

## Algunas aplicaciones de la integración

### 1.2. El área de una región comprendida entre dos gráficas expresada como una integral

**TEOREMA 1.1** *Supongamos que  $f$  y  $g$  son integrables y que satisfacen  $f \leq g$  en  $[a, b]$ . La región  $S$  entre sus gráficas es medible y su área  $a(S)$  viene dada por la integral*

$$a(S) = \int_a^b [g(x) - f(x)] dx$$

*Demostración.- Demostración.- Supongamos primero que  $f$  y  $g$  son no negativas,. Sean  $F$  y  $G$  los siguientes conjuntos:*

$$F = (x, y) | a \leq x \leq b, 0 \leq y \leq f(x), \quad G = (x, y) | a \leq x \leq b, 0 \leq y \leq g(x).$$

*Esto es,  $G$  es el conjunto de ordenadas de  $g$ , y  $F$  el de  $f$ , menos la gráfica de  $f$ . La región  $S$  es la diferencia  $G - F$ . Según los teoremas 1.10 y 1.11,  $F$  y  $G$  son ambos medibles. Puesto que  $F \subseteq G$  la diferencia  $S = G - F$  es también medible, y se tiene*

$$a(S) = a(G) - a(F) = \int_a^b g(x) dx = \int_a^b [g(x) - f(x)] dx$$

*Consideremos ahora el caso general cuando  $f \leq g$  en  $[a, b]$ , pero no son necesariamente no negativas. Este caso lo podemos reducir al anterior trasladando la región hacia arriba hasta que quede situada encima del eje  $x$ . Esto es, elegimos un número positivo  $c$  suficientemente grande que asegure que  $0 \leq f(x) + c \leq g(x) + c$  para todo  $x$  en  $[a, b]$ . Por lo ya demostrado la nueva región  $T$  entre las gráficas de  $f + c$  y  $g + c$  es medible, y su área viene dada por la integral*

$$a(T) = \int_a^b [(g(x) + c) - (f(x) + c)] = \int_a^b [g(x) - f(x)] dx$$

*Pero siendo  $T$  congruente a  $S$ , ésta es también medible y tenemos*

$$a(S) = a(T) = \int_a^b [g(x) - f(x)] dx$$

*Esto completa la demostración.*

**Nota 1.1** En los intervalos  $[a, b]$  puede descomponerse en un número de subintervalos en cada uno de los cuales  $f \leq g$  o  $g \leq f$  la fórmula (2.1) del teorema 2.1 adopta la forma

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

**LEMA 1.1 (Área de un disco circular)** Demostrar que  $A(r) = r^2 A(1)$ . Esto es, el área de un disco de radio  $r$  es igual al producto del área de un disco unidad (disco de radio 1) por  $r^2$ .

*Demostración.*- Ya que  $g(x) - f(x) = 2g(x)$ , el teorema 2.1 nos da

$$A(r) = \int_{-r}^r g(x) dx = 2 \int_{-r}^r \sqrt{r^2 - x^2} dx$$

En particular, cuando  $r = 1$ , se tiene la fórmula

$$A(1) = 2 \int_{-1}^1 \sqrt{1 - x^2} dx$$

Cambiando la escala en el eje  $x$ , y utilizando el teorema 1.19 con  $k = 1/r$ , se obtiene

$$A(r) = 2 \int_{-r}^r g(x) dx = 2r \int_{-1}^1 g(rx) dx = 2r \int_{-1}^1 \sqrt{r^2 - (rx)^2} dx = 2r^2 \int_{-1}^1 \sqrt{1 - x^2} dx = r^2 A(1)$$

Esto demuestra que  $A(r) = r^2 A(1)$ , como se afirmó.

**Definición 1.1** Se define el número  $\pi$  como el área de un disco unidad.

$$\pi = 2 \int_{-1}^1 \sqrt{1 - x^2} dx$$

La formula que se acaba de demostrar establece que  $A(r) = \pi r^2$

Generalizando el anterior lema se tiene

$$a(kS) = \int_{ka}^{kb} g(x) dx = k \int_{ka}^{kb} f(x/k) dx = k^2 \int_a^b f(x) dx$$

**TEOREMA 1.2** Para  $a > 0$ ,  $b > 0$  y  $n$  entero positivo, se tiene

$$\int_a^b x^{\frac{1}{n}} dx = \frac{b^{1+1/n} - a^{1+1/n}}{1 + \frac{1}{n}}$$

*Demostración.*- Sea  $\int_0^a x^{\frac{1}{n}}$ . El rectángulo de base  $a$  y altura  $a^{\frac{1}{n}}$  consta de dos componentes: el conjunto de ordenadas de  $f(x) = x^{\frac{1}{n}}$  a  $a$  y el conjunto de ordenadas  $g(y) = y^n$  a  $a^{\frac{1}{n}}$ . Por lo tanto,

$$a \cdot a^{\frac{1}{n}} = a^{1+\frac{1}{n}} = \int_0^a x^{\frac{1}{n}} dx + \int_0^{a^{\frac{1}{n}}} y^n dy \implies \int_0^a x^{\frac{1}{n}} dx = a^{1+\frac{1}{n}} - \frac{y^{n+1}}{n+1} \Big|_0^{a^{\frac{1}{n}}} = a^{1+\frac{1}{n}} - \frac{a^{1+\frac{1}{n}}}{n+1} = \frac{a^{1+\frac{1}{n}}}{1+1/n}$$

Análogamente se tiene

$$\int_0^b x^{\frac{1}{n}} dx = \frac{b^{1+\frac{1}{n}}}{1+1/n}$$

Luego notemos que

$$\int_a^b x^{\frac{1}{n}} dx = \int_0^b x^{\frac{1}{n}} dx - \int_0^a x^{\frac{1}{n}} dx$$

por lo tanto

$$\int_a^b x^{\frac{1}{n}} dx = \frac{b^{1+\frac{1}{n}} - a^{1+\frac{1}{n}}}{1+1/n}$$

## 1.4. Ejercicios

En los ejercicios del 1 al 14, calcular el área de la región  $S$  entre las gráficas de  $f$  y  $g$  para el intervalo  $[a, b]$  que en cada caso se especifica. Hacer un dibujo de las dos gráficas y sombrear  $S$ .

**1.**  $f(x) = 4 - x^2$ ,  $g(x) = 0$ ,  $a = -2$ ,  $b = 2$

Respuesta.-

$$\int_{-2}^2 [4 - x^2 - 0] dx = 4x \Big|_{-2}^2 - \frac{x^3}{3} \Big|_{-2}^2 = 4(2 - (-2)) - \left( \frac{2^3 - (-2)^3}{3} \right) = \frac{32}{3}$$

**2.**  $f(x) = 4 - x^2$ ,  $g(x) = 8 - 2x^2$ ,  $a = -2$ ,  $b = 2$ .

Respuesta.-

$$\int_{-2}^2 [8 - 2x^2 - (4 - x^2)] dx = \int_{-2}^2 4 - x^2 dx = \frac{32}{3} \text{ (por ejercicio 1)}$$

**3.**  $f(x) = x^3 + x^2$ ,  $g(x) = x^3 + 1$ ,  $a = -1$ ,  $b = 1$ .

Respuesta.-

$$\int_{-1}^1 x^3 + 1 - (x^3 + x^2) dx = \int_{-1}^1 1 - x^2 dx = x \Big|_{-1}^1 - \frac{x^3}{3} \Big|_{-1}^1 = 2 - \frac{1 - (-1)}{3} = \frac{4}{3}$$

**4.**  $f(x) = x - x^2$ ,  $g(x) = -x$ ,  $a = 0$ ,  $b = 2$

Respuesta.-

$$\int_0^2 x - x^2 - (-x) dx = \int_0^2 2x - x^2 dx = 2 \frac{x^2}{2} \Big|_0^2 - \frac{x^3}{3} \Big|_0^2 = 2 \frac{2^2}{2} - \frac{2^3}{3} = \frac{4}{3}$$

**5.**  $f(x) = x^{1/3}$ ,  $g(x) = x^{1/2}$ ,  $a = 0$ ,  $b = 1$

Respuesta.-

$$\int_0^1 x^{1/3} - x^{1/2} dx = \left. \frac{x^{1+1/3}}{1+1/3} \right|_0^1 - \left. \frac{x^{1+1/2}}{1+1/2} \right|_0^1 = \frac{3}{4} - \frac{2}{3} = \frac{1}{12}$$

**6.**  $f(x) = x^{1/3}$ ,  $g(x) = x^{1/2}$ ,  $a = 1$ ,  $b = 2$ .

Respuesta.-

$$\int_1^2 x^{1/2} - x^{1/3} dx = \left. \frac{x^{1/2+1}}{1+1/2} \right|_1^2 - \left. \frac{x^{1/3+1}}{1+1/3} \right|_1^2 = \frac{2^{1/2+1} - 1}{1+1/2} - \frac{2^{1/3+1}}{1+1/3} = \frac{4\sqrt{2}}{3} - \frac{3\sqrt[3]{2}}{2} + \frac{1}{12}$$

**7.**  $f(x) = x^{1/3}$ ,  $g(x) = x^{1/2}$ ,  $a = 0$ ,  $b = 2$

Respuesta.- Sea

$$\int_0^1 |x^{1/3} - x^{1/2}| dx + \int_1^2 |x^{1/3} - x^{1/2}| dx$$

por los problemas 5 y 6 se tiene

$$\frac{1}{12} + \frac{4\sqrt{2}}{3} - \frac{3\sqrt[3]{2}}{2} + \frac{1}{12} = \frac{4\sqrt{2}}{3} - \frac{3\sqrt[3]{2}}{2} + \frac{1}{6}$$

**8.**  $f(x) = x^{1/2}$ ,  $g(x) = x^2$ ,  $a = 0$ ,  $b = 2$

Respuesta.-

$$\begin{aligned} \int_0^1 x^{1/2} - x^2 dx + \int_1^2 x^2 - x^{1/2} dx &= \left( \left. \frac{x^{1+1/2}}{1+1/2} \right|_0^1 - \left. \frac{x^3}{3} \right|_0^1 \right) + \left( \left. \frac{x^3}{3} \right|_1^2 - \left. \frac{x^{1+1/2}}{1+1/2} \right|_1^2 \right) \\ &= \left( \frac{1}{1+1/2} - \frac{1}{3} \right) + \left( \frac{2^3 - 1}{3} - \frac{2^{1+1/2} - 1}{1+1/2} \right) \\ &= \frac{2}{3} - \frac{1}{3} + \frac{7}{3} - \frac{4\sqrt{2} - 2}{3} \\ &= \frac{10}{3} - \frac{4\sqrt{2}}{3} \end{aligned}$$

**9.**  $f(x) = x^2$ ,  $g(x) = x + 1$ ,  $a = -1$ ,  $b = (1 + \sqrt{5})/2$

Respuesta.

$$\int_{-1}^{(1-\sqrt{5})/2} x^2 - (x+1) dx + \int_{(1-\sqrt{5})/2}^{(1+\sqrt{5})/2} (x+1) - x^2 dx =$$

$$\begin{aligned}
&= \int_{-1}^{(1-\sqrt{5})/2} x^2 - x - 1 \, dx + \int_{(1-\sqrt{5})/2}^{(1+\sqrt{5})/2} x + 1 - x^2 \, dx \\
&= \left( \frac{x^3}{3} - \frac{x^2}{2} - x \right) \Big|_{-1}^{(1-\sqrt{5})/2} + \left( \frac{x^2}{2} + x - \frac{x^3}{3} \right) \Big|_{(1-\sqrt{5})/2}^{(1+\sqrt{5})/2} \\
&= -\frac{3}{4} + \frac{5\sqrt{5}}{12} + \frac{5\sqrt{5}}{6} \\
&= \frac{5\sqrt{5} - 3}{4}
\end{aligned}$$

**10.**  $f(x) = x(x^2 - 1)$ ,  $g(x) = x$ ,  $a = -1$ ,  $b = \sqrt{2}$

Respuesta.-

$$\begin{aligned}
&\int_{-1}^0 x(x^2 - 1) - x \, dx + \int_0^{\sqrt{2}} x - [x(x^2 - 1)] \, dx = \int_{-1}^0 x^3 - 2x \, dx + \int_0^{\sqrt{2}} -x^3 + 2x \, dx = \\
&= \left( \frac{x^4}{4} - x^2 \right) \Big|_{-1}^0 + \left( -\frac{x^4}{4} + x^2 \right) \Big|_0^{\sqrt{2}} = -\frac{1}{4} + 1 + (-1 + 2) = \frac{7}{4}
\end{aligned}$$

**11.**  $f(x) = |x|$ ,  $g(x) = x^2 - 1$ ,  $a = -1$ ,  $b = 1$

Respuesta.- Definimos  $f$  de la siguiente manera:

$$f(x) = |x| = \begin{cases} -x & \text{si } x \in [-1, 0) \\ x & \text{si } x \in [0, 1] \end{cases}$$

Luego,

$$\begin{aligned}
\int_{-1}^1 f(x) - g(x) \, dx &= \int_{-1}^0 -x - x^2 + 1 \, dx + \int_0^1 x - x^2 + 1 \, dx \\
&= \left( -\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} + x \right) \Big|_{-1}^0 + \left( \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} + x \right) \Big|_0^1 \\
&= \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{3} + 1 \right) + \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{3} + 1 \right) \\
&= \frac{7}{3}
\end{aligned}$$

**12.**  $f(x) = |x + 1|$ ,  $g(x) = x^2 - 2x$ ,  $a = 0$ ,  $b = 2$

Respuesta.- Definamos  $f$  de la siguiente manera:

$$f(x) = |x - 1| = \begin{cases} -(x + 1) & \text{si } x \in [0, 1) \\ x + 1 & \text{si } x \in [1, 2] \end{cases}$$

Entonces,

$$\begin{aligned}
\int_0^2 f(x) - g(x) dx &= \int_0^1 -(x-1) - x^2 + 2x dx + \int_1^2 x - 1 - x^2 + 2x dx \\
&= \int_0^1 -x^2 + x + 1 dx + \int_1^2 -x^2 + 3x - 1 dx \\
&= \left( -\frac{x^3}{3} + \frac{x^2}{2} + x \right) \Big|_0^1 + \left( -\frac{x^3}{3} + \frac{3x^2}{2} - x \right) \Big|_1^2 \\
&= \left( -\frac{1}{3} + \frac{1}{2} + 1 \right) + \left( -\frac{8}{3} + 6 - 2 + \frac{1}{3} - \frac{3}{2} + 1 \right) \\
&= \frac{7}{3}
\end{aligned}$$

