaquerizo, «Ajuste de splines con R», *Análisis y Decisión*, 26-ene-2017. [En línea]. Disponible en: <https://analisisydecision.es/ajuste-de-splines-con-r/>. [Accedido: 14-feb-2020].