

EJEMPLOS DE SUPERFICIES REGULARES II

ALAN REYES-FIGUEROA
GEOMETRÍA DIFERENCIAL

(AULA 15) 04.MARZO.2025

Necesitamos el siguiente resultado de análisis:

Teorema (Teorema de la Función Inversa)

Sea $F : U \subseteq \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ una aplicación diferenciable. Si la derivada $DF(\mathbf{p}) : \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m$ es un isomorfismo lineal (esto es, $\det DF(\mathbf{p}) \neq 0$) para $\mathbf{p} \in U$, entonces existen vecindades $V \subseteq U$ de \mathbf{p} y $W \subseteq \mathbb{R}^m$ de $\mathbf{q} = F(\mathbf{p})$, tales que la restricción

$$F|_V : V \rightarrow F(V) = W$$

es un difeomorfismo (i.e. $F|_V$ y $F^{-1}|_W$ son ambas diferenciables).

Proposición (Superficies regulares son localmente gráficas)

Sea $S \subseteq \mathbb{R}^3$ una superficie regular. Para todo punto $\mathbf{p} \in S$, existe una vecindad $V \subseteq \mathbb{R}^3$ de \mathbf{p} tal que $V \cap S$ es la gráfica de alguna función diferenciable, sobre alguno de los planos coordenados xy , xz ó yz .

Proposición (Superficies regulares son localmente gráficas)

Sea $S \subseteq \mathbb{R}^3$ una superficie regular. Para todo punto $\mathbf{p} \in S$, existe una vecindad $V \subseteq \mathbb{R}^3$ de \mathbf{p} tal que $V \cap S$ es la gráfica de alguna función diferenciable, sobre alguno de los planos coordenados xy , xz ó yz .

Prueba:

Proposición (Superficies regulares son localmente gráficas)

Sea $S \subseteq \mathbb{R}^3$ una superficie regular. Para todo punto $\mathbf{p} \in S$, existe una vecindad $V \subseteq \mathbb{R}^3$ de \mathbf{p} tal que $V \cap S$ es la gráfica de alguna función diferenciable, sobre alguno de los planos coordenados xy , xz ó yz .

Prueba:

Dado $\mathbf{p} \in S$, como S es superficie regular, existe una vecindad $V \subseteq \mathbb{R}^3$ de \mathbf{p} y una parametrización local $\mathbf{x} : U \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow V \cap S$.

Proposición (Superficies regulares son localmente gráficas)

Sea $S \subseteq \mathbb{R}^3$ una superficie regular. Para todo punto $\mathbf{p} \in S$, existe una vecindad $V \subseteq \mathbb{R}^3$ de \mathbf{p} tal que $V \cap S$ es la gráfica de alguna función diferenciable, sobre alguno de los planos coordenados xy , xz ó yz .

Prueba:

Dado $\mathbf{p} \in S$, como S es superficie regular, existe una vecindad $V \subseteq \mathbb{R}^3$ de \mathbf{p} y una parametrización local $\mathbf{x} : U \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow V \cap S$.

Sea $\mathbf{q} \in U$ tal que $\mathbf{x}(\mathbf{q}) = \mathbf{p}$ y consideremos el mapa

$$\mathbf{x}(u, v) = (x(u, v), y(u, v), z(u, v)).$$

Superficies

Sabemos que la matriz jacobiana de \mathbf{x}

$$D\mathbf{x}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial x}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial y}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial z}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial z}{\partial v}(\mathbf{q}) \end{pmatrix}$$

es inyectiva y de rango 2.

Superficies

Sabemos que la matriz jacobiana de \mathbf{x}

$$D\mathbf{x}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial x}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial y}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial z}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial z}{\partial v}(\mathbf{q}) \end{pmatrix}$$

es inyectiva y de rango 2. Así, al menos uno de los determinantes menores

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)}, \quad \frac{\partial(x, z)}{\partial(u, v)}, \quad \frac{\partial(y, z)}{\partial(u, v)}$$

no se anula en el punto \mathbf{q} .