**13.**  $f(x) = 2|x|$ ,  $g(x) = 1 - 3x^3$ ,  $a = -\sqrt{3}/3$ ,  $b = \frac{1}{3}$

Respuesta.- Definimos  $f$  de la siguiente manera:

$$f(x) = |x| = \begin{cases} -x & \text{si } x \in [-\sqrt{3}/3, 0) \\ x & \text{si } x \in [0, 1/3] \end{cases}$$

de donde se tiene,

$$\begin{aligned}
\int_{-\frac{\sqrt{3}}{3}}^{\frac{1}{3}} g(x) - f(x) dx &= \int_{-\frac{\sqrt{3}}{3}}^{\frac{1}{3}} g(x) dx - \int_{-\frac{\sqrt{3}}{3}}^{\frac{1}{3}} f(x) dx \\
&= \int_{-\frac{\sqrt{3}}{3}}^{\frac{1}{3}} 1 - 3x^3 dx - \int_{-\frac{\sqrt{3}}{3}}^0 -2x dx - \int_0^{\frac{1}{3}} 2x dx \\
&= \left( x - \frac{3}{4}x^4 \right) \Big|_{-\frac{\sqrt{3}}{3}}^{\frac{1}{3}} + x^2 \Big|_{-\frac{\sqrt{3}}{3}}^0 - x^2 \Big|_0^{\frac{1}{3}} \\
&= \left( \frac{1}{3} - \frac{1}{108} + \frac{\sqrt{3}}{3} + \frac{1}{12} \right) + \left( -\frac{1}{3} \right) - \frac{1}{9} \\
&= \frac{9\sqrt{3} - 1}{27}
\end{aligned}$$

**14.**  $f(x) = |x| + |x - 1|$ ,  $g(x) = 0$ ,  $a = -1$ ,  $b = 2$

Respuesta.- En este problema  $f(x) \geq g(x)$  en el intervalo  $[-1, 2]$ , por lo tanto

$$\int_{-1}^2 f(x) - g(x) dx = \int_{-1}^2 |x| + |x - 1| dx = \int_{-1}^2 |x| dx + \int_{-1}^2 |x - 1| dx$$

Definimos cada función por separado,

$$\begin{aligned}
|x| &= \begin{cases} -x & \text{si } x \in [-1, 0) \\ x & \text{si } x \in [0, 2] \end{cases} \\
|x - 1| &= \begin{cases} -(x - 1) & \text{si } x \in [-1, 1) \\ x - 1 & \text{si } x \in [1, 2] \end{cases}
\end{aligned}$$

por lo tanto

$$\begin{aligned}
\int_{-1}^2 |x| dx + \int_{-1}^2 |x-1| dx &= \int_{-1}^0 -x dx + \int_0^2 x dx + \int_{-1}^1 -(x-1) dx + \int_1^2 x-1 dx \\
&= \left(-\frac{x^2}{2}\right)\Big|_{-1}^0 + \left(\frac{x^2}{2}\right)\Big|_0^2 + \left(-\frac{x^2}{2}\right)\Big|_{-1}^1 + (x)\Big|_{-1}^1 + \left(\frac{x^2}{2}\right)\Big|_1^2 + (-x)\Big|_1^2 \\
&= \frac{1}{2} + 2 - \frac{1}{2} + \frac{1}{2} + 1 + 1 + 2 - \frac{1}{2} - 2 + 1 \\
&= 5
\end{aligned}$$

- 15.** Las gráficas de  $f(x) = x^2$  y  $g(x) = cx^3$ , siendo  $c > 0$ , se cortan en los puntos  $(0, 0)$  y  $(1/c, 1/c^2)$ . Determinar  $c$  de modo que la región limitada entre esas gráficas y sobre el intervalo  $[0, 1/c]$  tengan área  $\frac{2}{3}$ .

Respuesta.- Tenemos que  $f \geq g$  en el intervalo  $[0, 1/c]$  de donde,

$$\int_0^{1/c} x^2 - cx^3 dx = \int_0^{1/c} x^2 dx - c \int_0^{1/c} x^3 dx = \frac{1}{12c^3}$$

luego  $\frac{1}{12c^3} = \frac{2}{3}$  por lo tanto  $c = \frac{1}{2}$ .

- 16.** Sea  $f(x) = x - x^2$ ,  $g(x) = ax$ . Determinar  $a$  para que la región situada por encima de la gráfica de  $g$  y por debajo de  $f$  tenga área  $\frac{9}{2}$ .

Respuesta.- Tomaremos los casos cuando  $a = 0$ ,  $a > 0$  y  $a < 0$ .

Veamos primero que si  $g(x) \leq f(x)$  entonces

$$f(x) - g(x) \geq 0 \implies x - x^2 - ax \geq 0 \implies (1-a)x \geq x^2$$

de donde si  $x = 0$  se tiene una igualdad. Luego si  $x \neq 0$  entonces  $x \leq (1-a)$ . Ahora sea  $a < 0$  por suposición se tendrá  $1-a > 0$ , que nos muestra que el intervalo estará dado por  $[0, 1-a]$ . Análogamente se tiene el intervalo  $[1-a, 0]$  para  $a > 0$ .

- C 1.** Si  $a = 0$ , esto no es posible ya que si  $a = 0$  entonces  $g(x) = ax = 0$  y entonces el área arriba del gráfico de  $g$  y debajo del gráfico de  $f$  es igual a

$$\int_0^1 x - x^2 dx = \left(\frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3}\right)\Big|_0^1 = \frac{1}{6} \neq \frac{9}{2}$$

- C 2.** Si  $a < 0$ ,  $f(x) \geq g(x)$  para  $[0, 1-a]$ , por lo que tenemos la zona,  $a(S)$  de la región entre las dos gráficas dadas por

$$\begin{aligned}
\int_0^{1-a} x - x^2 - ax dx &= (1-a) \int_0^{1-a} x dx - \int_0^{1-a} x^2 dx \\
&= (1-a) \left(\frac{(1-a)^2}{2}\right) - \frac{(1-a)^3}{3} \\
&= -\frac{(1-a)^3}{6}
\end{aligned}$$

así nos queda que

$$-\frac{(1-a)^3}{6} = \frac{9}{2} \implies (1-a)^3 = -27 \implies a = a$$

**C 3.** Sea  $a > 0$  y  $f(x) \geq g(x)$  entonces  $[1-a, 0]$  lo que

$$\begin{aligned} \int_{1-a}^0 x - x^2 - ax \, dx &= (1-a) \int_{1-a}^0 x \, dx - \int_{1-a}^0 x^2 \, dx \\ &= (1-a) \left( -\frac{(1-a)^2}{2} - \frac{(1-a)^3}{2} \right) \\ &= -\frac{(1-a)^3}{6} \end{aligned}$$

Así igualando por  $\frac{9}{2}$  tenemos

$$-\frac{(1-a)^3}{6} = \frac{9}{2} \implies (1-a)^3 = -27 \implies a = 4$$

Por lo tanto los valores posibles para  $a$  son  $-2$  y  $4$ .

**17.** Hemos definido  $\pi$  como el área de un disco circular unidad. En el ejemplo 3 de la Sección 2.3, se ha demostrado que  $\pi = 2 \int_{-1}^1 \sqrt{1-x^2} \, dx$ . Hacer uso de las propiedades de la integral para calcular la siguiente en función de  $\pi$ .

(a)  $\int_{-3}^3 \sqrt{9-x^2} \, dx.$

Respuesta.- Por el teorema 19 de dilatación,  $\frac{1}{3} \int_{-3\frac{1}{3}}^{3\frac{1}{3}} \sqrt{9 - \left(\frac{x}{3}\right)^2} \, dx$ , de donde nos queda  $9 \int_{-1}^1 \sqrt{1-x^2} \, dx$ , por lo tanto y en función de  $\pi$  se tiene  $\frac{9}{2}\pi$ .

(b)  $\int_0^2 \sqrt{1 - \frac{1}{4}x^2} \, dx.$

Respuesta.- Similar al anterior ejercicio se tiene

$$\int_0^2 \sqrt{1 - \frac{1}{4}x^2} \, dx = 2 \int_0^1 \sqrt{1-x^2} \, dx = \int_{-1}^1 \sqrt{1-x^2} \, dx = \frac{\pi}{2}$$

(c)  $\int_{-2}^2 (x-3)\sqrt{4-x^2} \, dx.$

Respuesta.- Comencemos usando la linealidad respecto al integrando de donde tenemos  $\int_{-2}^2 x\sqrt{4-x^2} \, dx -$

$3 \int_{-2}^2 \sqrt{4-x^2} \, dx$ . Luego por el problema 25 de la sección 1.26,  $\int_{-2}^2 x\sqrt{4-x^2} \, dx = 0$ , de donde

$$-6 \int_{-1}^1 \sqrt{4-4x^2} \, dx = -12 \int_{-1}^1 \sqrt{1-x^2} \, dx = -6\pi$$



- 18.** Calcular las áreas de los dodecágonos regulares inscrito y circunscrito en un disco circular unidad y deducir del resultado las desigualdades  $3 < \pi < 12(2 - \sqrt{3})$ .

Respuesta.- Como estos son dodecágonos, el ángulo en el origen del círculo de cada sector triangular es  $2\pi/12 = \pi/6$ , y el ángulo de los triángulos rectángulos formado al dividir cada uno de estos sectores por la mitad es entonces  $\pi/12$ . Luego usamos el hecho de que,

$$\tan\left(\frac{\pi}{12}\right) = 2 - \sqrt{2}, \quad \sin\left(\frac{\pi}{12}\right) = \frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{2}}, \quad \cos\left(\frac{\pi}{12}\right) = \frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{2}}$$

Ahora, para el dodecágono circunscrito tenemos el área del triángulo rectángulo  $T$  con base 1 dado por,

$$a(T) = \frac{1}{2}bh = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot (2 - \sqrt{3}) = 1 - \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Como hay 24 triángulos de este tipo en el dodecaedro, tenemos el área del dodecaedro circunscrito  $D_c$  dada por

$$a(D_c) = 24 \left( \frac{1 - \sqrt{3}}{2} \right) = 12(2 - \sqrt{3})$$

Por otro lado para el dodecágono inscrito, consideramos el triángulo rectángulo  $T$  con hipotenusa 1 en el diagrama. La longitud de uno de los catetos viene dada por  $\sin\left(\frac{\pi}{12}\right) = \frac{\sqrt{3}-1}{2}$  y la otra por  $\cos\left(\frac{\pi}{12}\right)$ . Entonces el área del triángulo es,

$$a(T) = \frac{1}{2}bh = \frac{1}{2} \cdot \frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{2}} = \frac{2}{16} = \frac{1}{8}.$$

Dado que hay 24 triángulos de este tipo en el dodecaedro inscrito,  $D_i$  tenemos,

$$a(D_i) = 24 \cdot \frac{1}{8} = 3$$

Por lo tanto, en vista de que el área del círculo unitario es, por definición  $\pi$  y se encuentra entre estos dos dodecaedros, tenemos,

$$3 < \pi < 12(2 - \sqrt{3})$$

- 19.** Sea  $C$  la circunferencia unidad, cuya ecuación cartesiana es  $x^2 + y^2 = 1$ . Sea  $E$  el conjunto de puntos obtenido multiplicando la coordenada  $x$  de cada punto  $(x, y)$  de  $C$  por un factor constante  $a > 0$  y la coordenada  $y$  por un factor constante  $b > 0$ . El conjunto  $E$  se denomina elipse. (Cuando  $a = b$ , la elipse es otra circunferencia.).

- a) Demostrar que cada punto  $(x, y)$  de  $E$  satisface la ecuación cartesiana  $(x/a)^2 + (y/b)^2 = 1$ .

Demostración.- Sea  $E = \{(ax, by)/(x, y) \in C, a > 0, b > 0\}$ . Si  $(x, y)$  es un punto en  $E$  entonces  $\left(\frac{x}{a}, \frac{y}{b}\right)$  es un punto en  $C$ , ya que todos los puntos de  $E$  se obtienen tomando un punto de  $C$  y multiplicando la coordenada  $x$  por  $a$  y la coordenada  $y$  por  $b$ . Por definición de  $C$ , se tiene

$$\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1$$

- b) Utilizar las propiedades de la integral para demostrar que la región limitada por esa elipse es medible y que su área es  $\pi ab$ .

Demostración.- De la parte (a) sabemos que  $E$  es el conjunto de puntos  $(x, y)$  tales que  $\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 = 1$ . Esto implica,

$$g(x) = b\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}, \quad o \quad f(x) = -b\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}$$

Por lo tanto, el área de  $E$  es el área cerrada de  $-a, a$ .

Para demostrar que esta región es medible y tiene área  $\pi ab$ , comenzamos por mencionar

$$\pi = 2 \int_{-1}^1 \sqrt{1 - x^2} \, dx$$

y por lo tanto

$$\pi b = 2 \int_{-1}^1 b\sqrt{1 - x^2} \, dx$$

$$\pi ab = 2a \int_{-1}^1 b\sqrt{1 - x^2} \, dx$$

$$\pi ab = 2 \int_{-a}^a \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2} \, dx$$

$$\pi ab = \int_{-a}^a b\sqrt{1 - \frac{x}{a}} - \left(-b\sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}\right) \, dx$$

Por lo tanto, sabemos que la integral de  $-a, a$  de  $g(x) - f(x)$  existe y tiene valor  $\pi ab$ , concluyendo que  $E$  es medible y  $a(E) = \pi ab$ .

- 20.** El ejercicio 19 es una generalización del ejemplo 3 de la sección 2.3. Establecer y demostrar una generalización correspondiente al ejemplo 4 de la sección 2.3.

