



Universidad de Granada

DOBLE GRADO EN INGENIERÍA INFORMÁTICA Y
MATEMÁTICAS

TOPOLOGÍA II

Autor:
Jesús Muñoz Velasco

Curso 2025-2026

Índice general

0.1. Conexión	5
0.2. Conexión por arcos	6
1. El grupo fundamental	11
1.1. Homotopía por arcos	11
1.2. El grupo fundamental	16
1.3. Espacios recubridores	20
1.4. Levantamientos en espacios recubridores	25
1.5. Grupo fundamental de la circunferencia	29
1.6. Retracciones, tipos de homotopía y retracts de deformación	33
1.7. El grupo fundamental de las esferas. Aplicaciones.	40
1.8. El teorema de Seifert-van Kampen	48
1.8.1. Grupo cociente	48
1.8.2. Subgrupo normal generado por un conjunto	49
1.8.3. Producto libre de grupos	49
1.8.4. Grupos libres y presentaciones de grupos	51
1.8.5. Enunciado del teorema	53
2. Espacios Recubridores	61
2.1. Levantamiento de aplicaciones	61

Introducción. Conexión por arcos

0.1. Conexión

Notación. Notaremos por e.t. al espacio topológico (X, \mathcal{T}) o diremos X es un e.t.

Definición 0.1. Se dice que un e.t. X es no conexo si existen U y V abiertos disjuntos y no vacíos tales que $X = U \cup V$.

Proposición 0.1. Dado un e.t. X equivalen las siguientes afirmaciones:

- (i) X es conexo.
- (ii) Los únicos subconjuntos de X que son abiertos y cerrados a la vez son el vacío y el total.
- (iii) Los únicos subconjuntos de X con frontera vacía son el vacío y el total.

Teorema 0.2. El ser conexo se conserva por aplicaciones continuas. En particular, ser conexo es una propiedad topológica (se conserva por homeomorfismos).

Teorema 0.3. La unión de una colección de subconjuntos conexos que tienen un punto común de un e.t. X es también conexa.

Teorema 0.4. Si A es un subconjunto del e.t. X y A es conexo, entonces dado B con $A \subset B \subset \overline{A}$, entonces se tiene que B también es conexo. En particular, la adherencia de un conexo siempre es un conjunto conexo.

Teorema 0.5. Dados dos espacios topológicos X, Y se cumple que $X \times Y$ es conexo (con la topología producto) si y solo si X e Y son conexos.

Teorema 0.6. Los conjuntos conexos de \mathbb{R} con la topología usual son exactamente los intervalos (incluyendo los puntos).

Definición 0.2. Dados un e.t. X y un punto x_0 se define la componente conexa de x_0 en X como el mayor conexo de X que contiene a x_0 .

Teorema 0.7. Las componentes conexas de un e.t. X forman una partición de X en conjuntos conexos maximales y cerrados.

0.2. Conexión por arcos

Definición 0.3. Un **arco** (o camino) en un espacio topológico X es una aplicación continua $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$. Si además $\alpha(0) = \alpha(1)$ diremos que α es un **lazo**.

Diremos que un arco $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ une x con y si se verifica que $\alpha(0) = x$ y $\alpha(1) = y$. Si α es un lazo, diremos que está basado en x (o su punto base es x) si $\alpha(0) = x = \alpha(1)$.

Denotaremos por

$$\Omega(X; x, y) = \{\alpha : [0, 1] \rightarrow X \text{ continua} : \alpha(0) = x, \alpha(1) = y\}$$

al **conjunto de arcos** que unen x con y . Denotaremos además por

$$\Omega(X; x) = \{\alpha : [0, 1] \rightarrow X \text{ continua} : \alpha(0) = x = \alpha(1)\}$$

al **conjunto de lazos** basados en x .

Ejemplo.

1. Dados un e.t. X y un punto $x_0 \in X$ siempre se tiene que

$$\begin{aligned} \varepsilon_{x_0} : [0, 1] &\rightarrow X \\ t &\mapsto x_0 \end{aligned}$$

es un lazo basado en x_0 al que llamaremos **arco constante**. De hecho, si X tiene la topología discreta, entonces los únicos arcos que hay en X son los arcos constantes.

Demostración. Si X tiene la topología discreta, entonces como α es continua $\alpha^{-1}(\{x_0\})$ será abierto y cerrado y por tanto $\alpha^{-1}(\{x_0\}) \in \{\emptyset, X\}$ por ser $[0, 1]$ conexo. \square

2. Sean $x, y, z \in X$, $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ un arco uniendo x con y y $\beta : [0, 1] \rightarrow X$ un arco uniendo y con z . Buscaremos ahora un arco formado a partir de estos dos de la siguiente forma:

$$\alpha * \beta : [0, 1] \rightarrow X \text{ dado por } (\alpha * \beta)(t) = \begin{cases} \alpha(2t) & \text{si } 0 \leq t \leq 1/2 \\ \beta(2t - 1) & \text{si } 1/2 \leq t \leq 1 \end{cases}$$

Entonces $\alpha * \beta$ es continua ya que $(\alpha * \beta)|_{[0, 1/2]}$ y $(\alpha * \beta)|_{[1/2, 1]}$ lo son y para $t = 1/2$ se tiene que

$$\alpha\left(2 \cdot \frac{1}{2}\right) = \alpha(1) = \beta(0) = \beta\left(2 \cdot \frac{1}{2} - 1\right)$$

con $[0, \frac{1}{2}]$ y $[\frac{1}{2}, 1]$ cerrados. Aplicando el lema de pegado¹ tenemos que $\alpha * \beta$ es continua.

¹visto en Topología I

3. Si $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ es un arco uniendo x con y , entonces

$$\begin{aligned}\tilde{\alpha} : [0, 1] &\rightarrow X \\ t &\mapsto \alpha(1 - t)\end{aligned}$$

es un arco que une y con x .

Definición 0.4. Decimos que un e.t. X es **arcoconexo** (o **conexo por arcos**) si para cualesquiera $x, y \in X$ existe un arco en X que une el punto x con el punto y .

Si X es un e.t. y $A \subset X$, diremos que A es arcoconexo si A es arcoconexo con la topología de inducida de X .

Teorema 0.8. Todo espacio topológico arcoconexo es conexo.

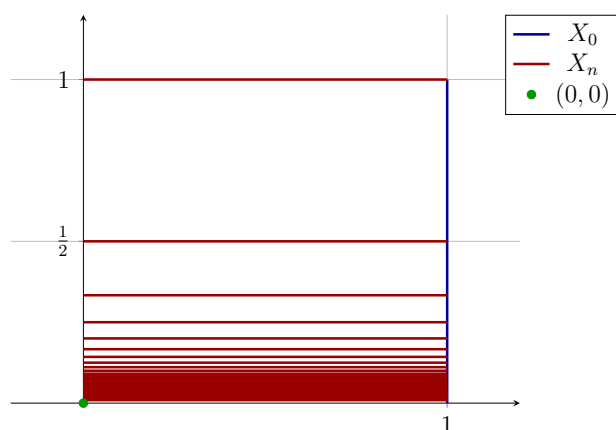
Demostración. Dado $x_0 \in X$ fijo y otro punto $x \in X$ cualquiera, sabemos que existe $\alpha_x : [0, 1] \rightarrow X$ un arco tal que $\alpha_x(0) = x_0$ y $\alpha_x(1) = x$. En particular, como el intervalo $[0, 1]$ es conexo y α_x es continua, entonces se tiene que $\alpha_x([0, 1])$ es conexo y podremos escribir

$$X = \bigcup_{x \in X} \{x\} \subseteq \bigcup_{x \in X} \alpha_x([0, 1]) \subseteq X \Rightarrow X = \bigcup_{x \in X} \alpha_x\{[0, 1]\}$$

y además $x_0 \in \bigcap_{x \in X} \alpha_x\{[0, 1]\}$ por lo que X es conexo (por el lema del peine). \square

Ejemplo. Veamos que la otra implicación no es cierta en general. Para ello consideramos los siguientes conjuntos:

$$X_0 = \{1\} \times [0, 1] \quad \text{y} \quad X_n = [0, 1] \times \left\{\frac{1}{n}\right\}, \quad n \in \mathbb{N}$$



Llamamos $X = \{(0, 0)\} \cup \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N} \cup \{0\}} X_n \right)$ y queremos ver que X es conexo pero no es arcoconexo.

Si tomamos la segunda parte de esta unión, es decir,

$$Y = \bigcup_{n \in \mathbb{N} \cup \{0\}} X_n$$

tenemos que Y es conexo porque es unión de los X_n que son todos conexos y que intersecan con X_0 . Entonces, como $Y \subset X \subset \overline{Y}$ tenemos que X es conexo. Veamos sin embargo que X no es arcoconexo.

Para ello vamos a demostrar que si $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ tal que α es continua con $\alpha(0) = (0, 0)$, entonces $\alpha(t) = (0, 0)$ para todo $t \in [0, 1]$.

Podemos escribir la curva como $\alpha(t) = (x(t), y(t)) \in \mathbb{R}^2$. Como $\alpha(0) = (0, 0)$, si tomamos $((-1/2, 1/2) \times (-1/2, 1/2)) \cap X$ un abierto que contiene al origen, entonces $\exists \varepsilon > 0$ tal que $\alpha([0, \varepsilon)) \subseteq ((-1/2, 1/2) \times (-1/2, 1/2)) \cap X$ por ser α continua. Como $y(t)$ es continua y se tiene que $y([0, \varepsilon)) \subseteq \{0\} \cup \left(\bigcup_{n \geq 2} \{\frac{1}{n}\} \right)$. Por el teorema del valor intermedio tenemos que $y([0, \varepsilon)) = \{0\}$ por lo que $\alpha([0, \varepsilon)) = \{(0, 0)\}$. De esta forma hemos probado que no hay ningún arco que conecte $(0, 0)$ con un punto distinto (el único arco es el constante).

Teorema 0.9. Si $A \subseteq \mathbb{R}^n$ es estrellado, entonces A es arcoconexo.

Demostración. Como A es estrellado existe un $x_0 \in A$ tal que para cualquier $x \in A$, el segmento que los une, $(1-t)x + tx_0 \in A$ para todo $t \in [0, 1]$ y entonces $\alpha(t) = (1-t)x + tx_0$ es una curva continua uniendo x con x_0 . Dados dos puntos cualesquiera $x, y \in A$ se tiene que $\alpha_x * \tilde{\alpha}_y$ es una curva continua que une x con y . \square

Corolario 0.9.1. Cualquier conjunto A de \mathbb{R}^n convexo es arcoconexo. Por ejemplo, las bolas abiertas o las bolas cerradas de \mathbb{R}^n .

Corolario 0.9.2. En \mathbb{R} coinciden los conjuntos conexos y arcoconexos (son solo los intervalos).

Teorema 0.10. La imagen mediante una aplicación continua de un arcoconexo es un arcoconexo. En particular, ser arcoconexo es una propiedad topológica, es decir, se conserva por homeomorfismos.

Demostración. Sea f el homeomorfismo y consideramos $x, y \in f(X)$, entonces existen $x_0, y_0 \in X$ tal que $f(x_0) = x$ y $f(y_0) = y$. Por ser X arcoconexo, entonces existe un arco $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ con $\alpha(0) = x_0$ y $\alpha(1) = y_0$. Entonces tenemos que $f \circ \alpha : [0, 1] \rightarrow f(X)$ es continua y $(f \circ \alpha)(0) = f(x_0) = x$ y $(f \circ \alpha)(1) = f(y_0) = y$ y tenemos demostrado el resultado que buscábamos. \square

Teorema 0.11. Sean X un e.t. y $\{A_i\}_{i \in I}$ una familia de arcoconexos de X . Si $\bigcap_{i \in I} A_i \neq \emptyset$, entonces $\bigcup_{i \in I} A_i$ es arcoconexo.

Observación. Hay resultados de conexión que no son ciertos para arcoconexión. Por ejemplo, si en un e.t. X se tiene que $A \subseteq X$ es arcoconexo podría ocurrir que si $A \subseteq B \subseteq \overline{A}$, se diera que B no sea arcoconexo (como en el ejemplo anterior).

Ejemplo. Veamos que $\mathbb{S}^n = \{x \in \mathbb{R}^{n+1} : |x| = 1\}$ es arcoconexo. Podemos hacerlo sabiendo que $\mathbb{S}^n \setminus \{N\}$, con $N = (0, \dots, 0, 1)$ es homeomorfo a \mathbb{R}^n que es arcoconexo por lo que $\mathbb{S}^n \setminus \{N\}$ es arcoconexo. Análogamente, $\mathbb{S}^n \setminus \{S\}$ con $S = (0, \dots, 0, -1)$ es arcoconexo y podemos escribir

$$\mathbb{S}^n = (\mathbb{S}^n \setminus \{N\}) \cup (\mathbb{S}^n \setminus \{S\})$$

por lo que \mathbb{S}^n es unión de arcoconexos con puntos en común, luego es arcoconexo.

Teorema 0.12. Sean X, Y e.t., entonces $X \times Y$ es arcoconexo (con la topología producto) si y solo si X e Y son arcoconexos.

Teorema 0.13. Dado un e.t. X , se tiene que X es arcoconexo si y solo si X es conexo y todo punto $x \in X$ tiene un entorno suyo arcoconexo.

Demostración.

\Rightarrow) Hemos visto que si X es arcoconexo, entonces X es conexo. Además, X es entorno de cualquier punto suyo luego todo punto tiene un entorno arcoconexo.

\Leftarrow) Elegimos un $x \in X$ fijo y definimos $A = \{y \in X : \exists \alpha_y \text{ arco uniendo } x \text{ con } y\}$

Como $x \in A$ tenemos que $A \neq \emptyset$. Si probamos que A es abierto y cerrado, entonces como X es conexo tendremos que $A = X$, es decir podremos unir x con cualquier otro punto $y \in X$.

Veamos que A es abierto. Tomamos $z \in A$ y queremos demostrar que $\exists U$ entorno de z tal que $U \subseteq A$. Por hipótesis sabemos que existe un entorno U arcoconexo de z . Entonces dado $u \in U$ existe un arco α_u que une z con u . Por otro lado, como $z \in A$, entonces existe un arco β_z que une x con z . Tendremos entonces que $\beta_z * \alpha_u$ es un arco que une x con u y por definición tendremos $u \in A$, luego $U \subseteq A$.

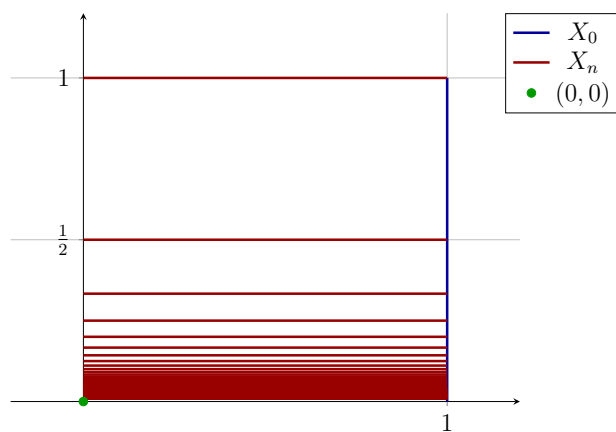
Nos queda ver que A es cerrado. Tomamos para ello $z \in \overline{A}$. Por hipótesis existe un entorno U de z arcoconexo. Por ser U entorno de z y $z \in \overline{A}$ necesariamente $U \cap A \neq \emptyset$ por lo que existe al menos un $u \in U \cap A$. Como $u \in A$ existe un arco α_u que une x con u y como $u \in U$ existe también un arco β_u que une u con z y tendríamos que $\alpha_u * \beta_u$ es un arco uniendo x con z llegando a que $z \in A$. Tendríamos $\overline{A} \subseteq A$ y como la otra inclusión se da siempre, tendremos que A coincide con su adherencia, por lo que es cerrado.

□

Definición 0.5. Dados un e.t. X y un punto $x_0 \in X$, llamamos **componente arcoconexa** de x_0 al mayor arcoconexo en X que contiene a x_0 .

Teorema 0.14. Las componentes arcoconexas de un e.t. X forman una partición de X en subconjuntos arcoconexos de X maximales.

Ejemplo. En el ejemplo que ya se trabajó se puede ver que el conjunto X que era



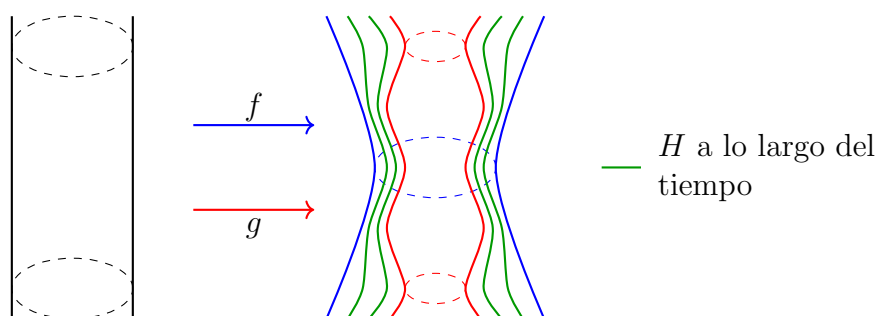
tiene dos componentes arcoconexas: $\{(0,0)\}$, $\bigcup_{u \in \mathbb{N} \cup \{0\}} X_n$

1. El grupo fundamental

1.1. Homotopía por arcos

Definición 1.1. Sean X e Y dos espacios topológicos y $f, g : X \rightarrow Y$ dos aplicaciones continuas. Decimos que f es **homotópica** a g si existe $H : X \times [0, 1] \rightarrow Y$ continua tal que

$$H(x, 0) = f(x) \quad \text{y} \quad H(x, 1) = g(x) \quad \forall x \in X$$



Definición 1.2. Dados X e.t., $x, y \in X$ y dos arcos $\alpha, \beta \in \Omega(X; x, y)$, decimos que α, β son **homotópicos por arcos** si existe $H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow X$ continua tal que

$$\begin{aligned} H(s, 0) &= \alpha(s) & \text{y} & & H(s, 1) &= \beta(s) & \forall s \in [0, 1] \\ H(0, t) &= x & \text{y} & & H(1, t) &= y & \forall t \in [0, 1] \end{aligned}$$

Lema 1.1. Ser homotópico por arcos da lugar a una relación de equivalencia en $\Omega(X; x, y)$.



Demostración.

- (i) Dado $\alpha \in \Omega(X; x, y)$ queremos ver que α es homotópica por arcos con α . Para ello tenemos

$$\begin{aligned} H(s, t) &= \alpha(s) & H(s, 0) &= \alpha(s) = H(s, 1) \\ H(0, t) &= \alpha(0) = x & H(1, t) &= \alpha(1) = y \end{aligned}$$

- (ii) Dados $\alpha, \beta \in \Omega(X; x, y)$ tales que existe $H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow X$ continua tal que

$$\begin{aligned} H(s, 0) &= \alpha(s) & \text{y} & & H(s, 1) &= \beta(s) & \forall s \in [0, 1] \\ H(0, t) &= x & \text{y} & & H(1, t) &= y & \forall t \in [0, 1] \end{aligned}$$

Queremos ver que existe un $\tilde{H} : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow X$ continua tal que

$$\begin{aligned} \tilde{H}(s, 0) &= \beta(s) & \text{y} & & \tilde{H}(s, 1) &= \alpha(s) & \forall s \in [0, 1] \\ \tilde{H}(0, t) &= x & \text{y} & & \tilde{H}(1, t) &= y & \forall t \in [0, 1] \end{aligned}$$

Tomando $\tilde{H}(s, t) := H(s, 1 - t)$ cumple claramente con lo que buscamos.

- (iii) Dado $\alpha, \beta, \gamma \in \Omega(X; x, y)$ y $H_1, H_2 : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow X$ continuas tales que

$$\begin{aligned} H_1(s, 0) &= \alpha(s) & H_2(s, 0) &= \beta(s) \\ H_1(s, 1) &= \beta(s) & H_2(s, 1) &= \gamma(s) \\ H_1(0, t) &= x & H_2(0, t) &= x \\ H_1(1, t) &= y & H_2(1, t) &= y \end{aligned}$$

Queremos ver que existe un $H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow X$ tal que

$$\begin{aligned} H(s, 0) &= \alpha(s) & H(s, 1) &= \gamma(s) \\ H(0, t) &= x & H(1, t) &= y \end{aligned}$$

Para ello consideramos

$$H(s, t) = \begin{cases} H_1(s, 2t) & \text{si } 0 \leq t \leq 1/2 \\ H_2(s, 2t - 1) & \text{si } 1/2 \leq t \leq 1 \end{cases}$$

Y con el lema de pegado es fácil ver que es continua y que satisface las condiciones que buscábamos ya que

$$\begin{aligned} H(s, 0) &= H_1(s, 0) = \alpha(s) \\ H(s, 1) &= H_2(s, 1) = \gamma(s) \\ H(0, t) &= \begin{cases} H_1(0, 2t) = x \\ H_2(0, 2t - 1) = x \end{cases} = x \\ H(1, t) &= \begin{cases} H_1(1, 2t) = y \\ H_2(1, 2t - 1) = y \end{cases} = y \end{aligned}$$

□

Ejemplo.