Superficies

Sabemos que la matriz jacobiana de \mathbf{x}

$$D\mathbf{x}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial x}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial y}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial z}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial z}{\partial v}(\mathbf{q}) \end{pmatrix}$$

es inyectiva y de rango 2. Así, al menos uno de los determinantes menores

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)}, \quad \frac{\partial(x, z)}{\partial(u, v)}, \quad \frac{\partial(y, z)}{\partial(u, v)}$$

no se anula en el punto \mathbf{q} .

Sin pérdida de generalidad, podemos asumir que $\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)}(\mathbf{q}) \neq 0$.

Superficies

Si $\pi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ es la proyección $\pi(x, y, z) = (x, y)$, entonces la composición $\pi \circ \mathbf{x} : U \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \pi(V \cap S) \subseteq \mathbb{R}^2$ es diferenciable (pues es composición de mapas diferenciables), y su derivada es

$$D(\pi \circ \mathbf{x})(\mathbf{q}) = D\pi(\mathbf{p}) D\mathbf{x}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial x}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial y}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial z}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial z}{\partial v}(\mathbf{q}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial x}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial y}{\partial v}(\mathbf{q}) \end{pmatrix}.$$

Superficies

Si $\pi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ es la proyección $\pi(x, y, z) = (x, y)$, entonces la composición $\pi \circ \mathbf{x} : U \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \pi(V \cap S) \subseteq \mathbb{R}^2$ es diferenciable (pues es composición de mapas diferenciables), y su derivada es

$$D(\pi \circ \mathbf{x})(\mathbf{q}) = D\pi(\mathbf{p}) D\mathbf{x}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial x}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial y}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial z}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial z}{\partial v}(\mathbf{q}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial x}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial y}{\partial v}(\mathbf{q}) \end{pmatrix}.$$

En particular, $\det D(\pi \circ \mathbf{x})(\mathbf{q}) \neq 0$, de modo que $D(\pi \circ \mathbf{x})(\mathbf{q})$ es un isomorfismo lineal.

Superficies

Si $\pi : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ es la proyección $\pi(x, y, z) = (x, y)$, entonces la composición $\pi \circ \mathbf{x} : U \subseteq \mathbb{R}^2 \rightarrow \pi(V \cap S) \subseteq \mathbb{R}^2$ es diferenciable (pues es composición de mapas diferenciables), y su derivada es

$$D(\pi \circ \mathbf{x})(\mathbf{q}) = D\pi(\mathbf{p}) D\mathbf{x}(\mathbf{q}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial x}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial y}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial z}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial z}{\partial v}(\mathbf{q}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial x}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial x}{\partial v}(\mathbf{q}) \\ \frac{\partial y}{\partial u}(\mathbf{q}) & \frac{\partial y}{\partial v}(\mathbf{q}) \end{pmatrix}.$$

En particular, $\det D(\pi \circ \mathbf{x})(\mathbf{q}) \neq 0$, de modo que $D(\pi \circ \mathbf{x})(\mathbf{q})$ es un isomorfismo lineal.

Por el Teorema de la Función Inversa, existen vecindades $W_1 \subseteq U$ de \mathbf{q} y $W_2 \subseteq \pi(V \cap S)$ de \mathbf{p} tales que

