

Entendiendo la Teoría de Nudos mediante la Simulación y la Informática Gráfica.

2 de septiembre de 2016

Índice

1. Teoría de nudos.	3
1.1. Motivación y primeras definiciones.	3
1.2. Sobre su historia y aplicaciones.	5
1.3. Componiendo nudos.	7
1.4. Equivalencia de nudos: movimientos de Reidemeister.	11
1.5. Algunos invariantes.	15
1.5.1. Número de componentes:	16
1.5.2. Crossing number:	16
1.5.3. Tricolorabilidad:	17
1.5.4. Unknotting number:	21
1.5.5. Polinomio de Alexander:	22
1.6. Notación de nudos.	27
1.6.1. Notación de Dowker:	27
1.6.2. Notación de Gauss:	28
1.6.3. Notación de Conway:	29
1.7. Conexión con distintas teorías.	33
1.7.1. Teoría de grafos:	33
1.7.2. Teoría de trenzas:	35
2. Teoría de trenzas.	36
2.1. Nudos y trenzas.	36
2.1.1. Notación de trenzas:	38

2.1.2.	Equivalencia de trenzas:	39
2.2.	El grupo de las trenzas.	41
2.2.1.	Estructura de grupo no abeliano:	41
2.2.2.	Trenzas equivalentes:	48
2.2.3.	Trenzas Markov-equivalentes:	52
2.3.	Algunos invariantes.	55
2.3.1.	Exponente:	55
2.3.2.	Permutación:	58
2.3.3.	Polinomio de Alexander:	60
2.4.	El problema de las palabras.	63

1. Teoría de nudos.

1.1. Motivación y primeras definiciones.

¿Alguna vez has visto una cuerda con nudos y te has preguntado si podrías deshacerlos sin necesidad de romper la cuerda? ¿Te has planteado si algo tan usual como los nudos pueden estar presentes en áreas esenciales para la vida? Es más, ¿cuál fue el motivo inicial para estudiar dicha teoría de nudos? Quizás te sorprendan las respuestas pero antes de descubrirlo, veamos que se entiende formalmente por un nudo.

Definición:

Un **nudo** es una curva cerrada en \mathbb{R}^3 que no tiene auto-intersecciones.

Veamos algunos ejemplos:

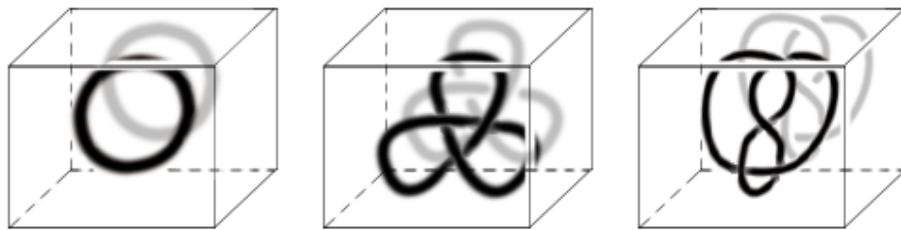


Figura 1: De izquierda a derecha: nudo trivial, nudo trébol, nudo de ocho.

Nos interesa saber cuándo dos nudos son equivalentes: se puede pasar de uno a otro mediante deformaciones. Veámoslo formalmente:

Se dice que dos nudos son equivalentes si existe un homeomorfismo de \mathbb{R}^3 que nos lleve de un nudo al otro.

Podemos representar un nudo en el plano visualizando su proyección. Como hay muchas formas de representar un mismo nudo, podremos tener diferentes proyecciones que representen al mismo nudo. Algunos ejemplos básicos son los siguientes:



Figura 2: Proyecciones del nudo trivial, nudo trébol, nudo de ocho.

Podemos ver en ellos una serie de cruces. En concreto en el nudo trébol tenemos 3 cruces y el nudo de ocho tenemos 4 cruces. El nudo trivial destaca por no tener ningún cruce.

Definición:

Un **enlace** es una o más curvas cerradas disjuntas en \mathbb{R}^3 . Cada una de sus curvas recibe el nombre de componente.

Por ejemplo, el siguiente enlace tiene dos componentes:



Por tanto, podemos ver un nudo como un caso particular de enlace en el que sólo tenemos una componente.

Una de las cuestiones más interesantes en la teoría de nudos es la siguiente: ¿Dada un nudo, o alguna proyección suya, podremos saber si se trata del nudo trivial?. A lo largo de este proyecto trataremos de dar respuesta, en parte, a dicha cuestión.

1.2. Sobre su historia y aplicaciones.

En el siglo XIX, ciertos físicos escoceses se preguntaban por la estructura de los átomos.

Estos científicos tomaron como base la teoría de Descartes, que afirmaba que el *éter* era un fluido que ocupaba todo el espacio y transmitía la luz (*éter lumínico*), para desarrollar su modelo del átomo.

Aunque dichos físicos conocían la existencia de los elementos y que estaban formados por átomos, no conocían la propia estructura de los átomos.

Científicos como Peter Guthrie Tait y Willian Thomson llegaron a la teoría de que los átomos se concebían como vórtices, que podríamos ver como remolinos tubulares, en dicho fluido. Estos vórtices se encontraban anudados y en función del tipo de anudamiento darían lugar a un tipo de elemento u otro.

De este modo se plantearon que los diferentes nudos corresponderían a los diferentes elementos de la naturaleza. De acuerdo con la teoría, si conociésemos todos los nudos posibles, crearíamos la tabla de elementos que reemplazaría la tabla periódica actual.

Para hacernos una idea más clara, para Willian Thomson el nudo trébol podría corresponder con el átomo de helio, el nudo de ocho con el átomo de oxígeno....

Numerosos científicos contribuyeron a dicha teoría intentando crear la tabla de nudos pero a finales de este mismo siglo, Michelson-Morley demostró que el *éter lumínico* no existía y por tanto la teoría de los átomos de vórtice fue descartada.

Tras este hecho, la teoría de nudos perdió su interés hasta que fue objeto de estudio en Topología a principios del siglo XX.

Posteriormente esta rama de la topología de baja dimensión destacó por su gran interés en áreas como:

1. Química: ya hemos visto que la teoría de nudos nace en este área.
2. Biología: se estudia la teoría de nudos en la estructura de ADN.
Conocemos como ácido desoxirribonucleico (ADN) a aquella molécula que se encuentra en el núcleo de nuestras células y, por tanto, que contiene nuestro código genético. Se trata de un elemento esencial para la vida. Es muy

conocida su forma: se puede ver como dos cuerdas enrolladas formando un doble hélice.

Su forma de doble hélice puede encontrarse cerrada por los extremos de forma que nos encontraríamos con la propia forma de un nudo. Las ideas que veremos en este proyecto, junto con algunas más, se pueden aplicar a estas estructuras de ADN.

Además, esta estructura de ADN puede sufrir ciertas alteraciones producidas por la encima topoisomerasa. Lo interesante es que estas alteraciones se corresponden con algunos de los movimientos que veremos para los nudos.

3. Criptografía: La fuerte relación que veremos entre la teoría de nudos y la teoría de trenzas, hace que podamos establecer cierta relación entre la teoría de nudos y la criptografía.

Haciendo uso de la criptografía tratamos de encontrar métodos para que el intercambio de información no sea comprensible por terceras personas.

Algunos métodos para encriptar dicha información están inspirados en la teoría de trenzas. En concreto el problema de la conjugación de trenzas, que trata de estudiar la igualdad de dos trenzas haciendo uso de una tercera trenza, nos permitirá encriptar la información de forma segura.

1.3. Componiendo nudos.

Supongamos que tenemos dos proyecciones J y K de nudos. Podemos definir un nuevo nudo a partir de ellos eliminando un arco de cada una de las proyecciones y conectando los 4 extremos finales de dos en dos mediante otros arcos de modo que no se añadan ni eliminen cruces.

A este nudo resultante le llamaremos **suma conexa** o composición de los dos nudos y se denotará como $J\#K$. A los nudos originales J y K les llamaremos **nudos factores**.

Por ejemplo, consideremos como nudos factores el nudo trébol y el nudo de ocho.

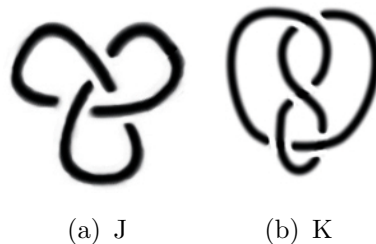


Figura 3: Nudo trébol y nudo de ocho.

Haciendo la suma conexa de ambos nudos obtenemos el nudo composición:

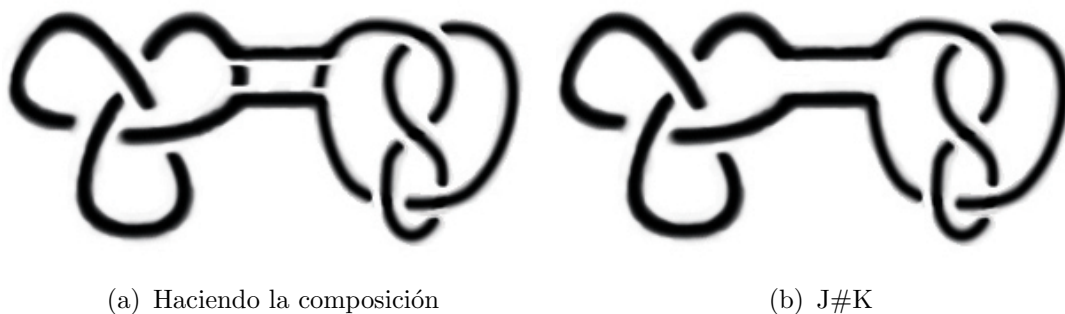


Figura 4: Composición de nudo trébol y nudo de ocho.

El nudo trivial es un elemento identidad para la suma conexa: si hacemos la composición de un nudo cualquiera J con el nudo trivial, vamos a obtener el propio nudo J . Por ejemplo, seguimos considerando J como el nudo trébol y el nudo trivial

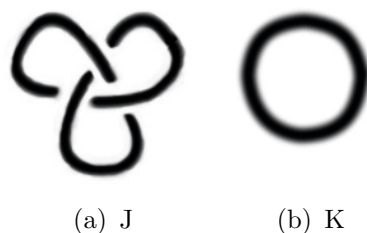


Figura 5: Nudo trébol y nudo trivial.

como K.

Su suma conexa nos seguiría dando el nudo factor J, es decir, el nudo trébol.

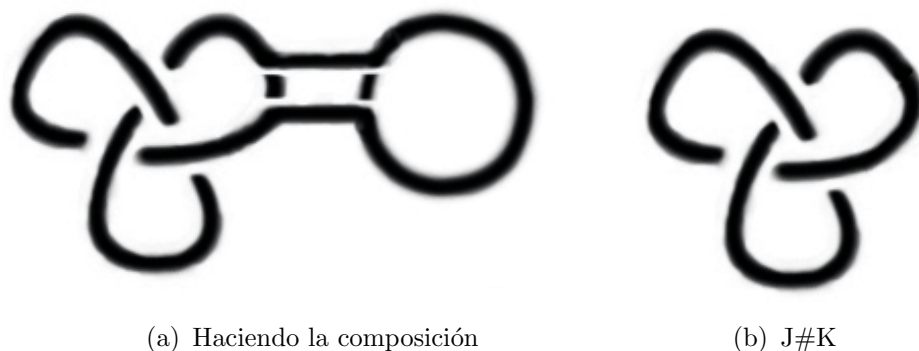


Figura 6: Composición de nudo trébol y nudo trivial.

Definición:

Diremos que un **nudo es primo** si no puede ser expresado como la suma conexa de dos nudos, a menos que uno de ellos sea el nudo trivial.

Definición:

Diremos que un **nudo es compuesto** si no es el nudo trivial ni es un nudo primo.

Por ejemplo, los nudos trébol y nudo de ocho de la figura 3 son nudos primos mientras que el nudo de la figura 4 es un nudo compuesto.