1. Sean X un e.t. y $f, g : X \rightarrow \mathbb{R}^n$ aplicaciones continuas, entonces vamos a ver que f y g son homotópicas.

Demostración. Vamos a definir la aplicación

$$H : X \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^n$$

$$(x, t) \mapsto (1 - t)f(x) + tg(x)$$

que es continua y además verifica

$$H(x, 0) = f(x) \qquad H(x, 1) = g(x)$$

por lo que tenemos lo que buscábamos. \square

En el caso particular de que $f = \alpha$ y $g = \beta$ fuesen arcos comenzando en un punto común y acabando en otro punto común, entonces la H anterior sería una homotopía por arcos.

2. Si $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$ es un arco y $h : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ es una aplicación continua con $h(0) = 0$ y $h(1) = 1$, entonces $\dot{\alpha}(s) = \alpha(h(s))$ es homotópica por arcos a $\alpha(s)$.

Demostración. Es claro que $\dot{\alpha}$ es continua y existe una homotopía por arcos entre α y $\dot{\alpha}$ que es la siguiente

$$H(s, t) = \alpha((1 - t)s + th(s))$$

que es claramente continua y que verifica que

$$\begin{aligned} H(s, 0) &= \alpha(s) & H(s, 1) &= \alpha(h(s)) = \dot{\alpha}(s) \\ H(0, t) &= \alpha(0) = \dot{\alpha}(1) & H(1, t) &= \alpha(1) = \dot{\alpha}(1) \end{aligned}$$

\square

Intuitivamente podemos entender esto como que no importa a qué velocidad se recorra una curva para ser homotópico por arcos.

Notación. Por convenio, a la clase de equivalencia de un arco α en $\Omega(X; x, y)$ la denotaremos por $[\alpha]$.

Lema 1.2. Dados dos arcos α_1, α_2 en $\Omega(X; x, y)$ y $\beta_1, \beta_2 \in \Omega(X; y, z)$. Se verifica que si $[\alpha_1] = [\alpha_2]$ y $[\beta_1] = [\beta_2]$, entonces $[\alpha_1 * \beta_1] = [\alpha_2 * \beta_2]$.

Demostración. Tenemos que

$$(\alpha_1 * \beta_1) = \begin{cases} \alpha_1(2s) & \text{si } 0 \leq s \leq 1/2 \\ \beta_1(2s - 1) & \text{si } 1/2 \leq s \leq 1 \end{cases}$$

$$(\alpha_2 * \beta_2) = \begin{cases} \alpha_2(2s) & \text{si } 0 \leq s \leq 1/2 \\ \beta_2(2s - 1) & \text{si } 1/2 \leq s \leq 1 \end{cases}$$

Además, sabemos que existen H_1, H_2 continuas tal que

$$\begin{aligned} H_1(s, 0) &= \alpha_1(s) & H_2(s, 0) &= \beta_1(s) \\ H_1(s, 1) &= \beta_1(s) & H_2(s, 1) &= \beta_2(s) \\ H_1(0, t) &= x & H_2(0, t) &= y \\ H_1(1, t) &= y & H_2(1, t) &= z \end{aligned}$$

Tomamos entonces $H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow X$ dada por

$$H(s, t) = \begin{cases} H_1(2s, t) & \text{si } s \in [0, 1/2], t \in [0, 1] \\ H_2(2s - 1, t) & \text{si } s \in [1/2, 1], t \in [0, 1] \end{cases}$$

es continua y tenemos que

$$H(s, 0) = \begin{cases} H_1(2s, 0) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ H_2(2s - 1, 0) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{cases} = \begin{cases} \alpha_1(2s) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ \beta_1(2s - 1) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{cases} = (\alpha_1 * \beta_1)(s)$$

Análogamente se tiene que $H(s, 1) = (\alpha_2 * \beta_2)(s)$ con $H(0, t) = x$ y $H(1, t) = z$.

□

Definición 1.3. A partir del lema anterior podemos definir

$$[\alpha] * [\beta] := [\alpha * \beta]$$

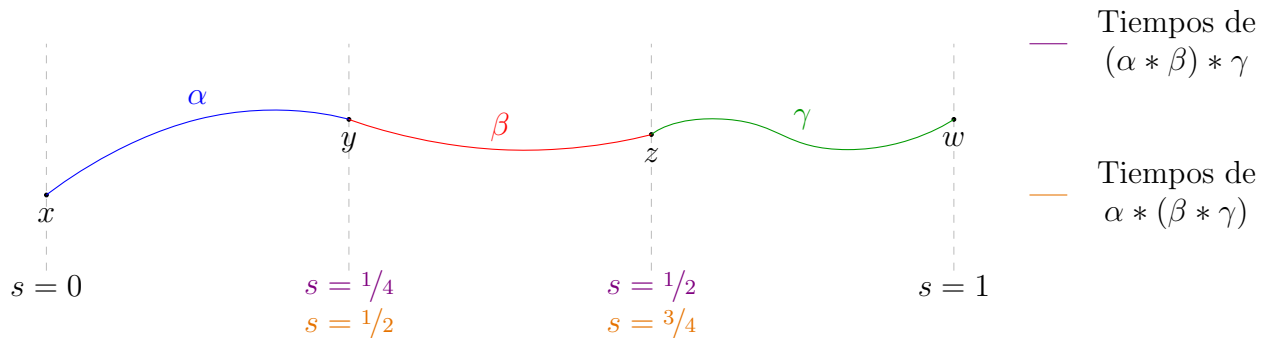
con $\alpha \in \Omega(X; x, y)$, $\beta \in \Omega(X; y, z)$

Teorema 1.3. Dado X e.t., $\alpha \in \Omega(X; x, y)$, $\beta \in \Omega(X; y, z)$ y $\gamma \in \Omega(X; z, w)$ se tiene que

- (i) $[\alpha] * ([\beta] * [\gamma]) = ([\alpha] * [\beta]) * [\gamma]$
- (ii) $[\alpha] * [\varepsilon_y] = [\alpha]$ y $[\varepsilon_x] * [\alpha] = [\alpha]$
- (iii) $[\alpha] * [\tilde{\alpha}] = [\varepsilon_x]$ y $[\tilde{\alpha}] * [\alpha] = [\varepsilon_y]$

Demostración.

- (i) Desarrollemos cada expresión



$$(\beta * \gamma)(s) = \begin{cases} \beta(2s) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ \gamma(2s - 1) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \alpha * (\beta * \gamma)(s) &= \begin{cases} \alpha(2s) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ (\beta * \gamma)(2s - 1) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{cases} = \\ &= \begin{cases} \alpha(2s) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ \beta(2(2s - 1)) & \text{si } s \in [1/2, 3/4] \\ \gamma(2(2s - 1) - 1) & \text{si } s \in [3/4, 1] \end{cases} = \begin{cases} \alpha(2s) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ \beta(4s - 2) & \text{si } s \in [1/2, 3/4] \\ \gamma(4s - 3) & \text{si } s \in [3/4, 1] \end{cases} \end{aligned}$$

$$(\alpha * \beta)(s) = \begin{cases} \alpha(2s) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ \beta(2s - 1) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{cases}$$

$$\begin{aligned} (\alpha * \beta) * \gamma(s) &= \begin{cases} (\alpha * \beta)(2s) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ \gamma(2s - 1) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{cases} = \\ &= \begin{cases} \alpha(2(2s)) & \text{si } s \in [0, 1/4] \\ \beta(2(2s) - 1) & \text{si } s \in [1/4, 1/2] \\ \gamma(2s - 1) & \text{si } s \in [3/4, 1] \end{cases} = \begin{cases} \alpha(4s) & \text{si } s \in [0, 1/4] \\ \beta(4s - 1) & \text{si } s \in [1/4, 1/2] \\ \gamma(2s - 1) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{cases} \end{aligned}$$

Usando el ejemplo 2 anterior se tiene que $[\alpha] * ([\beta] * [\gamma]) = ([\alpha] * [\beta]) * [\gamma]$ (realmente se están recorriendo las mismas curvas pero a distinta velocidad).

- (ii) Tendremos que ver que $\alpha * \varepsilon_y$ se relaciona por una homotopía con arcos con α . Recordemos que

$$(\alpha * \varepsilon_y) = \begin{cases} \alpha(2s) & \text{si } 0 \leq s \leq 1/2 \\ \varepsilon_y(2s - 1) & \text{si } 1/2 \leq s \leq 1 \end{cases} = \begin{cases} \alpha(2s) & \text{si } 0 \leq s \leq 1/2 \\ y & \text{si } 1/2 \leq s \leq 1 \end{cases}$$

De nuevo del ejemplo 2 se tiene que son homotópicas

- (iii) Tendremos que ver en este caso que $\alpha * \tilde{\alpha}$ es homotópico por arcos a ε_x . Describamos ambas curvas.

$$(\alpha * \tilde{\alpha}) = \begin{cases} \alpha(2s) & \text{si } 0 \leq s \leq 1/2 \\ \tilde{\alpha}(2s - 1) & \text{si } 1/2 \leq s \leq 1 \end{cases} = \begin{cases} \alpha(2s) & \text{si } 0 \leq s \leq 1/2 \\ \tilde{\alpha}(2 - 2s) & \text{si } 1/2 \leq s \leq 1 \end{cases}$$

$$\varepsilon_x(s) = x \quad \forall s \in [0, 1]$$

Pensamos ahora una transformación H que haga que cada vez la curva se vaya quedando más cerca de x (cada vez vuelve antes de llegar a y). Intuitivamente podríamos pensar en la siguiente gráfica, en la que vamos reduciendo la distancia desde la función roja hasta la verde



$$h(s) = \begin{cases} 2s & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ 2 - 2s & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{cases}$$

Y podemos construir $H(s, t) = \alpha((1 - t)h(s))$ que claramente es continua y verifica

$$\begin{aligned} H(s, 0) = \alpha(h(s)) = (\alpha * \tilde{\alpha}(s)) & \quad y \quad H(s, 1) = \alpha(0) = x = \varepsilon_x(s) & \quad \forall s \in [0, 1] \\ H(0, t) = \alpha(0) = x & \quad y \quad H(1, t) = \alpha(0) = x & \quad \forall t \in [0, 1] \end{aligned}$$

□

1.2. El grupo fundamental

Corolario 1.3.1. Dados un e.t. X y un punto $x_0 \in X$ se tiene que el conjunto de lazos en X basados en x_0 bajo la relación de equivalencia de ser homotópicos por arcos y con operación $*$ forman un grupo algebraico.

Demostración. Definimos el siguiente conjunto

$$G = \frac{\Omega(X; x_0)}{R}$$

donde R es la relación de equivalencia “ser homotópico por arcos”. Veamos ahora que G tiene estructura de grupo:

1. **Propiedad asociativa.** Tendremos que ver que se verifica para cualesquiera $[\alpha], [\beta], [\gamma] \in G$.

$$[\alpha] * ([\beta] * [\gamma]) = ([\alpha] * [\beta]) * [\gamma]$$

pero esto lo tenemos claramente del teorema anterior

2. **Existencia del elemento neutro.** Por el teorema anterior tenemos que para $x = y = x_0$ se tiene que $[\alpha] * [\varepsilon_{x_0}] = [\alpha] = [\varepsilon_{x_0}] * [\alpha]$ para cualquier $[\alpha] \in G$ luego tenemos la existencia probada.

3. **Existencia del elemento opuesto.** De nuevo usamos el teorema anterior y nos dice que para cualquier $[\alpha] \in G$ se tiene que

$$[\alpha] * [\tilde{\alpha}] = [\varepsilon_{x_0}] = [\tilde{\alpha}] * [\alpha]$$

y se tiene directamente.

Con esto hemos probado finalmente que G es un grupo. \square

Definición 1.4. Al grupo algebraico dado por el corolario anterior lo llamaremos el **grupo fundamental** de X en x_0 y lo denotaremos por $\pi_1(X, x_0)$.

Ejemplo. Consideramos $\mathbb{R}^2 \setminus \{0, 0\}$ y un punto cualquiera x_0 .



En este espacio tenemos que $[\varepsilon_{x_0}] \neq [\alpha] \neq [\tilde{\alpha}] \neq [\beta]$. Intuitivamente podríamos intentar identificar este espacio con \mathbb{Z} de la siguiente forma:

- La clase $[\varepsilon_{x_0}]$ la podemos interpretar como el 0 de \mathbb{Z} .
- Identificaremos los números positivos como el número de vueltas que da cada curva al punto $(0, 0)$ en sentido positivo (el que elijamos como positivo). Por ejemplo $[\alpha]$ sería $1 \in \mathbb{Z}$, $[\beta]$ sería $2 \in \mathbb{Z}$ y podríamos seguir así con todos los números enteros.
- Para los números negativos tomaremos los opuestos de los anteriores, es decir, las curvas recorridas en sentido contrario. Por ejemplo $[\tilde{\alpha}]$ será el $-1 \in \mathbb{Z}$, $[\tilde{\beta}]$ será el -2 y así sucesivamente.

Más adelante probaremos que $\pi_1(X, x_0)$ es isomorfo a \mathbb{Z} de una forma más rigurosa.

Ejemplo. Sea $X \subseteq \mathbb{R}^n$ un subconjunto estrellado desde un punto x_0 . Entonces $\pi_1(X; x_0) = \{[\varepsilon_{x_0}]\}$, es decir, es trivial.

Demostración. Dado $\alpha(s)$ un lazo basado en x_0 dentro de X , entonces

$$H(s, t) = (1 - t)\alpha(s) + tx_0$$

es una aplicación continua dentro¹ de X tal que

$$\begin{aligned} H(s, 0) = \alpha(s) &= y & H(s, 1) = x_0 = \varepsilon_{x_0}(s) & \quad \forall s \in [0, 1] \\ H(0, t) = x_0 & \quad y & H(1, t) = x_0 & \quad \forall t \in [0, 1] \end{aligned}$$

\square

¹aquí es donde usamos que es estrellado

En particular, las bolas abiertas, las bolas cerradas y los convexos en general como \mathbb{R}^n tienen grupo fundamental trivial.

Teorema 1.4. Sean x, y dos puntos de un e.t. X . Si X es arcoconexo, entonces $\pi_1(X, x)$ y $\pi_1(X, y)$ son iguales salvo isomorfismo.

Demostración. Como X es arcoconexo podemos considerar α un arco uniendo x con y y la aplicación

$$\begin{aligned} F_\alpha : \pi_1(X, y) &\rightarrow \pi_1(X, x) \\ [\gamma] &\mapsto [\alpha] * [\gamma] * [\tilde{\alpha}] \end{aligned}$$

que está bien definida por lo visto anteriormente sobre el operador $*$. Queremos ver ahora que F_α es un isomorfismo de grupos. Para ello comencemos por ver que F_α es un homomorfismo, es decir, que se verifica

$$F_\alpha([\gamma_1] * [\gamma_2]) = F_\alpha[\gamma_1] * F_\alpha([\gamma_2])$$

Desarrollamos el segundo término de la expresión:

$$\begin{aligned} F_\alpha[\gamma_1] * F_\alpha([\gamma_2]) &= ([\alpha] * [\gamma_1] * [\tilde{\alpha}]) * ([\alpha] * [\gamma_2] * [\tilde{\alpha}]) = [\alpha] * [\gamma_1] * [\gamma_2] * [\tilde{\alpha}] = \\ &= F_\alpha([\gamma_1] * [\gamma_2]) \end{aligned}$$

y tenemos la igualdad buscada. Veamos ahora que tiene inversa considerando $F_{\tilde{\alpha}}$ que por definición es $F_{\tilde{\alpha}}([\beta]) = [\tilde{\alpha}] * [\beta] * [\alpha]$ y que además verifica

$$\begin{aligned} (F_{\tilde{\alpha}} \circ F_\alpha)([\gamma]) &= F_{\tilde{\alpha}}([\alpha] * [\gamma] * [\tilde{\alpha}]) = [\tilde{\alpha}] * ([\alpha] * [\gamma] * [\tilde{\alpha}]) * [\alpha] = [\gamma] = Id_{\pi_1(X, y)}([\gamma]) \\ (F_\alpha \circ F_{\tilde{\alpha}})([\gamma]) &= F_\alpha([\tilde{\alpha}] * [\gamma] * [\alpha]) = [\alpha] * ([\tilde{\alpha}] * [\gamma] * [\alpha]) * [\tilde{\alpha}] = [\gamma] = Id_{\pi_1(X, x)}([\gamma]) \end{aligned}$$

por lo que es su inversa. Hemos encontrado por tanto un homomorfismo biyectivo, luego $\pi_1(X, x) \cong \pi_1(X, y)$ \square

Definición 1.5. Decimos que un e.t. es **simplemente conexo** si es arcoconexo y su grupo fundamental es el trivial en un punto (y, por tanto, en cualquier punto).

Ejemplo. Si $A \subset \mathbb{R}^n$ es estrellado desde un punto x_0 , entonces A es simplemente conexo.

Lema 1.5. Sea $f : X \rightarrow Y$ una aplicación continua entre espacios topológicos y $x \in X$. Entonces la aplicación

$$\begin{aligned} (f_x)_* : \pi_1(X, x) &\rightarrow \pi_1(Y, f(x)) \\ [\alpha] &\mapsto [f \circ \alpha] \end{aligned}$$

está bien definida y es un homomorfismo de grupos².

Demostración. Para ver que $(f_x)_*$ está bien definida tomamos α_1, α_2 lazos basados en x tales que $[\alpha_1] = [\alpha_2]$. Queremos comprobar que $[f \circ \alpha_1] = [f \circ \alpha_2]$. Para ello, sabemos que si $[\alpha_1] = [\alpha_2]$, entonces existe $H : [0, 1] \rightarrow X$ continua y tal que

$$H(s, 0) = \alpha_1(s) \quad , \quad H(s, 1) = \alpha_2(s) \quad , \quad H(0, t) = x = H(1, t)$$

²Cuando no haya confusión posible escribiremos solamente f_* en lugar de $(f_x)_*$

Entonces podemos considerar la aplicación

$$f \circ H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow Y$$

que es continua y verifica

$$\begin{aligned}(f \circ H)(s, 0) &= (f \circ \alpha_1)(s) \\ (f \circ H)(s, 1) &= (f \circ \alpha_2)(s) \\ (f \circ H)(0, t) &= f(x) = (f \circ H)(1, t)\end{aligned}$$

por lo que $[f \circ \alpha_1] = [f \circ \alpha_2]$. Veamos ahora que $(f_x)_*$ es un homomorfismo de grupos, es decir que se verifica

$$(f_x)_*([\alpha] * [\beta]) = (f_x)_*([\alpha]) * (f_x)_*([\beta])$$

Por definición sabemos que

$$\begin{aligned}(f_x)_*([\alpha] * [\beta]) &= (f_x)_*([\alpha * \beta]) = [f \circ (\alpha * \beta)] = \left[\begin{cases} f(\alpha(2s)) & \text{si } 0 \leq s \leq 1/2 \\ f(\beta(2s - 1)) & \text{si } 1/2 \leq s \leq 1 \end{cases} \right] = \\ &= [(f * \alpha) * (f * \beta)] = (f_x)_*([\alpha]) * (f_x)_*([\beta])\end{aligned}$$

□

Definición 1.6. A la aplicación f_* dada por el lema la llamaremos **homomorfismo inducido** por f .

Propiedades. Algunas propiedades básicas de f_* son

1. Si tenemos dos aplicaciones continuas $f : X \rightarrow Y$ y $g : Y \rightarrow Z$, entonces se tiene que

$$(g \circ f)_* = g_* \circ f_*$$

2. Se verifica que la aplicación dada por

$$\begin{aligned}Id_* : \pi_1(X, x_0) &\rightarrow \pi_1(X, x_0) \\ [\alpha] &\mapsto [\alpha]\end{aligned}$$

es la identidad en grupos fundamentales.

Corolario 1.5.1. Si $h : X \rightarrow Y$ es un homeomorfismo, entonces la aplicación dada por

$$(h_x)_* : \pi_1(X, x) \rightarrow \pi_1(Y, h(x))$$

es un isomorfismo de grupos, es decir, el grupo fundamental se conserva³ por homeomorfismos.