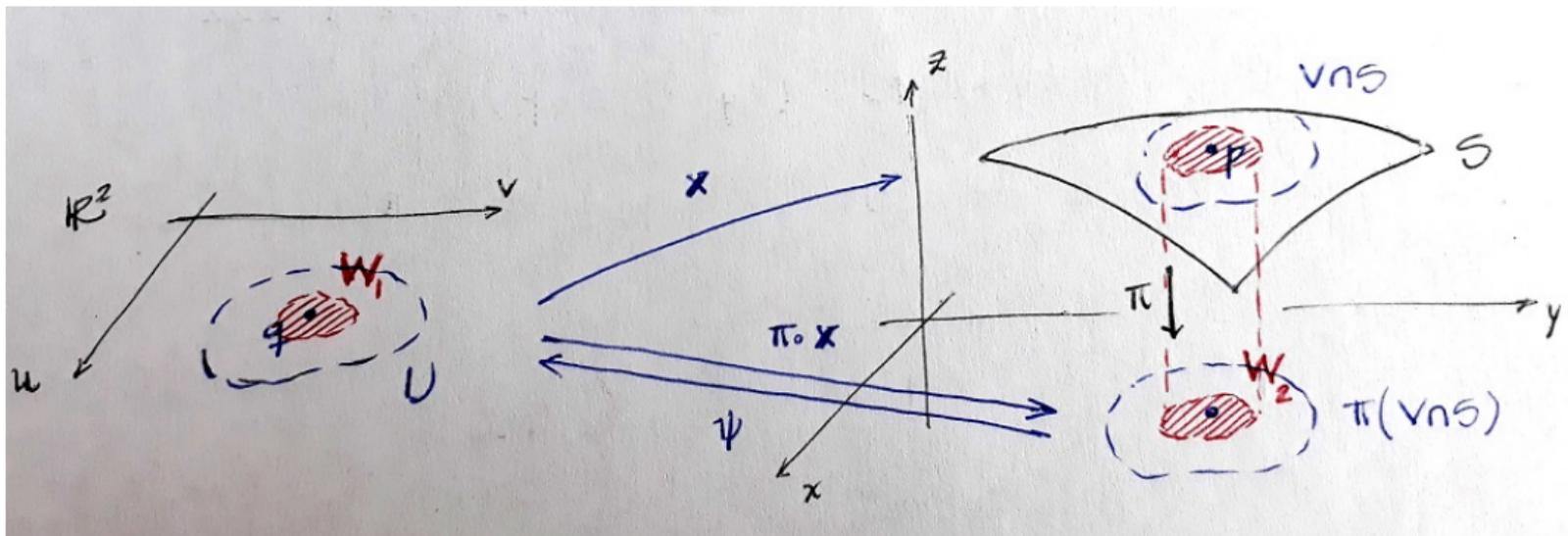
$$(\pi \circ \mathbf{x})|_{W_1} : W_1 \rightarrow W_2 \text{ es un difeomorfismo.}$$

Superficies

En particular, $(\pi \circ \mathbf{x})(u, v) = (x(u, v), y(u, v))$, y la función inversa es $\psi = (\pi \circ \mathbf{x})|_{W_1}^{-1} : W_2 \rightarrow W_1$ es diferenciable.

Superficies

En particular, $(\pi \circ \mathbf{x})(u, v) = (x(u, v), y(u, v))$, y la función inversa es $\psi = (\pi \circ \mathbf{x})|_{W_2}^{-1} : W_2 \rightarrow W_1$ es diferenciable.



Superficies

Definamos la función $f : W_2 \rightarrow \mathbb{R}$ por $f(x, y) = z(\psi(x, y))$.

Superficies

Definamos la función $f : W_2 \rightarrow \mathbb{R}$ por $f(x, y) = z(\psi(x, y))$.

f es diferenciable, por ser composición de mapas diferenciables. Además,

Superficies

Definamos la función $f : W_2 \rightarrow \mathbb{R}$ por $f(x, y) = z(\psi(x, y))$.

f es diferenciable, por ser composición de mapas diferenciables. Además,

$$\mathbf{x}(W_1) = \{ (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \in \mathbb{R}^3 : (u, v) \in W_1 \}.$$

Superficies

Definamos la función $f : W_2 \rightarrow \mathbb{R}$ por $f(x, y) = z(\psi(x, y))$.

f es diferenciable, por ser composición de mapas diferenciables. Además,

$$\mathbf{x}(W_1) = \{ (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \in \mathbb{R}^3 : (u, v) \in W_1 \}.$$

Por otro lado,

$$\begin{aligned} G_f &= \{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : z = f(x, y), (x, y) = (\pi \circ \mathbf{x})(u, v) \in W_2, (u, v) \in W_1 \} \\ &= \{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x = x(u, v), y = y(u, v), z = z(\psi(x, y)) = z(u, v), (u, v) \in W_1 \} \\ &= \{ (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \in \mathbb{R}^3 : (u, v) \in W_1 \} \\ &= \mathbf{x}(W_1). \end{aligned}$$

Superficies

Definamos la función $f : W_2 \rightarrow \mathbb{R}$ por $f(x, y) = z(\psi(x, y))$.

f es diferenciable, por ser composición de mapas diferenciables. Además,

$$\mathbf{x}(W_1) = \{ (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \in \mathbb{R}^3 : (u, v) \in W_1 \}.$$