Hay una gran variedad de nudos primos. Cualquier nudo puede ser expresado singularmente como suma conexa de nudos primos. En la siguiente tabla podemos

ver los diferentes nudos primos que tienen menos de 8 cruces.

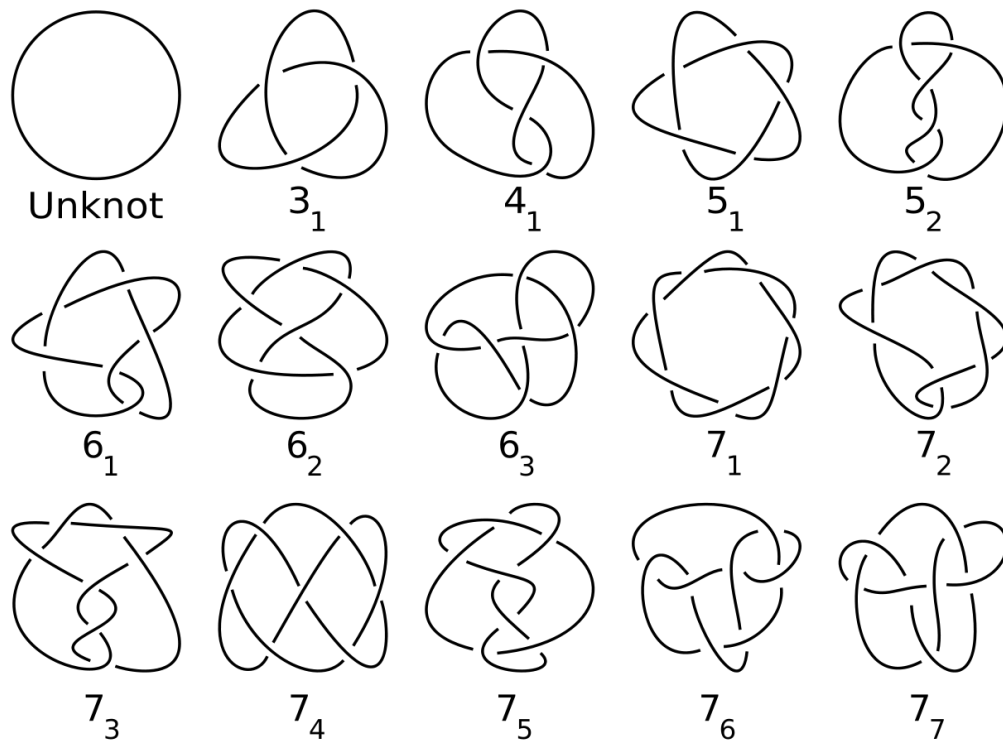


Figura 7: Composición de nudo trébol y nudo trivial.

Finalmente, es importante destacar el hecho de que la elección que hacemos de los arcos que eliminamos de cada uno de los nudos factores afecta al nudo composición. Por tanto, es posible construir dos nudos composición diferentes a partir del mismo par de nudos factores. Veamos esta idea con más detalle, para ello necesitamos:

Definición:

Un nudo orientado es un nudo al que se le ha asignado una orientación, es decir, es un nudo que dispone de una dirección de viaje sobre él mismo. Esta orientación se indica mediante flechas en la proyección.

Definición:

Un nudo es invertible si es equivalente a sí mismo con la orientación opuesta.

El problema de determinar si un nudo cualquiera es o no invertible no es para nada trivial.

Como ejemplo de nuevo invertible nos podemos encontrar el nudo trébol.



Figura 8: Ambas orientaciones del nudo trébol.

Sean los dos nudos factores J y K a los que se asignamos una orientación. Tendremos dos formas posibles de hacer la composición: conectar con las orientaciones emparejadas o no emparejadas.

Todas las composiciones de los nudos cuyas orientaciones emparejan al componer, darán el mismo nudo composición. Todas las composiciones de los nudos cuyas orientaciones no emparejan al componer, también darán el mismo nudo composición. Sin embargo, es posible que la composición de los nudos cuyas orientaciones emparejen no de lugar al mismo nudo que haciendo la composición de los nudos cuyas orientaciones no emparejen. Serán el mismo si uno de los nudos factores es invertible.

Veamos un caso en el que la composición de dos mismos factores, genera nudos diferentes. Consideramos el siguiente nudo:



Figura 9: Nudo factor J y K .

Si componemos el nudo consigo mismo conectando las orientaciones emparejadas y desemparejadas obtenemos nudos que no son equivalentes. Lo podemos

comprobar visualmente con la Figura 10.



Figura 10: Las composiciones no son equivalentes.

1.4. Equivalencia de nudos: movimientos de Reidemeister.

Dos nudos $K1$ y $K2$ serán equivalentes ($K1 \sim K2$) si podemos distorsionar uno de ellos en el otro sin hacer ningún corte.

Para ver si dos proyecciones corresponden a nudos equivalentes, usaremos el concepto de isotopía plana. Más precisamente, definimos una **isotopía plana** de las proyecciones $P1$ y $P2$ de nudos como la aplicación continua $F : \mathbb{R}^2 \times [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}^2$ tal que $F_0 = \text{identidad}$, $F_1(P1) = P2$ y F_t es un homeomorfismo $\forall t$.

Los movimientos de Reidemeister que vamos a ver a continuación nos permiten cambiar la proyección de un nudo de modo que se cambie la relación entre los cruces pero que no cambie el nudo al que representa la proyección. Cada uno de estos movimientos es una isotopía:

Primer movimiento de Reidemeister - R1

En cualquier zona de la proyección nos permite añadir o eliminar un giro tal y como vemos en la figura 11.

Segundo movimiento de Reidemeister - R2.

Nos permite añadir o eliminar dos cruces del nudo como se ve en la figura 12.

Tercer movimiento de Reidemeister - R3.

Nos permite deslizar una hebra del nudo de un lado de un cruce al otro lado del



Figura 11: Primer movimiento Reidemeister.



Figura 12: Segundo movimiento de Reidemeister.

cruce. Veamos la figura 13 para aclarar la idea.



Figura 13: Tercer movimiento de Reidemeister.

Teorema 1.1. Teorema de Reidemeister. Sean $P1$ y $P2$ las proyecciones que representan a dos nudos $K1$ y $K2$, respectivamente. Entonces, $K1 \sim K2$ si, y solo si, $P1$ y $P2$ están conectados por una secuencia finita de movimientos de Reidemeister e isotopías planas.

//AUN PENDIENTE DEMOSTRACIÓN.

Veamos un ejemplo en el que vemos la equivalencia de dos proyecciones, que en un primer momento podrían no parecerse equivalentes:

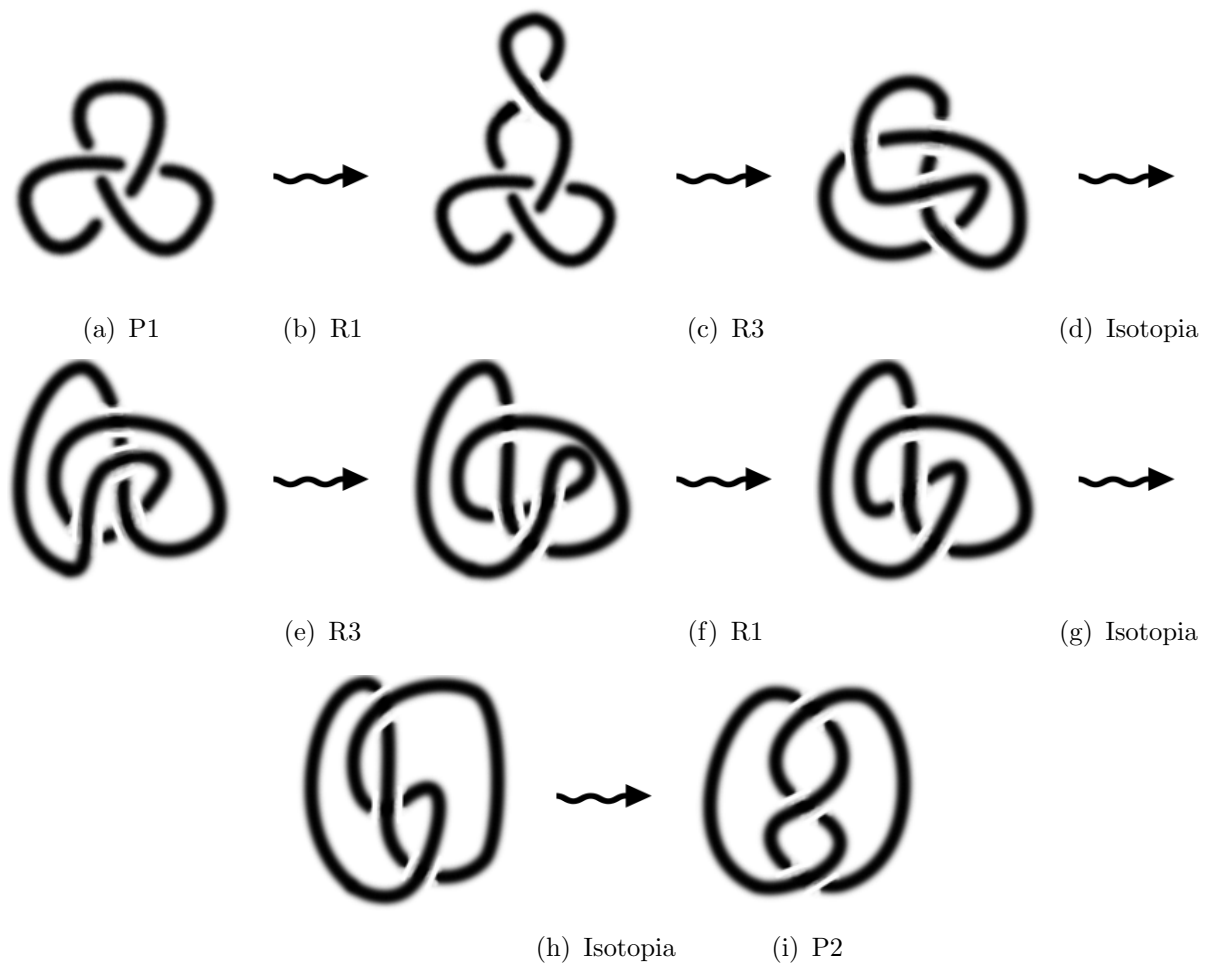


Figura 14: Equivalencia de dos proyecciones de nudos.

Gracias a dicho teorema podremos estudiar si dos proyecciones representan el mismo nudo. Para ello tendremos que encontrar una secuencia de movimientos de Reidemeister que nos lleve de una proyección a la otra. Sin embargo, este proceso

puede no tener el número de movimientos intermedios limitado por lo que no tiene mucho sentido implementarlo.

Aunque este teorema no nos permita ver de una forma cómoda la equivalencia entre dos nudos en la práctica (por la fuerte complejidad) si que nos permite obtener una conclusión esencial:

Si una propiedad de un nudo no cambia al aplicarle cualquiera de estos tres movimientos de Reidemeister, entonces esta propiedad no va a cambiar por muchas deformaciones que se le hagan al nudo. En definitiva, si un nudo cumple cierta propiedad y otro nudo no la cumple, esos nudos no podrán ser equivalentes. Incidiremos en esta idea en la siguiente Sección 1.5.

1.5. Algunos invariantes.

Suponga que cierto día ha ido a trabajar con su portátil fuera de casa y se lo ha dejado olvidado. Cuando te das cuenta, vuelves a buscarlo pero ya no está. Pasan unos días y un amigo te comenta que se ha encontrado un portátil con x número de puertos, procesador y y modelo z .

Es claro que si alguna de esas características no fuese la de tu portátil, tendrías claro que no es el tuyo. Pero resulta que tu portátil tiene exactamente las mismas características. Piensas que tal vez sea tu portátil pero no tienes garantía de que realmente lo sea.