Demostración.- Para generalizar esto, procedemos de la siguiente manera. Sea  $f$  una función integrable no negativa en  $[a, b]$ , y  $S$  sea el conjunto de ordenadas de  $f$ . Si aplicamos una transformación bajo la cual multiplicamos la coordenada  $x$  de cada punto  $(x, y)$  en la gráfica de  $f$  por una constante  $k > 0$  y cada coordenada  $y$  por una constante  $j > 0$ , entonces obtenemos una nueva función  $g$  donde un punto  $(x, y)$  está en  $g$  si y sólo si  $\left(\frac{x}{k}, \frac{y}{j}\right)$  está en  $f$ . Luego,

$$\frac{y}{j} = f\left(\frac{x}{k}\right) \implies y = j \cdot f\left(\frac{x}{k}\right) \implies g(x) = j \cdot f\left(\frac{x}{k}\right)$$

Sea  $jkS$  y denotamos el conjunto ordenado de  $g$ .

$$a(S) = \int_a^b f(x) \, dx$$

entonces

$$\begin{aligned}
a(jsS) &= \int_{ka}^{kb} g(x) dx \\
&= j \cdot \int_{ka}^{kb} f\left(\frac{x}{k}\right) dx \\
&= jk \cdot \int_a^b f(x) dx \\
&= \int_{ka}^{kb} jk \cdot a(S) dx
\end{aligned}$$

**21.** Con un razonamiento parecido al del ejemplo 5 de la sección 2.3 demostrar el teorema 2.2.

*Demostración.-* Esta demostración ya fue dada junto a la definición del teorema 2.2.

## 1.5. Las funciones trigonométricas

### Propiedad .1

1. *Dominio de definición.* Las funciones seno y coseno están definidas en toda la recta real.
2. *Valores especiales.* Tenemos  $\cos 0 = \sin \frac{1}{2}\pi = 1$ ,  $\cos \pi = -1$ .
3. *Coseno de una diferencia.* Para  $x$  e  $y$  cualesquiera, tenemos

$$\cos(y - x) = \cos y \cos x + \sin y \sin x.$$

4. *Desigualdades fundamentales.* Para  $0 < x < \frac{1}{2}\pi$ , tenemos

$$0 < \cos x < \frac{\sin x}{x} < \frac{1}{\cos x}$$

**TEOREMA 1.3** Si dos funciones  $\sin$  y  $\cos$  satisfacen las propiedades 1 a 4, satisfacen también las siguientes:

(a) La identidad pitagórica,  $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$ , para todo  $x$ .

*Demostración.-* La parte (a) se deduce inmediatamente si tomamos  $x = y$  en

$$\cos(y - x) = \cos y \cos x + \sin y \sin x$$

y usamos la relación  $\cos 0 = 1$ .

(b) Valores especiales,  $\sin 0 = \cos \frac{1}{2}\pi = \sin \pi = 0$ .

*Demostración.-* Resulta de (a) tomando  $x = 0$ ,  $x = \frac{1}{2}\pi$ ,  $x = \pi$  y utilizando la relación  $\sin \frac{1}{2}\pi = 1$ .

(c) El coseno es función par y el seno es función impar. Esto es, para todo  $x$  tenemos

$$\cos(-x) = \cos x, \quad \text{sen}(-x) = -\text{sen } x$$

*Demostración.-* Que el coseno es par resulta también de

$$\cos(y - x) = \cos y \cos x + \text{sen } y \text{sen } x$$

haciendo  $y = 0$ . A continuación deducimos la fórmula

$$\cos\left(\frac{1}{2}\pi - x\right) = \text{sen } x,$$

haciendo  $y = \frac{1}{2}\pi$  en  $\cos(y - x) = \cos y \cos x + \text{sen } y \text{sen } x$ . Partiendo de esto, encontramos que el seno es impar, puesto que

$$\text{sen}(-x) = \cos\left(\frac{\pi}{2} + x\right) = \cos\left[\pi - \left(\frac{\pi}{2} - x\right)\right] = \cos \pi \cos\left(\frac{\pi}{2} - x\right) + \text{sen } \pi \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - x\right) = -\text{sen } x$$

(d) Co-relaciones. Para todo  $x$ , se tiene

$$\text{sen}\left(\frac{1}{2}\pi\right) = \cos x, \quad \text{sen}\left(\frac{1}{2}\pi + x\right) = -\text{sen } x$$

*Demostración.-* Para demostrarlo utilizaremos  $\cos\left(\frac{1}{2}\pi\right) = \text{sen } x$  reemplazando primero  $x$  por  $\frac{1}{2}\pi + x$  y luego  $x$  por  $-x$ .

(e) Periodicidad. Para todo  $x$  se tiene  $\text{sen}(x + 2\pi) = \text{sen } x$ ,  $\cos(x + 2\pi) = \cos x$ .

*Demostración.-* El uso reiterado de (d) nos da entonces las relaciones de periodicidad (e).

(f) Fórmulas de adición. Para  $x$  e  $y$  cualesquiera, se tiene

$$\cos(x + y) = \cos x \cos y - \text{sen } x \text{sen } y$$

$$\text{sen}(x + y) = \text{sen } x \cos y + \cos x \text{sen } y$$

*Demostración.-* Para demostrar basta reemplazar  $x$  por  $-x$  en  $\cos(y - x) = \cos y \cos x + \text{sen } y \text{sen } x$  y tener en cuenta la paridad o imparidad. Luego utilizando la parte (d) y la fórmula de adición para el coseno se obtiene

$$\text{sen}(x + y) = -\cos\left(x + y + \frac{\pi}{2}\right) = -\cos x \cos\left(y + \frac{\pi}{2}\right) + \text{sen } x \text{sen}\left(y + \frac{\pi}{2}\right) = \cos x \text{sen } y + \text{sen } x \cos y$$

(g) Fórmulas de diferencias. Para todo los valores  $a$  y  $b$ , se tiene

$$\text{sen } a - \text{sen } b = 2 \text{sen } \frac{a - b}{2} = \cos \frac{a + b}{2},$$

$$\cos a - \cos b = -2 \text{sen } \frac{a + b}{2} \text{sen } \frac{a - b}{2}.$$

*Demostración.-* Reemplazaremos primero  $y$  por  $-y$  en la fórmula de adición para  $\sin(x+y)$  obteniendo

$$\sin(x-y) = \sin x \cos y - \cos x \sin y$$

Restando ésta de la fórmula para  $\sin(x+y)$  y haciendo lo mismo para función coseno, llegamos a

$$\sin(x+y) - \sin(x-y) = 2 \sin y \cos x,$$

$$\cos(x+y) - \cos(x-y) = -2 \sin y \sin x.$$

Haciendo  $x = (a+b)/2$ ,  $y = (a-b)/2$  encontramos que esas se convierten en las fórmulas de diferencia (g).

(h) *Monotonía.* En el intervalo  $[0, \frac{1}{2}\pi]$ , el seno es estrictamente creciente y el coseno estrictamente decreciente.

*Demostración.-* La propiedad 4 se usa para demostrar (h). Las desigualdades  $0 < \cos x < \frac{\sin x}{x} < \frac{1}{\cos x}$  prueban que  $\cos x$  y  $\sin x$  son positivas si  $0 < x < \frac{1}{2}\pi$ . Después de esto, si  $0 < b < a < \frac{1}{2}\pi$ , los números  $(a+b)/2$  y  $(a-b)/2$  están en el intervalo  $(0, \frac{1}{2}\pi)$ , y las fórmulas de diferencias (g) prueban que  $\sin a > \sin b$  y  $\cos a < \cos b$ . Esto completa la demostración.

## 1.6. Fórmulas de integración para el seno y el coseno

**TEOREMA 1.4** Si  $0 < a \leq \frac{1}{2}\pi$ , y  $n \geq 1$ , tenemos

$$\frac{a}{n} \sum_{k=1}^n \cos \frac{ka}{n} < \sin a < \frac{a}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \cos \frac{ka}{n} \quad (2.6).$$

*Demostración.-* Las desigualdades anterior serán deducidas de la identidad

$$2 \sin \frac{1}{2}x \sum_{k=1}^n \cos kx = \sin \left( n + \frac{1}{2} \right) x - \sin \frac{1}{2}x, \quad (2.7)$$

válida para  $n \geq 1$  y todo real  $x$ . Para demostrar, utilizaremos las fórmulas de diferencias (g) del teorema 2.3 para poner

$$2 \sin \frac{1}{2}x \cos kx = \sin \left( k + \frac{1}{2} \right) x - \sin \left( k - \frac{1}{2} \right) x$$

Haciendo  $k = 1, 2, \dots, n$  y sumando esas igualdades, encontramos que en la suma del segundo miembro se reduce unos términos con otros obteniéndose (2.7).

Si  $\frac{1}{2}x$  no es un múltiplo entero de  $\pi$  podemos dividir ambos miembros de (2.7) por  $2 \sin \frac{1}{2}x$  resultando

$$\sum_{k=1}^n \cos kx = \frac{\sin(n + \frac{1}{2}x) - \sin \frac{1}{2}x}{2 \sin \frac{1}{2}x}$$

Reemplazando  $n$  por  $n-1$  y sumando 1 a ambos miembros también obtenemos. (Ya que  $\cos 0 = 1$ ).

$$\sum_{k=0}^{n-1} \cos kx = \frac{\sin(n - \frac{1}{2})x + \sin \frac{1}{2}x}{2 \sin \frac{1}{2}x}$$

Esas dos fórmulas son válidas si  $x \neq 2m\pi$ , siendo  $m$  entero. Tomando  $x = a/n$ , donde  $0 < a < \frac{1}{2}\pi$  encontramos que el par de desigualdades (2.6) es equivalente al siguiente

$$\frac{a}{n} \frac{\sin\left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{a}{n} - \sin\left(\frac{a}{2n}\right)}{2 \sin\left(\frac{a}{2n}\right)} < \sin a < \frac{a}{n} \frac{\sin\left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{a}{n} + \sin\left(\frac{a}{2n}\right)}{2 \sin\left(\frac{a}{2n}\right)}$$

Este par, a su vez es equivalente al par

$$\sin\left(n + \frac{1}{2}\right) \frac{a}{n} - \sin\left(\frac{a}{2n}\right) < \frac{\sin\left(\frac{a}{2n}\right)}{\left(\frac{a}{2n}\right)} \sin a < \sin\left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{a}{n} + \sin\left(\frac{a}{2n}\right) \quad (2.8)$$

Por consiguiente demostrar (2.6) equivale a demostrar (2.8). Demostraremos que se tiene

$$\sin(2n+1)\theta - \sin\theta < \frac{\sin\theta}{\theta} < \sin(2n-1)\theta + \sin\theta \quad (2.9)$$

para  $0 < 2n\theta \leq \frac{1}{2}\pi$ . Cuando  $\theta = a/(2n)$  (2.9) se reduce a (2.8).

Para demostrar la desigualdad de la parte izquierda de (2.9), usamos la fórmula de adición para el seno poniendo

$$\sin(2n+1)\theta = \sin 2n\theta \cos \theta + \cos 2n\theta \sin \theta < \sin 2n\theta \frac{\sin \theta}{\theta} + \sin \theta,$$

habiendo usado también las desigualdades

$$\cos \theta < \frac{\sin \theta}{\theta}, \quad 0 < \cos 2n\theta \leq 1, \quad \sin \theta > 0, \quad (2.10)$$

siendo todas válidas ya que  $0 < 2n\theta \leq \frac{1}{2}\pi$ . La desigualdad (2.10) equivale a la parte izquierda de (2.9).

Para demostrar la parte derecha de (2.9), utilizamos nuevamente la fórmula de adición para el seno poniendo

$$\sin(2n-1)\theta = \sin 2n\theta \cos \theta - \cos 2n\theta \sin \theta$$

Sumando  $\sin \theta$  ambos miembros, obtenemos

$$\sin(2n-1)\theta + \sin \theta = \sin 2n\theta \left( \cos \theta + \sin \theta \frac{1 - \cos 2n\theta}{\sin 2n\theta} \right) \quad (2.11)$$

Pero ya que tenemos

$$\frac{1 - \cos 2n\theta}{\sin 2n\theta} = \frac{2 \sin^2 n\theta}{2 \sin n\theta \cos n\theta} = \frac{\sin n\theta}{\cos n\theta}$$

el segundo miembro de (2.11) es igual a

$$\sin 2n\theta \left( \cos \theta + \sin \theta \frac{\sin n\theta}{\cos n\theta} \right) = \sin 2n\theta \frac{\cos \theta \cos n\theta + \sin \theta \sin n\theta}{\cos n\theta} = \sin 2n\theta \frac{\cos(n-1)\theta}{\cos n\theta}$$

Por consiguiente, para completar la demostración de (2.9), necesitamos tan sólo demostrar que

$$\frac{\cos(n-1)\theta}{\cos n\theta} > \frac{\sin \theta}{\theta} \quad (2.12)$$

Pero tenemos

$$\cos n\theta = \cos(n-1)\theta \cos \theta - \sin(n-1)\theta \sin \theta < \cos(n-1)\theta \cos \theta < \cos(n-1)\theta \frac{\theta}{\sin \theta},$$

en donde otra vez hemos utilizado la desigualdad fundamental  $\cos \theta < \theta/\sin \theta$ . ya que  $\left(\cos x < \frac{x}{\sin x}\right)$ , esta última relación implica (2.12), con lo que se completa la demostración del teorema 2.4.