³salvo isomorfismo

Definición 1.7. Si $(G_1, *_1)$ y $(G_2, *_2)$ son dos grupos algebraicos, consideramos sobre $G_1 \times G_2$ el producto $*$ dado por

$$(a_1, b_1) * (a_2, b_2) := (a_1 *_1 a_2, b_1 *_2 b_2)$$

para $a_1, a_2 \in G_1, b_1, b_2 \in G_2$

Teorema 1.6. Sean X, Y dos e.t., $x \in X, y \in Y$. Entonces, con la topología producto en $X \times Y$ se tiene que

$$\pi_1(X \times Y, (x, y)) \cong \pi_1(X, x) \times \pi_1(Y, y)$$

Demostración. Veamos que

$$\begin{aligned} \phi : \pi_1(X \times Y, (x, y)) &\longrightarrow \pi_1(X, x) \times \pi_1(Y, y) \\ [\alpha] &\longmapsto ([p_1 \circ \alpha], [p_2 \circ \alpha]) \end{aligned}$$

donde p_1 y p_2 son las proyecciones a X y a Y respectivamente está bien definida. Esto es fácil de ver ya que

$$([p_1 \circ \alpha], [p_2 \circ \alpha]) = ((p_1)_*([\alpha]), (p_2)_*([\alpha]))$$

y además es un homomorfismo. Consideramos además la siguiente aplicación

$$\begin{aligned} \psi : \pi_1(X, x) \times \pi_1(Y, y) &\longrightarrow \pi_1(X \times Y, (x, y)) \\ ([\beta], [\gamma]) &\longmapsto [(\beta, \gamma)] \end{aligned}$$

y es fácil ver que está bien definida y es un homomorfismo tal que

$$\begin{aligned} \psi \circ \phi &= Id_{\pi_1(X \times Y, (x, y))} \\ \phi \circ \psi &= Id_{\pi_1(X, x) \times \pi_1(Y, y)} \end{aligned}$$

□

1.3. Espacios recubridores

Definición 1.8. Sea $p : R \rightarrow B$ una aplicación continua y sobreyectiva entre dos espacios topológicos. Dado un punto $b \in B$ decimos que un abierto O que contiene a b está **regularmente recubierto** si se verifican las siguientes propiedades

1. $p^{-1}(O)$ es una unión disjunta de abiertos $A_i \subseteq R, i \in I$.
2. Para cada $i \in I, p|_{A_i} : A_i \rightarrow O$ es un homeomorfismo.

Ejemplo. En este caso, si consideramos la aplicación $p : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{S}^1$ descrita en la gráfica, que es claramente continua y sobreyectiva⁴ podemos ver que O , que contiene al $(1, 0)$ está regularmente recubierto

⁴de hecho es un homeomorfismo que estudiamos en Topología I



Definición 1.9. Decimos que una aplicación $p : R \rightarrow B$ entre dos espacios topológicos es una **aplicación recubridora** si p es continua, sobreyectiva y todo punto $b \in B$ está contenido en un abierto O_b regularmente recubierto.

Observación. Todo homeomorfismo es una aplicación recubridora⁵.

Teorema 1.7. La aplicación

$$\begin{aligned} p : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{S}^1 \\ x &\mapsto (\cos(2\pi x), \sin(2\pi x)) \end{aligned}$$

es una aplicación recubridora

Demostración. Es claro que es sobreyectiva y continua por las propiedades del seno y el coseno en \mathbb{R} . Tendremos que ver que

$$O = \mathbb{S}^1 \cap ((0, \infty) \times \mathbb{R}) = \mathbb{S}^1 \cap \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : x_1 > 0\}$$

está regularmente recubierto. Para ello consideramos

$$\begin{aligned} p^{-1}(O) &= \{x \in \mathbb{R} : \cos(2\pi x) > 0\} = \{x \in \mathbb{R} : 2\pi x \in \left(-\frac{\pi}{2} + 2k\pi, \frac{\pi}{2} + 2k\pi\right), k \in \mathbb{Z}\} = \\ &= \{x \in \mathbb{R} : x \in \left(k - \frac{1}{4}, k + \frac{1}{4}\right), k \in \mathbb{Z}\} = \bigcup_{k \in \mathbb{Z}} \left(k - \frac{1}{4}, k + \frac{1}{4}\right) \end{aligned}$$

Tomando $A_k = \left(k - \frac{1}{4}, k + \frac{1}{4}\right)$ falta ver que cada abierto A_{k_0} cumple que $p : A_{k_0} \rightarrow O$ es un homeomorfismo.

Por las propiedades de $(\cos(2\pi x), \sin(2\pi x))$ es claro que p es inyectiva y sobreyectiva en A_{k_0} . Para ello podemos considerar

$$p' : \left[k - \frac{1}{4}, k + \frac{1}{4}\right] \rightarrow \overline{O}$$

⁵Podemos verlo fácilmente tomando $O_b = X$ el total.

que es continua y va desde un compacto en un conjunto T2, lo que nos dice que $p|_{\left[k-\frac{1}{4}, k+\frac{1}{4}\right]}$ es cerrada por lo que

$$p' : \left[k - \frac{1}{4}, k + \frac{1}{4}\right] \rightarrow \overline{O}$$

es un homeomorfismo y por tanto

$$p' : \left(k - \frac{1}{4}, k + \frac{1}{4}\right) \rightarrow \overline{O}$$

también lo es y como por la definición de A_k tenemos lo que buscábamos.

Si repetimos este razonamiento de forma análoga para los siguientes conjuntos:

$$\mathbb{S}^1 \cap \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : x_1 < 0\}$$

$$\mathbb{S}^1 \cap \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : x_2 > 0\}$$

$$\mathbb{S}^1 \cap \{(x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : x_2 < 0\}$$

tendremos la demostración completa. □

Ejemplo. La aplicación

$$\begin{aligned} p : \mathbb{S}^1 &\rightarrow \mathbb{S}^1 \\ (x, y) &\mapsto (x^2 - y^2, 2xy) \end{aligned}$$

que podemos entender como la aplicación que lleva

$$\begin{aligned} (x + iy) &\mapsto (x + iy)^2 \\ (\cos \theta, \sin \theta) &\mapsto (\cos 2\theta, \sin 2\theta) \end{aligned}$$

es recubridora. Intuitivamente la podemos ver como



Esta aplicación se podría generalizar como

$$\begin{aligned} p_n : \mathbb{S}^1 &\rightarrow \mathbb{S}^1 \\ (\cos \theta, \sin \theta) &\mapsto (\cos n\theta, \sin n\theta) \\ (x + iy) &\mapsto (x + iy)^n \end{aligned}$$

con $n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$.

Propiedades.

1. Sean $f : X \rightarrow Y$, $g : Y \rightarrow Z$ dos aplicaciones tales que una de ellas es un homeomorfismo y la otra una aplicación recubridora. Entonces $g \circ f : X \rightarrow Z$ es una aplicación recubridora.
2. Sea $p : R \rightarrow B$ una aplicación recubridora y B_0 un subconjunto de B , entonces

$$p|_{p^{-1}(B_0)} : p^{-1}(B_0) \rightarrow B_0$$

es una aplicación recubridora.

3. Si $p_1 : R_1 \rightarrow B_1$ y $p_2 : R_2 \rightarrow B_2$ son dos aplicaciones recubridoras, entonces

$$\begin{aligned} p_1 \times p_2 &\rightarrow B_1 \times B_2 \\ (x, y) &\mapsto (p_1(x), p_2(y)) \end{aligned}$$

es una aplicación recubridora cuando consideramos la topología producto en $R_1 \times R_2$ y $B_1 \times B_2$.

Ejemplo.

1. \mathbb{R}^2 es un recubridor del cilindro $\mathbb{S}^1 \times \mathbb{R}$. Para ello podemos considerar la aplicación

$$\begin{aligned} p_1 : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{S}^1 \\ x &\mapsto (\cos(2\pi x), \sin(2\pi x)) \end{aligned}$$

y $p_2 = Id_{\mathbb{R}}$ y como p_1 es un recubrimiento y p_2 es un homeomorfismo tendremos que la aplicación

$$\begin{aligned} p_1 \times p_2 : \mathbb{R}^2 &\rightarrow \mathbb{S}^1 \times \mathbb{R} \\ (x, y) &\mapsto (\cos(2\pi x), \sin(2\pi x), y) \end{aligned}$$

es una aplicación recubridora. Intuitivamente podemos entenderlo de forma gráfica como



2. \mathbb{R}^2 es un recubridor del toro $\mathbb{S}^1 \times \mathbb{S}^1$ de \mathbb{R}^4 (o el toro de rotación de \mathbb{R}^3 porque ambos toros son homeomorfos). Para ello consideramos

$$\begin{aligned} p : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{S}^1 \\ x &\mapsto (\cos(2\pi x), \sin(2\pi x)) \end{aligned}$$

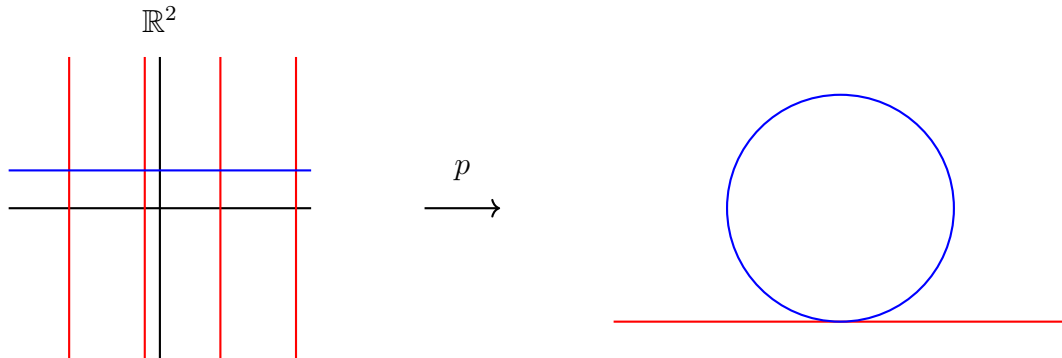
y su producto

$$\begin{aligned} p \times p : \mathbb{R} \times \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{S}^1 \times \mathbb{S}^1 \\ x &\mapsto (\cos(2\pi x), \sin(2\pi x), \cos(2\pi x), \sin(2\pi x)) \end{aligned}$$

que sería la aplicación recubridora. Intuitivamente podemos entenderlo de forma gráfica como

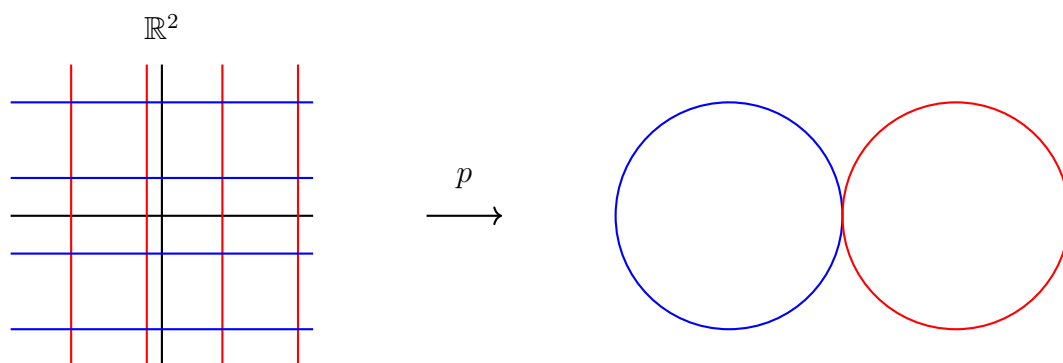


3. Intuitivamente podemos pensar en un recubrimiento de una circunferencia tangente a una recta como una colección de rectas paralelas y atravesadas por una común, como aparece en la figura. De esta forma (tal cual está en el dibujo) al “enrollar” el eje x de forma que hagamos coincidir todas las rectas rojas tendremos que la recta azul forma una circunferencia, que como originalmente solo tocaba en un punto a cada recta, resultará en la circunferencia tangente a la recta.



4. Por último podemos plantearnos cómo podría ser un recubrimiento de dos circunferencias tangentes. Para ello, tal como aparece en la figura podremos usar una **cuadrícula**. De forma análoga al ejemplo anterior podremos “enrollar” en

primer lugar el eje x y obtendremos una única recta roja tangente a infinitas circunferencias azules (como en el ejemplo anterior pero con las circunferencias azules periódicas). Ahora podremos “enrollar” la propia recta roja, haciendo coincidir todas las circunferencias azules de forma que obtendremos las dos circunferencias tangentes.



1.4. Levantamientos en espacios recubridores

Definición 1.10. Sean $p : R \rightarrow B$ una aplicación recubridora y $f : X \rightarrow B$ una aplicación continua. Decimos que $\hat{f} : X \rightarrow R$ es un **levantamiento** de f si se cumple que \hat{f} es continua y $p \circ \hat{f} = f$.

Ejemplo. Consideramos la aplicación recubridora

$$\begin{aligned} p : \mathbb{R} &\rightarrow \mathbb{S}^1 \\ x &\mapsto (\cos(2\pi x), \sin(2\pi x)) \end{aligned}$$

y tomamos

$$\begin{aligned} \alpha : [0, 1] &\rightarrow \mathbb{S}^1 \\ s &\mapsto (\cos(2\pi s), \sin(2\pi s)) \end{aligned}$$

Si elegimos

$$\begin{aligned} \hat{\alpha} : [0, 1] &\rightarrow \mathbb{R} \\ s &\mapsto s \end{aligned}$$

es claro que $p \circ \hat{\alpha} = \alpha$. Otros posibles levantamientos de α son

$$\begin{aligned} \hat{\alpha}_k : [0, 1] &\rightarrow \mathbb{R} \quad , k \in \mathbb{Z} \\ s &\mapsto k + s \end{aligned}$$

Nos planteamos ahora cuál sería un levantamiento de $\tilde{\alpha}(s) = \alpha(1 - s)$. Podemos ver que $\tilde{\hat{\alpha}}_k(s) = k - s$ para $k \in \mathbb{Z}$ es en efecto un levantamiento de $\tilde{\alpha}(s)$.



Lema 1.8. Sean $p : R \rightarrow B$ una aplicación recubridora, $r_0 \in R$ y $b_0 \in B$ tales que $p(r_0) = b_0$. Entonces dado un arco $\alpha : [0, 1] \rightarrow B$ con $\alpha(0) = b_0$, existe un único arco $\hat{\alpha} : [0, 1] \rightarrow R$ tal que $\hat{\alpha}(0) = r_0$ y $\hat{\alpha}$ es un levantamiento de α .

Demostración. Como p es una aplicación recubridora, cada punto $b \in B$ tiene asociado un abierto O_b regularmente recubierto que contiene a b . Como $\alpha([0, 1])$ es compacto tenemos que existe un recubrimiento finito, es decir,

$$\alpha([0, 1]) \subseteq O_{b_1} \cup O_{b_2} \cup \dots \cup O_{b_n}$$

Entonces $[0, 1] \subseteq \alpha^{-1}(O_{b_1}) \cup \alpha^{-1}(O_{b_2}) \cup \dots \cup \alpha^{-1}(O_{b_n})$ por lo que tendremos el intervalo $[0, 1]$ recubierto por una familia finita de abiertos. Por el lema del número de Lebesgue⁶ sabemos que existe un $\delta > 0$ tal que para cada $x \in [0, 1]$ se tiene que $B(x, \delta) \cap [0, 1]$ está contenido en algún $p^{-1}(O_{b_j})$ para cierto $j \in \{1, \dots, k\}$. Esto nos asegura que podemos hacer una subdivisión del intervalo $[0, 1]$ tal que

$$0 = t_0 < t_1 < \dots < t_{r-1} < t_r = 1$$

tal que $\alpha([t_j, t_{j+1}])$ está contenido en algún O_{b_l} para $j \in \{0, \dots, r-1\}$, $l \in \{1, \dots, k\}$. Definimos $\hat{\alpha}$ de manera recursiva:

$\alpha([t_0, t_1])$ está contenido en algún O_{b_l} . Como O_{b_l} está regularmente recubierto

$$p^{-1}(O_{b_l}) = \bigcup_{i \in I} A_i \quad \text{unión disjunta de abiertos}$$

$$p|_{A_i} : A_i \rightarrow O_{b_l} \text{ es homeomorfismo}$$

Como $r_0 \in p^{-1}(b_0) = p^{-1}(\alpha(0)) \subseteq p^{-1}(O_{b_l}) = \bigcup_{i \in I} A_i$ se tiene que $r_0 \in A_{i_0}$ para algún A_{i_0} con $i_0 \in I$. Como además $p|_{A_{i_0}} : A_{i_0} \rightarrow O_{b_l}$ es un homeomorfismo, podemos definir

$$\hat{\alpha}(t) = (p|_{A_{i_0}})^{-1}(\alpha(t)), \quad t \in [0 = t_0, t_1]$$

Es claro que $\hat{\alpha}$ en $[0, t_1]$ es continua y $p \circ \hat{\alpha} = \alpha$.

⁶visto probablemente en alguna asignatura de Análisis.

Para definir $\hat{\alpha}$ en $[t_1, t_2]$ repetimos el mismo procedimiento. Sabemos que $\alpha([t_1, t_2])$ cae en un abierto O_{b_m} que está regularmente recubierto.

$$p^{-1}(O_{b_m}) = \bigcup_{i \in I'} A'_i \quad \text{con } A'_i \text{ abiertos disjuntos}$$

$$p|_{A'_i} : A'_i \rightarrow O_{b_m} \text{ homeomorfismo}$$

Además tenemos que $\alpha(t_1) \in O_{b_m}$. Como $p(\hat{\alpha}(t_1)) = \alpha(t_1) \in O_{b_m}$, entonces $\hat{\alpha}(t_1) \in p^{-1}(O_{b_m})$ y por tanto $\exists i'_0$ tal que $\hat{\alpha}(t_1) \in A'_{i'_0}$. Como $p|_{A'_{i'_0}} : A'_{i'_0} \rightarrow O_{b_m}$ es un homeomorfismo, podemos definir $\hat{\alpha}$ en $[t_1, t_2]$ como

$$\hat{\alpha}(t) = (p|_{A'_{i'_0}})^{-1}(\alpha(t))$$

que es claramente continua y $(p \circ \hat{\alpha})(t) = \alpha(t)$ para $t \in [t_1, t_2]$. Por el lema de pegado tenemos que $\hat{\alpha}$ es continua en $[t_0, t_2]$. Siguiendo este procedimiento con cada t_i , $i \in \{0, \dots, r-1\}$ tendremos el resultado que buscábamos probar.

Veamos ahora por qué $\hat{\alpha}$ es única con $\hat{\alpha}(0) = r_0$. Si existiese otro arco $\alpha^* : [0, 1] \rightarrow R$ tal que $p \circ \hat{\alpha} = p \circ \alpha^*$ con $\hat{\alpha}(0) = r_0 = \alpha^*(0)$, entonces

$$\alpha([0, t_0]) \subset O_{b_l}$$

por lo que

$$\alpha^*([0, t_1]) \subseteq p^{-1}(O_{b_l}) = \bigcup_{i \in I} A_i$$

$$\hat{\alpha}([0, t_1]) \subseteq p^{-1}(O_{b_l}) = \bigcup_{i \in I} A_i$$

Por continuidad, $\alpha^*([0, t_1]) \subseteq A_{i_1}$ y $\hat{\alpha}([0, t_1]) \subseteq A_{i_0}$ pero $\alpha^*(0) = r_0 = \hat{\alpha}(0) \in A_{i_0}$ y como los A_i son disjuntos tenemos que $A_{i_1} = A_{i_0}$. Además, $p|_{A_{i_0}}$ es homeomorfismo de A_{i_0} en O_{b_l} por lo que

$$\alpha^*(t) = \hat{\alpha}(t), \quad t \in [0, 1]$$

De forma recursiva se verifica la unicidad en todos los intervalos $[t_j, t_{j+1}]$ con $j \in \{0, \dots, r-1\}$. \square

Observación. Es importante tener en cuenta que en general el levantamiento de un lazo no es un lazo, sino simplemente un arco.

Lema 1.9. Sean $p : R \rightarrow B$ una aplicación recubridora y $H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow B$ una aplicación continua. Dados $b_0 = H(0, 0)$ y $r_0 \in p^{-1}(b_0)$, entonces existe un único levantamiento $\hat{H} : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow R$ tal que $\hat{H}(0, 0) = r_0$. Si además H es una homotopía por arcos, entonces \hat{H} también lo será.