Algo similar, aplicado a nudos, es lo que vamos a tratar de ver en esta sección. ¿Dadas dos proyecciones, podremos decir que representan al mismo nudo? Vamos a tratar de estudiar ciertos invariantes sobre los nudos. Al igual que ocurría con el caso del portátil, si dos proyecciones tienen valores de un invariante distintos podremos decir que no representan al mismo nudo. Sin embargo, si ambos tienen valores de un invariante iguales no podremos saber si se trata del mismo nudo. Tendremos que estudiar otros invariantes de nudos.

¿Y si estudiamos una gran cantidad de invariantes de dos proyecciones y siempre toman los mismos valores? ¿Podremos garantizar que son equivalentes? La respuesta es clara, no. Tendremos que analizar en mayor detalle las proyecciones, pero puede ser que no lleguemos a obtener una conclusión definitiva.

Por tanto, el estudio de invariantes de los nudos nos va a permitir saber si dos nudos pueden ser (destacamos, que no quiere decir que lo sean) o no son equivalentes.

Antes de ver algunos de los invariantes de nudos más conocidos y útiles vamos a dar una definición formal de lo que se conoce como un invariante:

Definición:

Un **invariante** de un nudo (o de un enlace) es una propiedad que no cambia cuando el nudo sufre deformaciones en el espacio.

1.5.1. Número de componentes:

Es uno de los invariantes de enlaces más sencillos que nos podemos encontrar y que ya hemos comentado ligeramente en las secciones anteriores.

Cada componente de un enlace es una curva disjunta del mismo. En la Figura 15 vemos un enlace con dos componentes.



Figura 15: Enlace con dos componentes.

Al aplicarle a un enlace cualquier transformación no se le puede añadir ni eliminar ninguna componente. De modo que este invariante no nos va a permitir comparar nudos, pues todo nudo tiene una sola componente.

1.5.2. Crossing number:

Sea un nudo K . Su **crossing number** es el menor número de cruces que se encuentra en cualquier proyección del nudo. Se denota como $c(K)$.

Esto nos lleva a deducir el nudo K tendrá como mínimo $c(K)$ cruces por muchas transformaciones que se haga a sus proyecciones.

Aunque es un invariante sencillo de visualizar, no es fácil de obtener: puede ser que al estudiar muchas proyecciones de un nudo pensemos que su número de cruces es n , sin embargo pueden existir otras proyecciones del nudo que no conocemos con menor número de cruces. Por este motivo, no vamos a trabajar posteriormente con este invariante.

Para dejarlo más claro vamos a ver un ejemplo.

Consideramos la proyección de la primera figura 16. Podemos pensar que el número de cruces del nudo sería 4 (ver los 4 cruces de la figura a). Sin embargo, esta proyección es equivalente a la proyección que vamos en la figura b, que tiene como

número de cruces el valor 3. Por tanto, el número de cruces del nudo, que es el nudo trébol, es 3.

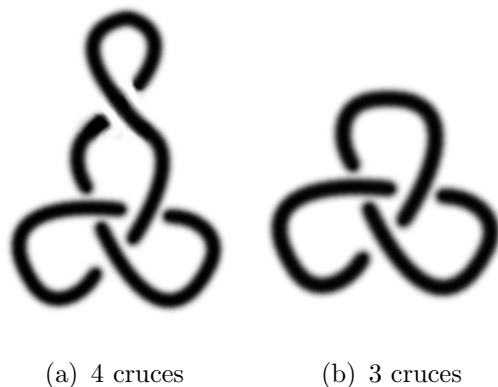


Figura 16: Crossing number del nudo trébol.

1.5.3. Tricolorabilidad:

Para definir este invariante de enlaces, tenemos que conocer unos conceptos previos:

Entendemos por undercrossing y overcrossing a un recorrido en el cruce de la proyección de un nudo que nos lleva por encima o por debajo en el cruce. Veamos la siguiente imagen donde queda representado:

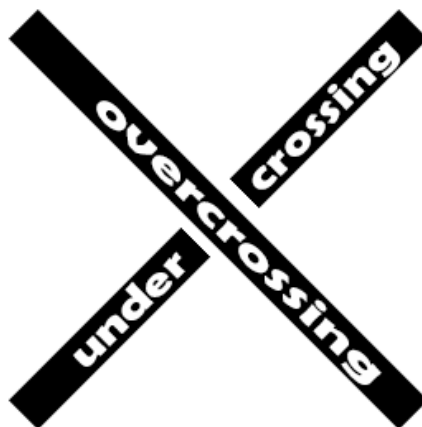


Figura 17: Tipo de cruce.

Definición:

Una **hebra** de una proyección de un enlace es una región de cuerda del enlace que va desde un undercrossing a otro undercrossing atravesando sólo overcrossings.

Definición:

Una proyección de un enlace es tricolorable si cada una de las hebras de la proyección puede ser coloreada con uno de tres colores diferentes de modo que en cada cruce o los 3 colores se junten o se junte un sólo color. En este caso diremos que el enlace es **tricolorable**.

Teorema 1.2. *La tricolorabilidad se perserva mediante movimientos de Reidemeister.*

Demostración. Supongamos que partimos de una proyección de un nudo que es tricolorable y vamos a aplicarle los movimientos de Reidemeister. Tendremos que ver que la proyección final es tricolorable. Podemos centrarnos en la zona de la proyección a la que se le aplica el movimiento. Veamos qué ocurre al aplicar cada movimiento:

R1: En este caso sólo se puede dar que tengamos un sólo color. Al aplicar el movimiento R1 seguiremos utilizando ese mismo color, de modo que la proyección modificada seguirá siendo tricolorable.



Figura 18

R2: Supongamos que el coloreado inicial se ha realizado con un sólo color. Al igual que con el movimiento R1, no tendríamos ninguna dificultad pues al aplicar el movimiento R2 seguiremos coloreando con el mismo color y la proyección seguirá siguiendo tricolorable.

Ahora tenemos otra segunda opción de coloreado en la proyección inicial y es que en ambos cruces posibles usemos los 3 colores posibles. Se puede ver en la

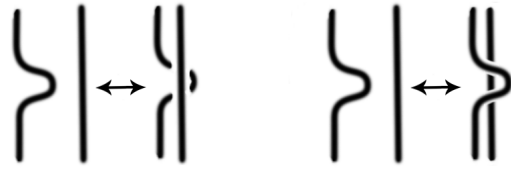


Figura 19

figura 20. Se observa que la proyección sigue siendo tricolorable.

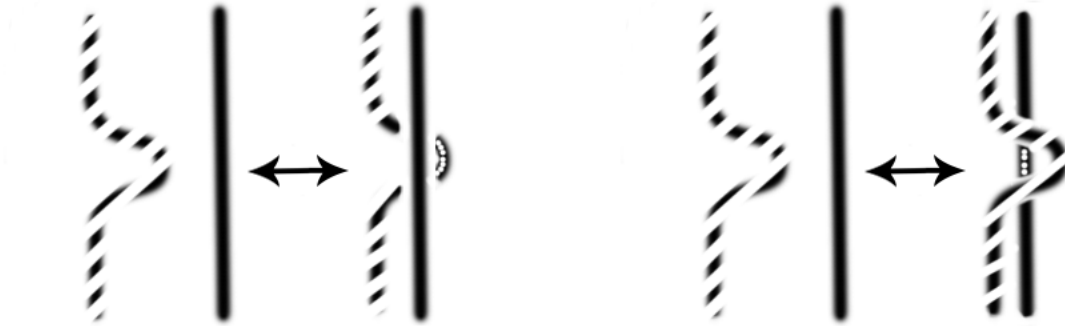


Figura 20

R3: Este movimiento tiene más complejidad pues tenemos 3 cruces posibles. Analizamos todos los casos posibles y vemos que nos podemos reducir a cinco situaciones. Veamos en la figura 21 cómo sería el cambio de color en cada caso para confirmar que las proyecciones resultantes al aplicar el movimiento siguen siendo tricolorables.

Concluimos que si tenemos una proyección tricolorable y aplicamos los movimientos de Reidemeister, la proyección resultante sigue siendo tricolorable. Si la proyección de partida no fuese tricolorable, la proyección resultante tampoco podría ser tricolorable: supongamos que la proyección resultante es tricolorable, por el razonamiento que hemos seguido anteriormente, tendríamos que tener que la proyección inicial sería tricolorable llegando a contradicción.

□

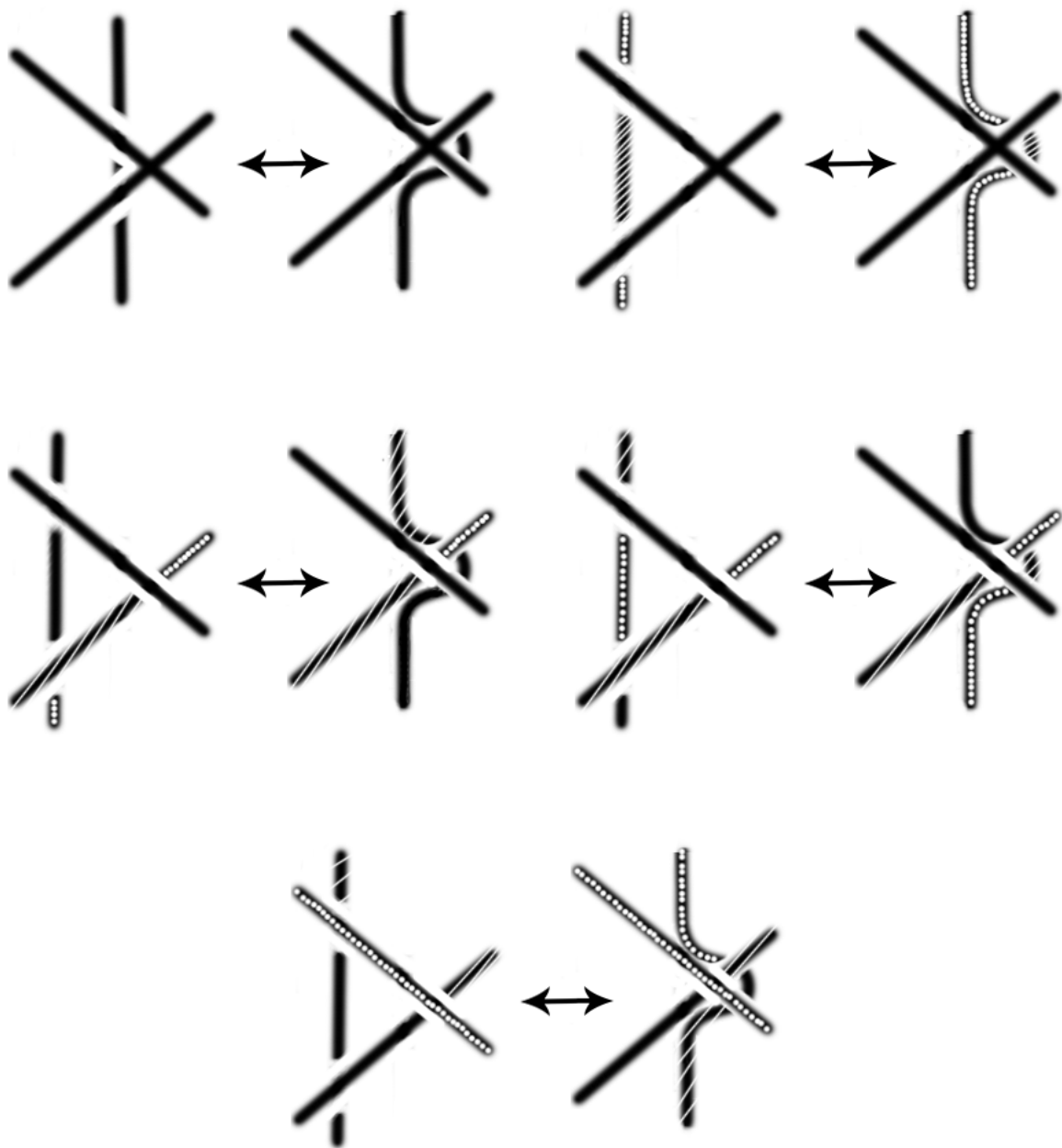


Figura 21

Haciendo uso de este invariante podemos demostrar que el nudo trivial y el nudo trébol no son equivalentes, es decir, son topológicamente distintos. Esto se debe a que el nudo trébol es tricolorable pero el nudo trivial no lo es. Podemos

verlo en la imagen 22:

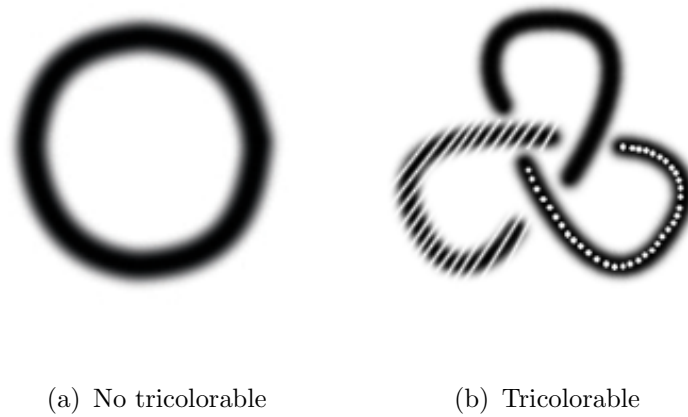


Figura 22: Dos nudos no equivalentes.