**TEOREMA 1.5** Si dos funciones  $\sin$  y  $\cos$  satisfacen las propiedades fundamentales de la 1 a la 4, para todo  $a$  real se tiene

$$\int_0^a \cos x \, dx = \sin a, \quad (2.13)$$

$$\int_0^a x \, dx = 1 - \cos a. \quad (2.14)$$

*Demostración.-* Primero se demuestra (2.13), y luego usamos (2.13) para deducir (2.14). Supongamos que  $0 < a \leq \frac{1}{2}\pi$ . Ya que el coseno es decreciente en  $[0, a]$  podemos aplicar el teorema 1.14 y las desigualdades del teorema 2.4 obteniendo (2.13). La fórmula es válida también para  $a = 0$ , ya que ambos miembros son cero. Pueden ahora utilizarse las propiedades de la integral para ampliar su validez todos los valores reales  $a$ . Por ejemplo, si  $-\frac{1}{2}\pi \leq a \leq 0$ , entonces  $0 \leq -a \leq \frac{1}{2}\pi$ , y la propiedad de reflexión nos da

$$\int_0^a \cos x \, dx = - \int_0^{-a} \cos(-x) \, dx = - \int_0^{-a} \cos x \, dx = -\sin(-a) = \sin a.$$

Así, pues, (2.13) es válida en el intervalo  $[-\frac{1}{2}\pi, \frac{1}{2}\pi]$ . Supongamos ahora que  $\frac{1}{2}\pi \leq a \leq \frac{3}{2}\pi$ . Entonces  $-\frac{1}{2}\pi \leq a - \pi \leq \frac{1}{2}\pi$ , de modo que

$$\begin{aligned} \int_0^a \cos x \, dx &= \int_0^{\pi/2} \cos x \, dx + \int_{\pi/2}^a \cos x \, dx = \sin \frac{1}{2}\pi + \int_{-\pi/2}^{a-\pi} \cos(x+\pi) \, dx = 1 - \int_{-\pi/2}^{a-\pi} \cos x \, dx = \\ &= 1 - \sin(a-\pi) + \sin\left(-\frac{1}{2}\pi\right) = \sin a \end{aligned}$$

Con ellos resulta que (2.13) es válida para todo  $a$  en el intervalo  $[-\frac{1}{2}\pi, \frac{3}{2}\pi]$ . Pero este intervalo tiene longitud  $2\pi$ , con lo que la fórmula (2.13) es válida para todo  $a$  puesto que ambos miembros son periódicos respecto a  $a$  con período  $2\pi$ .

Seguidamente usamos (2.13) para deducir (2.14). Ante todo demostramos que (2.14) es válida cuando  $a = \pi/2$ . Aplicando sucesivamente, la propiedad de traslación, la co-relación  $\sin(x + \frac{1}{2}\pi)$ , y la propiedad de reflexión, encontramos

$$\int_0^{\pi/2} \sin x \, dx = \int_{-\pi/2}^0 \sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right) \, dx = \int_{-\pi/2}^0 \cos x \, dx = \int_0^{\pi/2} \cos(-x) \, dx$$

Haciendo uso de la relación  $\cos(-x) = \cos x$  y la igualdad (2.13), se obtiene

$$\int_0^{\pi/2} \sin x \, dx = 1$$

Por consiguiente, para cualquier  $a$  real, podemos escribir

$$\begin{aligned} \int_0^a \sin x \, dx &= \int_0^{\pi/2} \sin x \, dx + \int_{\pi/2}^a \sin x \, dx = 1 + \int_0^{a-\pi/2} \sin\left(x + \frac{\pi}{2}\right) \, dx = \\ &= 1 + \int_0^{a-\pi/2} \cos x \, dx = 1 + \sin\left(a - \frac{\pi}{2}\right) = 1 - \cos a \end{aligned}$$

Esto demuestra que la igualdad (2.13) implica (2.14).

**Nota 1.2** Usando (2.13) y (2.14) junto con la propiedad aditiva

$$\int_a^b f(x) dx = \int_0^b f(x) dx - \int_0^a f(x) dx$$

llegamos a las fórmulas de integración más generales

$$\int_a^b \cos x dx = \operatorname{sen} b - \operatorname{sen} a$$

y

$$\int_a^b \operatorname{sen} x dx = (1 - \cos b) - (1 - \cos a) = -(\cos b - \cos a).$$

Si nuevamente utilizamos el símbolo especial  $f(x) \Big|_a^b$  para indicar la diferencia  $f(b) - f(a)$ , podemos escribir esas fórmulas de integración en la forma

$$\int_a^b \cos x dx = \operatorname{sen} x \Big|_a^b \quad y \quad \int_a^b \operatorname{sen} x dx = -\cos x \Big|_a^b$$

**Nota 1.3** Con los resultados del ejemplo 1 y la propiedad de dilatación

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{1}{c} \int_{ca}^{cb} f(x/c) dx,$$

obtenemos las fórmulas siguientes, válidas para  $c \neq 0$ ;

$$\int_a^b \cos cx dx = \frac{1}{c} \int_{ca}^{cb} \cos x dx = \frac{1}{c} (\operatorname{sen} cb - \operatorname{sen} ca)$$

y

$$\int_a^b \operatorname{sen} cx dx = \frac{1}{c} \int_{ca}^{cb} \operatorname{sen} x dx = -\frac{1}{c} (\cos cb - \cos ca).$$

**Nota 1.4** La identidad  $\cos 2x = 1 - 2 \operatorname{sen}^2 x$  implica  $\operatorname{sen}^2 x = \frac{1}{2}(1 - \cos 2x)$  con lo que, a partir del ejemplo 2, obtenemos

$$\int_a^b \operatorname{sen}^2 x dx = \frac{1}{2} \int_0^a (1 - \cos 2x) dx = \frac{a}{2} - \frac{1}{4} \operatorname{sen} 2a$$

Puesto que  $\operatorname{sen}^2 x + \cos^2 x = 1$ , encontramos también

$$\int_0^a \cos^2 x dx = \int_0^a (1 - \operatorname{sen}^2 x) dx = a - \int_0^a \operatorname{sen}^2 x dx = \frac{a}{2} + \frac{1}{4} \operatorname{sen} 2a$$

## 1.8. Ejercicios

En este conjunto de ejercicios, se pueden emplear las propiedades del seno y del coseno citadas en las Secciones de la 2.5 a la 2.7.

### 1. (a)



Demostrar que  $\sin n\pi = 0$  para todo entero  $n$  y que esos son los únicos valores de  $x$  para los que  $\sin x = 0$ .

Demostración.- Primero, ya que  $\sin x = -\sin(-x)$  implica que si  $\sin x = 0$  entonces  $\sin(-x) = 0$ , lo que es suficiente mostrar que la declaración es válida para todo  $n \in \mathbb{Z}^+$ . Sabemos que  $\sin 0 = \sin \pi = 0$ . Por lo tanto, es válida para el caso de  $n = 0$  y  $n = 1$ . Ahora utilizaremos la inducción dos veces, primero para los enteros pares y luego para los impares.

Supongamos que la declaración es válida para algunos pares  $m \in \mathbb{Z}^+$ . Es decir,  $\sin(m\pi) = 0$ . Luego usando la periodicidad de la función seno,

$$0 = \sin(m\pi) = \sin(m\pi + 2\pi) = \sin[(m+2)\pi].$$

Por lo tanto se cumple para todo par  $n \in \mathbb{Z}^+$ .

Luego supongamos que es verdad para algunos impares  $m \in \mathbb{Z}^+$ , entonces

$$0 = \sin m\pi = \sin(m\pi + 2\pi) = \sin[(m+2)\pi]$$

de donde es verdad para todo impar  $n \in \mathbb{Z}^+$ . Se sigue que es verdad para todo entero no negativo  $n$ , y por lo tanto para todo  $n \in \mathbb{Z}$ .

Por otro lado debemos demostrar que estos son únicos valores reales el cual el seno es 0. Por la periodicidad del seno, es suficiente mostrar que se cumple para cualquier intervalo  $2\pi$ . Escogeremos el intervalo  $(-\pi, \pi)$  y demostraremos que  $\sin x = 0 \iff x = 0$  para todo  $x \in (-\pi, \pi)$ . Por la primera parte conocemos que  $\sin 0 = 0$ . Entonces por la propiedad fundamental del seno y el coseno, tenemos las inecuaciones

$$0 < \cos x < \frac{\sin x}{x} < \frac{1}{\cos x} \quad x \in \left(0, \frac{\pi}{2}\right)$$

de donde ambos  $\sin x$  y  $\cos x$  son positivos en  $(0, \frac{\pi}{2})$ . Pero, de la identidad de correlación, tenemos

$$\sin\left(\frac{\pi}{2} + x\right) = \cos x$$

así, para  $x \in (\frac{\pi}{2}, \pi)$   $\sin x \neq 0$ . Pero también sabemos que  $\sin \frac{\pi}{2} = 1$  y porque  $x \in (0, \pi)$  tenemos  $\sin x \neq 0$ . Dado que seno es una función impar,

$$\sin(-x) = -\sin x \implies \sin(-x) \neq 0 \quad \text{para } x \in (0, \pi)$$

en consecuencia,  $\sin x \neq 0$  para  $x \in (-\pi, 0)$ . así,

$$\sin x = 0 \implies x = 0 \quad \text{para } x \in (-\pi, \pi)$$

2) Hallar todos los valores reales  $x$  tales que  $\cos x = 0$ .

Respuesta.- Se tiene que  $\cos x = 0$  si y sólo si  $x = \frac{\pi}{2} + n\pi$ . Probando esta proposición se tiene que  $x = 0 \implies \sin(x + \frac{\pi}{2}) = 0$ , aplicando la parte (a) concluimos que

$$x + \frac{\pi}{2} = n\pi \implies x = \frac{\pi}{2} + n\pi.$$

2. Hallar todos los reales  $x$  tales que

a)  $\sin x = 1$

Respuesta.-  $x$  está dado por  $\frac{\pi}{2} + 2n\pi$ . Para todo  $n \in \mathbb{N}$ .

b)  $\cos x = 1$

Respuesta.-  $x$  es igual a  $2n\pi$ . Para todo  $n \in \mathbb{N}$ .

c)  $\sin x = -1$

Respuesta.-  $x = \frac{3\pi}{2} + 2n\pi$ . Para todo  $n \in \mathbb{N}$ .

d)  $\cos x = -1$

Respuesta.- Está dado por  $x = (2n+1)\pi$ . Para todo  $n \in \mathbb{N}$ .

- 3.** Demostrar que  $\sin(x + \pi) = -\sin x$  y  $\cos(x + \pi) = -\cos x$  para todo  $x$ .

Demostración.- Por las fórmulas de adición se tiene

$$\sin(x + \pi) = \sin x \cos \pi + \cos x \sin \pi = -\sin x$$

Por otro lado se tiene

$$\cos(x + \pi) = \cos x \cos \pi - \sin x \sin \pi = -\cos x$$

- 4.** Demostrar que  $\sin 3x = 3\sin x - 4\sin^3 x$  y  $\cos 3x = \cos x - 4\sin^2 x \cos x$  para todo real  $x$ . Demostrar también que  $\cos 3x = 4\cos^3 x - 3\cos x$ .

Demostración.- Por la fórmula de adición y la identidad Pitagórica se tiene,

$$\begin{aligned} \sin 3x &= \sin(2x + x) \\ &= \sin 2x \cos x + \cos 2x \sin x \\ &= (\sin x \cos x + \cos x \sin x) \cos x + \sin x(1 - \sin^2 x) \\ &= 2\sin x \cos^2 x + \sin x - \sin^3 x \\ &= 2\sin x(1 - \sin^2 x) + \sin x - \sin^3 x \\ &= 2\sin x - 2\sin^3 x + \sin x - \sin^3 x \\ &= 3\sin x - 3\sin^3 x \end{aligned}$$

Luego,

$$\begin{aligned} \cos 3x &= \cos 2x \cos x - \sin 2x \sin x \\ &= (1 - 2\sin^2 x) \cos x - 2\sin^2 x \cos x \\ &= \cos x - 2\sin^2 x \cos x - 2\sin^2 x \cos x \\ &= \cos x - 4\sin^2 x \cos x && \text{Se demuestra la segunda proposición} \\ &= \cos x - 4(1 - \cos^2 x) \cos x \\ &= \cos x - 4\cos x + 4\cos^3 x \\ &= 4\cos x - 3\cos x && \text{Se demuestra la tercera proposición} \end{aligned}$$

- 5. (a)** Demostrar que  $\sin \frac{1}{6}\pi = \frac{1}{2}$ ,  $\cos \frac{1}{6}\pi = \frac{1}{2}\sqrt{3}$ .

Demostración.- Por el anterior problema se tiene

$$\sin \frac{\pi}{2} = \sin \left( 3 \cdot \frac{\pi}{6} \right) = 3\sin \frac{\pi}{6} - 4\sin^3 \frac{\pi}{6}$$

luego ya que  $\sin \frac{\pi}{2} = 1$  se tiene,

$$3 \sin \frac{\pi}{6} - 4 \sin^3 \frac{\pi}{6} = 1 \implies \sin \frac{\pi}{6} = \frac{1}{2}.$$

se sigue,

$$\cos \frac{\pi}{2} = \cos \left( 3 \cdot \frac{\pi}{6} \right) = 4 \cos^3 \frac{\pi}{6} - 3 \cos \frac{\pi}{6}$$

por lo tanto

$$4 \cos^3 \frac{\pi}{6} - 3 \cos \frac{\pi}{6} = 0 \implies \cos \frac{\pi}{6} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

(b) Demostrar que  $\frac{1}{3}\pi = \frac{1}{2}\sqrt{3}$ ,  $\cos \frac{1}{3}\pi = \frac{1}{2}$ .

Demostración.- Se usa la parte (a) y la correlación del teorema 2.3, parte d,

$$\cos \left( \frac{\pi}{2} + x \right) = -\sin x \implies \cos \frac{\pi}{6} = -\sin \left( -\frac{\pi}{3} \right) \implies \sin \frac{\pi}{3} = \frac{\sqrt{3}}{2}.$$

similarmente,

$$\sin \left( \frac{\pi}{2} + x \right) = \cos x \implies \sin \frac{\pi}{6} = \cos \left( -\frac{\pi}{3} \right) = \cos \frac{\pi}{3} \implies \cos \frac{\pi}{3} = \frac{1}{2}.$$

(c) Demostrar que  $\sin \frac{1}{4}\pi = \cos \frac{1}{4}\pi = \frac{1}{2}\sqrt{2}$ .

Demostración.- Primeramente se tiene

$$1 = \sin \frac{\pi}{2} = \sin \left( 2 \cdot \frac{\pi}{4} \right) = 2 \sin \frac{\pi}{4} \cos \frac{\pi}{4}.$$

Luego

$$0 = \cos \frac{\pi}{2} = \cos \left( 2 \cdot \frac{\pi}{4} \right) = 1 - 2 \sin^2 \frac{\pi}{4}.$$

se sigue

$$1 - 2 \sin^2 \frac{\pi}{4} = 0 \implies \sin^2 \frac{\pi}{4} = \frac{1}{2} \implies \sin \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

entonces,

$$2 \sin \frac{\pi}{4} \cos \frac{\pi}{4} = 1 \implies \sqrt{2} \cos \frac{\pi}{4} = 1 \implies \cos \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

por lo tanto

$$\sin \frac{\pi}{4} = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

**6.** Demostrar que  $\tan(x - y) = (\tan x - \tan y)/(1 + \tan x \tan y)$  para todo par de valores  $x, y$  tales que  $\tan x \tan y \neq -1$ . Obtener las correspondientes fórmulas para  $\tan(x + y)$  y  $\cot(x + y)$ .