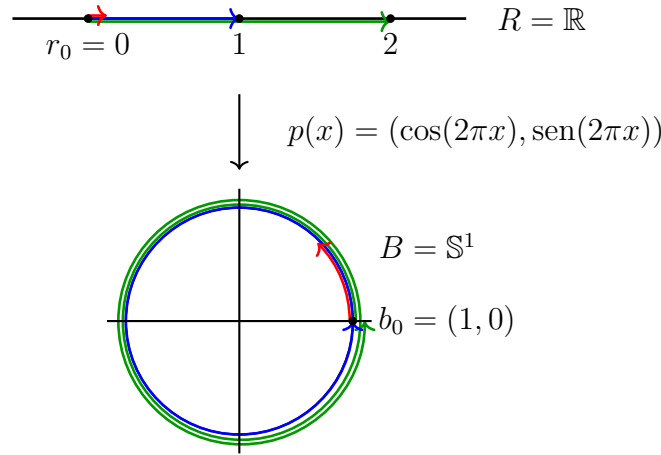
Corolario 1.9.1. Sea $p : R \rightarrow B$ una aplicación recubridora, $\alpha, \beta : [0, 1] \rightarrow B$ dos arcos con $[\alpha] = [\beta]$ y tomamos un $r_0 \in p^{-1}(\alpha(0))$ ($\alpha(0) = \beta(0)$). Si elegimos $\hat{\alpha}, \hat{\beta} : [0, 1] \rightarrow R$ como los únicos arcos con $\hat{\alpha}(0) = r_0 = \hat{\beta}(0)$, entonces $[\hat{\alpha}] = [\hat{\beta}]$.

Definición 1.11. Consideramos una aplicación recubridora $p : R \rightarrow B$, un punto $b_0 \in B$ y otro $r_0 \in R$ tal que $p(r_0) = b_0$. Entonces podemos definir la siguiente aplicación

$$\begin{aligned} \phi : \pi_1(B, b_0) &\rightarrow p^{-1}(b_0) \\ [\alpha] &\mapsto \hat{\alpha}(1) \end{aligned}$$

donde $\hat{\alpha}$ es el único levantamiento de α con $\hat{\alpha}(0) = r_0$. A la aplicación ϕ la llamaremos **correspondencia del levantamiento**.

Ejemplo. Consideramos el caso de “enrollar” \mathbb{R} sobre una circunferencia. La aplicación ϕ cuenta el número de vueltas que da cada arco, como se puede ver en el siguiente dibujo.



Teorema 1.10. Sean $p : R \rightarrow B$ una aplicación recubridora, $b_0 \in B$, $r_0 \in R$ con $p(r_0) = b_0$. Si R es arcoconexo, entonces la correspondencia del levantamiento

$$\phi : \pi_1(B, b_0) \rightarrow p^{-1}(b_0)$$

es sobreyectiva. Además, si R es simplemente conexo, entonces ϕ es biyectiva.

Demostración. Si R es arcoconexo tenemos que probar que dado $r_1 \in p^{-1}(b_0) \subseteq R$ existe un lazo $\alpha : [0, 1] \rightarrow B$ de forma que $\phi([\alpha]) = r_1$, es decir, su único levantamiento $\hat{\alpha} : [0, 1] \rightarrow R$ cumple que $\hat{\alpha}(0) = r_0$ y $\hat{\alpha}(1) = r_1$.

Para ello tomo un arco cualquiera $\alpha^* : [0, 1] \rightarrow R$ tal que $\alpha^*(0) = r_0$ y $\alpha^*(1) = r_1$ que existe por ser R arcoconexo. Elijo ahora $\alpha = p \circ \alpha^*$ que es un arco en B tal que $\alpha(0) = p(\alpha^*(0)) = p(r_0) = b_0$ y $\alpha(1) = p(\alpha^*(1)) = p(r_1) = b_0$. Tenemos entonces que α es un lazo basado en b_0 y como $\alpha = p \circ \alpha^*$, entonces $\hat{\alpha} = \alpha^*$ es un levantamiento de α con $\hat{\alpha}(0) = \alpha^*(0) = r_0$ por lo que $\phi([\alpha]) = \hat{\alpha}(1) = \alpha^*(1) = r_1$.

Nos queda ver que si R es simplemente conexo, entonces ϕ es biyectiva. Como todo simplemente conexo es necesariamente arcoconexo sabemos de la primera parte del teorema que ϕ es sobreyectiva por lo que solo tenemos que probar la inyectividad. Eso es equivalente a considerar $[\alpha], [\beta] \in \pi_1(B, b_0)$ y ver si se verifica la implicación

$$\phi([\alpha]) = \phi([\beta]) \stackrel{?}{\Rightarrow} [\alpha] = [\beta]$$

Sabiendo que $\hat{\alpha}(1) = \phi([\alpha])$ y $\hat{\beta}(1) = \phi([\beta])$. Como $\hat{\alpha}(1) = \hat{\beta}(1)$ consideramos $\hat{\alpha} * \tilde{\hat{\beta}}$ que es un lazo basado en r_0 . Como R es simplemente conexo tenemos que

$$[\hat{\alpha}] * \left[\tilde{\hat{\beta}} \right] = \left[\hat{\alpha} * \tilde{\hat{\beta}} \right] = [\varepsilon_{r_0}]$$

por lo que se tiene

$$[\hat{\alpha}] = [\varepsilon_{r_0}] * [\hat{\beta}] = [\hat{\beta}]$$

Usando p_* tenemos que

$$\begin{aligned} p_*([\hat{\alpha}]) &= [p \circ \hat{\alpha}] = [\alpha] \\ p_*([\hat{\beta}]) &= [p \circ \hat{\beta}] = [\beta] \end{aligned}$$

y como $p_*([\hat{\alpha}]) = p_*([\hat{\beta}])$ llegamos a que $[\alpha] = [\beta]$ como queríamos demostrar. \square

1.5. Grupo fundamental de la circunferencia

Definición 1.12. Dado un lazo $\alpha : [0, 1] \rightarrow \mathbb{S}^1 \subseteq \mathbb{R}^2$ basado en $(1, 0)$, definimos el grado de α como el único número entero $\hat{\alpha}(1)$ dado por el levantamiento $\hat{\alpha}$ de α mediante la aplicación recubridora

$$p(x) = (\cos(2\pi x), \sin(2\pi x)) \quad , \text{ con } \hat{\alpha}(0) \neq 0$$

Notaremos al grado de α como $\deg(\alpha)$

Observación. Como el grado es simplemente la correspondencia del levantamiento para p y $r_0 = 0$, entonces si $[\alpha] = [\beta]$ se tiene que $\deg(\alpha) = \deg(\beta)$, es decir el grado está bien definido para clases de equivalencia.

Teorema 1.11. El grupo fundamental de \mathbb{S}^1 en el $(1, 0)$ es isomorfo al grupo aditivo $(\mathbb{Z}, +)$. De hecho, la aplicación

$$\begin{aligned} \deg : \pi_1(\mathbb{S}^1, (1, 0)) &\rightarrow \mathbb{Z} \\ [\alpha] &\mapsto \deg(\alpha) \end{aligned}$$

es un isomorfismo de grupos.

Demostración. Como \mathbb{R} es simplemente conexo, el teorema anterior nos dice que la aplicación \deg es biyectiva. Tendremos que probar que \deg es un homomorfismo, es decir que se verifica

$$\deg([\alpha] * [\beta]) = \deg([\alpha]) + \deg([\beta])$$

Para verlo tomamos $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$ levantamientos de α y β respectivamente con

$$\hat{\alpha}(0) = 0 = \hat{\beta}(0)$$

Recordemos que $[\alpha] * [\beta] = [\alpha * \beta]$. Vamos a considerar

$$\widehat{\alpha * \beta}(s) = \begin{cases} \hat{\alpha}(2s) & \text{si } 0 \leq s \leq 1/2 \\ \hat{\alpha}(1) + \hat{\beta}(2s - 1) & \text{si } 1/2 \leq s \leq 1 \end{cases}$$

y es claro que $\widehat{\alpha * \beta}$ es continua. Queremos ver que $p(\widehat{\alpha * \beta}) = \alpha * \beta$. Desarrollando tenemos

$$\begin{aligned} p(\widehat{\alpha * \beta})(s) &= \begin{cases} p(\hat{\alpha}(2s)) & \text{si } 0 \leq s \leq 1/2 \\ p(\hat{\alpha}(1) + \hat{\beta}(2s - 1)) & \text{si } 1/2 \leq s \leq 1 \end{cases} \\ &= \begin{cases} \alpha(2s) & \text{si } 0 \leq s \leq 1/2 \\ p(\hat{\beta}(2s - 1)) & \text{si } 1/2 \leq s \leq 1 \end{cases} = (\alpha * \beta) \end{aligned}$$

por lo que $\widehat{\alpha * \beta}$ es un levantamiento de $\alpha * \beta$ con $\widehat{\alpha * \beta}(0) = \hat{\alpha}(0)$ por lo que por definición tenemos que

$$\deg(\widehat{\alpha * \beta}) = \widehat{\alpha * \beta}(1) = \hat{\alpha}(1) + \hat{\beta}(1) = \deg(\alpha) + \deg(\beta)$$

□

Observación. Algunas consecuencias elementales son las siguientes

- El grupo fundamental de $\mathbb{S}^1 \times \mathbb{R}$ es \mathbb{Z} . De aquí se deduce que $\mathbb{R}^2 \setminus \{p_0\}$ no es homeomorfo a \mathbb{R}^2 ya que $\mathbb{R}^2 \setminus \{p_0\}$ es homeomorfo a $\mathbb{S}^1 \times \mathbb{R}$ que tiene por grupo fundamental \mathbb{Z} y \mathbb{R}^2 tiene por grupo elemental el trivial.
- $\mathbb{R}^3 \setminus R$ es homeomorfo a $(\mathbb{R}^2 \setminus \{(0,0)\}) \times \mathbb{R}$ donde R es una recta en \mathbb{R}^3 .
- El grupo fundamental del toro $\mathbb{S}^1 \times \mathbb{S}^1$ o el toro de rotación de \mathbb{R}^3 es $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$.

Proposición 1.12. No existe ninguna aplicación continua⁷ $f : \overline{\mathbb{D}} \rightarrow \mathbb{S}^1$ tal que $f(x) = x$ para todo $x \in \mathbb{S}^1$

Demostración. Tomamos $\alpha(s) = (\cos(2\pi s), \sin(2\pi s))$, lazo basado en $(1, 0)$. Su clase de equivalencia en el disco sería

$$[\alpha]_{\overline{\mathbb{D}}} = [\varepsilon_{(1,0)}]$$

ya que $\overline{\mathbb{D}}$ es simplemente conexo. Si existiese una f continua, entonces tendríamos que

$$f_* : \pi_1(\overline{\mathbb{D}}, (1,0)) \rightarrow \pi_1(\mathbb{S}^1, (1,0)) \text{ es homeomorfismo}$$

$$[\alpha]_{\overline{\mathbb{D}}} \mapsto f_*([\alpha]_{\overline{\mathbb{D}}}) \stackrel{def}{=} [f \circ \alpha]_{\mathbb{S}^1} = [\alpha]_{\mathbb{S}^1}$$

Pero $[\alpha]_{\overline{\mathbb{D}}} = [\varepsilon_{(1,0)}]_{\overline{\mathbb{D}}}$ por lo que

$$f_*([\alpha]_{\overline{\mathbb{D}}}) = f_*([\varepsilon_{(1,0)}]_{\overline{\mathbb{D}}}) = [\varepsilon_{(1,0)}]_{\mathbb{S}^1}$$

pero como $f_*([\alpha]_{\overline{\mathbb{D}}}) = [\alpha]_{\mathbb{S}^1}$ llegamos a contradicción ya que $\deg(\alpha) = 1$ y $\deg(\varepsilon_{(1,0)}) = 0$ □

⁷ $\overline{\mathbb{D}}$ denota el disco cerrado de \mathbb{R}^2 centrado en el $(0,0)$ y con radio 1

Teorema 1.13 (punto fijo de Brouwer). Si $f : \overline{\mathbb{D}} \rightarrow \overline{\mathbb{D}}$ es continua, entonces existe $x_0 \in \overline{\mathbb{D}}$ tal que $f(x_0) = x_0$.

Demostración. Supongamos que f no tiene ningún punto fijo, es decir, $f(x) \neq x$ para todo $x \in \overline{\mathbb{D}}$. Buscaremos ahora construir una aplicación a partir de esta hipótesis que deje a los puntos de la circunferencia \mathbb{S}^1 fijos para poder aplicar la proposición anterior.

Para cada x consideramos la semirrecta abierta

$$f(x) + \lambda_x(x - f(x)) \quad \forall \lambda_x > 0$$

y la intersección de dicha semirrecta con la circunferencia unidad. Como $f(x), x \in \overline{\mathbb{D}}$ y $f(x) \neq x$, lo recién definido es efectivamente una semirrecta y ha de cortar exactamente en un único punto a \mathbb{S}^1 .

$$1 = \langle f(x) + \lambda_x(x - f(x)), f(x) + \lambda_x(x - f(x)) \rangle = \\ \langle f(x) \rangle + 2\lambda_x \langle f(x), x - f(x) \rangle + \lambda_x^2 \langle x - f(x), x - f(x) \rangle$$

Por lo que podemos despejar λ_x y nos queda

$$\lambda_x = \frac{-2\langle f(x), x - f(x) \rangle + \sqrt{4\langle f(x), x - f(x) \rangle^2 - 4(\langle f(x), f(x) - 1 \rangle)\langle x - f(x), x - f(x) \rangle}}{2\langle x - f(x), x - f(x) \rangle}$$

Por lo que $g(x) = f(x) + \lambda_x(x - f(x))$ es continua y $|g(x)| = 1$. Por tanto tenemos que si $x \in \mathbb{S}^1$, entonces $g(x) = x$ lo que contradice la proposición anterior. \square

Observación. El teorema del punto fijo de Brouwer no solo es cierto para $\overline{\mathbb{D}}$ sino para cualquier espacio topológico X homeomorfo a $\overline{\mathbb{D}}$. Es decir, si $f : X \rightarrow X$ es continua con X homeomorfo a $\overline{\mathbb{D}}$, entonces existe al menos un punto $x_0 \in X$ tal que $f(x_0) = x_0$.

Demostración. Notemos por $h : \overline{\mathbb{D}} \rightarrow X$ al homeomorfismo y estaremos en la siguiente situación

$$\overline{\mathbb{D}} \xrightarrow{h} X \xrightarrow{f} X \xrightarrow{h^{-1}} \overline{\mathbb{D}}$$

Entonces tendríamos $h^{-1} \circ f \circ h : \overline{\mathbb{D}} \rightarrow \overline{\mathbb{D}}$ continua y por el teorema de Brouwer existe $y_0 \in \overline{\mathbb{D}}$ tal que $(h^{-1} \circ f \circ h)(y_0) = y_0$. \square

Corolario 1.13.1. Sea $V : \overline{\mathbb{D}} \rightarrow \mathbb{R}^2 \setminus \{(0,0)\}$ una aplicación continua. Entonces existen puntos $x, y \in \mathbb{S}^1$ de forma que $V(x) = \lambda x$, $V(y) = -\mu y$ con $\lambda, \mu > 0$.

Demostración. Consideramos la aplicación $f(x) = \frac{V(x)}{|V(x)|}$ que es continua (ya que $V(x) \neq 0$ para todo $x \in \overline{\mathbb{D}}$). Por el teorema de Brouwer tenemos que $\exists x_0 \in \overline{\mathbb{D}}$ tal que $f(x_0) = x_0$ por lo que $x_0 = \frac{V(x_0)}{|V(x_0)|}$ y entonces $V(x_0) = |V(x_0)|x_0 = \lambda x_0$ (tomando $\lambda = |V(x_0)|$). Si tomamos $g(x) = -\frac{V(x)}{|V(x)|}$ tendríamos análogamente que existe un y_0 tal que $y_0 = g(y_0) = \frac{V(y_0)}{|V(y_0)|} \in \mathbb{S}^1$ y $V(y_0) = -|V(y_0)|y_0 = -\mu y_0$ (tomando

$\mu = |V(y_0)|$). En general, para poder considerar cualquier ángulo θ tendremos que considerar

$$h(x) = \frac{V(x)}{e^{i\theta}|V(x)|}$$

□

Teorema 1.14 (Teorema fundamental del álgebra). Todo polinomio complejo de grado $n \geq 1$ tiene al menos una raíz compleja

Demostración. Vamos a considerar $p(z) = a_0 + a_1 z + \dots + a_{n-1} z^{n-1} + z^n$ con $n \geq 1$ y supongamos que $p(z) \neq 0 \quad \forall z \in \mathbb{C}$, es decir, que no tiene raíces en \mathbb{C} . Consideramos la siguiente aplicación

$$H(s, t) = \begin{cases} \frac{p\left(\frac{t}{1-t}e^{2\pi i s}\right) \cdot \left|p\left(\frac{t}{1-t}\right)\right|}{\left|p\left(\frac{t}{1-t}e^{2\pi i s}\right)\right| \cdot p\left(\frac{t}{1-t}\right)} & \text{si } (s, t) \in [0, 1] \times [0, 1[\\ e^{2\pi i s} & \text{si } (s, t) \in [0, 1] \times \{1\} \end{cases}$$

Esta aplicación lo que hace es considerar el plano complejo y su imagen mediante p . La aplicación p no pasa por el origen porque así lo hemos supuesto. Para $t = 0$ (tiempo inicial) tenemos que $H(s, 0) = (1, 0)_{\mathbb{R}^2} \equiv 1_{\mathbb{C}}$. Además para $s = 0$ tenemos $H(0, t) = (1, 0)_{\mathbb{R}^2} \equiv 1_{\mathbb{C}}$. Si la aplicación H fuera una homotopía, al principio (cuando t es bajo) no daría ninguna vuelta (en la imagen) y al final (cuando domina z^n) daría n vueltas por lo que no puede ser.

Comprobemos que H es continua. Para esto simplemente veamos que

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 1^-} \frac{p\left(\frac{t}{1-t}e^{2\pi i s_0}\right) \cdot \left|p\left(\frac{t}{1-t}\right)\right|}{\left|p\left(\frac{t}{1-t}e^{2\pi i s_0}\right)\right| \cdot p\left(\frac{t}{1-t}\right)} &= e^{2\pi i s_0} \\ \lim_{t \rightarrow 1^-} \frac{p\left(\frac{t}{1-t}e^{2\pi i s_0}\right) \cdot \left|p\left(\frac{t}{1-t}\right)\right|}{\left|p\left(\frac{t}{1-t}e^{2\pi i s_0}\right)\right| \cdot p\left(\frac{t}{1-t}\right)} &= \\ = \lim_{t \rightarrow 1^-} \frac{\left(\left(\frac{t}{1-t}\right)^n e^{2\pi i n s_0} + a_{n-1} \left(\frac{t}{1-t}\right)^{n-1} e^{2\pi i (n-1)s_0} + \dots\right) \cdot \left|\left(\frac{t}{1-t}\right)^n + a_{n-1} \left(\frac{t}{1-t}\right)^{n-1} + \dots\right|}{\left|\left(\frac{t}{1-t}\right)^n e^{2\pi i n s_0} + a_{n-1} \left(\frac{t}{1-t}\right)^{n-1} e^{2\pi i (n-1)s_0} + \dots\right| \cdot \left(\left(\frac{t}{1-t}\right)^n + a_{n-1} \left(\frac{t}{1-t}\right)^{n-1} + \dots\right)} &= \\ = \frac{e^{2\pi i n s_0}}{|e^{2\pi i n s_0}|} \cdot \frac{|1|}{1} &= e^{2\pi i s_0} \end{aligned}$$

y tenemos claramente que $H : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{S}^1$ es continua. Además se tiene

$$\begin{aligned} H(0, t) &= 1 & t \in [0, 1] \\ H(1, t) &= 1 & t \in [0, 1] \\ H(s, 0) &= 1 & s \in [0, 1] \\ H(s, 1) &= e^{2\pi i s} & s \in [0, 1] \end{aligned}$$

por lo que H es una homotopía por arcos entre los lazos $\alpha_1(s) = 1$ y $\alpha_2(s) = e^{2\pi i s}$. Entonces tendremos que

$$[\alpha_1] = [\alpha_2] \quad \text{y} \quad 0 = \deg(\alpha_1) = \deg(\alpha_2) = n$$

y llegamos a contradicción ya que $n \geq 1$. Por tanto $\exists z \in \mathbb{C}$ tal que $f(z) = 0$. \square

1.6. Retracciones, tipos de homotopía y retracts de deformación

Definición 1.13. Sea X un espacio topológico y $A \subseteq X$. Decimos que una aplicación continua $r : X \rightarrow A$ es una **retracción** si se cumple que $r(a) = a \quad \forall a \in A$.

Se dice que A es un **retracto** de X si existe una retracción $r : X \rightarrow A$.

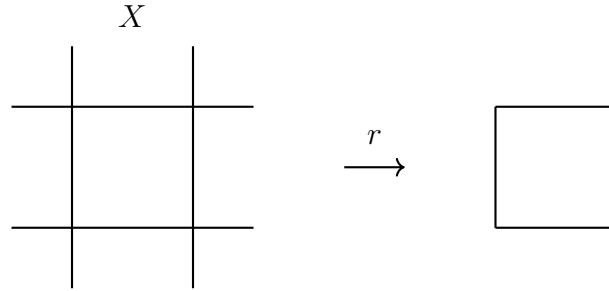
Ejemplo.