Por otro lado,

$$\begin{aligned} G_f &= \{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : z = f(x, y), (x, y) = (\pi \circ \mathbf{x})(u, v) \in W_2, (u, v) \in W_1 \} \\ &= \{ (x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x = x(u, v), y = y(u, v), z = z(\psi(x, y)) = z(u, v), (u, v) \in W_1 \} \\ &= \{ (x(u, v), y(u, v), z(u, v)) \in \mathbb{R}^3 : (u, v) \in W_1 \} \\ &= \mathbf{x}(W_1). \end{aligned}$$

Portanto, $V \cap S \supseteq W_2 = \mathbf{x}(W_1)$ es el grafo de la función f .

Superficies de revolución

5. Superficies de revolución:

Sea $C : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ una curva regular plana inyectiva, y sea L un eje en el plano que no corta a la curva C , (e.g. xz el plano de C y Oz el eje).

Superficies de revolución

5. Superficies de revolución:

Sea $C : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ una curva regular plana inyectiva, y sea L un eje en el plano que no corta a la curva C , (e.g. xz el plano de C y Oz el eje).

Sea S el subconjunto de \mathbb{R}^3 obtenido al girar la curva C en torno del eje Oz .

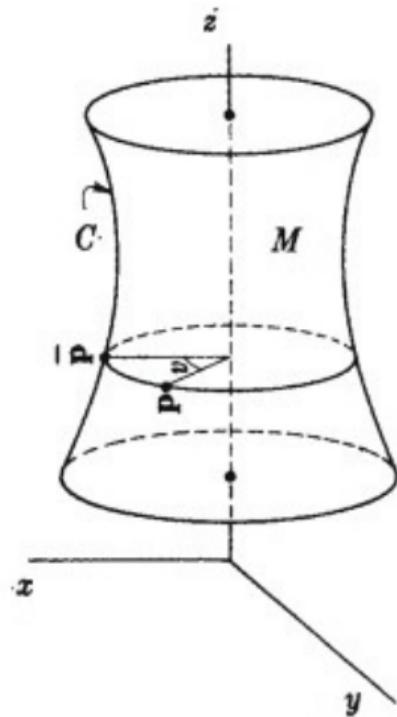
Superficies de revolución

5. Superficies de revolución:

Sea $C : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}^2$ una curva regular plana inyectiva, y sea L un eje en el plano que no corta a la curva C , (e.g. xz el plano de C y Oz el eje).

Sea S el subconjunto de \mathbb{R}^3 obtenido al girar la curva C en torno del eje Oz .

Sea $x = f(v)$, $z = g(v)$, con $a \leq v \leq b$ una parametrización de la curva C , con $f(v) > 0$; y denotemos por u el ángulo de rotación en torno del eje Oz .



Superficies de revolución

La aplicación

$$\mathbf{x}(u, v) = (f(v) \cos u, f(v) \sin u, g(v)),$$

definida en el abierto $U = (0, 2\pi) \times (a, b) \subset \mathbb{R}^2$ proporciona una parametrización para S :

Superficies de revolución

La aplicación

$$\mathbf{x}(u, v) = (f(v) \cos u, f(v) \sin u, g(v)),$$

definida en el abierto $U = (0, 2\pi) \times (a, b) \subset \mathbb{R}^2$ proporciona una parametrización para S :

- \mathbf{x} es diferenciable (desde que f y g son diferenciables).

Superficies de revolución

La aplicación

$$\mathbf{x}(u, v) = (f(v) \cos u, f(v) \sin u, g(v)),$$

definida en el abierto $U = (0, 2\pi) \times (a, b) \subset \mathbb{R}^2$ proporciona una parametrización para S :

- \mathbf{x} es diferenciable (desde que f y g son diferenciables).
- Como $(f(v), g(v))$ parametriza C , dados z y $r^2 = x^2 + y^2 = (f(v))^2$ entonces $z = g(v)$ y $r = f(v)$, están únicamente determinados, $\Rightarrow, x = r \cos u, y = r \sin u$ también $\Rightarrow \mathbf{x}$ es inyectiva y continua.