Demostración.- Por definición de tangente primeramente se tiene que,

$$\begin{aligned} \tan(x - y) &= \frac{\sin(x - y)}{\cos(x - y)} = \frac{\sin x \cos y - \cos x \sin y}{\cos x \cos y + \sin x \sin y} \\ &= \frac{\sin x \cos y - \cos x \sin y}{\cos x \cos y (1 + \tan x \tan y)} \\ &= \frac{\tan x - \tan y}{1 + \tan x \tan y} \end{aligned}$$

Luego probemos  $\tan(x + y)$  para encontrar una fórmula de la siguiente manera,

$$\begin{aligned}\tan(x + y) &= \frac{\sin(x + y)}{\cos(x + y)} = \frac{\sin x \cos y + \sin y \cos x}{\cos x \cos y - \sin x \sin y} \\ &= \frac{\sin x \cos y + \sin y \cos x}{\cos x \cos y (1 - \tan x \tan y)} \\ &= \frac{\tan x + \tan y}{1 - \tan x \tan y}\end{aligned}$$

Por último probemos para la fórmula cotangente,

$$\begin{aligned}\cot(x + y) &= \frac{\cos(x + y)}{\sin(x + y)} = \frac{\cos x \cos y - \sin x \sin y}{\sin x \cos y + \sin y \cos x} \\ &= \frac{\sin x \sin y (\cot x \cot y - 1)}{\sin x \cos y + \sin y \cos x} \\ &= \frac{\cot x + \cot y - 1}{\cot x + \cot y}\end{aligned}$$

- 7.** Hallar dos números  $A$  y  $B$  tales que  $3 \sin(x + \frac{1}{3}\pi) = A \sin x + B \cos x$  para todo  $x$ .

Respuesta.-

$$\begin{aligned}3 \sin\left(x + \frac{\pi}{3}\right) &= 3\left(\sin x \cos \frac{\pi}{3} + \sin \frac{\pi}{3} \cos x\right) \\ &= 3\left(\frac{1}{2} \sin x \frac{\sqrt{3}}{2} \cos x\right) \\ &= \frac{3}{2} \sin x + \frac{3\sqrt{3}}{2} \cos x.\end{aligned}$$

Por lo tanto

$$A = \frac{3}{2}, \quad B = \frac{3\sqrt{3}}{2}$$

- 8.** Demostrar que si  $C$  y  $\alpha$  son números reales dados, existen dos números reales  $A$  y  $B$  tal es que  $C \sin(x - \alpha) = A \sin x + B \cos x$  para todo  $x$ .

Respuesta.- Para  $C$  y  $\alpha \in \mathbb{R}$  entonces,

$$\begin{aligned}C \sin(x + \alpha) &= C(\sin x \cos \alpha + \sin \alpha \cos x) \\ &= (C \cos \alpha) \sin x + (C \sin \alpha) \cos x\end{aligned}$$

Ya que  $\sin$  y  $\cos$  está definida para todo  $\alpha \in \mathbb{R}$ , tenemos  $C \cos \alpha, C \sin \alpha \in \mathbb{R}$ . Por lo tanto, los números que requerimos serán:

$$A = C \cos \alpha, \quad B = C \sin \alpha$$

- 9.** Demostrar que si  $A$  y  $B$  son números reales dados, existen dos números  $C$  y  $\alpha$  siendo  $C \geq 0$  tales que la fórmula del ejercicio 8 es válida.

Respuesta.- Sea

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}$$

de donde es verdad que

$$|A| \leq \left| \sqrt{A^2 + B^2} \right|$$

y por lo tanto

$$\left| \frac{A}{C} \right| \leq 1$$

así sabemos que existe un  $\alpha \in \mathbb{R}$  de manera que

$$\cos \alpha = \frac{A}{C}.$$

Pero si  $\cos \alpha = \frac{A}{C}$  entonces,

$$\begin{aligned} \cos^2 \alpha = \frac{A^2}{C^2} &\implies 1 - \sin^2 \alpha = \frac{A^2}{A^2 + B^2} \\ \implies \sin^2 \alpha &= 1 - \frac{A^2}{A^2 + B^2} = \frac{B^2}{A^2 + B^2} \\ \implies \sin \alpha &= \frac{B}{C} \end{aligned}$$

en consecuencia,

$$\begin{aligned} C \sin(x + \alpha) &= C \sin x \cos \alpha + C \sin \alpha \cos x = (A^2 + B^2)^{1/2} \frac{A}{(A^2 + B^2)^{1/2}} \sin x + (A^2 + B^2)^{1/2} \frac{B}{(A^2 + B^2)^{1/2}} \cos x \\ &= A \sin x + B \cos x \end{aligned}$$

- 10.** Determinar  $C$  y  $\alpha$ , siendo  $C > 0$ , tales que  $C \sin(x + \alpha) = -2 \sin x - 2 \cos x$  para todo  $x$ .

Respuesta.- Por el anterior ejercicio tenemos que

$$A \sin x + B \cos x = C \sin(x + \alpha)$$

para

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}, \text{ y } \sin \alpha = \frac{A}{(A^2 + B^2)^{1/2}}, \quad \cos \alpha = \frac{B}{(A^2 + B^2)^{1/2}}$$

Luego ya que tenemos  $A = B = -2$ , entonces

$$C = [(-2)^2 + (-2)^2]^{1/2} = 2\sqrt{2}$$

y,

$$\sin \alpha = \cos \alpha = -\frac{\sqrt{2}}{2} \quad \alpha = \frac{5\pi}{4}.$$

- 11.** Demostrar que si  $A$  y  $B$  son números reales dados, existen dos números  $C$  y  $\alpha$  siendo  $C \geq 0$  tales que  $C \cos(x + \alpha) = A \sin x + B \cos x$ . Determinar  $C$  y  $\alpha$  si  $A = B = 1$ .

Demostración.- Por el problema 9, sabemos que para  $A, B \in \mathbb{R}$ , existe  $D, \beta \in \mathbb{R}$  tal que

$$\begin{aligned} D \sin(x + \beta) &= A \sin x + B \cos x \\ D \sin \left[ \frac{\pi}{2} + x + \left( \beta - \frac{\pi}{2} \right) \right] &= A \sin x + B \cos x \\ D \cos \left[ x + \left( \beta - \frac{\pi}{2} \right) \right] &= A \sin x + B \cos x \end{aligned}$$

entonces,

$$C = D, \quad \alpha = \beta - \frac{\pi}{2}.$$

Por lo tanto,  $C$  y  $\alpha$  existe si  $C \cos(x + \alpha) = A \sin x + B \cos x$ . Luego, si  $A = B = 1$ , entonces  $C = \sqrt{2}$  y  $\alpha = \beta - \frac{\pi}{2}$  donde  $\sin \beta = \cos \beta = \frac{\sqrt{2}}{2} \implies \beta = \frac{\pi}{4}$ . Así,

$$C = \sqrt{2}, \quad \alpha = -\frac{\pi}{4}.$$

- 12.** Hallar todos los números reales  $x$  tales que  $\sin x = \cos x$ .

Respuesta.- Sea  $\sin x = \cos x$  entonces

$$\begin{aligned} \cos x - \sin x &= 0 \\ \cos^2 x - 2 \sin x \cos x &= 0 \\ \sin 2x &= \sin^2 x + \cos^2 x \\ \sin 2x &= 1 \\ 2x &= \frac{\pi}{2} + 2n\pi \\ x &= \frac{\pi}{4} + n\pi \quad \text{para } n \in \mathbb{Z} \end{aligned}$$

- 13.** Hallar todos los números reales tales que  $\sin x - \cos x = 1$ .

Respuesta.- Por el ejercicio 9 sabemos que existe  $C, \alpha$  tal que

$$A \sin x + B \cos x = C \sin(x + \alpha),$$

para cualquier  $A, B \in \mathbb{R}$ . También sabemos que,

$$C = (A^2 + B^2)^{1/2}, \quad \sin \alpha = \frac{A}{(A^2 + B^2)^{1/2}} \quad \frac{B}{(A^2 + B^2)^{1/2}}$$

Así, en este caso tenemos  $A = 1$ ,  $B = 1$  y calculando,

$$C = \sqrt{2}, \quad \cos \alpha = -\frac{\sqrt{2}}{2}, \sin \alpha = -\frac{\sqrt{2}}{2} \implies \alpha = \frac{\pi}{4}$$

luego sabiendo que  $\sin x - \cos x = 1$  entonces,

$$\begin{aligned}
\sqrt{2} \operatorname{sen} \left( x - \frac{\pi}{4} \right) &= 1 \\
\operatorname{sen} \left( x - \frac{\pi}{4} \right) &= \frac{\sqrt{2}}{2} \\
x - \frac{\pi}{4} &= x - \frac{\pi}{4} + 2n\pi \text{ o } x - \frac{\pi}{4} = \frac{4\pi}{4} + 2n\pi \\
x &= \frac{\pi}{2} + 2n\pi \text{ o } x = \pi + 2n\pi
\end{aligned}$$

**14.** Demostrar que las identidades siguientes son válidas para todos los pares  $x$  e  $y$ :

(a)  $2 \operatorname{sen} x \cos y = \cos(x - y) + \cos(x + y).$

Demostración.- Usando la fórmula para el coseno de una suma y de una diferencia, se sigue,

$$\begin{aligned}
2 \cos x \cos y &= \cos x \cos y + \cos x \cos y \\
&= \cos x \cos y + \operatorname{sen} x \operatorname{sen} y + \cos x \cos y - \operatorname{sen} x \operatorname{sen} y \\
&= \cos(x - y) + \cos(x + y)
\end{aligned}$$

(b)  $2 \operatorname{sen} x \operatorname{sen} y = \cos(x - y) - \cos(x + y).$

Demostración.- Similar al anterior ejercicios tenemos,

$$\begin{aligned}
2 \operatorname{sen} x \operatorname{sen} y &= \operatorname{sen} x \operatorname{sen} y + \operatorname{sen} x \operatorname{sen} y \\
&= \cos x \cos y + \operatorname{sen} x \operatorname{sen} y - (\cos x \cos y - \operatorname{sen} x \operatorname{sen} y) \\
&= \cos(x - y) - \cos(x + y)
\end{aligned}$$

(c)  $2 \operatorname{sen} x \cos y = \operatorname{sen}(x - y) + \operatorname{sen}(x + y).$

Demostración.- Usando la fórmula del seno de una suma y diferencia:

$$\begin{aligned}
2 \operatorname{sen} x \cos y &= \operatorname{sen} x \cos y + \operatorname{sen} x \cos y \\
&= \operatorname{sen} x \cos y - \operatorname{sen} y \cos x + \operatorname{sen} x \cos y + \operatorname{sen} y \cos x \\
&= \operatorname{sen}(x - y) + \operatorname{sen}(x + y)
\end{aligned}$$

**15.** Si  $h \neq 0$ , demostrar que las identidades siguientes son válidas para todo  $x$ :

$$\begin{aligned}
\frac{\operatorname{sen}(x + h) - \operatorname{sen} x}{h} &= \frac{\operatorname{sen}(h/2)}{h/2} \cos \left( x + \frac{h}{2} \right) \\
\frac{\cos(x + h) - \cos x}{h} &= -\frac{\operatorname{sen}(h/2)}{h/2} \cos \left( x + \frac{h}{2} \right)
\end{aligned}$$

Estas fórmulas se utilizan en cálculo diferencial.

Demostración.- Usando el seno y coseno para la suma y diferencia, se sigue,

$$\begin{aligned}
\frac{\operatorname{sen}(x+h) - \operatorname{sen} x}{h} &= \frac{\operatorname{sen}(x + \frac{h}{2} + \frac{h}{2}) - \operatorname{sen}(x + \frac{h}{2} - \frac{h}{2})}{h} \\
&= \frac{\operatorname{sen}(x + \frac{h}{2}) \cos(\frac{h}{2}) + \operatorname{sen}(\frac{h}{2}) \cos(x + \frac{h}{2}) - \operatorname{sen}(x + \frac{h}{2}) \cos(\frac{h}{2}) + \operatorname{sen}(\frac{h}{2}) \cos(x + \frac{h}{2})}{h} \\
&= \frac{2 \operatorname{sen} \frac{h}{2} \cos\left(x + \frac{h}{2}\right)}{h} \\
&= \frac{\operatorname{sen} \frac{h}{2}}{h/2} \cos\left(x + \frac{h}{2}\right)
\end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned}
\frac{\cos(x+h) - \cos x}{h} &= \frac{\cos(x + \frac{h}{2} + \frac{h}{2}) - \cos(x + \frac{h}{2} - \frac{h}{2})}{h} \\
&= \frac{\cos(x + \frac{h}{2}) \cos(\frac{h}{2}) - \operatorname{sen}(x + \frac{h}{2}) \operatorname{sen}(\frac{h}{2}) - \cos(x + \frac{h}{2}) \cos(\frac{h}{2}) + \operatorname{sen}(x + \frac{h}{2}) \operatorname{sen}(\frac{h}{2})}{h} \\
&= \frac{2 \operatorname{sen}(x + \frac{h}{2}) \operatorname{sen}(\frac{h}{2})}{h} \\
&= -\frac{\operatorname{sen}(\frac{h}{2})}{h/2} \operatorname{sen}\left(x + \frac{h}{2}\right)
\end{aligned}$$

**16.** Demostrar si son o no ciertas las siguientes afirmaciones.

(a) Para todo  $x \neq 0$  se tiene  $\operatorname{sen} 2x \neq 2 \operatorname{sen} x$ .

Demostración.- Sea  $x = \pi$ , entonces  $\operatorname{sen} 2x = \operatorname{sen} 2\pi = 0$ , y  $2 \operatorname{sen} x = 2 \operatorname{sen} \pi = 0$ . Luego por hipótesis  $x \neq 0$ , pero  $\operatorname{sen} 2x = 2 \operatorname{sen} x$ , por lo tanto esta proposición es falsa.

(b) Para cualquier  $x$ , existe un  $y$  tal que  $\cos(x+y) = \cos x + \cos y$ .