1. \mathbb{S}^1 es un retracto de $\mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\}$. Podemos considerar

$$\begin{aligned} r : \mathbb{R}^{n+1} \setminus \{0\} &\rightarrow \mathbb{S}^1 \\ x &\mapsto \frac{x}{|x|} \end{aligned}$$

que es claramente continua y $r(x) = x$ para todo $x \in \mathbb{S}^1$.

2. \mathbb{S} no es un retracto de \mathbb{D} por lo visto en la proposición 1.12.
3. La compresión de un cuadrado también es un retracto.



Lema 1.15. Sean X un e.t. y $A \subseteq X$ tal que A es un retracto de X . Entonces la aplicación inclusión $i : A \rightarrow X$ induce un homomorfismo inyectivo

$$i_* : \pi_1(A, a_0) \rightarrow \pi_1(X, a_0)$$

Demostración. Si A es retracto de X , entonces por definición tenemos que $\exists r : X \rightarrow A$ continua tal que $r(a) = a$ para cualquier $a \in A$.

$$\begin{aligned} A &\xrightarrow{i} X \xrightarrow{r} A, \quad r \circ i = Id_A \\ a &\longmapsto a \longmapsto a \end{aligned}$$

$$\pi_1(A, a_0) \xrightarrow{i_*} \pi_1(X, a_0) \xrightarrow{r_*} \pi_1(A, a_0)$$

$$\quad \quad \quad \xrightarrow{r_* \circ i_*}$$

$$r_* \circ i_* = (Id_A)_* = Id_{\pi_1(A, a_0)}$$

Como $Id_{\pi_1(A, a_0)}$ es inyectiva, entonces se tiene que i_* es inyectiva. \square

Definición 1.14. Sea $f : X \rightarrow Y$ una aplicación continua entre dos espacios topológicos. Decimos que f es una **equivalencia homotópica** si existe $g : Y \rightarrow X$ continua tal que $g \circ f$ es homotópica a Id_X y $f \circ g$ es homotópica a Id_Y .

Decimos que X e Y son **homotópicamente equivalentes** si existe una equivalencia homotópica entre ambos.

A la aplicación g se le llama una **inversa homotópica** de f .

Observación.

- (i) La inversa homotópica no tiene por qué ser única
- (ii) La composición de equivalencias homotópicas sigue siendo una equivalencia homotópica, de lo que se deduce que ser homotópicamente equivalente es una relación de equivalencia.
- (iii) Una equivalencia homotópica no tiene por qué ser ni inyectiva ni sobreyectiva.
- (iv) Todo homeomorfismo es una equivalencia homotópica.

Lema 1.16. Sean $f, g : X \rightarrow Y$ dos aplicaciones continuas, $x_0 \in X$. Si H es una homotopía entre f y g y consideramos el arco $\alpha(t) = H(x_0, t)$. Entonces se tiene que el siguiente diagrama es conmutativo

$$\begin{array}{ccc} & \pi_1(Y, f(x_0)) & \\ f_* \nearrow & \downarrow \varphi \equiv \text{isomorfismo} & \\ \pi_1(X, x_0) & & \pi_1(Y, g(x_0)) \\ g_* \searrow & & \end{array}$$

donde $\phi([\gamma]) = [\tilde{\alpha}] * [\gamma] * [\alpha]$. En particular, f_* es inyectiva (respectivamente sobreyectiva) si y solo si g_* lo es.

Demostración. Tenemos que demostrar que si β es un lazo en X basado en x_0 , entonces:

$$(\varphi \circ f_*)([\beta]) = g_*([\beta]) = [g \circ \beta]$$

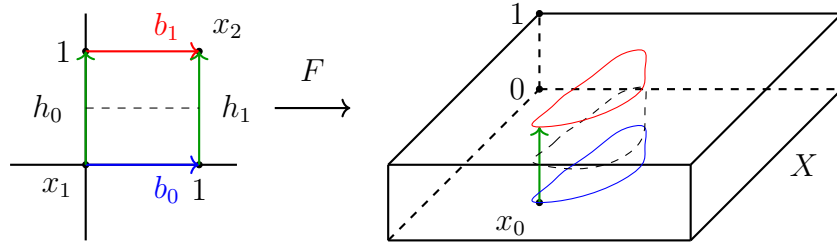
Pero tenemos además

$$(\varphi \circ f_*)([\beta]) = [\tilde{\alpha}] * [f \circ \beta] * [\alpha]$$

por lo que será equivalente a probar que

$$[\alpha] * [g \circ \beta] = [f \circ \beta] * [\alpha]$$

es decir, que existe una homotopía por arcos que lleva $\alpha * (g \circ \beta)$ en $(f \circ \beta) * \alpha$.



Por hipótesis tenemos $H : X \times [0, 1] \rightarrow Y$ continua tal que

$$\begin{aligned} (x, 0) &\mapsto f(x) \\ (x, 1) &\mapsto g(x) \\ \alpha(t) &= H(x_0, t) \end{aligned}$$

Definimos la siguiente aplicación

$$\begin{aligned} F : [0, 1] \times [0, 1] &\rightarrow X \times [0, 1] \quad \text{continua} \\ (s, t) &\mapsto (\beta(s), t) \end{aligned}$$

que verifica

$$\begin{aligned} b_0(s) &= (s, 0) & , s \in [0, 1] \\ b_1(s) &= (s, 1) & , s \in [0, 1] \\ h_0(s) &= (0, s) & , s \in [0, 1] \\ h_1(s) &= (1, s) & , s \in [0, 1] \end{aligned}$$

Como $[0, 1] \times [0, 1]$ es simplemente conexo y $b_0 * h_1 * \tilde{b}_1 * \tilde{h}_0$ es un lazo en el $(0, 0)$, entonces se tiene que

$$[b_0 * h_1 * \tilde{b}_1 * \tilde{h}_0] = [\varepsilon_{(0,0)}] \Rightarrow [b_0 * h_1] = [h_0 * b_1]$$

Por tanto tenemos que $\exists G : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1] \times [0, 1]$ homotopía por arcos tal que $G(s, 0) = (b_0 * h_1)(s)$ y $G(s, 1) = (h_0 * b_1)(s)$ por lo que quedan los extremos fijos, es decir, $G(0, t) = (0, 0)$ y $G(1, t) = (1, 1)$. Consideramos entonces

$$H \circ F \circ G : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow Y \quad \text{continua}$$

y tenemos que

$$\begin{aligned}
(H \circ F \circ G)(0, t) &= H(F(0, 0)) = H(x_0, 0) = f(x_0) \\
(H \circ F \circ G)(1, t) &= H(F(1, 1)) = H(x_0, 1) = g(x_0) \\
(H \circ F \circ G)(s, 0) &= H(F((b_0 * h_1)(s))) = (H \circ F) \left(\left\{ \begin{array}{ll} b_0(2s) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ h_1(2s - 1) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{array} \right\} \right) = \\
&= (H \circ F) \left(\left\{ \begin{array}{ll} (2s, 0) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ (1, 2s - 1) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{array} \right\} \right) = H \left(\left\{ \begin{array}{ll} (\beta(2s), 0) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ (x_0, 2s - 1) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{array} \right\} \right) = \\
&= \left\{ \begin{array}{ll} f(\beta(2s)) & \text{si } s \in [0, 1/2] \\ \alpha(2s - 1) & \text{si } s \in [1/2, 1] \end{array} \right\} = ((f \circ \beta) \circ \alpha)(s)
\end{aligned}$$

Análogamente se tiene que

$$(H \circ F \circ G)(s, 1) = (\alpha * (g \circ \beta))(s)$$

Por lo que llegamos a que

$$[\alpha] * [g \circ \beta] = [f \circ \beta] * [\alpha]$$

como queríamos probar. \square

Teorema 1.17. Sea $f : X \rightarrow Y$ una equivalencia homotópica, entonces

$$f_* : \pi_1(X, x_0) \rightarrow \pi_1(Y, f(x_0))$$

es un isomorfismo.

Demostración. Como f es una equivalencia homotópica, existe $g : Y \rightarrow X$ que es una inversa homotópica suya. Sabemos que $g \circ f$ es homotópica a Id_X entonces:

$$\begin{array}{ccc}
\pi_1(X, x_0) & \xrightarrow{(f_0)_*} \pi_1(Y, f(x_0)) & \xrightarrow{g_*} \pi_1(X, g(f(x_0))) \\
& \searrow \text{isom.} & \downarrow \varphi \equiv \text{isomorfismo} \\
& & \pi_1(X, x_0)
\end{array}$$

De aquí se deduce que $(f_{x_0})_*$ es inyectiva y que g_* es sobreyectiva

$$\begin{array}{ccc}
\pi_1(Y, f(x_0)) & \xrightarrow{g_*} \pi_1(X, g(f(x_0))) & \xrightarrow{(f \circ g \circ f(x_0))_*} \pi_1(Y, f(g(f(x_0)))) \\
& \searrow \text{isom.} & \downarrow \tilde{\varphi} \equiv \text{isomorfismo} \\
& & \pi_1(X, x_0)
\end{array}$$

\square

Definición 1.15. Sean X un espacio topológico y $A \subset X$. Decimos que A es un **retracto de deformación** de X si existe una retracción $r : X \rightarrow A$ que es homotópica a la identidad en X .

Esta definición se escribe simplemente como que existe $H : X \times [0, 1] \rightarrow X$ homotopía tal que

$$H(x, 0) = x \quad \forall x \in X$$

$$H(x, 1) \in A \quad \forall x \in X$$

$$H(a, 1) = a \quad \forall a \in A$$

Aquí la retracción es simplemente $r(x) = H(x, 1)$.

Ejemplo.

$$1. X = \mathbb{S}^1 \cup (\mathbb{R} \times \{1\}).$$



Veamos que \mathbb{S}^1 es retracto de deformación de X . Para ello buscamos $H : X \times [0, 1] \rightarrow X$ y la definimos de la siguiente forma:

$$H(x, t) = \begin{cases} x & \text{si } x \in \mathbb{S}^1, t \in [0, 1] \\ (1-t)x + t(0, 1) & \text{si } x \in \mathbb{R} \times \{1\}, t \in [0, 1] \end{cases}$$

Con esta definición tenemos

$$H(x, 0) = x \quad \forall x \in X$$

$$H(x, 1) = \begin{cases} x & \text{si } x \in \mathbb{S}^1 \\ (0, 1) & \text{si } x \in \mathbb{R} \times \{1\} \end{cases} \Rightarrow H(x, 1) \in \mathbb{S}^1 \quad \forall x \in X$$

$$H(a, 0) = a \quad \forall a \in \mathbb{S}^1$$

y tenemos la retracción definida como se ha hecho en la definición.

$$2. X = (\mathbb{R} \times \{-1, 1\}) \cup (\{-1, 1\} \times \mathbb{R}).$$



Veamos que $A = ([-1, 1] \times \{-1, 1\}) \cup (\{-1, 1\} \times [-1, 1])$ es un retracto de deformación de X . Para ello definimos la homotopía como

$$H(x, t) = \begin{cases} x & \text{si } x \in A \\ (1-t)x + t(1, 1) & \text{si } x = (x_1, x_2) \text{ con } x_1 \geq 1, x_2 \geq 1 \\ (1-t)x + t(-1, 1) & \text{si } x = (x_1, x_2) \text{ con } x_1 \leq -1, x_2 \geq 1 \\ (1-t)x + t(-1, -1) & \text{si } x = (x_1, x_2) \text{ con } x_1 \leq -1, x_2 \leq -1 \\ (1-t)x + t(1, -1) & \text{si } x = (x_1, x_2) \text{ con } x_1 \geq 1, x_2 \leq -1 \end{cases}$$

Corolario 1.17.1. Sea A un retracto de deformación de X , entonces A y X son del mismo tipo de homotopía. En particular la aplicación inclusión $i : A \rightarrow X$ induce un isomorfismo entre sus grupos fundamentales.

$$i_* : \pi_1(A, a_0) \xrightarrow{\text{isomorf.}} \pi_1(X, a_0) \quad a_0 \in A$$

Demostración. Si A es un retracto de deformación de X , entonces $\exists H$ homotopía cumpliendo

$$\begin{aligned} H(x, 0) &= x \quad \forall x \in X \\ H(x, 1) &\in A \quad \forall x \in X \\ H(a, 1) &= a \quad \forall a \in A \end{aligned}$$

Si $r(x) = H(x, 1)$ se tiene que H es una homotopía entre Id_X y $i \circ r$ y por otro lado

$$\begin{aligned} A &\xrightarrow{i} X \xrightarrow{r} A \\ a &\mapsto a \mapsto a \end{aligned}$$

con $r \circ i = Id_A$ por lo que $r \circ i$ es homotópica a Id_A . Por el teorema anterior tenemos que A y X son del mismo tipo de homotopía y que i_* es isomorfismo. \square

Ejemplo. Sabemos de ejemplos anteriores que $A = \mathbb{S}^1$ es retracto de deformación de $X = \mathbb{S}^1 \cup (\mathbb{R} \times \{1\})$. Por el corolario recién estudiado tenemos que son del mismo tipo de homotopía y por tanto la inclusión induce un isomorfismo. Además el isomorfismo entre $\pi_1(\mathbb{S}^1, x_0)$ y $(\mathbb{Z}, +)$ ya se estudió previamente (con la aplicación que “cuenta vueltas”). Es decir, se tiene

$$\begin{aligned} \pi_1(X, x_0) &\cong_{\text{isom.}} \pi_1(\mathbb{S}^1, x_0) \cong_{\text{isom.}} (\mathbb{Z}, +) \\ [\alpha]_X &\mapsto [\alpha]_{\mathbb{S}^1} \end{aligned}$$

Observación. Si A es retracto de X , entonces $i_* : \pi(A, a_0) \rightarrow \pi_1(X, a_0)$ es inyectiva. Si A es retracto de deformación de X , entonces se tiene que $i_* : \pi(A, a_0) \rightarrow \pi_1(X, a_0)$ es biyectiva.

Ejemplo.

1. $X = \mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\}$ y $x_0 \in X$. Sabemos que x_0 es retracto de X , ya que

$$\begin{aligned} r : X &\rightarrow \{x_0\} \\ x &\mapsto x_0 \end{aligned}$$

es continua pero x_0 no es retracto de deformación de x ya que si lo fuese, entonces

$$i_* : \{0\} \cong \pi_1(\{x_0\}, x_0) \rightarrow \pi_1(\mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0)\}, x_0) \cong (\mathbb{Z}, +)$$

sería biyectiva

2. $\mathbb{S}^1 \times \{0\}$ es un retracto de deformación de $\mathbb{S}^1 \times \mathbb{R}$. Si consideramos la aplicación

$$\begin{aligned} H : (\mathbb{S}^1 \times \mathbb{R}) \times [0, 1] &\rightarrow \mathbb{S}^1 \times \mathbb{R} \\ ((x_1, x_2, x_3), t) &\mapsto (x_1, x_2, (1-t)x_3) = (1-t)(x_1, x_2, x_3) + t(x_1, x_2, 0) \end{aligned}$$

Tenemos que verifica

$$\begin{aligned} H((x_1, x_2, x_3), 0) &= (x_1, x_2, x_3) \\ H((x_1, x_2, x_3), 1) &= (x_1, x_2, 0) \in \mathbb{S}^1 \times \{0\} \\ H((x_1, x_2, 0), 1) &= a \end{aligned}$$

3. Consideramos la cinta de Möbius X dada por $Y = [0, 1] \times [0, 1]$ bajo la relación de equivalencia

$$(x_1, y_1) R (x_2, y_2) \iff \begin{cases} (x_1, y_1) = (x_2, y_2) \\ \vee \\ \{x_1, x_2\} = \{0, 1\} \wedge y_1 + y_2 = 1 \end{cases}$$

Definimos la “circunferencia”

$$A = [0, 1] \times \left\{ \frac{1}{2} \right\} \text{ bajo la relación de equivalencia de } R$$

Consideramos la homotopía:

$$\begin{aligned} H : Y \times [0, 1] &\rightarrow Y \\ ((x, t), t) &\mapsto (1-t)(x, y) + y \left(x, \frac{1}{2} \right) \end{aligned}$$

que es continua. Se deja como ejercicio ver que H está bien definida, es decir, que para cualesquiera 2 elementos relacionados tienen la misma imagen (bajo R). De esta forma se tiene

$$\pi_1(X) \underset{\text{isom.}}{\cong} \pi_1(A) \cong \pi_1(\mathbb{S}^1) \cong (\mathbb{Z}, +)$$

4. Consideramos $\mathbb{R}^2 \setminus \{(-1, 0), (1, 0)\}$ [Terminar]

Definición 1.16. Se dice que un espacio topológico X es **contráctil** si existe un punto $x_0 \in X$ tal que x_0 sea retracto de deformación de X .

Corolario 1.17.2. Todo espacio topológico contráctil es simplemente conexo.

Demostración. Sea X el e.t y x_0 el punto de X para el cual existe $H : X \times [0, 1] \rightarrow X$ homotopía que verifica $\forall x \in X$

$$H(x, 0) = x$$

$$H(x, 1) = x_0$$

En este caso tenemos que $\alpha_*(t) = H(x, t)$ es un arco que une x con x_0 por lo que X es arcoconexo.

Como $\{x_0\}$ es retracto de deformación de X se tiene que

$$i_* : \pi_1(\{x_0\}, x_0) \rightarrow \pi_1(X, x_0)$$

es isomorfismo por lo que $\pi_1(X, x_0)$ es trivial. \square

1.7. El grupo fundamental de las esferas. Aplicaciones.

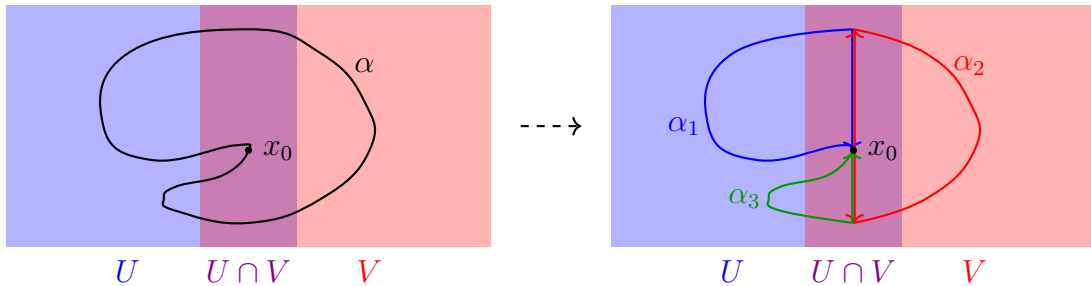
Parece intuitivo que el grupo fundamental de una circunferencia es el trivial ya que podríamos llevar cualquier lazo al trivial. Efectivamente la intuición no nos engaña pero tendremos que verlo de una forma más rigurosa para concluir la veracidad de esta afirmación.

Lema 1.18. Sean X un e.t. y U, V dos abiertos suyos tales que $X = U \cup V$. Si $U \cap V$ es arcoconexo, entonces dado un punto $x_0 \in U \cap V$ y α un lazo basado en x_0 , existen $\alpha_1, \dots, \alpha_k$ una cantidad finita de lazos basados en x_0 tales que

$$[\alpha] = [\alpha_1] * \dots * [\alpha_k]$$

donde la imagen de cada α_i cae completamente en U o bien en V .

Demostración. Podemos entender de forma gráfica la demostración de la siguiente forma, en la que se podrá descomponer la curva α en $\alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3$



Comenzamos con el lazo $\alpha : [0, 1] \rightarrow X$. Consideramos $\alpha^{-1}(U)$ y $\alpha^{-1}(V)$ que son abiertos en $[0, 1]$. Por el lema del número de Lebesgue tenemos que existen

$$0 = t_0 < t_1 < \dots < t_m = 1 \text{ partición del } [0, 1]$$

tal que $\alpha([t_i, t_{i+1}])$ contenido en U o bien en V para $i \in \{0, \dots, m-1\}$. Si $\alpha(t_i) \notin U \cap V$ podemos quitar al t_i de la partición ya que $\alpha([t_{i-1}, t_i] \cup [t_i, t_{i+1}])$ estaría

contenido en U o bien todo en V . Así suponemos todos los $\alpha(t_i) \in U \cap V$. Como $U \cap V$ es arcoconexo existe un arco β_i uniendo x_0 con $\alpha(t_i)$ para cada $i \in \{1, \dots, m-1\}$. Tenemos por tanto

$$[\alpha] = [\alpha_1 * \alpha_2 * \dots * \alpha_m]$$

donde α_i es una parametrización en $[0, 1]$ de $\alpha|_{[t_{i-1}, t_i]}$. Tenemos que

$$\begin{aligned} [\alpha] &= [\alpha_1] * [\tilde{\beta}_1] * [\beta_1] * [\alpha_2] * [\tilde{\beta}_2] * \dots * [\beta_{m-1}] * [\alpha_m] = \\ &= [\alpha_1 * \beta_1] * [\beta_1 * \alpha_2 * \tilde{\beta}_2] * \dots * [\beta_{m-1} * \alpha_m] \end{aligned}$$

Donde $[\alpha_1 * \tilde{\beta}_1]$, cada $[\beta_i * \alpha_{i+1} * \tilde{\beta}_{i+1}]$ y $[\beta_{m-1} * \alpha_m]$ son lazos basados en x_0 completamente contenidos en U o bien en V . \square

Teorema 1.19. Sean X un e.t y U, V abiertos de X . Supongamos que

1. $X = U \cup V$
2. $U \cap V$ es arcoconexo (no vacío)
3. U y V son simplemente conexos

Entonces X es simplemente conexo.