Este hecho confirma que existe al menos un nudo distinto del nudo trivial. Es más, todo nudo que sea tricolorable será distinto del nudo trivial.

Sin embargo, este invariante no es muy potente en el sentido de que sólo clasifica los enlaces en tricolorables y no tricolorables y sólo podremos afirmar que dos proyecciones representan a diferentes nudos si una de ellas es tricolorable y la otra no lo es.

1.5.4. Unknotting number:

Supongamos que tenemos la proyección de un nudo no trivial. Modificar la proyección para que un undercrossing pase a ser un overcrossing, o viceversa, no es un movimiento válido pues estamos intersecando la cuerda. Sin embargo, es un movimiento interesante ya que nos llevará al nudo trivial.

Definición: Se define el **número de desanudamiento** de un nudo como el menor número de cambios en los cruces necesarios para desanudarlo, es decir, para llegar al nudo trivial. Se denota como $u(K)$.

Es claro que en un número finito de pasos conseguiremos obtenemos el número de desanudamiento: Recorremos el nudo con cierta orientación y al llegar a un cruce, si no hemos pasado anteriormente por él y es un undercrossing, lo convertimos en overcrossing.

Podemos ver, en la figura 23, que el número uno es el número de desanudamiento para el nudo trébol. El punto de partida lo indicamos con un punto grueso.

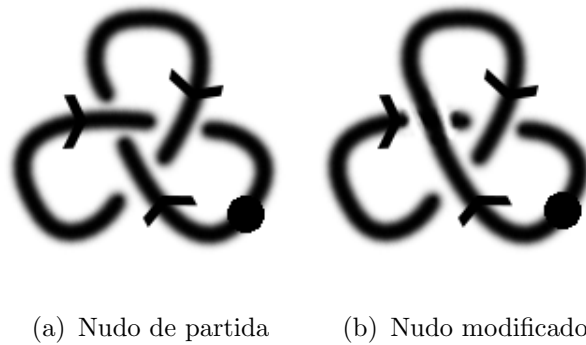


Figura 23: Unknotting number trébol.

1.5.5. Polinomio de Alexander:

Anteriormente hemos visto algunos invariantes geométricos y numéricos que nos pueden ayudar en la tarea de comprobar si dos proyecciones representan al mismo nudo. Ahora vamos a ver un invariante polinómico que estudiaremos con más detalle pues será uno de los puntos fuertes que implementaremos para resolver, en parte, la cuestión.

Se trata de un polinomio, con variable t , para nudos orientados. En 1969, se probó que dicho polinomio puede calcularse computacionalmente haciendo uso de dos reglas:

■ Regla 1:

El polinomio de Alexander del nudo trivial es el polinimio trivial equivalente a 1. Esta regla se representa como $\Delta(\bigcirc) = 1$

Para poder exponer la segunda regla tenemos que conocer antes las siguientes ideas.

Consideramos el enlace orientado de partida. Si nos centramos en uno de sus cruces, podemos crear tres nuevos enlaces orientados exactamente iguales al de partida variando únicamente en este cruce seleccionado. A cada uno de estos nuevos enlaces le establecemos uno de estos nuevos cruces:

1. L_+ : El cruce seleccionado se establece como positivo.
2. L_- : El cruce seleccionado se establece como negativo.
3. L_0 : El cruce seleccionado se elimina.

Podemos ver estos nuevos cruces en la figura 24.

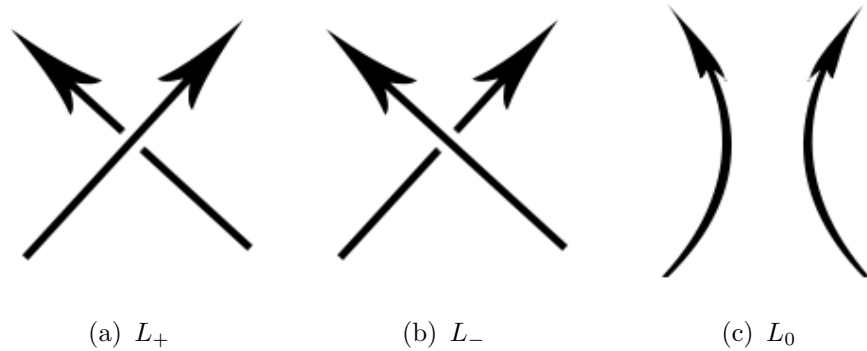


Figura 24: Tipos de cruces.

■ Regla 2:

Esta regla se representa como $\Delta(L_+) - \Delta(L_-) + (t^{\frac{1}{2}} - t^{-\frac{1}{2}}) \Delta(L_0) = 0$

Veamos cómo se calcularía el polinomio de Alexander con el nudo trébol: Como el nudo de partida tiene más de un cruce, tenemos que aplicarle la segunda regla. Consideraremos como cruce a cambiar el que nos encontramos más a la izquierda aunque podríamos considerar cualquier otro cruce. Generamos los tres nuevos enlaces haciendo el cambio en el cruce. Sus proyección se pueden ver en la figura 25. Las llamamos A, B y C por comodidad.

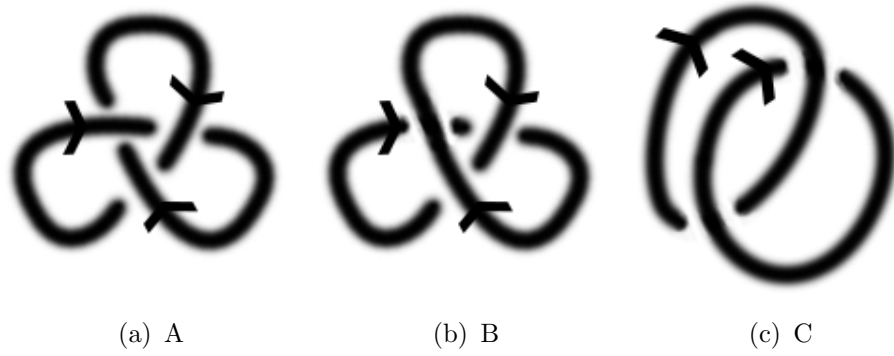


Figura 25

Al aplicar la segunda regla tendremos:

$$\Delta (A) - \Delta (B) + (t^{\frac{1}{2}} - t^{-\frac{1}{2}}) \Delta (C) = 0. \quad (1)$$

Sabemos que $\Delta (B) = \Delta (\bigcirc) = 1$. Luego nos quedaría la ecuación:

$$\Delta (A) + (t^{\frac{1}{2}} - t^{-\frac{1}{2}}) \Delta (C) = 1. \quad (2)$$

Ahora necesitamos conocer el valor de $\Delta (C)$. Al igual que ocurría anteriormente, la proyección de este nuevo nudo tiene más de un cruce de modo que vamos a aplicarle la segunda regla. Esta vez seleccionamos el cruce superior como cruce que se modifica en los nuevos nudos. Obtenemos las proyecciones que vemos en la figura 26, a las que llamaremos D y E.

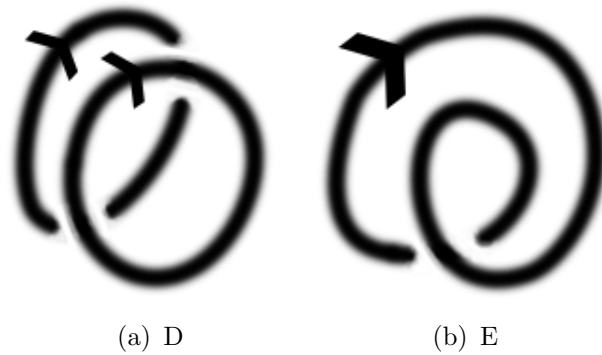


Figura 26

Al aplicar la segunda regla tendremos:

$$\Delta (C) - \Delta (D) + (t^{\frac{1}{2}} - t^{-\frac{1}{2}}) \Delta (E) = 0. \quad (3)$$

Sabemos que $\Delta(E) = \Delta(\bigcirc) = 1$. Además $\Delta(D) = \Delta(\bigcirc \bigcirc) = 0$. Luego nos quedaría la ecuación:

$$\Delta(C) = -(t^{\frac{1}{2}} - t^{-\frac{1}{2}}). \quad (4)$$

Volviendo a la ecuación (2) tendemos:

$$\Delta(A) = (t^{\frac{1}{2}} - t^{-\frac{1}{2}})^2 + 1 = t^{-1} - 1 + t. \quad (5)$$

Luego $t^{-1} - 1 + t$ es el polinomio de Alexander del nudo trébol.

Es importante destacar el hecho de que podemos tener un nudo no trivial que tenga como polinomio de Alexander el polinomio trivial equivalente a 1. Por este motivo, con dicho invariante no podemos distinguir cualquier nudo del nudo trivial.

¿Mediante estas dos reglas podremos obtener siempre el polinomio de Alexander en tiempo finito? La respuesta es afirmativa, veámoslo:

La idea que vamos a seguir en este proceso será reducir las proyecciones, a las que le queremos obtener el polinomio de Alexander, hasta llegar al nudo trivial. Reducir estas proyecciones quiere decir ir modificando sus cruces obteniendo L_+ , L_- y L_0 . Como veíamos en el invariante de la sección 1.5.4, a cualquier proyección le podemos aplicar una secuencia finita de cambios en los cruces de modo que resulte el nudo trivial. Por tanto, este procedimiento tendrá fin en una secuencia finita de pasos.

Al ir considerando los distintos nudos de la proyección, obtendremos dos nuevas proyecciones en cada paso. Con estas nuevas proyecciones podremos formar lo que se denomina **árbol de resolución**. En la figura 27 podemos ver el árbol de resolución del nudo trébol.

Definición:

Se define la **profundidad de un nudo** (o enlace) como el mínimo número de niveles que nos encontramos en los árboles de resolución del nudo.

Esta profundidad del nudo es un invariante que además nos permite medir la complejidad que supondrá el cálculo del polinomio de Alexander.