Demostración.- Sea  $x = 0$ , entonces  $\cos(x+y) = \cos y$ , pero  $\cos x + \cos y = 1 + \cos y$ . Por lo tanto la proposición es falsa.

(c) Existe un  $x$  tal que  $\operatorname{sen}(x+y) = \operatorname{sen} x + \operatorname{sen} y$  para todo  $y$ .

Demostración.- Sea  $x = 0$ , entonces  $\operatorname{sen}(x+y) = \operatorname{sen} y$ , para todo  $y$ , y  $x + \operatorname{sen} y = \operatorname{sen} y$  para todo  $y$ . Y por lo tanto la proposición es verdadera.

(d) Existe un  $y \neq 0$  tal que  $\int_0^y \operatorname{sen} x \, dx = \operatorname{sen} y$ .

Demostración.- Sea  $y = \frac{\pi}{2}$ , entonces  $\int_0^{\frac{\pi}{2}} \operatorname{sen} x \, dx = 1 - \cos \frac{\pi}{2} = 1$  y  $\operatorname{sen} \frac{\pi}{2} = 1$ . Por lo tanto la proposición es verdadera.



- 17.** Calcular la integral  $\int_a^b \operatorname{sen} x \, dx$  para cada uno de los siguientes valores de  $a$  y  $b$ . En cada caso interpretar el resultado geoméricamente en función del área.

(a)  $a = 0, b = \pi/6$ .

Respuesta.-  $\int_0^{\pi/6} \operatorname{sen} x \, dx = 1 - \cos(\pi/6) = 1 - \sqrt{3}/2$ .

(b)  $a = 0, b = \pi/4$ .

Respuesta.-  $\int_0^{\pi/4} \operatorname{sen} x \, dx = 1 - \cos(\pi/4) = 1 - \sqrt{2}/2$ .

(c)  $a = 0, b = \pi/3$ .

Respuesta.-  $\int_0^{\pi/3} \operatorname{sen} x \, dx = 1 - \cos(\pi/3) = 1 - \frac{1}{2} = \frac{1}{2}$ .

(d)  $a = 0, b = \pi/2$ .

Respuesta.-  $\int_0^{\pi/2} \operatorname{sen} x \, dx = 1 - \cos(\pi/2) = 1$ .

(e)  $a = 0, b = \pi$ .

Respuesta.-  $\int_0^{\pi} \operatorname{sen} x \, dx = 1 - \cos(\pi) = 1 - (-1) = 2$ .

(f)  $a = 0, b = 2\pi$ .

Respuesta.-  $\int_0^{2\pi} \operatorname{sen} x \, dx = 1 - \cos(2\pi) = 1 - 1 = 0$ .

(g)  $a = -1, b = 1$

Respuesta.-  $\int_{-1}^1 \operatorname{sen} x \, dx = -[\cos(1) - \cos(-1)] = 0$ .

(h)  $a = -\pi/6, b = \pi/4$ .

Respuesta.-  $\int_{\pi/4}^{-\pi/6} \operatorname{sen} x \, dx = -[\cos(\pi/4) - \cos(-\pi/6)] = -\left(\frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) = \frac{\sqrt{3} - \sqrt{2}}{2}$ .

**18.**  $\int_0^{\pi} (x + \operatorname{sen} x) \, dx = \frac{x^2}{2} \Big|_0^{\pi} + 1 - (\cos \pi) = \frac{\pi^2}{2} + 1 - (-1) = \frac{\pi^2}{2} + 2$ .

**19.**  $\int_0^{\pi/2} (x^2 + \cos x) \, dx = \frac{x^3}{3} \Big|_0^{\pi/2} + \operatorname{sen} \left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{(\frac{\pi}{2})^3}{3} + 1 = \frac{\pi^3}{24} + 1$ .

**20.**  $\int_0^{\pi/2} (\sen x - \cos x) dx = 1 - \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - \sen\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1 - 0 - 1 = 0.$

**21.**  $\int_0^{\pi/2} |\sen x - \cos x| dx$

Respuesta.- Ya que  $\cos x - \sen x \geq 0$  esta definida por  $(0, \frac{\pi}{4})$  y  $\cos x - \sen x < 0$  esta dado por  $(\frac{\pi}{4}, \frac{\pi}{2}]$  tenemos,

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi/2} |\sen x - \cos x| dx &= \int_0^{\pi/4} (\cos x - \sen x) dx + \int_{\pi/4}^{\pi/2} (\sen x - \cos x) dx \\ &= \sen\left(\frac{\pi}{4}\right) - \left[1 - \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)\right] - \left[\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) - \cos\left(\frac{\pi}{4}\right)\right] + \left[\sen\left(\frac{\pi}{2}\right) - \sen\left(\frac{\pi}{4}\right)\right] \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} + \frac{\sqrt{2}}{2} - 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} - 0 - 1 + \frac{\sqrt{2}}{2} \\ &= 2\sqrt{2} - 2 \end{aligned}$$

**22.**  $\int_0^{\pi} \left(\frac{1}{2} + \cos t\right) dt = \frac{t}{2}\Big|_0^{\pi} + \sen \pi = \frac{\pi}{2}.$

**23.**  $\int_0^{\pi} \left|\frac{1}{2} + \cos t\right| dx.$

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi} \left|\frac{1}{2} + \cos t\right| dt &= \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{1}{2} + \cos t\right) dt + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \left(\frac{1}{2} + \cos t\right) dt \\ &= \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \frac{1}{2} dt + \int_0^{\frac{2\pi}{3}} \cos(t) dt - \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \pi \frac{1}{2} dt + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \cos(t) dt \\ &= \frac{t}{2}\Big|_0^{\frac{2\pi}{3}} + \sen(t)\Big|_0^{\frac{2\pi}{3}} - \frac{t}{2}\Big|_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \frac{1}{2} dt - \sen(t)\Big|_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \\ &= \frac{\pi}{3} + \sen\left(\frac{2\pi}{3}\right) - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{2\pi}{6}\right) - \left[\sen \pi - \sen\left(\frac{2\pi}{3}\right)\right] \\ &= \frac{\pi}{6} + \sqrt{3} \end{aligned}$$

**24.**  $\int_{-\pi}^x \left|\frac{1}{2} + \cos t\right| dx$  si  $0 \leq x \leq \pi.$

Respuesta.- Primero queremos determinar  $\frac{1}{2} + \cos t$  para  $t$  positivo y en otro caso negativo, por lo tanto,

$$\left|\frac{1}{2} + \cos t\right| = \begin{cases} \frac{1}{2} + \cos t & \text{si } -\pi \leq x \leq -\frac{2\pi}{3} \text{ o } \frac{2\pi}{3} \leq x \leq \pi \\ -\left(\frac{1}{2} + \cos t\right) & \text{si } -\frac{2\pi}{3} \leq x \leq \frac{2\pi}{3} \end{cases}$$

Ahora consideremos dos casos. Si  $0 \leq x \leq \frac{2\pi}{3}$ , entonces

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^x \left| \frac{1}{2} + \cos t \right| dt &= - \int_{-\frac{\pi}{3}}^{-\frac{2\pi}{3}} \left( \frac{1}{2} + \cos t \right) dt + \int_{-\frac{2\pi}{3}}^x \left( \frac{1}{2} + \cos t \right) dt \\ &= - \left( -\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{2} \right) - \left[ \sin \left( -\frac{2\pi}{3} \right) - \sin(-\pi) \right] + \left( \frac{x}{2} + \frac{\pi}{3} \right) + \left[ \sin x - \sin \left( -\frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ &= \frac{\pi}{6} + \sqrt{3} + \frac{x}{2} + \sin x \end{aligned}$$

En otro caso, si  $\frac{2\pi}{3} \leq x \leq \pi$ , entonces,

$$\begin{aligned} \int_{-\pi}^x \left| \frac{1}{2} + \cos t \right| dt &= - \int_{-\pi}^{-\frac{2\pi}{3}} \left( \frac{1}{2} + \cos t \right) dt + \int_{-\frac{2\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \left( \frac{1}{2} + \cos t \right) dx - \int_{\frac{2\pi}{3}}^x \left( \frac{1}{2} + \cos t \right) dx \\ &= \left( -\frac{\pi}{6} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \left( \frac{2\pi}{3} + \sqrt{3} \right) - \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3} \right) - \left( \sin x - \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \\ &= \frac{5\pi}{6} + 2\sqrt{3} - \frac{x}{2} - \sin x \end{aligned}$$

$$25. \int_x^{x^2} (t^2 + \sin t) dx = \frac{x^6 - x^3}{3} - \cos(x^2) + \cos x.$$

$$26. \int_0^{\pi/2} \sin 2x dx = \frac{1}{2} \int_{0.2}^{\frac{\pi}{2} \cdot 2} \sin x dx = -\frac{1}{2} (\cos \pi - \cos 0) = 1.$$

$$27. \int_0^{\pi/3} \cos \frac{x}{2} dx = 2 \int_{0 \cdot \frac{1}{2}}^{\frac{\pi}{3} \cdot \frac{1}{2}} \cos x dx = 2 (\sin \frac{\pi}{6} - \sin 0) = 1.$$

28. Demostrar las siguientes fórmulas de integración, válidas para  $b \neq 0$ .

$$\int_0^x \cos(a + bt) dt = \frac{1}{b} [\sin(a + bx) + \sin a],$$

$$\int_0^x \sin(a + bt) dt = -\frac{1}{b} [\cos(a + bx) - \cos a].$$

Demostración.- Usando la formula de adición tenemos,

$$\begin{aligned}
\int_0^x \cos(a+bt) \, dt &= \int_0^x [\operatorname{sen} a \cos(bt) + \operatorname{sen}(bt) \cos a] \, dt \\
&= \frac{\cos a}{b} \int_0^{bx} \cos t \, dt - \frac{\operatorname{sen} a}{b} \int_0^{bx} \operatorname{sen} t \, dt \quad b \neq 0 \\
&= \frac{1}{b} [\cos a \operatorname{sen}(bx) - \operatorname{sen} a + \operatorname{sen} a \cos(bx)] \\
&= \frac{1}{b} [\operatorname{sen}(a+bx) - \operatorname{sen} a]
\end{aligned}$$

Similar a la anterior demostración tenemos,

$$\begin{aligned}
\int_0^x \operatorname{sen}(a+bt) \, dt &= \int_0^x [\operatorname{sen} a \cos(bt) + \operatorname{sen}(bt) \cos a] \, dt \\
&= \frac{\operatorname{sen} a}{b} \int_0^{bx} \cos t \, dt - \frac{\cos a}{b} \int_0^{bx} \operatorname{sen} t \, dt \quad b \neq 0 \\
&= \frac{\operatorname{sen} a}{b} \operatorname{sen}(bx) + \frac{\cos a}{b} (1 - \cos(bx)) \\
&= \frac{1}{b} [\operatorname{sen} a \operatorname{sen}(bx) + \cos a - \cos a \cos(bx)] \\
&= -\frac{1}{b} [\cos(a+bx) - \cos a]
\end{aligned}$$

**29. (a)** Hacer uso de la identidad  $\operatorname{sen} 3t = 3 \operatorname{sen} t - 4 \operatorname{sen}^3 t$  para deducir la fórmula de integración

$$\int_0^x \operatorname{sen}^3 t \, dt = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} (2 \operatorname{sen}^2 x) \cos x.$$

Respuesta.-  $\operatorname{sen}^3 = \frac{3}{4} = \frac{3}{4} \operatorname{sen} t - \frac{1}{4} \operatorname{sen}(3t)$

$$\begin{aligned}
\int_0^x \operatorname{sen}^3 t \, dx &= \int_0^x \left[ \frac{3}{4} \operatorname{sen} t - \frac{1}{4} \operatorname{sen}(3t) \right] \, dt \\
&= \frac{3}{4} (1 - \cos x) - \frac{1}{12} \int_0^x \operatorname{sen} t \, dt \\
&= \frac{3}{4} - \frac{3}{4} \cos x - \frac{1}{12} + \frac{1}{12} \cos 3x \\
&= \frac{2}{3} - \frac{3}{4} \cos x + \frac{1}{12} (\cos x - 4 \operatorname{sen}^2 x \cos x) \\
&= \frac{2}{3} - \frac{2}{3} \cos x - \frac{1}{2} \operatorname{sen}^2 x \cos x \\
&= \frac{2}{3} - \frac{1}{3} (2 + \operatorname{sen}^2 x) \cos x
\end{aligned}$$

(b) Deducir la identidad  $\cos 3t = 4 \cos^3 t - 3 \cos t$  y utilizándola para demostrar que

$$\int_0^x \cos^3 t \, dt = \frac{1}{3}(2 + \cos^2 x) \sin x$$

Respuesta.-  $\cos 3x = 4 \cos^3 x - 3 \cos x$

$$\begin{aligned} \int_0^x \cos^3 t \, dt &= \int_0^x [\cos(3t) + 3 \cos t] \, dt \\ &= \frac{1}{4} \int_0^x \cos(3t) \, dt + \int_0^x \cos t \, dt \\ &= \frac{1}{12} \int_0^3 x \cos t \, dt + \frac{3}{4} \int_0^x \cos t \, dt \\ &= \frac{1}{12} \sin(3t) \, dt + \frac{3}{4} \sin x \\ &= \frac{1}{12} (3 \sin x - 4 \sin^3 x) + \frac{3}{4} \sin x \\ &= \sin x \frac{1}{3} \sin^3 x \\ &= \sin x \frac{1}{3} \sin^2 x \sin x \\ &= \sin x - \frac{1}{3} \sin^2 x \sin x \\ &= \left[ 1 - \frac{1}{3} (1 - \cos^2 x) \right] \sin x \\ &= \left( \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cos^2 x \right) \sin x \\ &= \frac{1}{3} (2 + \cos^2 x) \sin x \end{aligned}$$

**30.** Si una función  $f$  es periódica  $p > 0$  e integrable en  $[0, p]$ , demostrar que  $\int_0^{2p} f(x) \, dx = \int_a^{a+p} f(x) \, dx$  para todo  $a$ .