Demostración. Dado α lazo basado en $x_0 \in U \cup V$ se tiene por el lema anterior que

$$[\alpha] = [\alpha_1] * [\alpha_2] * \dots * [\alpha_k]$$

donde cada α_i es un lazo completamente contenido en U o bien en V . Como U, V son simplemente conexos tenemos

$$[\alpha] = [\varepsilon_{x_0}] * [\varepsilon_{x_0}] * \dots * [\varepsilon_{x_0}] = [\varepsilon_{x_0}]$$

\square

Corolario 1.19.1. Las esferas \mathbb{S}^n para $n \geq 2$ son simplemente conexas. En particular su grupo fundamental es el trivial.

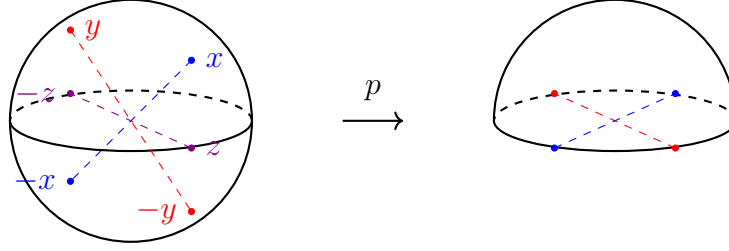
Demostración. Definimos los siguientes conjuntos

$$U = \mathbb{S}^n \setminus \{(0, \dots, 1)\} \quad V = \mathbb{S}^n \setminus \{(1, \dots, 0)\}$$

U y V son homeomorfos a \mathbb{R}^n por lo que son simplemente conexos, $\mathbb{S}^n = U \cup V$ y además, como $U \cap V$ es homeomorfo a $\mathbb{R}^n \setminus \{(0, \dots, 0)\}$ que es arcoconexo (ya que $n \geq 2$), tenemos que $U \cap V$ es arcoconexo. \square

Corolario 1.19.2. El grupo fundamental de $\mathbb{R}P^n$ es isomorfo a \mathbb{Z}^2 para $n \geq 2$.

Demostración.



Veamos que la aplicación

$$\begin{aligned} p : \mathbb{S}^n &\rightarrow \mathbb{R}P^n \\ x &\mapsto [x] \end{aligned}$$

es recubridora. Es claro que p es continua y sobreyectiva. Por otro lado, dado cualquier punto $x_0 \in \mathbb{S}^n$ tenemos que el abierto

$$U_{x_0} = \{x \in \mathbb{S}^n : \langle x, x_0 \rangle \neq 0\}$$

es saturado, es decir, que $p^{-1}(p(U_{x_0})) = U_{x_0}$ y además podemos escribir

$$U_{x_0} = \{x \in \mathbb{S}^n : \langle x, x_0 \rangle > 0\} \cup \{x \in \mathbb{S}^n : \langle x, x_0 \rangle < 0\} = U_{x_0}^+ \cup U_{x_0}^-$$

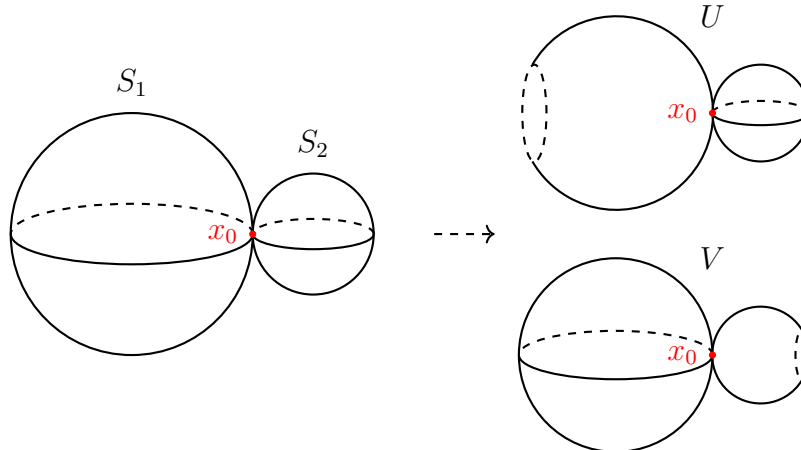
Es fácil probar que $p|_{U_{x_0}^+}$ y $p|_{U_{x_0}^-}$ son homeomorfismos. Entonces la correspondencia del levantamiento

$$\varphi : \pi_1(\mathbb{R}P^n, [a_0]) \rightarrow p^{-1}([a_0]) = \{a_0, -a_0\}$$

es biyectiva (ya que \mathbb{S}^1 es simplemente conexo). Entonces $\pi_1(\mathbb{R}P^n, [a_0])$ solo tiene dos elementos, luego $\pi_1(\mathbb{R}P^n, [a_0]) \cong \mathbb{Z}^2$. \square

Ejemplo.

1. Calculamos el grupo fundamental de dos esferas S_1, S_2 de \mathbb{R}^3 que se cortan en un único punto.



Sea $\{x_0\} = S_1 \cap S_2$ y tomamos $U = X \setminus \{y_1\}$ con $y_1 \in S_1 \setminus \{x_0\}$ y $V = X \setminus \{y_2\}$ con $y_2 \in S_2 \setminus \{x_0\}$. Es claro que $X = U \cap V$ y U, V son abiertos. $U \cap V$ es arcoconexo por ser unión de dos arcoconexos $(S_1 \setminus \{y_1\}) \cup (S_2 \setminus \{y_2\})$ ya que

$$S_1 \setminus \{y_1\} \text{ homeomorfo a } \mathbb{R}^2 \Rightarrow S_1 \setminus \{y_1\} \text{ es arcoconexo}$$

$$S_2 \setminus \{y_2\} \text{ homeomorfo a } \mathbb{R}^2 \Rightarrow S_2 \setminus \{y_2\} \text{ es arcoconexo}$$

y que tienen un punto común x_0 . Veamos ahora que U tiene a S_2 por retracto de deformación. Si esto es cierto, entonces

$$\pi(U) \stackrel{\text{isom.}}{\cong} \pi_1(S_2) \cong \{0\}$$

Sabemos que $S_1 \setminus \{y_1\}$ es homeomorfo a \mathbb{R}^2 y podemos suponer que la imagen mediante ese homeomorfismo de x_0 es el origen $(0, 0)$. Entonces la composición de este homeomorfismo y la homotopía

$$H(x, t) = (1 - t)x \quad x \in \mathbb{R}^2$$

nos da una homotopía $\hat{H} : (S_1 \setminus \{y_1\}) \times [0, 1] \rightarrow S_1 \setminus \{y_1\}$ tal que $\hat{H}(x_0, t) = x_0$. Entonces

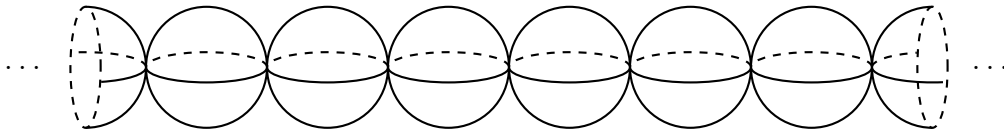
$$\begin{aligned} \tilde{H} : U \times [0, 1] &\rightarrow U \\ (x, t) &\mapsto \begin{cases} \hat{H}(x, t) & \text{si } x \in S_1 \setminus \{y_1\} \\ x & \text{si } x \in S_2 \end{cases} \end{aligned}$$

es una homotopía desde la identidad hasta la que deja fijos a todos los puntos de S_1 , luego S_2 es un retracto de deformación de U .

2. Si llamamos $S(x, r)$ a la esfera centrada en $x \in \mathbb{R}^3$ de radio $r > 0$ y consideramos

$$X = \bigcup_{k \in \mathbb{Z}} S\left((k, 0, 0), \frac{1}{2}\right)$$

veamos que su grupo fundamental es el trivial.

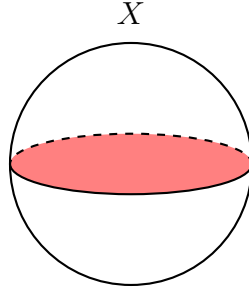


Para ello, con una simple inducción se puede demostrar que esto es cierto para una cantidad finita de esferas usando el ejemplo anterior. En este caso tenemos una cantidad infinita de esferas pero como un lazo es un compacto en \mathbb{R}^3 , tiene que caer en una unión finita de esferas (unidas dos a dos por un único punto) por lo que se podrá reducir al trivial.

3. Vamos a definir el siguiente conjunto

$$X = \mathbb{S}^2 \cup \{(x, y, 0) : x^2 + y^2 \leq 1\}$$

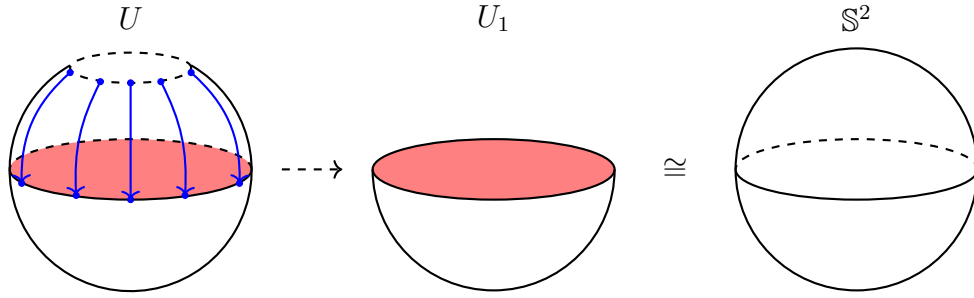
y veamos cual es su grupo fundamental.



Para ello tomamos $U = X \setminus \{(0, 0, 1)\}$ que es retracto de deformación de U_1 donde

$$U_1 = \{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{S}^2 : x_3 \leq 0\} \cup \{(x, y, 0) : x^2 + y^2 \leq 1\}$$

y además U_1 es homeomorfo a \mathbb{S}^2 por lo que $\pi_1(U)$ es el trivial.



De forma análoga si consideramos $V = X \setminus \{(0, 0, -1)\}$ se tiene que $\pi_1(V)$ es trivial. Claramente se tiene que $U \cap V$ es arcoconexo⁸ y por el teorema anterior se tiene que X es simplemente conexo, luego su grupo fundamental es el trivial.

Lema 1.20. Sea $f : \mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{S}^1$ una aplicación continua que conserva antípodas, es decir, $f(-x) = -x$ para todo $x \in \mathbb{S}^1$. Si consideramos el lazo

$$\alpha(s) = (\cos(2\pi s), \sin(2\pi s))$$

entonces se tiene que el grado del lazo $f \circ \alpha$ es impar.

Demostración. La curva α la podemos ver como $\alpha = \alpha_1 * \alpha_2$ con

$$\begin{aligned} \alpha_1(s) &= \alpha\left(\frac{s}{2}\right) & s \in [0, 1] \\ \alpha_2(s) &= \alpha\left(\frac{s+1}{2}\right) & s \in [0, 1] \end{aligned}$$

⁸en un examen habrá que demostrarlo de forma más rigurosa

Como $(f \circ \alpha_1)$ es un arco que comienza en $(1, 0)$ y acaba en $(-1, 0)$, entonces su levantamiento por \widetilde{p} lo podemos elegir para que comience en 0 (ya que $p(0) = (1, 0)$) y un punto final $(f \circ \alpha_1)(1)$ que ha de cumplir que $p((f \circ \alpha_1)(1)) = (-1, 0)$. Es decir,

$$\begin{aligned}\cos(2\pi((f \circ \alpha_1)(1))) &= -1 \\ \sin(2\pi((f \circ \alpha_1)(1))) &= 0\end{aligned}$$

y tenemos que $(f \circ \alpha)(1) = k + \frac{1}{2}$ para un cierto $k \in \mathbb{Z}$. Veamos que $\widetilde{f \circ \alpha}$ es la siguiente curva

$$\widetilde{f \circ \alpha} = \widetilde{f \circ \alpha_1} * \gamma$$

donde $\gamma(s) = k + \frac{1}{2} + \widetilde{f \circ \alpha_1}$.

Tenemos que comprobar que $\widetilde{f \circ \alpha_1} * \gamma$ está bien definida, lo cual es claro porque

$$(\widetilde{f \circ \alpha_1})(1) = k + \frac{1}{2} = k + \frac{1}{2} + (\widetilde{f \circ \alpha_1})(0) = \gamma(0)$$

y que $p(\widetilde{f \circ \alpha_1} * \gamma) = f \circ \alpha$. Tenemos que

$$p((\widetilde{f \circ \alpha_1}) * \gamma) = p(\widetilde{f \circ \alpha_1}) * p(\gamma) = (f \circ \alpha_1) * p(\gamma)$$

y si desarrollamos tenemos

$$\begin{aligned}p(\gamma) &= p\left(k + \frac{1}{2} + (\widetilde{f \circ \alpha_1})(s)\right) = \\ &= \left(\cos\left(2\pi\left(k + \frac{1}{2} + (\widetilde{f \circ \alpha_1})(s)\right)\right), \sin\left(2\pi\left(k + \frac{1}{2} + (\widetilde{f \circ \alpha_1})(s)\right)\right)\right) = \\ &= (\cos(\pi + 2\pi(\widetilde{f \circ \alpha_1})(s)), \sin(\pi + 2\pi(\widetilde{f \circ \alpha_1})(s))) = \\ &= -(\cos(2\pi(\widetilde{f \circ \alpha_1})(s)), \sin(2\pi(\widetilde{f \circ \alpha_1})(s))) = \\ &= -p((\widetilde{f \circ \alpha_1})(s)) = -(f \circ \alpha_1)(s) \stackrel{hip.}{=} f(-\alpha_1(s)) = \\ &= f(\alpha_2(s))\end{aligned}$$

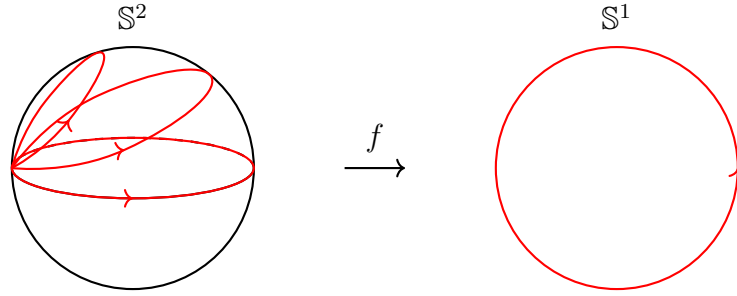
y llegamos a que $p(\widetilde{f \circ \alpha_1} * \gamma) = (f \circ \alpha_1) * (f \circ \alpha_2) = f \circ \alpha$. Por tanto finalmente tenemos

$$\begin{aligned}\deg(f \circ \alpha) &= (\widetilde{f \circ \alpha})(1) = \gamma(1) = k + \frac{1}{2} + (\widetilde{f \circ \alpha_1})(1) = \\ &= \left(k + \frac{1}{2}\right) + \left(k + \frac{1}{2}\right) = 2k + 1 \text{ impar}\end{aligned}$$

□

Lema 1.21. No existe una aplicación continua $f : \mathbb{S}^2 \rightarrow \mathbb{S}^1$ que conserve antípodas, es decir, tal que $f(-x) = -f(x)$ para todo $x \in \mathbb{S}^2$.

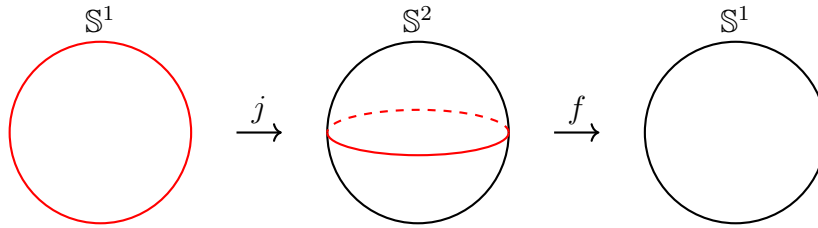
Demostración.



Supongamos que existiese $f : \mathbb{S}^2 \rightarrow \mathbb{S}^1$ continua con $f(-x) = -f(x) \quad \forall x \in \mathbb{S}^2$. Entonces consideramos la aplicación

$$\begin{aligned} j : \mathbb{S}^1 &\rightarrow \mathbb{S}^2 \\ (x, y) &\mapsto (x, y) \end{aligned}$$

que es continua.



Tenemos además que $f \circ j : \mathbb{S}^1 \rightarrow \mathbb{S}^1$ conserva antípodas (salvo rotación de \mathbb{S}^1 podemos suponer que $(f \circ j)(1, 0) = (1, 0)$). Por el lema anterior tenemos que existe un lazo α tal que $\deg((f \circ j)(\alpha))$ es impar. En particular se tiene que

$$\begin{aligned} (f \circ j)_*([\alpha]) &\neq [\varepsilon_{(1,0)}] \\ (f \circ j)_*([\alpha]) &= (f_* \circ j_*)([\alpha]) = [\varepsilon_{(1,0)}] \end{aligned}$$

lo que contradice la existencia de f continua. \square

Teorema 1.22 (Teorema de Borsuk-Ulam). Sea $f : \mathbb{S}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ una aplicación continua. Entonces existe $x_0 \in \mathbb{S}^2$ tal que $f(x_0) = f(-x_0)$.

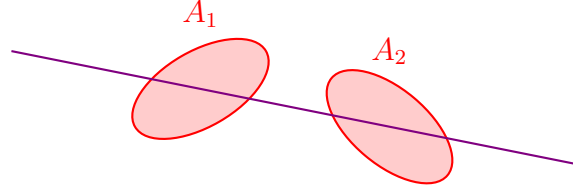
Demostración. Si no existiese $x \in \mathbb{S}^2$ tal que $f(x) = f(-x)$, entonces podríamos considerar

$$g(x) = \frac{f(x) - f(-x)}{|f(x) - f(-x)|} \text{ continua de } \mathbb{S}^2 \text{ en } \mathbb{S}^1$$

y se tendría que $g(-x) = -g(x)$, lo que contradice el lema anterior. \square

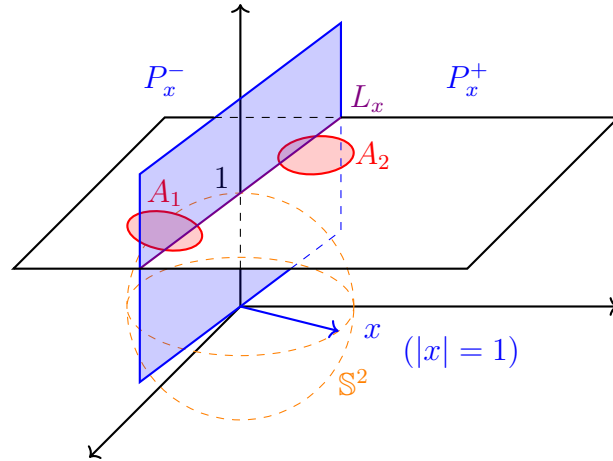
Observación. Del teorema de Borsuk-Ulam se deduce que no existen aplicaciones continuas e inyectivas de \mathbb{S}^2 en \mathbb{R}^2 . Se deduce que \mathbb{S}^2 no es homeomorfo a ningún subconjunto de \mathbb{R}^2 .

Teorema 1.23 (de las tortitas). Sean A_1 y A_2 dos compactos de \mathbb{R}^2 , entonces existe una única que divide a ambos a la vez dejando la mitad del área de cada uno a cada lado de la recta.