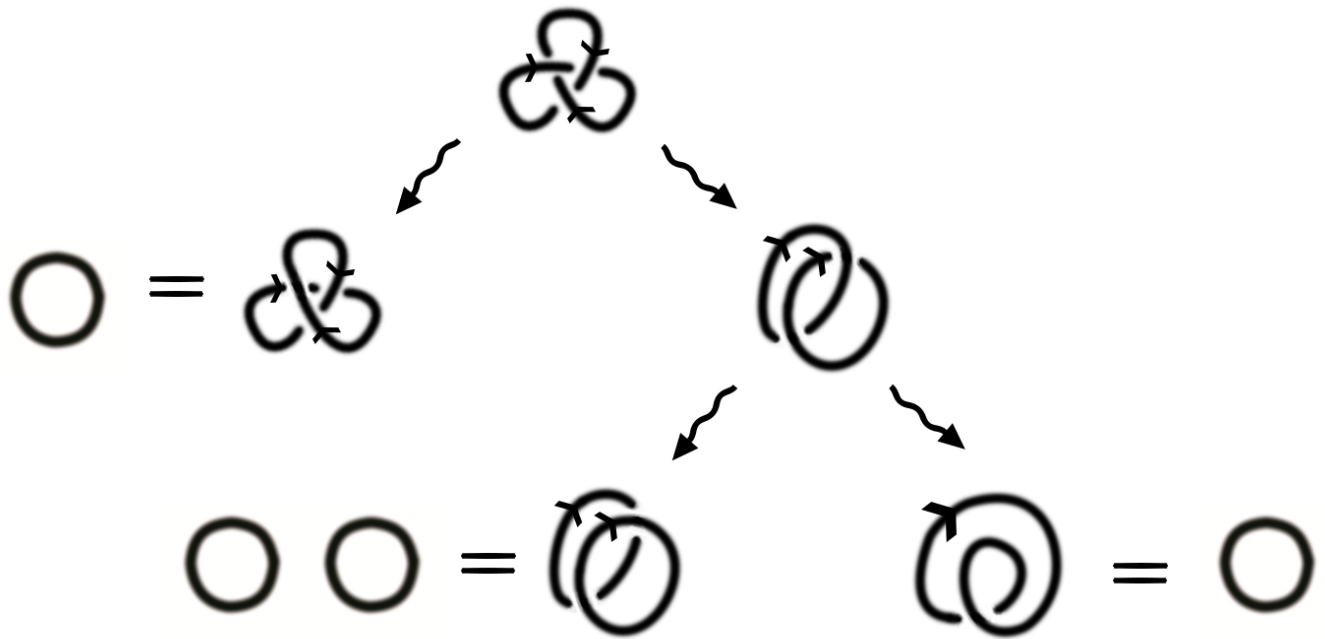


Figura 27: Árbol de resolución del nudo trébol.

El árbol de resolución del nudo trébol que vemos en la figura 27 tiene una profundidad de 2 niveles (la proyección inicial no se cuenta como nivel). Es importante destacar que el único nudo que tiene profundidad de nudo igual a 0 es el nudo trivial.

1.6. Notación de nudos.

Ya sabemos qué son los nudos y algunas nociones esenciales sobre los mismos, pero aún no sabemos asociar una notación concreta a un nudo. En esta sección vamos a ver algunas de las notaciones más comunes de los nudos.

1.6.1. Notación de Dowker:

Se trata de una notación muy sencilla para describir la proyección de un nudo. La notación en sí es una secuencia de números enteros, veamos cómo se obtiene:

Consideramos una orientación en la proyección de n cruces y asignamos el valor 1 al primer cruce que nos encontremos. Continuamos por la proyección y asignamos el valor 2 al siguiente cruce. Vamos repitiendo el proceso hasta pasar por cada cruce un par de veces (una vez por el undercrossing y otra por el overcrossing). Como resultado tendremos un número par y un número impar por cada cruce de la proyección.

Finalmente es necesario asignar los signos a cada uno de estos $2n$ números. Los números pares que correspondan a un overcrossing tendrán signo negativo. Veamos un ejemplo con el nudo trébol:

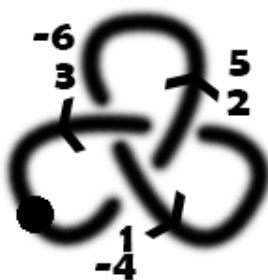


Figura 28: Numeración de cruces-Dowker.

Tendríamos los pares $(1, -4)$, $(3, -6)$ y $(5, 2)$. La notación de Dowker sería $-4 -6 2$ pues nos quedamos únicamente con los números pares en el orden que indican los números impares.

1.6.2. Notación de Gauss:

La notación de Gauss es una notación parecida a la de Dowker. Consideremos de nuevo una orientación en la proyección de n cruces de un nudo.

En este caso cada vez que pasamos por un cruce, tendremos un solo número asignado. De este modo la secuencia de números de la notación se compone de $2n$ elementos con valores desde 1 hasta n , cada uno de ellos repetido dos veces.

Consideramos una orientación en la proyección de n cruces y asignamos el valor 1 al primer cruce que nos encontremos. Realizamos el siguiente proceso: continuamos por la proyección hasta el siguiente cruce. Si ya hemos pasado por él, anotamos el número de cruce que tenga asociado. Si no hemos pasado anteriormente por él, asignamos el siguiente número de cruce.

Finalmente es necesario asignar los signos a cada uno de esos $2n$ números. Los números que representen uncrossings tendrán signo negativo. Veamos la notación de Gauss para el nudo trébol.

Si vamos haciendo el recorrido partiendo desde el punto grueso indicado tendríamos



Figura 29: Numeración de cruces-Gauss.

la secuencia de números: -1 2 -3 1 -2 3. Esta sería su notación de Gauss.

1.6.3. Notación de Conway:

Por último vamos a ver una notación que puede resultar algo más compleja pero que tiene gran uso e interés, sobre todo en la teoría del ADN.

Definición:

Un **enredo** o tangle de una proyección de un enlace es una región de la proyección rodeada por una bola de modo que las dos cuerdas enlazadas de la proyección tocan la bola exactamente en cuatro puntos. A estos puntos los denotaremos como NO, NE, SO y SE.

En la figura 30 vemos un enredo general y un ejemplo particular de un enredo.

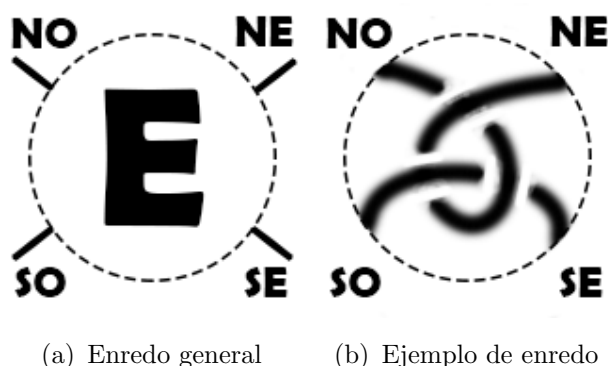


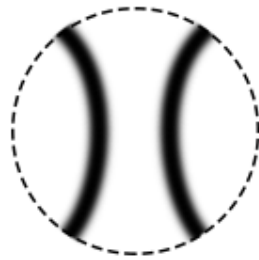
Figura 30

Pero la idea es trabajar con enredos más sencillos como son los que vemos en la figura 31. La notación se corresponde con el número de cruces que tiene el enredo con signo positivo y negativo según se ve en las imágenes.

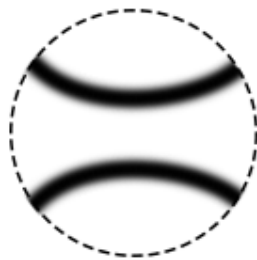
Haciendo uso de estos enredos básicos podemos construir nuevos enredos uniendo, respectivamente, los extremos NE y SE de un enredo con los extremos NO y SO del otro enredo. A esta operación se le conoce como suma de enredos.

Además, disponemos de una operación de multiplicación: reflejaremos el primer enredo y hacemos la operación de suma.

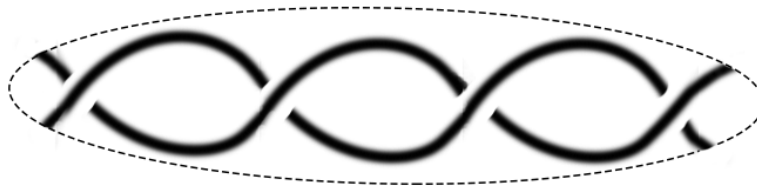
A los enredos contruidos con estas operaciones se les conoce con **enredos racionales**. Podemos ver un esquema básico estas dos operaciones en la imagen 32:



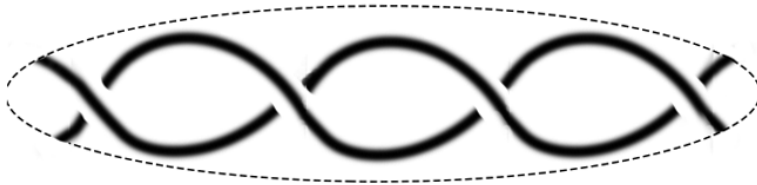
(a) Enredo ∞



(b) Enredo 0



(c) Enredo 4



(d) Enredo -4

Figura 31: Tipos básicos de enredos.



(a) Operacion suma

(b) Operacion multiplicacion

Figura 32: Operaciones con enredos.



Figura 33: Enlace -2 3 2

En la figura 33 podemos ver un ejemplo de un enlace más complejo:

A partir de estos enredos podemos construir proyecciones de nudos enlazando los puntos NO con NE y los puntos SO con SE. La notación del nudo corresponde con la notación que le damos a su enredo.

Nos interesa ver si dos proyecciones de nudos representan al mismo nudo, luego nos interesa ver si dos enredos son equivalentes. Veamos qué quiere decir que sean equivalentes:

Definición:

Diremos que dos enredos son equivalentes si podemos pasar de un enredo al otro mediante los movimientos de Reidemeister, que vimos en la sección 1.4, manteniendo los cuatro extremos fijos en la bola imaginaria.

Ver si dos enredos son equivalentes por definición no es viable de modo que vamos a aplicar otro método: consiste en calcular la fracción continua asociada a cada enredo.

Definición:

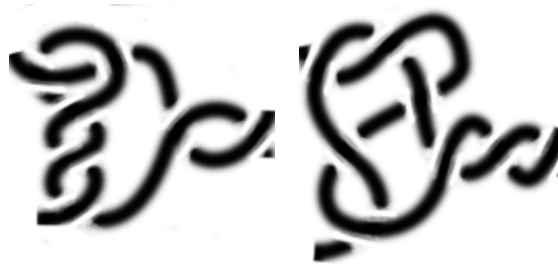
Sea un enredo con notación $a_n \dots a_1 a_0$. Su **fracción continua** es una expresión del tipo:

$$a_0 + \frac{1}{a_1 + \frac{1}{a_2 + \frac{1}{\dots a_n}}} \quad (6)$$

siendo $a_i \in \mathbb{Z}, \forall i = 0, 1, \dots, n$.

Teorema 1.3. *Dos enredos racionales son equivalentes si y solo si sus fracciones continuas toman el mismo valor.*

Veamos un ejemplo. Consideramos los enredos racionales $-2 \ 3 \ 2$ y $3 \ -2 \ 3$ que vemos en la siguiente figura.



(a) Enlace $-2 \ 3 \ 2$

(b) Enlace $3 \ -2 \ 3$

Figura 34: Enlaces equivalentes

A simple vista resulta difícil confirmar que sean equivalentes. Vamos a obtener sus fracciones continuas asociadas:

$-2 \ 3 \ 2$ tiene fracción continua

$$2 + \frac{1}{3 + \frac{1}{-2}} = \frac{12}{5} \quad (7)$$

$3 \ -2 \ 3$ tiene fracción continua

$$3 + \frac{1}{-2 + \frac{1}{3}} = \frac{12}{5} \quad (8)$$

Ambas fracciones continuas son iguales, luego los enredos $-2 \ 3 \ 2$ y $3 \ -2 \ 3$ son equivalentes.

1.7. Conexión con distintas teorías.

1.7.1. Teoría de grafos:

Definición:

Un **grafo** es un par (V, A) de conjuntos, junto con la aplicación

$$\gamma : A \rightarrow \{\{u, v\} / u, v \in V\}$$

Al conjunto de puntos V se le llama conjunto de vértices y al conjunto A le llamaremos conjunto de aristas.