Superficies de revolución

La aplicación

$$\mathbf{x}(u, v) = (f(v) \cos u, f(v) \sin u, g(v)),$$

definida en el abierto $U = (0, 2\pi) \times (a, b) \subset \mathbb{R}^2$ proporciona una parametrización para S :

- \mathbf{x} es diferenciable (desde que f y g son diferenciables).
- Como $(f(v), g(v))$ parametriza C , dados z y $r^2 = x^2 + y^2 = (f(v))^2$ entonces $z = g(v)$ y $r = f(v)$, están únicamente determinados, $\Rightarrow, x = r \cos u, y = r \sin u$ también $\Rightarrow \mathbf{x}$ es inyectiva y continua.
- Para mostrar que \mathbf{x}^{-1} es continua en función de (x, y, z) , tome $u \neq \pi$. Como $f(v) \neq 0$, entonces

$$v = C^{-1}(f(v), g(v)) = C^{-1}(\sqrt{x^2 + y^2}, z),$$

es la parametrización inversa de C , la cual es continua.

Superficies de revolución

- (aquí se está usando el hecho que toda función continua e inyectiva definida en un compacto tiene inversa continua).

Superficies de revolución

- (aquí se está usando el hecho que toda función continua e inyectiva definida en un compacto tiene inversa continua).
- Por otro lado,

$$\tan \frac{u}{2} = \frac{\sin \frac{u}{2}}{\cos \frac{u}{2}} = \frac{2 \sin \frac{u}{2} \cos \frac{u}{2}}{2 \cos^2 \frac{u}{2}} = \frac{\sin u}{1 + \cos u} = \frac{y/f(v)}{1 + x/f(v)} = \frac{y}{x + \sqrt{x^2 + y^2}},$$

para $u \neq \pi$.

Superficies de revolución

- (aquí se está usando el hecho que toda función continua e inyectiva definida en un compacto tiene inversa continua).
- Por otro lado,

$$\tan \frac{u}{2} = \frac{\sin \frac{u}{2}}{\cos \frac{u}{2}} = \frac{2 \sin \frac{u}{2} \cos \frac{u}{2}}{2 \cos^2 \frac{u}{2}} = \frac{\sin u}{1 + \cos u} = \frac{y/f(v)}{1 + x/f(v)} = \frac{y}{x + \sqrt{x^2 + y^2}},$$

para $u \neq \pi$. En ese caso,

$$u = 2 \arctan \frac{y}{x + \sqrt{x^2 + y^2}}, \quad u \neq \pi.$$

En caso $u \in (\pi - \epsilon, \pi + \epsilon)$, se tiene $u = 2 \arctan \frac{y}{x - \sqrt{x^2 + y^2}}$.

Superficies de revolución

- Así, \mathbf{x} es un homeomorfismo.

Superficies de revolución

- Así, \mathbf{x} es un homeomorfismo.
- Finalmente,

$$D\mathbf{x}(u, v) = \begin{pmatrix} -f(v) \sin u & f'(v) \cos u \\ f(v) \cos u & f'(v) \sin u \\ 0 & g'(v) \end{pmatrix}.$$

Superficies de revolución

- Así, \mathbf{x} es un homeomorfismo.
- Finalmente,

$$D\mathbf{x}(u, v) = \begin{pmatrix} -f(v) \sin u & f'(v) \cos u \\ f(v) \cos u & f'(v) \sin u \\ 0 & g'(v) \end{pmatrix}.$$

Tenemos los determinantes menores

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = -f(v)f'(v), \quad \frac{\partial(x, z)}{\partial(u, v)} = -f(v)g'(v) \sin u, \quad \frac{\partial(y, z)}{\partial(u, v)} = f(v)g'(v) \cos u.$$

Superficies de revolución

- Así, \mathbf{x} es un homeomorfismo.
- Finalmente,

$$D\mathbf{x}(u, v) = \begin{pmatrix} -f(v) \sin u & f'(v) \cos u \\ f(v) \cos u & f'(v) \sin u \\ 0 & g'(v) \end{pmatrix}.$$

Tenemos los determinantes menores

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = -f(v)f'(v), \quad \frac{\partial(x, z)}{\partial(u, v)} = -f(v)g'(v) \sin u, \quad \frac{\partial(y, z)}{\partial(u, v)} = f(v)g'(v) \cos u.$$

Como C es una curva regular, entonces $C'(v) = (f'(v), g'(v)) \neq 0 \Rightarrow D\mathbf{x}(\mathbf{q})$ es inyectiva.