Demostración.- Sabemos que existe un único  $n \in \mathbb{Z}$  tal que

$$n \leq \frac{a}{p} < n+1 \implies np \leq a < np+p \leq a+p \implies np \leq a < (n+1)p \leq a+p$$

Entonces, empezamos dividiendo la integral en dos partes

$$\begin{aligned}
\int_a^{a+p} f(x) dx &= \int_a^{(n+1)p} f(x) dx + \int_{(n+1)p}^{a+p} f(x) dx \\
&= \int_{a-np}^{(n+1)p-np} f(x+np) dx + \int_{(n+1)p-(n+1)p}^{a+p-(n+1)p} f(x+(n+1)p) dx \\
&= \int_{a-np}^p f(x) dx + \int_0^{a-np} f(x) dx && \text{periodicidad de } p \\
&= \int_0^p f(x) dx && \text{ya que } 0 \leq a-np < p
\end{aligned}$$

**31.** (a) Demostrar que  $\int_0^{2\pi} \sin nx \, dx = \int_0^{2\pi} \cos nx \, dx = 0$  para todos los enteros  $n \neq 0$ .

Demostración.-

$$\begin{aligned}
\int_0^{2\pi} \sin nx \, dx &= \int_0^{2\pi} \cos nx \, dx \\
\int_0^{2\pi \cdot n} \sin x \, dx &= \int_0^{2\pi \cdot n} \cos x \, dx \\
-\frac{1}{n} [\cos(2\pi \cdot n) - \cos 0] &= \frac{1}{n} [\sin(2\pi \cdot n) - \sin 0] \\
-\frac{1}{n} (0 - 0) &= \frac{1}{n} (1 - 1) \\
0 &= 0
\end{aligned}$$

(b) Usando la parte (a) y las fórmulas de adición para seno y coseno, establecer las siguientes fórmulas, válidas para los enteros  $m$  y  $n$ , tales que  $m^2 \neq n^2$ ;

$$\int_0^{2\pi} \sin nx \cos mx \, dx = \int_0^{2\pi} \sin nx \sin mx \, dx = \int_0^{2\pi} \cos nx \cos mx \, dx = 0,$$

$$\int_0^{2\pi} \sin^2 nx \, dx = \int_0^{2\pi} \cos^2 nx \, dx = \pi, \quad \text{si } n \neq 0$$

Estas fórmulas son las relaciones de ortogonalidad para el seno y el coseno.

Demostración.-

$$\begin{aligned}
\int_0^{2\pi} \sin(nx) \cos(mx) \, dx &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} 2 \sin(nx) \cos(mx) \, dx \\
&= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} [\sin(n+m)x - \sin(n-m)x] \, dx \\
&= \frac{1}{2(n+m)} \int_0^{2\pi(n+m)} \sin x \, dx - \frac{1}{2(n-m)} \int_0^{2\pi(n-m)} \sin x \, dx \\
&= 0
\end{aligned}$$

**32.** A partir de la identidad

$$2 \operatorname{sen} \frac{x}{2} \cos kx = \operatorname{sen}(2k+1)\frac{x}{2} - \operatorname{sen}(2k-1)\frac{x}{2}$$

y de las propiedades telescópicas de las sumas finitas demostrar que si  $x \neq 2m$  ( $m$  entero) se tiene

$$\sum_{k=1}^n \cos kx = \frac{\operatorname{sen} \frac{1}{2}nx \cos \frac{1}{2}(n+1)x}{\operatorname{sen} \frac{1}{2}x}$$

Demostración.- Haciendo  $k = 1, 2, \dots, n$  y sumando esas igualdades, se obtiene que

$$2 \operatorname{sen} \frac{x}{2} \sum_{k=1}^n \cos kx = \sum_{k=1}^n \left[ \operatorname{sen}(2k+1)\frac{x}{2} - \operatorname{sen}(2k-1)\frac{x}{2} \right]$$

Luego por la propiedad telescópica de las sumas finitas, se tiene,

$$2 \operatorname{sen} \frac{\pi}{2} \sum_{k=1}^n \cos kx = \operatorname{sen} \left[ (2n+1)\frac{x}{2} \right] - \operatorname{sen}(0+1)\frac{x}{2}$$

luego,

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \cos kx &= \frac{\operatorname{sen} \left[ (2n+1)\frac{x}{2} \right] - \operatorname{sen} \frac{x}{2}}{2 \operatorname{sen} \frac{x}{2}} \\ &= \frac{2 \operatorname{sen} \frac{(2n+1)\frac{x}{2} - \frac{x}{2}}{2} \cos \frac{(2n+1)\frac{x}{2} + \frac{x}{2}}{2}}{2 \operatorname{sen} \frac{x}{2}} \\ &= \frac{\operatorname{sen} \frac{nx}{2} \cos \frac{(n+1)x}{2}}{\operatorname{sen} \frac{x}{2}} \end{aligned}$$

**33.** Si  $x \neq 2m\pi$  ( $m$  un entero), probar que

$$\sum_{k=1}^n \operatorname{sen} kx = \frac{\operatorname{sen} \frac{1}{2}nx \operatorname{sen} \frac{1}{2}(n+1)x}{\operatorname{sen} \frac{1}{2}x}$$

Demostración.- Recordemos que

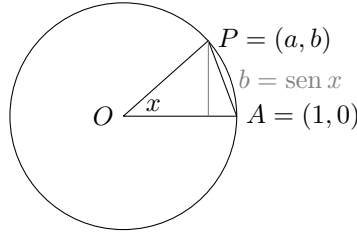
$$\begin{aligned} -2 \operatorname{sen} \frac{x}{2} \operatorname{sen}(kx) &= \cos \left( \frac{x}{2} + kx \right) - \cos \left( \frac{x}{2} - kx \right) \\ &= \cos \left[ (2k+1)\frac{x}{2} \right] - \cos \left[ (1-2k)\frac{x}{2} \right] \\ &= \cos \left[ (2k+1)\frac{x}{2} \right] - \cos \left[ (2k-1)\frac{x}{2} \right] \end{aligned}$$

Luego, aplicando la propiedad telescópica de las sumas finitas, y la primera parte del teorema 4 se tiene,

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^n \sin kx &= \frac{\cos \left[ \left( n + \frac{1}{2} \right) \right] - \cos \frac{x}{2}}{-2 \sin \frac{x}{2}} \\
&= \frac{\cos(nx) \cos \frac{x}{2} - \sin(nx) \sin \frac{x}{2} - \cos \frac{x}{2}}{-2 \sin \frac{x}{2}} \\
&= \frac{\cos \frac{x}{2} (\cos(nx) - 1) - \sin(nx) \sin \frac{x}{2}}{-2 \sin \frac{x}{2}} \\
&= \frac{-2 \cos \frac{x}{2} \sin^2 \frac{nx}{2} - 2 \sin \frac{nx}{2} \cos \frac{nx}{2} \sin \frac{x}{2}}{-2 \sin \frac{x}{2}} \\
&= \frac{\sin \frac{nx}{2} (\cos \frac{x}{2} \sin \frac{nx}{2} + \cos \frac{nx}{2} \sin x)}{2 \sin \frac{x}{2}} \\
&= \frac{\sin \frac{nx}{2} \sin \frac{(n+1)x}{2}}{2 \sin \frac{x}{2}}
\end{aligned}$$

- 34.** Se hace referencia a la figura 2.7. Por comparación del área del triángulo OAP con la del sector circular OAP, demostrar que  $\sin x < x$  si  $0 < x < \frac{1}{2}\pi$ . Usando entonces el hecho de que  $\sin(-x) = -\sin x$ , demostrar que  $|\sin x| < |x|$  si  $0 < |x| < \frac{1}{2}\pi$ .

Demostración.- Considere la siguiente figura



Asumiendo que el radio es  $r = 1$ . Para  $0 < x < \frac{\pi}{2}$  tenemos el triángulo  $OAP_t$  de tamaño de base  $a = 1$  y altura  $b = \sin x$ , es decir,

$$\text{Area}(OAP_t) = \frac{1}{2}ab = \frac{\sin x}{2}$$

Luego el área del sector circular  $OAP_s$  es

$$\text{Area}(OAP_s) = \frac{x}{2\pi} \pi r^2 = \frac{x}{2}$$

Ya que el área del triángulo  $OAP_t$  es menor al área del sector  $OAP_s$  tenemos,

$$\frac{\sin x}{2} < \frac{x}{2} \implies \sin x < x$$

dado que  $\sin(-x) = -\sin x$  para  $0 < x < \frac{\pi}{2}$  entonces

$$\sin x < x \implies -\sin x > -x \implies |\sin x| < |x|$$

para  $0 < |x| < \frac{\pi}{2}$ .



## 1.10. la integral para el área en coordenadas polares

**TEOREMA 1.6** Sea  $R$  el conjunto radial de una función no negativa  $f$  en un intervalo  $[a, b]$ , donde  $0 \leq b - a \leq 2\pi$ , y se asume que  $R$  es medible. Si  $f^2$  es integrable en  $[a, b]$  el área de  $R$  está dado por la integral

$$a(R) = \frac{1}{2} \int_a^b f^2(\theta) d\theta$$

*Demostración.- Elegimos dos funciones escalonadas  $s$  y  $t$  que satisfacen*

$$0 \leq s(\theta) \leq f(\theta) \leq t(\theta)$$

*Para todo  $\theta$  en  $[a, b]$ , y denotamos  $S$  y  $T$  sus conjuntos radiales, respectivamente. Ya que  $s \leq f \leq t$  en  $[a, b]$ , los conjuntos radiales satisfacen la relación de inclusión  $S \subseteq R \subseteq T$ . Por lo tanto, por la propiedad monótona del área, tenemos  $a(S) \leq a(R) \leq a(T)$ . Pero  $S$  y  $T$  son conjuntos radiales de la función escalonada, así  $a(S) = \frac{1}{2} \int_a^b s^2(\theta) d\theta$  y  $a(T) = \frac{1}{2} \int_a^b t^2(\theta) d\theta$ . Entonces tenemos la inecuación*

$$\int_a^b s^2(\theta) d\theta \leq 2a(R) \leq \int_a^b t^2(\theta) d\theta$$

*para toda función escalonada  $s$  y  $t$  que satisfacen  $s \leq f \leq t$  en  $[a, b]$ . Donde  $s^2$  y  $t^2$  son funciones escalonadas arbitrarias que satisfacen  $s^2 \leq f^2 \leq t^2$  en  $[a, b]$ , se sigue  $f^2$  es integrable, y tenemos  $2a(R) = \int_a^b f^2(\theta) d\theta$ . Esto prueba el teorema.*

## 1.11. Ejercicios

En cada uno de los ejercicios 1 al 4, demostrar que el conjunto de puntos cuyas coordenadas rectangulares  $(x, y)$  satisfacen la ecuación cartesiana dada, es igual al conjunto de todos los puntos cuyas coordenadas polares  $(r, \theta)$  satisfacen la correspondiente ecuación polar.

**1.**  $(x - 1)^2 + y^2 = 1; \quad r = 2 \cos \theta, \cos \theta.$

Respuesta.- Sea  $x = r \cos \theta$  y  $y = r \sin \theta$  entonces

$$\begin{aligned} (x - 1)^2 + y^2 = 1 &\implies (r \cos \theta - 1)^2 + r^2 \sin^2 \theta = 1 \\ &\implies r^2 \cos^2 \theta - 2r \cos \theta + 1 + r^2 \sin^2 \theta = 1 \\ &\implies r^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta) - 2r \cos \theta = 0 \\ &\implies r = 2 \cos \theta \end{aligned}$$

Donde  $\cos \theta > 0$  entonces  $r > 0$ .

**2.**  $x^2 + y^2 - x = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad r = 1 + \cos \theta.$

Respuesta.- Sea  $x = r \cos \theta$  y  $y = r \sin \theta$  entonces

$$\begin{aligned} x^2 + y^2 - x = \sqrt{x^2 + y^2} &\implies r^2 \cos^2 \theta + r^2 \sin^2 \theta = \sqrt{r^2 \cos^2 \theta + r^2 \sin^2 \theta} \\ &\implies r^2 - r \cos \theta = r \\ &\implies 1 + \cos \theta = r. \end{aligned}$$

**3.**  $(x^2 + y^2)^2 = x^2 - y^2$ ,  $y^2 \leq x^2$ ;  $r = \sqrt{\cos 2\theta}$ ,  $\cos 2\theta \geq 0$

Respuesta.- Sea  $x = r \cos \theta$  y  $y = r \sin \theta$  entonces

$$\begin{aligned} (x^2 + y^2)^2 = x^2 - y^2 &\implies (r^2 \cos^2 \theta + r^2 \sin^2 \theta)^2 = r^2 \cos^2 \theta - r^2 \sin^2 \theta \\ &\implies r^4 = r^2 \cos(2\theta) \\ &\implies r^2 = r^2 \cos(2\theta) \\ &\implies r = \sqrt{\cos(2\theta)} \end{aligned}$$

Ya que  $\cos^2 \theta - r^2 \sin^2 \theta$ .

**4.**  $(x^2 + y^2) = |x^2 - y^2|$ ;  $r = \sqrt{|\cos 2\theta|}$

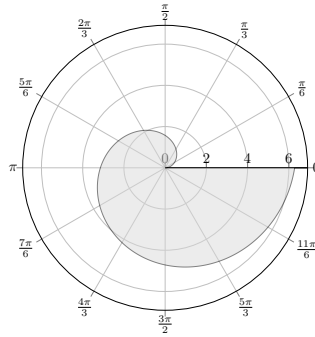
Respuesta.- Sea  $x = r \cos \theta$  y  $y = r \sin \theta$  entonces

$$\begin{aligned} (x^2 + y^2) = |x^2 - y^2| &\implies (r^2 \cos^2 \theta + r^2 \sin^2 \theta)^2 = |r^2 \cos^2 \theta - r^2 \sin^2 \theta| \\ &\implies r^4 = r^2 |\cos(2\theta)| \\ &\implies r^2 = |\cos(2\theta)| \\ &\implies r = \sqrt{|\cos(2\theta)|}. \end{aligned}$$

En cada uno de los ejercicios del 5 al 15, trazar la gráfica de  $f$  en coordenadas polares y calcular el área del conjunto radial de  $f$  sobre el intervalo especificado. Se supondrá que cada conjunto es medible.