Definición:

Un **grafo plano** G es un grafo que permanece en el plano.

Podemos ver varios ejemplos en la figura 35.

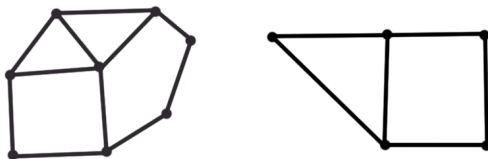


Figura 35: Ejemplos de grafos planos.

A partir de la proyección de un nudo (o de un enlace en general) podemos generar su grafo plano asociado. Para ello tendremos que realizar el siguiente proceso:

Sombreamos las regiones de la proyección que estén de modo que la región externa al nudo se quede sin sombrear y situamos un vértice en cada zona. Unimos los vértices con aristas que pasan por los cruces de la proyección. Ya tendríamos el grafo plano. Además, si el nudo tiene asignada una orientación, podremos asignarle el tipo de cruce (positivo o negativo) a cada arista. Podemos ver un ejemplo en la figura 36.

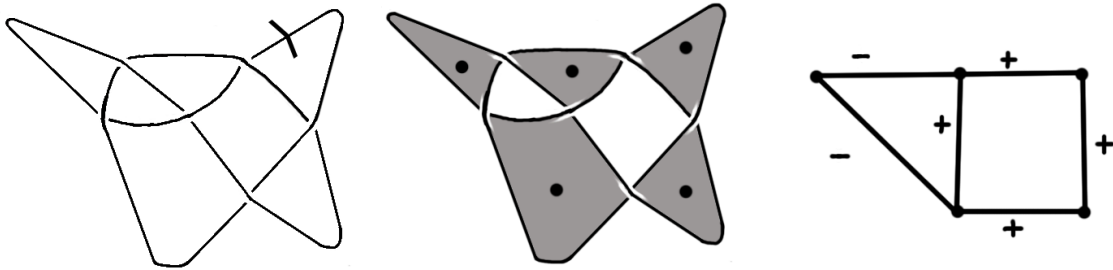


Figura 36: De proyección a grafo

Finalmente, para ver que los problemas de nudos se pueden ver como problemas de grafos y viceversa, vamos a ver el procedimiento inverso. Dado un grafo plano, podremos obtener la proyección del nudo asociado. Veamos cuál sería el procedimiento:

Partiendo del grafo plano con los signos asociados en cada vértice, marcamos cada una de las aristas. Uniremos cada una de estas marcas con aquellas marcas que estén en las aristas que conectan con los vértices de la arista que tiene la marca. A continuación, sombrearemos las zonas que contienen a cada vértice. Finalmente, establecemos los cruces conforme a los signos del grafo plano. Podemos ver un ejemplo en la figura 37.

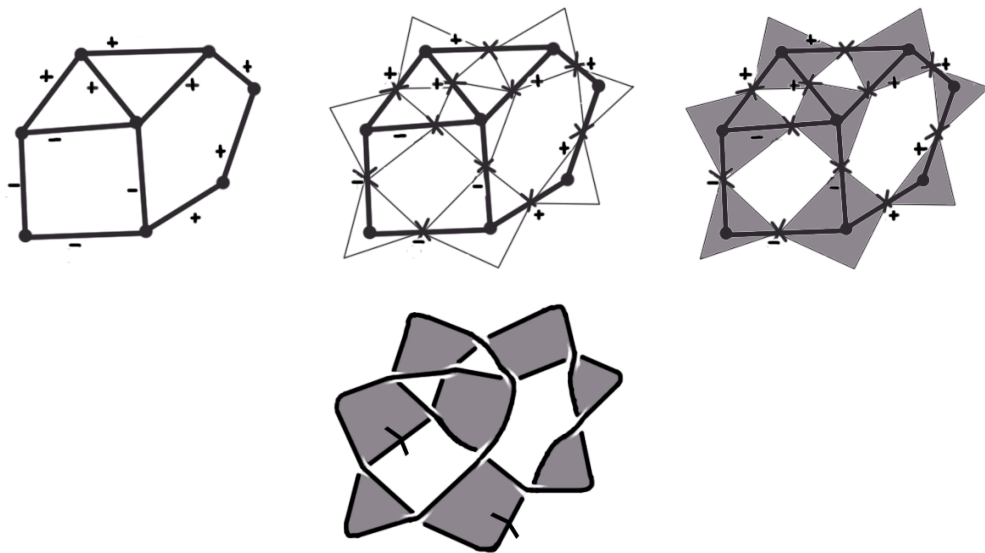


Figura 37: De grafo a proyección.

1.7.2. Teoría de trenzas:

En esta sección vamos a introducir la relación que hay entre teoría de nudos y teoría de trenzas, teoría que estudiaremos con mayor detalle en el próximo tema.

Vamos a ver la idea general de lo que se entiende por el término trenza y veremos una definición más precisa más adelante. Podemos pensar en una trenza como un conjunto de n cadenas que son atadas a un tope imaginario arriba y abajo. Podemos ver algunos ejemplos de trenzas en la figura 38.



Figura 38: Ejemplos de trenzas

A partir de una trenza, podemos obtener su nudo o enlace correspondiente. Simplemente tendremos que unir en orden los topes superiores de las cadenas con los inferiores. Esta trenza cerrada será el nudo al que representa la trenza. Podemos ver algunos ejemplos en la sección 2.1.

Para ver el proceso inverso haremos uso del siguiente teorema:

Teorema 1.4. *Teorema de Alexander.*

Todo nudo puede ser representado como una trenza cerrada.

//PENDIENTE DEMOSTRACIÓN A PARTIR DE POSIBLE IMPLEMENTACIÓN!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

2. Teoría de trenzas.

2.1. Nudos y trenzas.

En la sección 1.7 dimos una idea general de lo que se entiende por una trenza. Veamos su definición más formal:

Definición:

Consideremos el cubo $\mathbb{D} = \{(x, y, z)/0 \leq x, y, z \leq 1\}$ y situamos A_i puntos en su cara superior y B_i puntos en la cara inferior, siendo $i \in \mathbb{N}$. Unimos cada punto A_i con un cierto punto B_k , $i \geq k \in \mathbb{N}$, mediante arcos simples d_i de modo que:

1. d_1, d_2, \dots, d_n sean disjuntos.
2. Los arcos d_i no pueden conectar puntos A_i o B_i entre sí.
3. Al cortar por cualquier plano horizontal, cada arco d_i toca en un sólo punto al plano.

A cada uno de estos arcos simples d_i les llamaremos cadenas y al conjunto de las n -cadenas se le conoce como **trenza**.

Podemos ver algunos ejemplos de trenzas en la figura 39.

Al igual que hacíamos con los nudos, podremos representar una trenza en el plano visualizando su proyección. En la figura 40 se pueden ver las proyección de las trenzas representadas en la figura 39.

Anteriormente vimos que a cada trenza le corresponde un nudo o un enlace particular. Se obtendrá uniendo los extremos superiores con los extremos inferiores de las cadenas en el mismo orden. A este nudo se le conocerá como **trenza cerrada**.

Denotaremos como \mathcal{B}_n al conjunto de todas las trenzas de n cadenas.

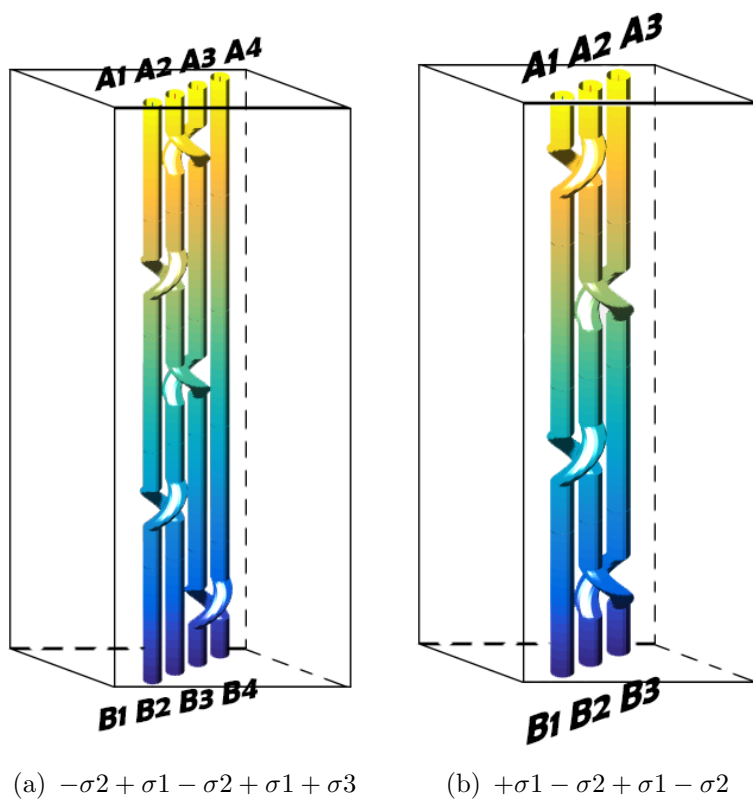


Figura 39: Ejemplos de trenzas



(a) $-\sigma_2 + \sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_1 + \sigma_3$ (b) $+\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_1 - \sigma_2$

Figura 40: Proyección de trenzas

2.1.1. Notación de trenzas:

Para poder trabajar de forma cómoda con las trenzas vamos a darle la siguiente notación:

Sean los segmentos que unen las posiciones i con la $i + 1$ y las posiciones $i + 1$ con la i . Al producir un intercambio de posiciones de estos segmentos se producirá un **cruce**. Este cruce puede realizarse de dos formas:

- El segmento que parte de la posición i cruza por delante al segmento que inicialmente parte en la posición $i + 1$. En este caso el cruce se denota como $-\sigma(i)$ y se conoce como un cruce negativo.
- El segmento que parte de la posición i cruza por detrás al segmento que inicialmente parte en la posición $i + 1$. En este caso el cruce se denota como $+\sigma(i)$ y se conoce como un cruce positivo.

Podemos verlo más claro en la figura 41.

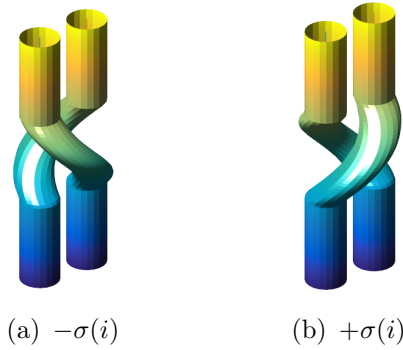


Figura 41: Signo cruce.

La **n-trenza trivial** se define como la n -trenza que no realiza ningún cruce. La denotaremos como 1_n .

Cualquier trenza no trivial tendrá de una serie de cruces. En cada plano horizontal podremos tener como mucho un cruce. Notaremos a la trenza con la secuencia de cruces que tenga, empezando por la parte superior de la trenza. A esta secuencia se le conoce como **palabra** que representa a la trenza. Podemos ver un ejemplo en la figura 42.



Figura 42: Trenza $+\sigma_3 - \sigma_2 + \sigma_4$.

2.1.2. Equivalencia de trenzas:

Intuitivamente diremos que dos trenzas son equivalentes si podemos deformar las cadenas de las trenzas de forma que ambas trenzas se vean iguales. Las trenzas de la figura 43 son equivalentes.



(a) $-\sigma_1 + \sigma_2 - \sigma_2$



(b) $-\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_2$

Figura 43: Trenzas equivalentes.

Definición:

Consideremos la cadena d de una trenza situada en el cubo $\mathbb{D} = \{(x, y, z)/0 \leq x, y, z \leq 1\}$. Sea AB un segmento de dicha cadena y C un punto en el cubo de forma que el triángulo $\triangle ABC$ no corta a ninguna otra cadena de la trenza y sólo toca a la cadena d en el segmento AB . Supongamos además que los segmentos AC y CB cortar a cualquier plano horizontal del cubo en un sólo punto como mucho. Podemos quedarnos con una representación poligonal de las cadenas. Visualizamos estas condiciones en la primera imagen de la figura 44.