Superficies de revolución

- Así, \mathbf{x} es un homeomorfismo.
- Finalmente,

$$D\mathbf{x}(u, v) = \begin{pmatrix} -f(v) \sin u & f'(v) \cos u \\ f(v) \cos u & f'(v) \sin u \\ 0 & g'(v) \end{pmatrix}.$$

Tenemos los determinantes menores

$$\frac{\partial(x, y)}{\partial(u, v)} = -f(v)f'(v), \quad \frac{\partial(x, z)}{\partial(u, v)} = -f(v)g'(v) \sin u, \quad \frac{\partial(y, z)}{\partial(u, v)} = f(v)g'(v) \cos u.$$

Como C es una curva regular, entonces $C'(v) = (f'(v), g'(v)) \neq 0 \Rightarrow D\mathbf{x}(\mathbf{q})$ es inyectiva.

Esto muestra que S , la superficie de revolución, es una superficie regular.

Ejemplos

Ejemplo: La esfera S^2 .

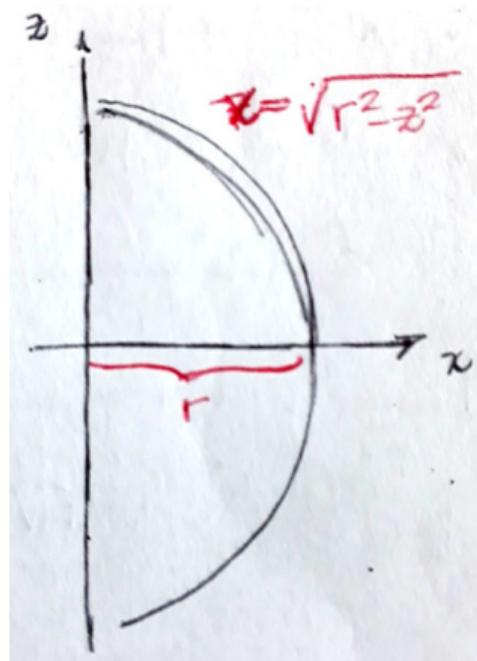
Consideremos la curva $C : \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right] \rightarrow \mathbb{R}^2$ dada por

$$C(v) = (r \sin v, r \cos v), \quad v \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right), \quad r > 0.$$

La curva es regular e inyectiva. Siguiendo el proceso descrito anteriormente, podemos girar la curva C en torno al eje Oz y construir una superficie de revolución dada por

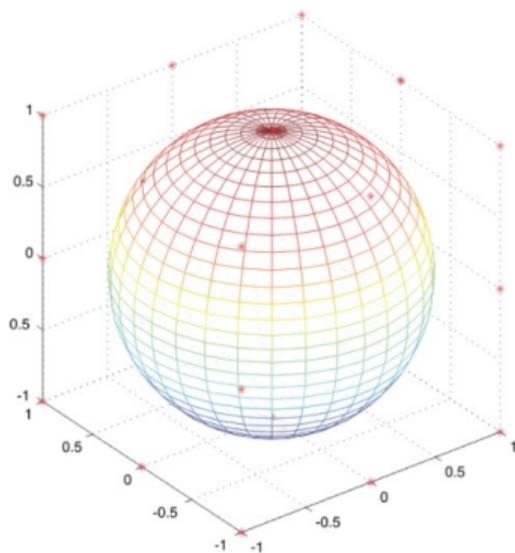
$$\mathbf{x}(u, v) = (r \cos u \sin v, r \sin u \sin v, r \cos v),$$

$$u \in (0, 2\pi), \quad v \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$



Ejemplos

Obtenemos la típica parametrización en coordenadas esféricas.



Meridianos = curvas idénticas a C al variar el parámetro u .