**5.** Espiral de Arquimedes:  $f(\theta) = \theta$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .

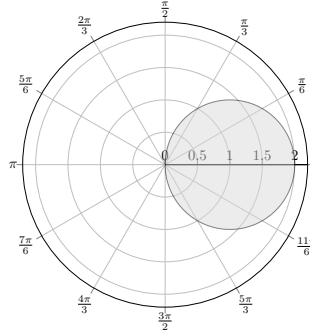
Respuesta.-



$$\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \theta^2 d\theta = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\theta^3}{3} \Big|_0^{2\pi} \right) = \frac{1}{2} \cdot \frac{(2\pi)^3}{3} = \frac{4\pi^3}{3}$$

**6.** Circunferencia tangente al eje  $y$ :  $f(\theta) = 2 \cos \theta$ ,  $-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2$ .

Respuesta.-

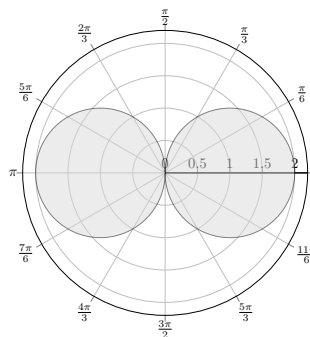


$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} 4 \cos^2 \theta \, d\theta &= \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (1 - \sin^2 \theta) \, d\theta \\
 &= 2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} 1 \, d\theta + \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (1 - 2 \sin^2 \theta - 1) \, d\theta \\
 &= 2\pi + \left( \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos 2\theta \, d\theta \right) - \pi \\
 &= \pi + \frac{1}{2} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \theta \, d\theta \\
 &= \frac{1}{2} \left( \sin \theta \Big|_{-\pi}^{\pi} \right) + \pi \\
 &= \pi
 \end{aligned}$$

7. Dos circunferencias tangentes al eje  $y$ :  $f(\theta) = 2|\cos \theta|$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .

Respuesta.-

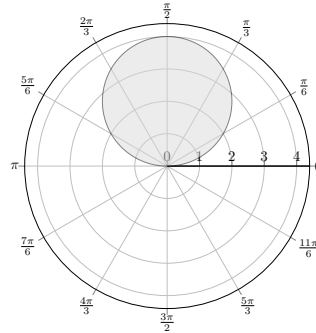
$$\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} 4 \cos^2 \theta \, d\theta = 2 \int_0^{2\pi} \left( \frac{1 + \cos(2\theta)}{2} \right) \, d\theta = 2 \int_0^{2\pi} \frac{1}{2} \, d\theta + 2 \int_0^{2\pi} \cos(2\theta) \, d\theta = 2\pi + 0 = 2\pi$$



8. Circunferencia tangente al eje  $x$ :  $f(\theta) = 4 \sin \theta$ ,  $0 \leq \theta \leq \pi$ .

Respuesta.-

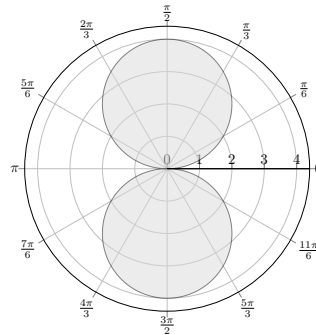
$$\frac{1}{2} \int_0^\pi 16 \sin^2 \theta \, d\theta = 8 \int_0^\pi \sin^2 \theta \, d\theta = 8 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\pi \right) = 4\pi$$



- 9.** Dos circunferencias tangentes al eje  $x$ :  $f(\theta) = 4|\sin \theta|$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .

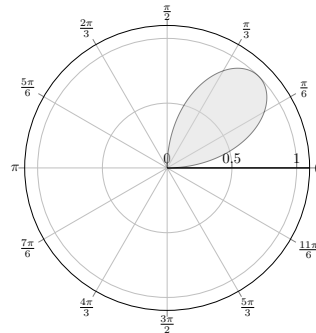
Respuesta.-

$$\frac{1}{2} \int_0^\pi 16 \sin^2 \theta \, d\theta = 8 \int_0^\pi \sin^2 \theta \, d\theta = 8 \left( \frac{2\pi}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\pi \right) = 8\pi$$



- 10.** Pétalo de rosa:  $f(\theta) = \sin 2\theta$ ,  $0 \leq \theta \leq \pi/2$ .

Respuesta.-

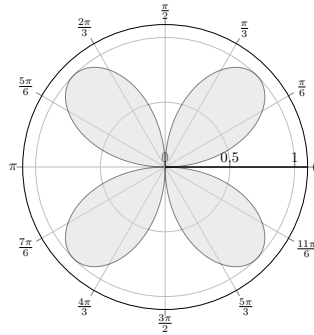


$$\frac{1}{2} \int_0^{\pi/2} \sin^2(2\theta) \, d\theta = \frac{1}{2 \cdot 2} \int_{0 \cdot 2}^{2 \cdot \pi/2} \sin^2\left(\frac{2\theta}{2}\right) \, d\theta = \frac{1}{4} \left[ \frac{\pi}{2} + \frac{1}{4} \sin(2\pi) \right] = \frac{\pi}{8}$$

Se aplico el teorema 1.19 (dilatación o contracción del intervalo de integración) y la nota 2.4 respectivamente.

**11.** Rosa de cuatro hojas:  $f(\theta) = |\sin 2\theta|$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .

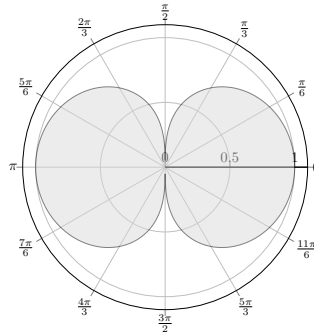
Respuesta.-



$$\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \sin^2(2\theta) d\theta = \frac{1}{2 \cdot 2} \int_{2 \cdot 0}^{2 \cdot 2\pi} \sin^2\left(\frac{2\theta}{2}\right) d\theta = \frac{1}{4} \left[ \frac{4\pi}{2} + \frac{1}{4} \sin(2 \cdot 4\pi) \right] = \frac{\pi}{2}$$

**12.** Ocho aplastado:  $f(\theta) = \sqrt{|\cos \theta|}$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .

Respuesta.-



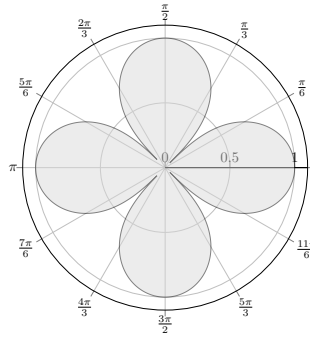
$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left( \sqrt{|\cos \theta|} \right)^2 d\theta &= \frac{1}{2} \left( \int_0^{\pi/2} \cos \theta d\theta - \int_{\pi/2}^{3\pi/2} \cos \theta d\theta + \int_{3\pi/2}^{2\pi} \cos \theta d\theta \right) \\ &= \frac{1}{2} \left[ \sin \frac{\pi}{2} - \left( \sin \frac{3\pi}{2} - \sin \frac{\pi}{2} \right) + \sin 2\pi - \sin \frac{3\pi}{2} \right] \\ &= \frac{1}{2} (1 + 1 + 1 + 0 + 1) \\ &= 2 \end{aligned}$$

Esto por la nota 2.2. y por hecho de que

$$|\cos \theta| = \begin{cases} + & \text{si } 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ - & \text{si } \frac{\pi}{2} < \theta \leq \frac{3\pi}{2} \\ + & \text{si } \frac{3\pi}{2} < \theta \leq 2\pi \end{cases}$$

**13.** Trébol de cuatro hojas:  $f(\theta) = \sqrt{|\cos 2\theta|}$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .

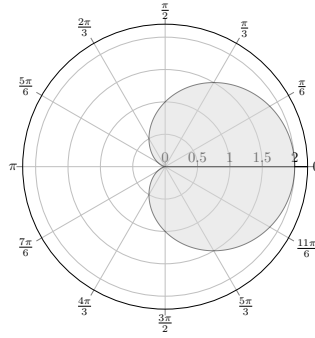
Respuesta.-



$$\begin{aligned} \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left( \sqrt{|\cos(2\theta)|} \right)^2 d\theta &= \frac{1}{2 \cdot 2} \int_0^{2\pi \cdot 2} \left| \cos \frac{2\theta}{2} \right| d\theta \\ &= \frac{1}{4} \int_0^{4\pi} |\cos \theta| d\theta \\ &= \frac{1}{4} \left( \int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta d\theta - \int_{\frac{\pi}{2}}^{\frac{3\pi}{2}} \cos \theta d\theta + \int_{\frac{3\pi}{2}}^{2\pi} \cos \theta d\theta \right. \\ &\quad \left. + \int_{2\pi}^{\frac{5\pi}{2}} \cos \theta d\theta - \int_{\frac{5\pi}{2}}^{\frac{7\pi}{2}} \cos \theta d\theta + \int_{\frac{7\pi}{2}}^{4\pi} \cos \theta d\theta \right) \\ &= \frac{1}{4} \left[ \sin \frac{\pi}{2} - \left( \sin \frac{3\pi}{2} - \sin \frac{\pi}{2} \right) + \sin 2\pi - \sin \frac{3\pi}{2} \right. \\ &\quad \left. + \sin \frac{5\pi}{2} - \sin 2\pi - \left( \sin \frac{7\pi}{2} - \sin \frac{5\pi}{2} \right) + \sin 4\pi - \sin \frac{7\pi}{2} \right] \\ &= \frac{1}{4} (1 + 1 + 1 + 0 + 1 + 1 + 1 + 1 + 0 + 1) \\ &= 2 \end{aligned}$$

**14.** Cardioide:  $f(\theta) = 1 + \cos \theta$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .

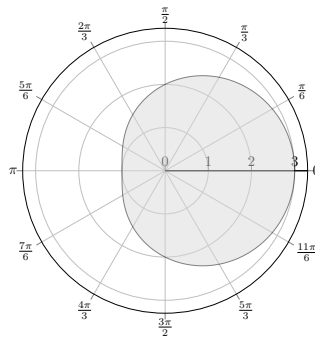
Respuesta.-



$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (1 + \cos \theta)^2 d\theta &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (1 + 2 \cos \theta + \cos^2 \theta) d\theta \\
 &= \frac{1}{2} \left( 2\pi + 2 \sin 2\pi + \frac{2\pi}{2} + \frac{1}{4} \sin 4\pi \right) \\
 &= \frac{3\pi}{2}
 \end{aligned}$$

**15.** Caracol:  $f(\theta) = 2 + \cos \theta$ ,  $0 \leq \theta \leq 2\pi$ .

Respuesta.-



$$\begin{aligned}
 \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (2 + \cos \theta)^2 d\theta &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} (4 + 4 \cos \theta + \cos^2 \theta) d\theta \\
 &= \frac{1}{2} \left( 8\pi + 4 \sin 2\pi + \frac{2\pi}{2} + \frac{1}{4} \sin 4\pi \right) \\
 &= \frac{9\pi}{2}
 \end{aligned}$$

## 1.12. Aplicación de la integración al cálculo de volúmenes

1. **Propiedad de no negatividad.** Para cada conjunto  $S$  de  $\mathcal{A}$  se tiene  $v(S) \geq 0$ .
2. **Aditividad.** Si  $S$  y  $T$  pertenecen a  $\mathcal{A}$ ,  $S \cup T$  y  $S \cap T$  también pertenecen a  $\mathcal{A}$ , y se tiene  $v(S \cup T) = v(S) + v(T) - v(S \cap T)$ .
3. **Propiedad de la diferencia.** Si  $S$  y  $T$  pertenecen a  $\mathcal{A}$ , siendo  $S \subseteq T$ ,  $T - S$  pertenece a  $\mathcal{A}$  y se tiene  $v(T - S) = v(T) - v(S)$ .

Ya que  $v(T - S) \geq 0$ , implica también la siguiente propiedad monótona:

$$v(S) \leq v(T), \quad \text{para los conjuntos } S \text{ y } T \text{ en } \mathcal{A} \text{ con } S \subseteq T.$$

4. **Principio de Cavalieri.** Si  $S$  y  $T$  son dos sólidos de Cavalieri pertenecientes a  $\mathcal{A}$  tales que  $a(S \cap F) \leq a(T \cap F)$  para todo plano  $F$  perpendicular a una recta dada, entonces  $v(S) \leq v(T)$ .
5. **Elección de escala.** Toda caja  $B$  pertenece a  $\mathcal{A}$ . Si los lados o aristas de  $B$  tienen longitudes  $a, b$  y  $c$ , se tiene que  $v(B) = abc$ .
6. Todo conjunto convexo pertenece a  $\mathcal{A}$ .

**TEOREMA 1.7** Sea  $R$  un sólido de Cavalieri de  $\mathcal{A}$  cuya función área seccional  $a_R$ , sea integrable en un intervalo  $[a, b]$  y nula fuera del mismo. En tales condiciones el volumen de  $R$  es igual a la integral del área seccional:

$$v(R) = \int_a^b a_R(u) du$$

*Demostración.-* Elijamos funciones escalonadas  $s$  y  $t$  tales que  $s \leq a_R \leq t$  en  $[a, b]$  y definamos  $s$  y  $t$  como nulas fuera de  $[a, b]$ . Para cada subintervalo de  $[a, b]$  en el que  $s$  sea constante, podemos imaginar un sólido cilíndrico construido de modo que su área seccional en este subintervalo tenga el mismo valor constante que  $s$ . La reunión de esos cilindros sobre los intervalos en los que  $s$  es constante es un sólido  $S$  cuyo volumen  $v(S)$  es, por la aditividad, igual a la integral  $\int_a^b s(u) du$ . Del mismo modo, existe un sólido  $T$ , una reunión de cilindros, cuyo volumen  $v(T) = \int_a^b t(u) du$ . Pero  $a_S(u) = s(u) \leq t(u) = a_T(u)$  para todo  $u$  de  $[a, b]$ , de modo que el principio de Cavalieri implica que  $v(S) \leq v(R) \leq v(T)$ . En otras palabras,  $v(R)$  satisface las desigualdades,

$$\int_a^b s(u) du \leq v(R) \leq \int_a^b t(u) du.$$

para todas las funciones escalonadas  $s$  y  $t$  que satisfacen  $s \leq a_S \leq t$  en  $[a, b]$ . Puesto que  $a_S$  es integrable en  $[a, b]$ , resulta que  $v(R) = \int_a^b a_S(u) du$ .

## 1.13. Ejercicios

1.