Bajo estas condiciones definimos un **movimiento elemental** como la operación Ω que intercambia el segmento AB por los segmentos $AC \cup CB$.

La operación inversa Ω^{-1} que intercambia los segmentos $AC \cup CB$, que formen parte de una cadena, por el segmento AB de forma que el triángulo $\triangle ABC$ no corte a ninguna otra cadena, también es considerada un movimiento elemental. Podemos ver la representación de ambos movimientos en la figura 44.

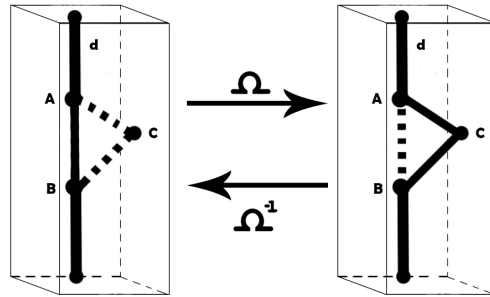


Figura 44

Definición 2.1:

Sean dos trenzas β, β' . Diremos que son **equivalentes** ($\beta \sim \beta'$) si existe una cadena finita de trenzas $\beta = \beta_0, \beta_1, \dots, \beta_m = \beta'$ tal que cada par de trenzas $\beta_i, \beta_{i+1}, i = 0, \dots, m-1$, está relacionado por un movimiento elemental. A esta cadena de trenzas equivalentes la representaremos del siguiente modo:

$$\beta = \beta_0 \rightarrow \beta_1 \rightarrow \dots \rightarrow \beta_m = \beta'$$

Si dos trenzas β, β' no son equivalentes, lo denotaremos como $\beta \not\sim \beta'$.

Denotaremos como \mathbf{B}_n al conjunto de todas las trenzas de n cadenas no equivalentes entre sí. Es decir, $B_n = \mathcal{B}_n / \sim$.

2.2. El grupo de las trenzas.

Hemos visto una definición que nos permite saber cuándo dos trenzas son equivalentes, pero es demasiado general como para poder llevarla a la práctica. En esta sección vamos a hacer un estudio más profundo de la teoría de trenzas. Para ello tenemos que empezar viendo que el conjunto B_n , dotado del producto de trenzas que veremos a continuación, tiene estructura de grupo no abeliano.

2.2.1. Estructura de grupo no abeliano:

Definición 2.2:

Sean las trenzas $\beta, \beta' \in \mathcal{B}_n$. Definimos su **producto** $\beta\beta'$ como la n -trenza que se crea al unir los extremos finales de las cuerdas de β con los extremos iniciales de las cuerdas de β' .

En la figura 45 se puede ver un ejemplo del producto de dos trenzas: la trenza (c) es el producto de las trenzas (a) y (b).

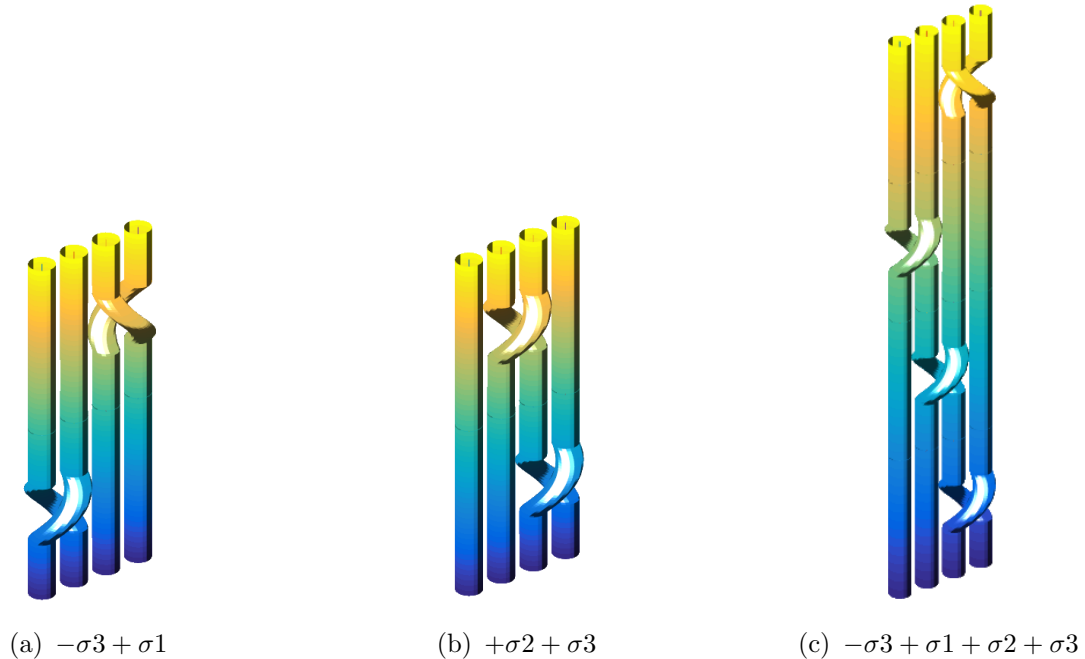


Figura 45

Proposición 2.1. Sean las trenzas $\beta_1, \beta_1', \beta_2, \beta_2' \in \mathcal{B}_n$ verificando las equivalencias $\beta_1 \sim \beta_1'$ y $\beta_2 \sim \beta_2'$. Entonces se verifica la equivalencia $\beta_1\beta_2 \sim \beta_1'\beta_2'$.

Demostración. Por hipótesis tenemos $\beta_1 \sim \beta_1'$ y $\beta_2 \sim \beta_2'$. Por la definición 2.1 sabemos que existen las secuencias de trenzas equivalentes tales que:

$$\beta_1 = \beta_{1_0} \rightarrow \beta_{1_1} \rightarrow \dots \rightarrow \beta_{1_m} = \beta_1'$$

$$\beta_2 = \beta_{2_0} \rightarrow \beta_{2_1} \rightarrow \dots \rightarrow \beta_{2_m} = \beta_2'$$

Mediante la primera igualdad tenemos

$$\beta_1\beta_2 = \beta_{1_0}\beta_2 \rightarrow \beta_{1_1}\beta_2 \rightarrow \dots \rightarrow \beta_{1_m}\beta_2 = \beta_1'\beta_2 \text{ luego } \beta_1\beta_2 \sim \beta_1'\beta_2.$$

Mediante la segunda igualdad tenemos

$$\beta_1'\beta_2 = \beta_1'\beta_{2_0} \rightarrow \beta_1'\beta_{2_1} \rightarrow \dots \rightarrow \beta_1'\beta_{2_m} = \beta_1'\beta_2' \text{ luego } \beta_1'\beta_2 \sim \beta_1'\beta_2'.$$

Por la transitividad de la equivalencia de trenzas se tiene que

$$\beta_1\beta_2 \sim \beta_1'\beta_2 \sim \beta_1'\beta_2'$$

□

Veamos el ejemplo de la figura 46: Las trenzas (a) y (b) son equivalentes luego la parte superior de las trenzas (e) y (f) es equivalente. Las trenzas (c) y (d) son equivalentes, luego la parte inferior de las trenzas (e) y (f) es equivalente. La unión de estas dos partes que mencionamos en las trenzas (e) y (f) no supone la pérdida de equivalencia.

Proposición 2.2. *Producto de trenzas **asociativo**.*

Sean las trenzas $\beta_1, \beta_2, \beta_3 \in \mathcal{B}_n$. Se verifica $(\beta_1\beta_2)\beta_3 \sim \beta_1(\beta_2\beta_3)$.

Demostración. Por la definición 2.2 sabemos que el producto $(\beta_1\beta_2)\beta_3$ une los extremos finales β_1 con los extremos iniciales de β_2 y posteriormente une los extremos finales de β_2 con los extremos iniciales de β_3 .

Por otra parte el producto $\beta_1(\beta_2\beta_3)$ une los extremos finales β_2 con los extremos iniciales de β_3 y posteriormente une los extremos finales de β_1 con los extremos iniciales de β_2 .

En definitiva, es claro que las trenzas $(\beta_1\beta_2)\beta_3$ y $\beta_1(\beta_2\beta_3)$ son equivalentes.

□

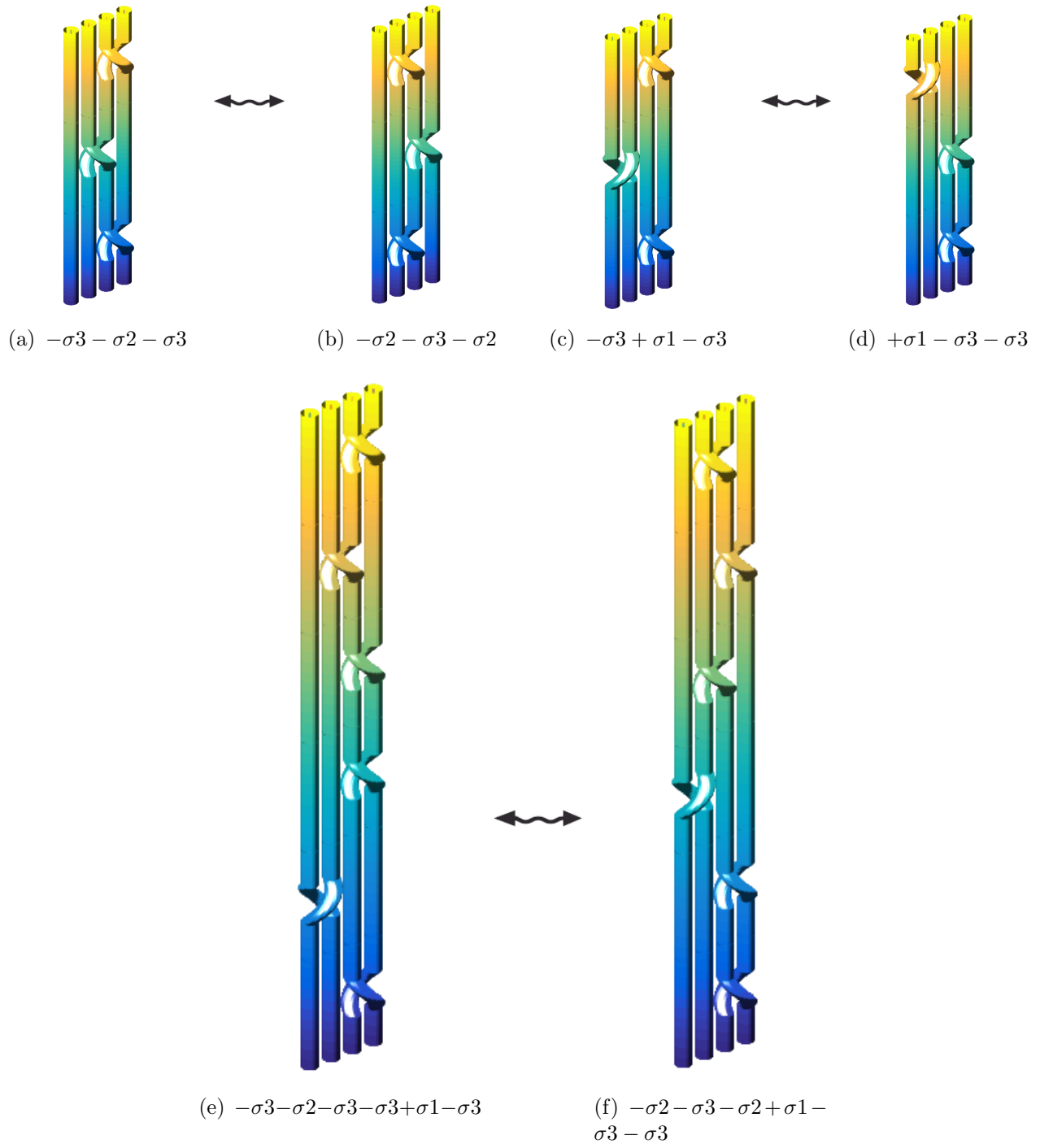


Figura 46

En la figura 47 podemos ver que, efectivamente, el producto de las trenzas dadas β_1, β_2 y β_3 es asociativo: las trenzas (e) y (g) son iguales.