Demostración. Identificamos \mathbb{R}^2 dentro de \mathbb{R}^3 como $\mathbb{R}^2 \times \{1\}$. Para cada $x \in \mathbb{S}^2$ consideramos

$$\begin{aligned} P_x^+ &= \{v \in \mathbb{R}^3 : \langle v, x \rangle > 0\} \\ P_x^- &= \{v \in \mathbb{R}^3 : \langle v, x \rangle < 0\} \\ L_x &= \{v \in \mathbb{R}^3 : \langle v, x \rangle = 0\} \cap (\mathbb{R}^2 \times \{1\}) \end{aligned}$$



Observamos que si $x \neq \pm(0,0,1)$, entonces L_x es una recta. En otro caso, si $x = \pm(0,0,1)$, entonces $L_x = \emptyset$. Observemos además que $P_x^+ = P_{-x}^-$. Además, si $area(A_1) = area(A_2) = 0$, entonces cualquier recta nos vale. Vamos a suponer entonces que $area(A_1) > 0$ y definimos

$$\begin{aligned} f : \mathbb{S}^2 &\rightarrow \mathbb{R}^2 \\ x &\mapsto (area(A_1 \cap P_x^+), area(A_2 \cap P_x^+)) \end{aligned}$$

Como f es continua, entonces el teorema de Borsuk Ulam $\exists x_0 \in \mathbb{S}^2$ tal que $f(x_0) = f(-x_0)$, es decir, tal que

$$(area(A_1 \cap P_{x_0}^+), area(A_2 \cap P_{x_0}^+)) = (area(A_1 \cap P_{x_0}^-), area(A_2 \cap P_{x_0}^-))$$

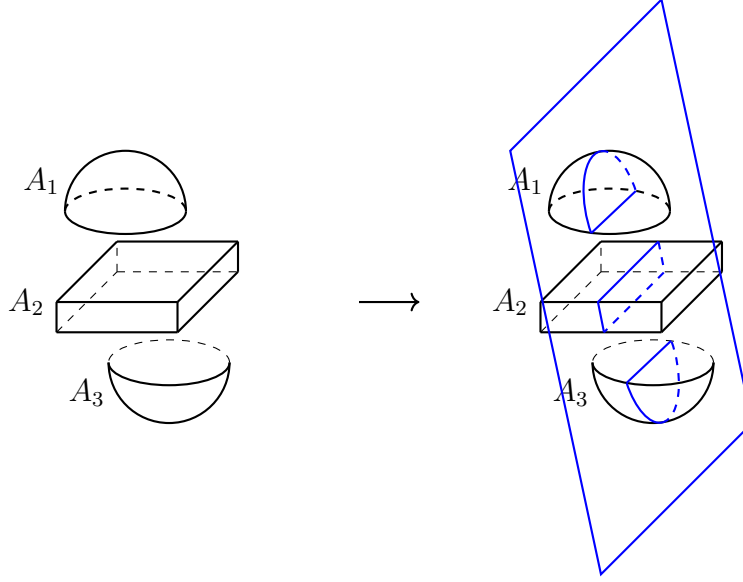
por lo que llegamos a que

$$\begin{cases} area(A_1 \cap P_{x_0}^+) = area(A_1 \cap P_{x_0}^-) \\ area(A_2 \cap P_{x_0}^+) = area(A_2 \cap P_{x_0}^-) \end{cases}$$

(recordemos que $x_0 \neq (0,0,1)$).

□

Teorema 1.24 (del bocadillo de jamón). Sean A_1, A_2, A_3 tres compactos en \mathbb{R}^3 , entonces existe un plano que divide a la vez a cada uno de ellos en dos partes de igual volumen.



Podemos interpretar este resultado geométricamente como que se tienen 3 volúmenes: A_1 (la tapa superior de pan), A_2 (el jamón) y A_3 (la tapa inferior de pan).

Entonces existe un corte (plano) que divide a todos los volúmenes por la mitad (se pueden dividir todas las partes del “bocadillo” exactamente por la mitad con un único corte).

1.8. El teorema de Seifert-van Kampen

En primer lugar fijaremos los preliminares algebraicos necesarios para estudiar el teorema relativo a esta sección. Utilizaremos la notación multiplicativa de grupos que facilitará su comprensión.

Notación. Dado un grupo (G, \cdot) denotaremos por e a su elemento neutro y para cada $g \in G$ usaremos la notación g^{-1} para denotar a su inverso.

Dado $n \in \mathbb{Z}$ denotaremos por g^n a

$$g^n = \begin{cases} g \cdot \overset{(n)}{\dots} \cdot g & \text{si } n \geq 1 \\ e & \text{si } n = 0 \\ g^{-1} \cdot \overset{(n)}{\dots} \cdot g^{-1} & \text{si } n \leq -1 \end{cases}$$

Recordemos que $H \subseteq G$ es un subgrupo de G si $h_1 \cdot h_2^{-1} \in H$ para todo $h_1, h_2 \in H$.

Si H es un subgrupo de G lo denotaremos por $H < G$. Si además se tiene que $g \cdot h \cdot g^{-1} \in H$ para todo $g \in G, \forall h \in H$ se dice que H es un subgrupo normal. En este caso lo denotamos por $H \triangleleft G$.

1.8.1. Grupo cociente

Definición 1.17. Dado H un subgrupo de G definimos la relación de equivalencia R dada por

$$g_1 R g_2 \stackrel{\text{def}}{\iff} g_1 \cdot g_2^{-1} \in H \quad \forall g_1, g_2 \in G$$

Dado $g \in G$ denotamos por

$$[g] = H \cdot g = \{h \cdot g : h \in H\}$$

a la clase de equivalencia de g bajo la relación de equivalencia R .

Observación. Es importante observar que la definición

$$[g_1] \cdot [g_2] \stackrel{def}{=} [g_1 \cdot g_2]$$

no está bien hecha para $H < G$ cualquiera. De hecho solo estaría bien definida si y solo si $H \triangleleft G$. En este caso podemos considerar el conjunto cociente

$$G/H = \{[g] : g \in G\}$$

que con la operación anterior tiene la estructura de grupo.

Ejemplo. Para $G = \mathbb{Z}$ y $H = n\mathbb{Z}$ con $n \geq 2$ entero tendremos que $H \triangleleft G$ por ser H conmutativo. Además se tendrá que

$$G/H \equiv \mathbb{Z}_n$$

1.8.2. Subgrupo normal generado por un conjunto

Observación. Dado un grupo G , la intersección cualquiera de subgrupos normales de G es un subgrupo normal en G .

Definición 1.18. Dado $C \subseteq G$ subconjunto cualquiera de G no vacío, existe el menor subgrupo normal que lo contiene (dado por la intersección de todos los subgrupos normales que contienen a C , que al menos es el total). Lo notaremos por $\langle C \rangle_N$ y diremos que es el **subgrupo normal de G generado por C** .

Observación. Se puede caracterizar el subgrupo normal de G generado por C de la siguiente forma:

$$g \in \langle C \rangle_N \iff g = (g_1 \cdot c_1^{n_1} \cdot g_1^{-1}) \cdot (g_2 \cdot c_2^{n_2} \cdot g_2^{-1}) \cdot \dots \cdot (g_k \cdot c_k^{n_k} \cdot g_k^{-1})$$

donde $g_i \in G$, $c_i \in C$, $n_i \in \mathbb{Z}$ para todo $i \in 1, 2, \dots, k$

1.8.3. Producto libre de grupos

Definición 1.19. Sea $\{G_i\}_{i \in I}$ una familia de grupos donde todos los elementos de la familia son disjuntos, es decir, $G_i \cap G_j = \emptyset$ si $i \neq j$. Denotamos por e_i al elemento neutro de G_i .

Llamamos **letra** a un elemento $x \in \bigcup_{i \in I} G_i$ de cualquiera de los grupos.

Llamamos **palabra** a una yuxtaposición de letras, $w = x_1 x_2 \dots x_m$ donde m es un entero no negativo. Si $m = 0$ se le suele llamar **palabra vacía** y la denotaremos por $w = 1$. Al número m lo llamaremos **longitud de la palabra**.

Llamaremos **sílaba** a cada palabra con 2 letras.

Diremos que 2 palabras $w_1 = x_1 x_2 \dots x_m$ y $w_2 = y_1 y_2 \dots y_k$ son iguales si $m = k$ y $x_i = y_i$ para todo $i \in 1, 2, \dots, m = k$.

Definición 1.20. En el conjunto de todas las palabras definimos la aplicación yuxtaposición que a cada dos palabras $w_1 = x_1x_2\dots x_m$ y $w_2 = y_1y_2\dots y_k$ le hace corresponder la nueva palabra

$$w_1w_2 = x_1x_2, \dots x_my_1, y_2\dots y_k$$

Esta operación tiene un elemento neutro ($w = 1$) y es asociativa.

Definición 1.21. Dada una palabra $w = x_1x_2\dots x_m$ diremos que es **reducida** si verifica las siguientes propiedades:

1. No existen dos letras consecutivas del mismo grupo.
2. No aparece ningún elemento neutro e_i .

Observación. Dada una palabra cualquiera $w = x_1x_2\dots x_m$ podemos reducirla con el siguiente procedimiento:

1. Cuando hay dos letras consecutivas del mismo grupo se multiplican usando la operación de ese grupo.
2. Se eliminan todos los elementos neutros e_i de la palabra.

Definición 1.22. En el conjunto de las palabras reducidas podemos definir la operación yuxtaposición + reducción. Esto dota al conjunto de las palabras reducidas de estructura de grupo. A este grupo se le suele denotar por $\ast_{i \in I} G_i$ y se llama **producto libre** de los G_i .

Ejemplo. Consideramos los siguientes conjuntos:

$$\begin{aligned} G_1 = \mathbb{Z}_2 &= \{e_1, a\} : e_1 \text{ es el neutro, } a \cdot a = e_1 \\ G_2 = \mathbb{Z}_2 &= \{e_2, b\} : e_2 \text{ es el neutro, } b \cdot b = e_2 \end{aligned}$$

y las siguientes palabras:

$$\begin{aligned} w_1 &= e_1aae_2ab \\ w_2 &= be_2e_1ab \end{aligned}$$

y tendríamos

$$\begin{aligned} w_1 &\sim aae_2ab \sim e_1e_2ab \sim ab \\ w_2 &\sim bab \end{aligned}$$

Si pensamos en el conjunto de las palabras reducidas tenemos

$$G_1 \ast G_2 = \{1, a, b, ab, ba, aba, bab, \dots\}$$

donde

$$a^{-1} = a, \quad b^{-1} = b, \quad (ab)^{-1} = ba, \quad (aba)^{-1} = aba, \quad (bab)^{-1} = bab$$

Lema 1.25 (Propiedad universal del producto libre). Sea $\{G_i\}_{i \in I}$ una familia de grupos disjuntos ⁹. Consideramos una familia de homeomorfismos

$$f_i : G_i \rightarrow G$$

sobre un grupo G fijo. Entonces existe un único homomorfismo

$$f_i * G_i \rightarrow G$$

tal que el siguiente diagrama conmuta:

$$\begin{array}{ccc} G_i & \xrightarrow{f_i} & G \\ & \searrow h_i & \nearrow f \\ & *_{i \in I} G_i & \end{array}$$

donde $h_{i_0} : G_{i_0} \rightarrow *_{i \in I} G_i$ es el homomorfismo inclusión. En la práctica se tendrá que

$$f(x_1, \dots, x_n) = f_{i_1}(x_1) \cdot \dots \cdot f_{i_n}(x_n)$$

donde $x_k \in G_{i_k}$ para todo $k \in \{1, \dots, n\}$.

1.8.4. Grupos libres y presentaciones de grupos

Vamos a ver ahora productos libres donde cada G_i es isomorfo a \mathbb{Z} . Sea $S = \{a\}$ un conjunto con un único elemento. Definimos el conjunto

$$F(a) = \{a^k : k \in \mathbb{Z}\}$$

donde definimos además la operación

$$a^k \cdot a^l := a^{k+l}$$

De esta forma, $(F(a), \cdot)$ es isomorfo a \mathbb{Z}

$$a^k \leftrightarrow k$$

Definición 1.23. A $F(a)$ se le suele llamar el **grupo libre de rango 1** generado por a .

Definición 1.24. Dado un conjunto S cualquiera no vacío definimos $F(S)$ como

$$F(S) = *_{a \in S} F(a)$$

y se le suele llamar **grupo libre** generado por S .

Ejemplo. $F(a, b)$ tiene como elementos:

$$a^2, b^3, ab, ba \quad (ab \neq ba), a^3b^7a^8, a^{-2}b^{-1}, 1, \dots$$

Algunos de los elementos que no están en el grupo libre son:

$$a^0, a^2a^3b^2b^7$$

⁹dos a dos

Definición 1.25. Cuando el conjunto $S = \{a_1, \dots, a_n\}$ es finito con n elementos se suele decir que $F(S)$ es el **grupo libre de rango n** sobre S y se suele denotar por $\mathbb{Z} * \overset{(n)}{\dots} * \mathbb{Z}$.

Observación. Esto se puede hacer ya que el nombre de los elementos no es importante, y por ejemplo se tendría que $F(a, b) \cong F(c, d)$.

Corolario 1.25.1 (Propiedad universal del grupo libre). Dados S un conjunto no vacío, G un grupo y $\rho : S \rightarrow G$ una aplicación, existe un único homomorfismo

$$f : F(S) \rightarrow G$$

tal que $f|_S = \rho$. En la práctica se tendrá que

$$f(a_1^{n_1} a_2^{n_2} \dots a_k^{n_k}) = \rho(a_1)^{n_1} \cdot \rho(a_2)^{n_2} \cdot \dots \cdot \rho(a_k)^{n_k}$$

con $a_i \in S$ y $n_i \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$.

Observación. De esta forma, de la propiedad anterior se deduce que de todo grupo G se puede ver como un grupo libre sobre un subgrupo normal suyo.

Definición 1.26. Sean S un conjunto no vacío y $F(S)$ el grupo libre sobre S . Dado un subconjunto no vacío $R \subseteq F(S)$. Entonces al grupo cociente

$$\frac{F(S)}{\langle R \rangle_N}$$

lo denotaremos de la forma $\langle S | R \rangle$ o bien $\langle S; R \rangle$. El resultado anterior nos dice que todo grupo G es de la forma $\langle S; R \rangle$ para ciertos S y R , donde S serán los generadores y R las relaciones. A $\langle S; R \rangle$ se le suele llamar **presentación**.

Ejemplo.

1. $\langle a; a^n \rangle$ es una presentación de \mathbb{Z}_n

$$\frac{F(a)}{\langle a^n \rangle_N} = \frac{\{a^k : k \in \mathbb{Z}\}}{\{a^{ln} : l \in \mathbb{Z}\}} \cong \frac{\mathbb{Z}}{n\mathbb{Z}} = \mathbb{Z}_n$$

2. $\langle a; \emptyset \rangle$ es una presentación de \mathbb{Z} .

3. $\langle a, b; b \rangle$ es una presentación de \mathbb{Z} ya que

$$\frac{F(a, b)}{\langle b \rangle_N} \cong F(a) \cong \mathbb{Z}$$

Esto es más fácil de ver si entendemos que el cociente lleva al denominador al elemento neutro por lo que un elemento de este grupo será $[a^2 a^3 b^{-2} a b^4 a^5] = [a^2 a^3 a a^5] = [a^9]$

4. $\langle a, b; a^n, b^m \rangle$

$$\frac{F(a, b)}{\langle \{a^n, b^m\} \rangle} \cong \mathbb{Z}_n * \mathbb{Z}_m$$

Veámoslo para un caso particular, por ejemplo $\langle a, b; a^2, b^3 \rangle$. Consideramos el elemento

$$[b^7 a^5 b^{-2} a^{-4}] = [(b^3 b^3 b)(a^2 a^2 a) b^{-2} ((a^2)^{-1} (a^2)^{-1})] = [bab^{-2}]$$

5. $\langle a, b; aba^{-1}b^{-1} \rangle$

$$\frac{F(a, b)}{\langle aba^{-1}b^{-1} \rangle} \cong \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$$

Veamos algunos casos particulares para entenderlo mejor

$$\begin{aligned} [aba^{-1}b^{-1}] &= [1] \\ [ab] &= [ba] \\ [a^3b^7a^2b^5] &= [a^5b^{12}] \end{aligned}$$

1.8.5. Enunciado del teorema

Teorema 1.26 (Seifert-van Kampen). Sean X un e.t. y U, V dos abiertos suyos cumpliendo:

1. $X = U \cup V$
2. U, V y $U \cap V$ son arcoconexos

Si denotamos por i_1, i_2, j_1, j_2 las inclusiones naturales dadas por el diagrama

$$\begin{array}{ccc} & U & \\ i_1 \nearrow & & \searrow j_1 \\ U \cap V & & X \\ i_2 \searrow & & \nearrow j_2 \\ & V & \end{array}$$

y $x_0 \in U \cap V$, entonces el homomorfismo

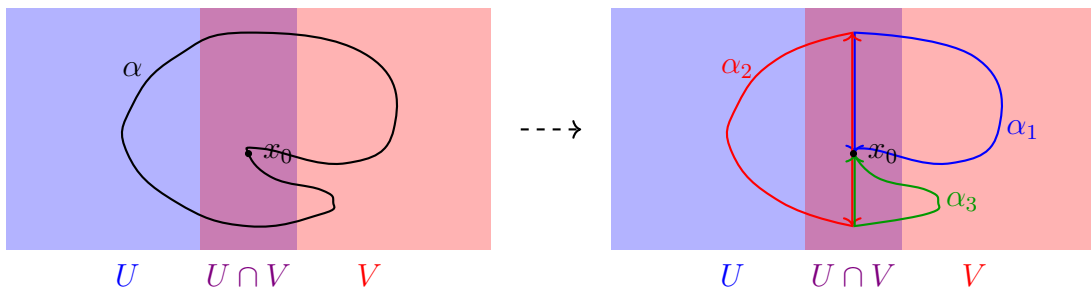
$$j : \pi_1(U, x_0) * \pi_1(V, x_0) \rightarrow \pi_1(X, x_0)$$

que extiende a j_{i*} y j_{2*} es sobreyectivo. Además, el núcleo viene dado por el subgrupo normal generado por

$$R = \{i_1^{-1}(g)i_{2*}(g) : g \in \pi_1(U \cap V, x_0)\}$$

Por tanto,

$$\pi_1(X, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \frac{\pi_1(U, x_0) * \pi_1(V, x_0)}{\langle R \rangle_N}$$



$$[\alpha]_X = [\alpha_1]_X * [\alpha_2]_X * [\alpha_3]_X$$

Si consideramos ahora $g = [\beta]_{U \cap V}$ tendríamos que

$$i_{1*}(g)^{-1} = [\beta]_U^{-1} \text{ y } i_{2*}(g) = [\beta]_V$$

Observación. Algunos casos especiales a considerar son los siguientes:

1. Si U y V son simplemente conexos, caso que ya estudiamos anteriormente y que resultó en que X es simplemente conexo.
2. Si $U \cap V$ es simplemente conexo, entonces

$$\pi_1(X, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \pi_1(U, x_0) * \pi_2(V, x_0)$$

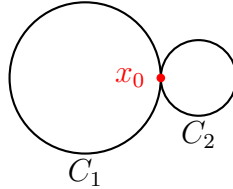
3. Si U es simplemente conexo, entonces

$$\pi_1(X, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \frac{\pi_1(V, x_0)}{\langle R \rangle_N}$$

donde $R = \{i_{2*}(g) : g \in \pi_1(U \cap V, x_0)\}$

Ejemplo.

1. Sean C_1 y C_2 dos circunferencias de \mathbb{R}^2 que se tocan en un único punto x_0 . Queremos calcular el grupo fundamental de $C_1 \cup C_2$.



Tomamos $x_1 \in C_1 \setminus \{x_0\}$ y $x_2 \in C_2 \setminus \{x_0\}$. Consideramos entonces los siguientes conjuntos:

$$U = X \setminus \{x_1\}$$

$$V = X \setminus \{x_2\}$$

y tenemos que U es abierto y arcoconexo (ya que C_1 es arcoconexo, $C_2 \setminus \{x_2\}$ es arcoconexo y se tocan en un punto) y de forma análoga V también es abierto y arcoconexo. Es por esto que $U \cap V$ es arcoconexo (dos abiertos arcoconexos que se intersecan).

Tenemos que C_1 es retracto de deformación de U por lo que

$$\pi_1(U, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \pi_1(C_1, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \mathbb{Z}$$

De la misma forma

$$\pi_1(V, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \pi_1(C_2, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \mathbb{Z}$$

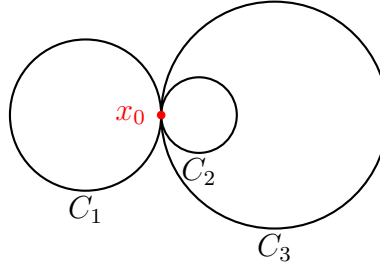
Además, $\{x_0\}$ es retracto de deformación de $U \cap V$ por lo que

$$\pi_1(U \cap V, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \{0\}$$

Por el teorema de Seifert-van Kampen tenemos que

$$\pi_1(X, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \pi_1(U, x_0) * \pi_1(V, x_0) \cong \mathbb{Z} * \mathbb{Z}$$

2. Sean C_1, C_2, C_3 tres circunferencias que solo se tocan en un punto común $x_0 \in \mathbb{R}^2$.



Tomamos $x_1 \in C_1 \setminus \{x_0\}$, $x_2 \in C_2 \setminus \{x_0\}$ y consideramos

$$\begin{aligned} U &= X \setminus \{x_1\} \\ V &= X \setminus \{x_2\} \end{aligned}$$

Tenemos con el mismo razonamiento del apartado anterior que U, V son abiertos arcoconexos y $U \cap V$ arcoconexo. Como U tiene a $C_2 \cup C_3$ como retracto de deformación suyo tendremos que¹⁰

$$\pi_1(U, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \mathbb{Z} * \mathbb{Z}$$

Sus generadores son $[\beta]_U$ y $[\gamma]_U$. Como V tiene a $C_1 \cup C_3$ como retracto de deformación suyo se tendrá que

$$\pi_1(V, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \mathbb{Z} * \mathbb{Z}$$

con generadores $[\alpha]_V$ y $[\gamma]_V$. Tendremos también que

$$\pi_1(U \cap V, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \mathbb{Z}$$

ya que C_3 es retracto de deformación de $U \cap V$. Su generador es $[\gamma]_{U \cap V}$.