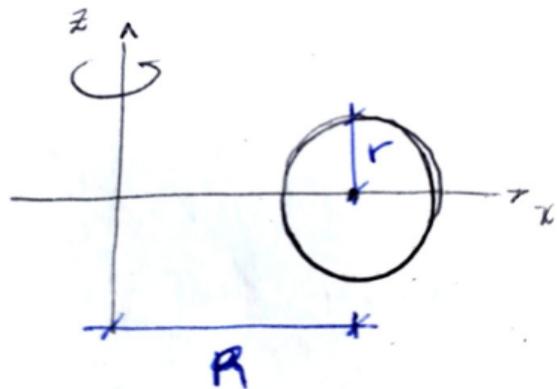
Paralelos = círculos que se obtienen al fijar el parámetro v .

Ejemplos

Ejemplo: El toro bidimensional \mathbb{T}^2 .

Ejemplos

Ejemplo: El toro bidimensional \mathbb{T}^2 .



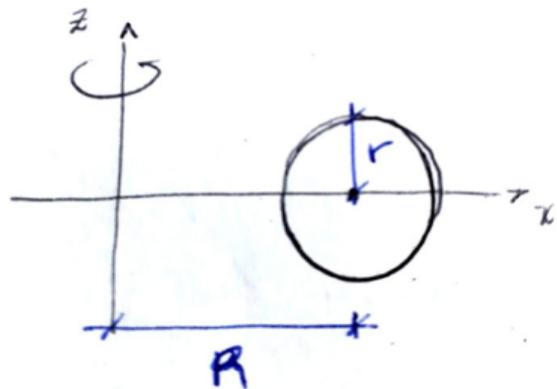
Consideramos la curva $C : [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}^2$ dada por

$$C(v) = (R, 0) + (r \cos v, r \sin v), \quad v \in (0, 2\pi),$$

$$R > r > 0.$$

Ejemplos

Ejemplo: El toro bidimensional \mathbb{T}^2 .



Consideramos la curva $C : [0, 2\pi] \rightarrow \mathbb{R}^2$ dada por

$$C(v) = (R, 0) + (r \cos v, r \sin v), \quad v \in (0, 2\pi),$$

$R > r > 0$.

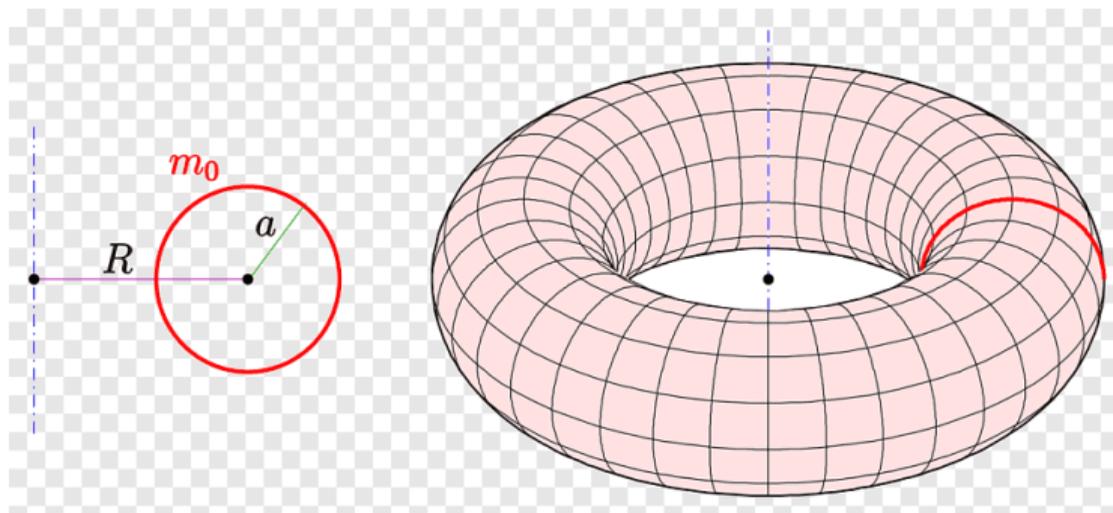
La curva es regular e inyectiva. Construimos la superficie de revolución girando C en torno al eje Oz y obtenemos la parametrización

$$\mathbf{x}(u, v) = ((R + r \cos v) \cos u, (R + r \cos v) \sin u, r \sin v),$$

$u, v \in (0, 2\pi)$.

Ejemplos

Esta es la parametrización usual del toro bidimensional.



Observe que, topológicamente, el toro es homeomorfo a $\mathbb{T} \simeq S^1 \times S^1$.