¹⁰del apartado anterior

En este punto podríamos pensar que

$$\pi_1(X, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \frac{(\mathbb{Z} * \mathbb{Z}) * (\mathbb{Z} * \mathbb{Z})}{\mathbb{Z}}$$

y que podríamos “cancelar” un \mathbb{Z} resultando en que

$$\pi_1(X, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \mathbb{Z} * \mathbb{Z} * \mathbb{Z}$$

y aunque en este caso de pura casualidad se verifica, esto es **ABSOLUTAMENTE INCORRECTO** en general.

El razonamiento correcto sería el siguiente. Sabemos que

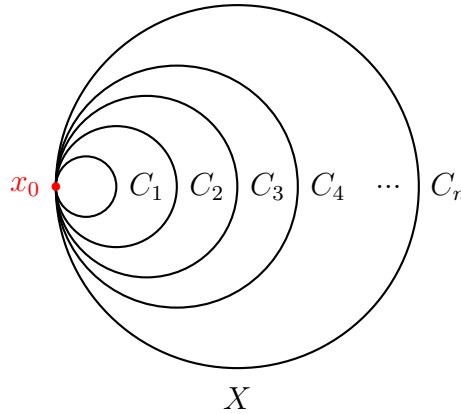
$$\pi_1(X, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \frac{\pi_1(U, x_0) * \pi_1(V, x_0)}{\langle R \rangle_N}$$

donde $R = \{i_{1*}(g)^{-1}i_{2*}(g) : g \in \pi_1(U \cap V, x_0)\}$. Tenemos entonces que

$$\pi_1(X, x_0) \stackrel{isom.}{\cong} \langle [\beta]_U, [\gamma]_U, [\alpha]_V, [\gamma]_V; i_{1*}([\gamma]_{U \cap V})^{-1}, i_{2*}([\gamma]_{U \cap V}) \rangle$$

donde $i_{1*}([\gamma]_{U \cap V})^{-1} = [\gamma]_U^{-1}[\gamma]_V$

3. Consideramos n circunferencias C_1, \dots, C_n en \mathbb{R}^n tal que se tocan entre sí en un único punto x_0 .

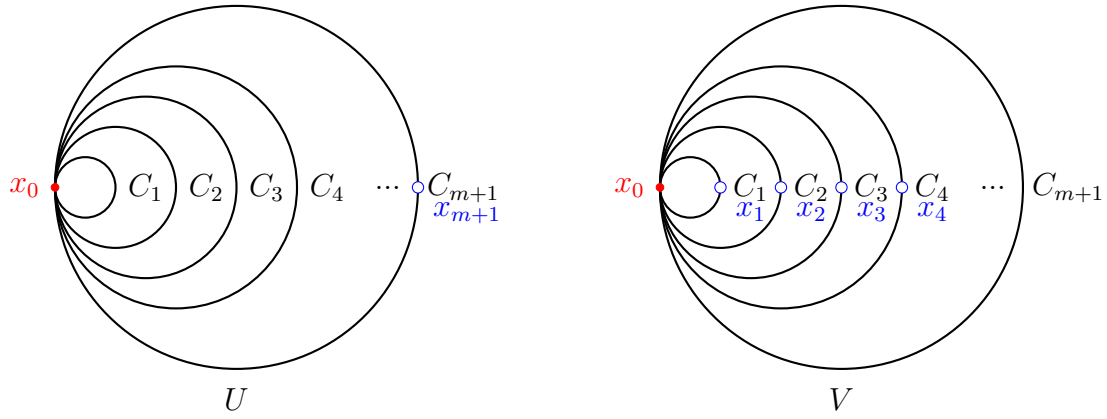


Vamos a demostrar que $\pi_1(X, x_0)$ es isomorfo a $\mathbb{Z} * \dots * \mathbb{Z}$ con $X = \bigcup_{k=1}^n C_k$ donde el conjunto de generadores son los lazos basados en x_0 y que dan una vuelta alrededor de cada circunferencia.

Lo vemos por inducción. El caso base, $n = 2$ se ha estudiado en los apartados anteriores. Suponemos que el resultado es cierto para $n = m$ y lo probamos para $n = m + 1$. Para ello, consideramos los siguientes conjuntos

$$U = X \setminus \{x_{m+1}\} \text{ con } x_{m+1} \in C_{m+1} \setminus \{x_0\}$$

$$V = X \setminus \{x_1, \dots, x_m\} \text{ con } x_i \in C_i \setminus \{x_0\} \quad \forall i \in 1, \dots, m$$



Es claro que $X = U \cup V$ y además, U , V y $U \cap V$ son arcoconexos. Es fácil ver que U tiene por retracto de deformación a $\bigcup_{k=1}^m C_k$, es decir, podemos retraer la circunferencia C_{m+1} a x_0 y dejar el resto igual. Por hipótesis de inducción tenemos que

$$\pi_1(U, x_0) \cong \mathbb{Z} * \overset{(n)}{\dots} * \mathbb{Z}$$

Además, V tiene por retracto de deformación a C_{m+1} (se puede ver pensando en retraer todas las C_i con $i = 1, \dots, m$ a x_0), por lo que

$$\pi_1(V, x_0) \cong \mathbb{Z}$$

Si consideramos $U \cap V$ tenemos que todas las circunferencias se pueden retraer ahora al punto x_0 por lo que este será retracto de deformación y tenemos que

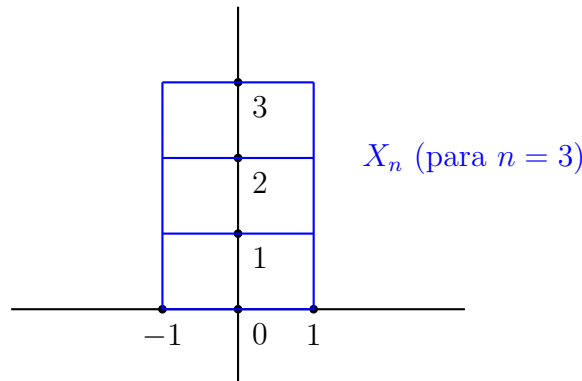
$$\pi_1(U \cap V, x_0) \cong \{0\}$$

Por el teorema de Seifert-van Kampen tenemos que

$$\pi_1(X, x_0) \cong (\mathbb{Z} * \overset{(m)}{\dots} * \mathbb{Z}) * \mathbb{Z} = \mathbb{Z} * \overset{(m+1)}{\dots} * \mathbb{Z}$$

4. Consideramos en \mathbb{R}^2 el siguiente conjunto para $n \in \mathbb{N}$

$$X_n = (\{-1, 1\} \times [0, n]) \cup \left(\bigcup_{k=0}^n ([-1, 1] \times \{k\}) \right)$$

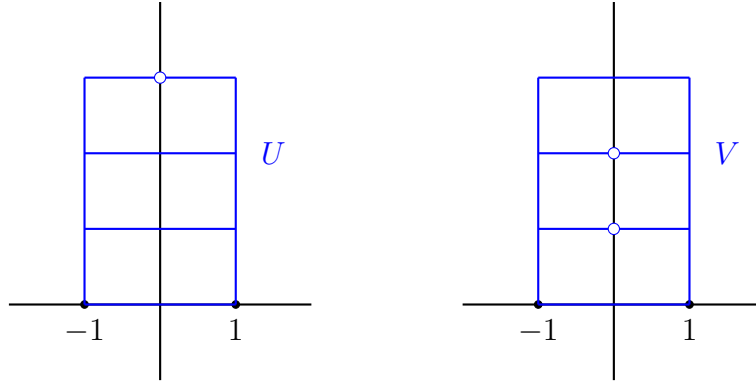


Veámos cuál es su grupo fundamental aplicando de nuevo una inducción sobre n . Para $n = 1$, X es homeomorfo a \mathbb{S}^1 , luego $\pi_1(X) \cong \mathbb{Z}$.

Suponemos que para $n = m$ ocurre que $\pi_1(X_{m+1}) \cong \mathbb{Z} * \overset{(m)}{\dots} * \mathbb{Z}$ y demostramos ahora que $\pi_1(X_{m+1}) \cong \mathbb{Z} * \overset{(m)}{\dots} * \mathbb{Z}$. Considremos los siguientes conjuntos

$$U = X_{m+1} \setminus \{(0, m+1)\}$$

$$V = X_{m+1} \setminus \{(0, 1), \dots, (0, m)\}$$



Es claro que U, V son abiertos arcoconexos y $U \cap V$ es arcoconexo y $X_{m+1} = U \cup V$. Tenemos que U tiene por retracts de deformación a X_m (podemos pensar en llevar el rectángulo superior, que está abierto, a las esquinas del penúltimo rectángulo superior) por lo que

$$\pi_1(U) \cong \mathbb{Z} * \overset{(m)}{\dots} * \mathbb{Z}$$

V tiene por retracts de deformación al rectángulo exterior (ya que todas las barras horizontales excepto la primera y la última están abiertas por lo que se pueden retraer llevándolas a los laterales de forma que quede solo el rectángulo exterior). Dicho rectángulo será

$$(\{-1, 1\} \times [0, m+1]) \cup ([-1, 1] \times \{0, m+1\})$$

que es una circunferencia topológica por lo que

$$\pi_1(V) \cong \mathbb{Z}$$

Si pensamos ahora en la intersección $U \cap V$ podemos ver con un razonamiento similar a los usados para U y V que se puede retraer $U \cap V$ al origen $(0, 0)$, luego

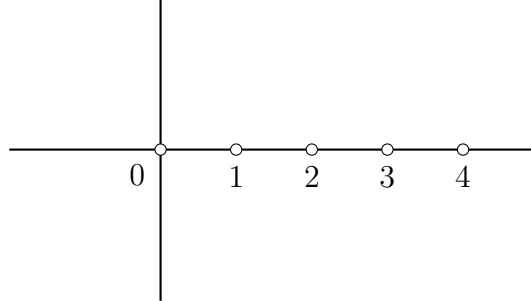
$$\pi_1(U \cap V) \cong \{0\}$$

Por el teorema de Seifert-van Kampen tenemos que

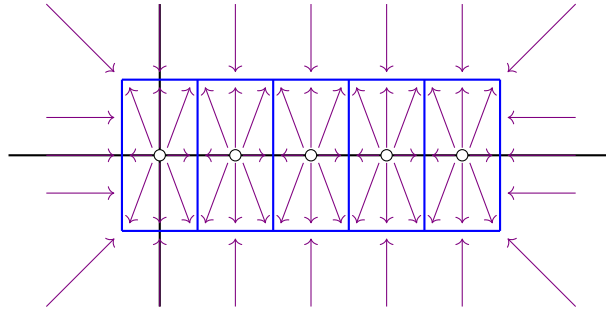
$$\pi_1(X_{m+1}) \cong (\mathbb{Z} * \overset{(m)}{\dots} * \mathbb{Z}) * \mathbb{Z} = \mathbb{Z} * \overset{(m+1)}{\dots} * \mathbb{Z}$$

5. Vamos a considerar el siguiente conjunto

$$Y_n = \mathbb{R}^2 \setminus \{(0, 0), (1, 0), \dots, (n, 0)\}$$



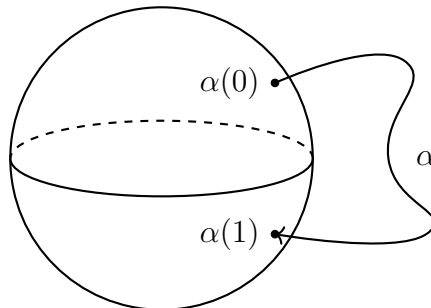
Podemos pensar en un retracto de deformación suyo y fácilmente llegamos a que X_{n+1} del apartado anterior (rotado y colocado adecuadamente) es retracto de deformación viéndolo de la siguiente forma:



Por tanto tenemos que

$$\pi_1(Y_n) \cong \mathbb{Z} * \overset{(n+1)}{\dots} * \mathbb{Z}$$

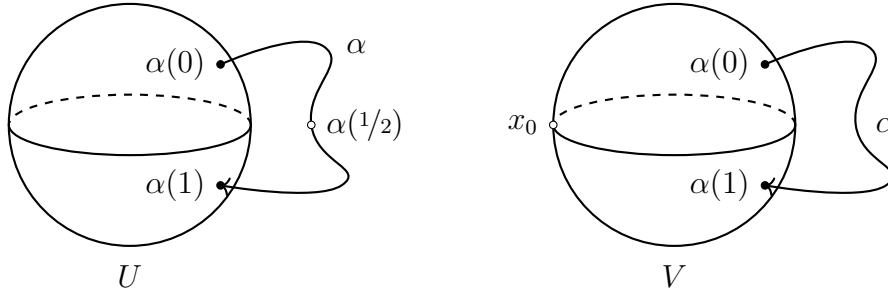
6. Sea $X = \mathbb{S}^2 \cup \text{Im}(\alpha([0, 1])) \subseteq \mathbb{R}^3$ donde $\alpha : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^3$ es un arco inyectivo con $\|\alpha(0)\| = 1 = \|\alpha(1)\|$ y $\|\alpha(t)\| \neq 1$ para $t \in (0, 1)$.



Seleccionamos los siguientes conjuntos

$$U = X \setminus \{\alpha(1/2)\}$$

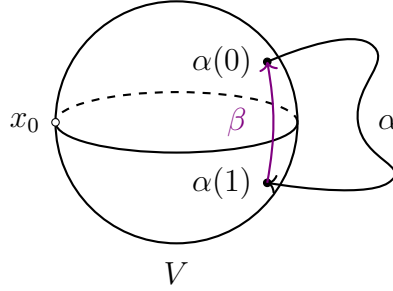
$$V = X \setminus \{x_0\} \text{ con } x_0 \in \mathbb{S}^2 \setminus \{\alpha(0), \alpha(1)\}$$



Es claro que U y V son abiertos con $X = U \cup V$. También lo es que U, V y $U \cap V$ son arcoconexos. Además, se puede ver que \mathbb{S}^2 es retracto de deformación de U (llevando la mitad de α a $\alpha(0)$ y la otra mitad a $\alpha(1)$) por lo que

$$\pi_1(U) \cong \pi_1(\mathbb{S}) \cong \{0\}$$

Consideramos ahora un arco β en \mathbb{S}^2 tal que $\beta(0) = \alpha(1)$ y $\beta(1) = \alpha(0)$



Para V se puede ver que $Im(\alpha * \beta) = Im(\alpha) \cup Im(\beta)$ es retracto de deformación (llevando la esfera a la imagen de β , abriéndola por x_0) y como $Im(\alpha * \beta)$ es una circunferencia topológica tenemos que

$$\pi_1(V) \cong \pi_1(Im(\alpha * \beta)) \cong \pi_1(\mathbb{S}^1) \cong \mathbb{Z}$$

En el caso de la intersección podemos unir ambas ideas y podemos retraer $U \cap V$ a $Im(\beta)$ que es un segmento topológico por lo que

$$\pi_1(U \cap V) \cong \{0\}$$

Por el teorema de Seifert-van Kampen tenemos que

$$\pi_1(X) \cong \mathbb{Z}$$

2. Espacios Recubridores

Observación. A lo largo de este tema supondremos que todos los espacios topológicos son conexos y localmente arcoconexos. En particular estos espacios son siempre arcoconexos.

2.1. Levantamiento de aplicaciones

Observación. Vamos a tener en cuenta que si X es un espacio topológico conexo y localmente arcoconexo, entonces todo abierto suyo cumple que cada componente arcoconexa es abierta.

Demostración. Si O es abierto y A es una componente arcoconexa de O , entonces dado $a \in A$, como X es localmente arcoconexo tendremos que existe un U entorno arcoconexo de a tal que $U \subseteq O$. Como A es el mayor arcoconexo en O que contiene al punto a tendremos que $U \subseteq A$, luego A es abierto. \square

Esto lo vamos a usar para el caso en el que tenemos dada una aplicación recubridora $p : R \rightarrow B$ y un punto $b_0 \in B$. Entonces tendremos que existe un abierto regularmente recubierto O que contiene a b_0 . Restringiéndonos a la componente arcoconexa de O que contiene a b_0 podremos suponer que el entorno regularmente recubierto es abierto y arcoconexo.

Lema 2.1 (Unicidad del levantamiento). Sean $p : R \rightarrow B$ una aplicación recubridora, $f_1, f_2 : X \rightarrow R$ continuas tales que

$$p \circ f_1 = p \circ f_2$$

Si existe un $x_0 \in X$ tal que $f_1(x_0) = f_2(x_0)$, entonces $f_1 = f_2$.

Demostración. Para la demostración solo se necesita que X sea conexo y no necesariamente localmente arcoconexo.

Partimos la siguiente situación

$$\begin{array}{ccc} & & R \\ & \nearrow^{f_1, f_2} & \downarrow p \\ X & \xrightarrow{f=p \circ f_1 = p \circ f_2} & B \end{array}$$

Consideramos el siguiente conjunto

$$Y = \{x \in X : f_1(x) = f_2(x)\}$$

Como X es conexo y tenemos que $Y \neq \emptyset$, ya que por hipótesis $x_0 \in Y$, si probamos que Y es abierto y cerrado tendremos que $Y = X$, es decir, $f_1 = f_2$.

Veamos que Y es abierto. Para ello tomamos $y \in Y$, es decir, un punto y tal que $f_1(y) = f_2(y)$. Elegimos el punto $b = p(f_1(y)) = p(f_2(y))$. Sea O abierto regularmente recubierto y arcoconexo que contiene a b , entonces

$$p^{-1}(O) = \bigcup_{i \in I} A_i$$

donde los A_i son abiertos disjuntos de R y tal que

$$p|_{A_i} : A_i \rightarrow O$$

es un homeomorfismo. Tomamos el abierto A_{i_0} donde se encuentra $f_1(y) = f_2(y)$. Elegimos $V = f_1^{-1}(A_{i_0}) \cap f_2^{-1}(A_{i_0})$. Veamos que $\forall x \in V$ se tiene que $f_1(x) = f_2(x)$. Como $x \in V$ tendremos que $f_1(x), f_2(x) \in A_{i_0}$ por lo que

$$p(f_1(x)) = p(f_2(x)) \stackrel{(*)}{\Rightarrow} f_1(x) = f_2(x) \Rightarrow V \subseteq Y$$

donde en $(*)$ hemos usado que $p|_{A_i}$ es inyectiva. Tenemos finalmente que Y es abierto.

Veamos ahora que Y es cerrado. Para ello demostramos que $X \setminus Y$ es abierto. Tomamos $y \in X \setminus Y$ y vemos que existe un V abierto que contiene al punto y y tal que $V \subseteq X \setminus Y$. Sea $b = p(f_1(y)) = p(f_2(y))$ y de nuevo tomamos O regularmente recubierto que contiene a b . Tendremos

$$p^{-1}(O) = \bigcap_{i \in I} A_i$$

donde los A_i son abiertos disjuntos y tal que

$$p|_{A_i} : A_i \rightarrow O$$

es un homeomorfismo. Tendremos $f_1(y) \in A_{i_1}$ y $f_2(y) \in A_{i_2}$ y además se verificará que $A_{i_1} \neq A_{i_2}$ ya que si se diera la igualdad tendríamos que la aplicación

$$p|_{A_{i_1}} : A_{i_1} \rightarrow O$$

no sería inyectiva. Elegimos ahora $V = f_1^{-1}(A_{i_1}) \cap f_2^{-1}(A_{i_2})$, donde se tiene que $y \in V$. Además se tiene que

$$\begin{aligned} f_1(V) &\subseteq A_{i_1} \\ f_2(V) &\subseteq A_{i_2} \end{aligned}$$

por lo que para cada $x \in V$ se tendrá que $f_1(x) \neq f_2(x)$ ya que $f_1(x) \in A_{i_1}$ y $f_2(x) \in A_{i_2}$. Esto nos dice que $V \subseteq X \setminus Y$, luego Y es cerrado. \square