(a) $\beta_1 = -\sigma_3 + \sigma_1$



(b) $\beta_2 = +\sigma_2 + \sigma_3$



(c) $\beta_3 = +\sigma_3$



(d) $\beta_1\beta_2$



(e) $(\beta_1\beta_2)\beta_3$



(f) $\beta_2\beta_3$



(g) $\beta_1(\beta_2\beta_3)$

Figura 47

Proposición 2.3. *Producto de trenzas **no conmutativo**.*

Sean las trenzas $\beta_1, \beta_2 \in \mathcal{B}_n$. No se tiene porqué verificarse la equivalencia $\beta_1\beta_2 \sim \beta_2\beta_1$.

Demostración. Por la definición 2.2 sabemos que:

El producto $\beta_1\beta_2$ une los extremos finales β_1 con los extremos iniciales de β_2 .

El producto $\beta_2\beta_1$ une los extremos finales β_2 con los extremos iniciales de β_1 .

Es claro que las trenzas resultantes no tienen porqué ser equivalentes. \square

Podemos ver un ejemplo de dos trenzas no conmutativas en la figura 48. Efectivamente las trenzas (c) y (e) no son iguales.

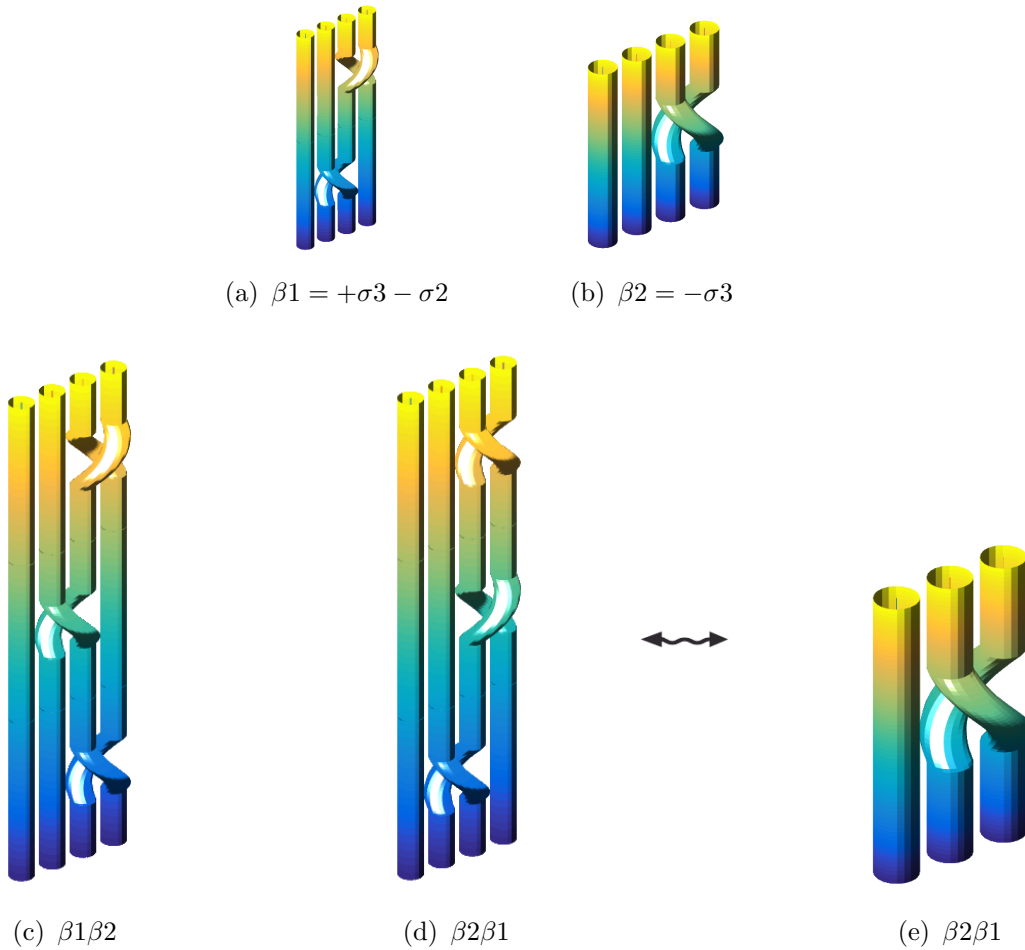


Figura 48

Proposición 2.4. Elemento neutro.

Sea la trenza $\beta \in \mathcal{B}_n$. Se verifica:

$$\beta 1_n \sim \beta \sim 1_n \beta.$$

Demostración. Es claro por la definición de n-trenza trivial 1_n (las cadenas de 1_n no tienen cruces luego no afectan a las cadenas de la trenza β). \square

Proposición 2.5. Elemento inverso.

Sea la trenza $\beta \in \mathcal{B}_n$. Existirá una trenza $\beta^{-1} \in \mathcal{B}_n$ verificando:

$$\beta \beta^{-1} \sim 1_n \sim \beta^{-1} \beta.$$

A esta trenza β^{-1} se le conoce como trenza inversa.

Demostración. Sea la trenza β a la que notamos como $\beta = \pm\sigma(i_1)\pm\sigma(i_2)\dots\pm\sigma(i_m)$, $i = 1, 2, \dots, m$.

Construimos la trenza β' a la que notamos como $\beta' = \mp\sigma(i_m)\dots\mp\sigma(i_2)\mp\sigma(i_1)$. Veamos que esta trenza es la trenza inversa:

Por una parte, $\beta\beta' = \pm\sigma(i_1)\pm\sigma(i_2)\dots\pm\sigma(i_m)\mp\sigma(i_m)\dots\mp\sigma(i_2)\mp\sigma(i_1) = \pm\sigma(i_1)\pm\sigma(i_2)\dots\pm\sigma(i_{m-1})\mp\sigma(i_{m-1})\dots\mp\sigma(i_2)\mp\sigma(i_1) = 1_n$. Luego $\beta\beta' \sim 1_n$.

Por otra parte, $1_n = \mp\sigma(i_m)\dots\mp\sigma(i_2)\mp\sigma(i_1)\pm\sigma(i_1)\pm\sigma(i_2)\dots\pm\sigma(i_m) = \mp\sigma(i_m)\dots\mp\sigma(i_2)\pm\sigma(i_2)\dots\pm\sigma(i_m) = \beta'\beta$. Luego $1_n \sim \beta'\beta$.

Por tanto $\beta' = \beta^{-1}$.

Nota: estas igualdades son ciertas porque $\mp\sigma(i)\pm\sigma(i) = 1_2$. Se puede ver claro en la figura 49.

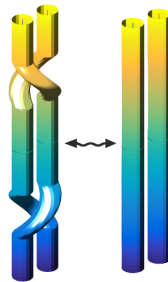


Figura 49

\square

En la figura 50 podemos ver un ejemplo de una trenza (a) y su trenza inversa (b). En la secuencia de trenzas (c)-(f) vemos que efectivamente su producto genera la trenza trivial.

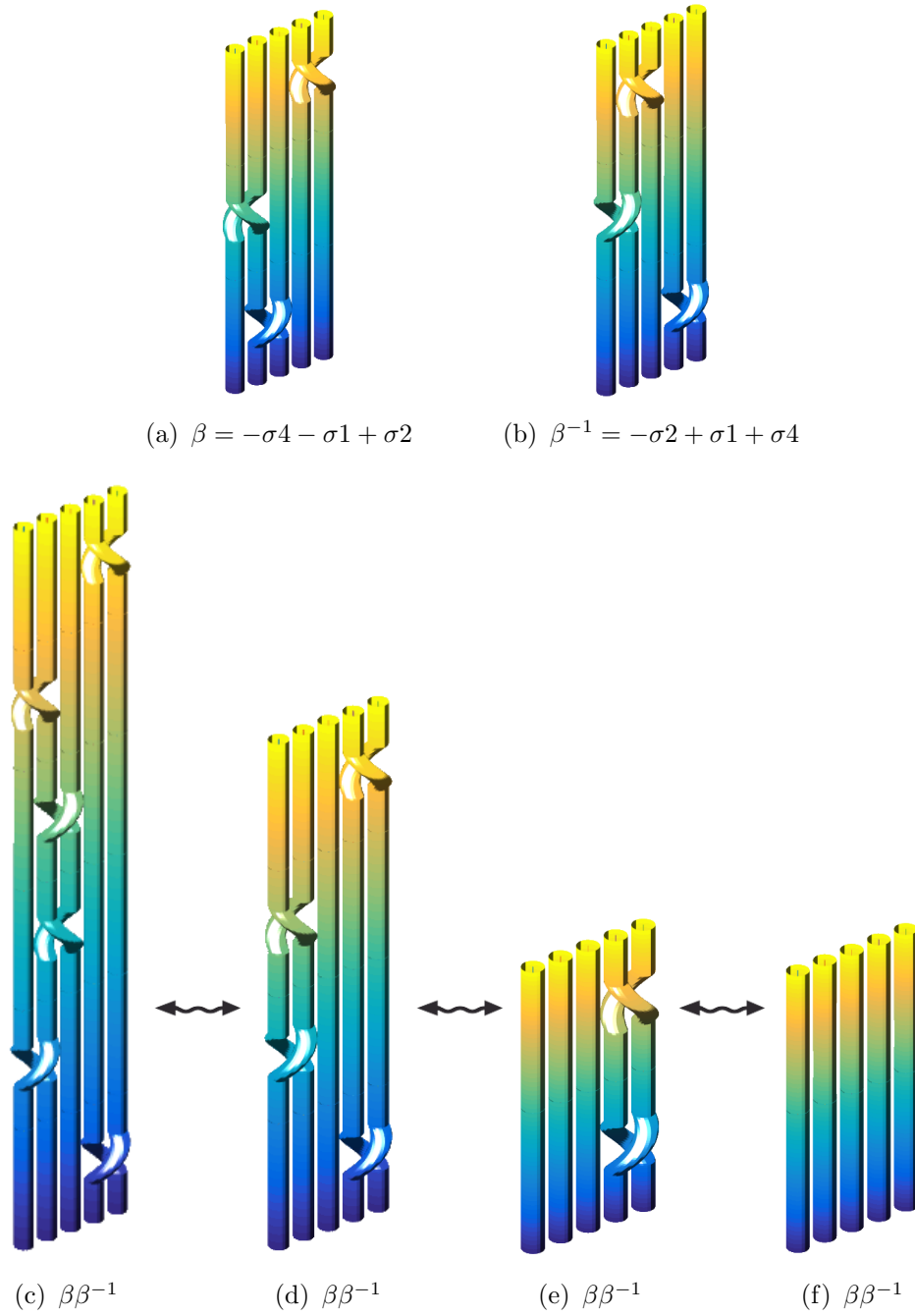


Figura 50

Teorema 2.1. *El conjunto B_n , dotado del producto de trenzas, es un grupo. El grupo se conoce como el grupo de n -trenzas o el **grupo de n -trenzas de Artin**.*

Demostración. Sea la trenza $\beta \in \mathcal{B}_n$, denotamos su clase de equivalencia como $[\beta] \in B_n$. Veamos que B_n es un grupo:

1. Por la proposición 2.1 sabemos que el producto de trenzas está bien definido: Sean $[\beta_1], [\beta_2] \in B_n$, se tiene que $[\beta_1][\beta_2] = [\beta_1\beta_2]$
2. Por la proposición 2.2 sabemos que el producto de trenzas es asociativo.
3. Por la proposición 2.4 sabemos que la n -trenza trivial es el elemento identidad para el producto de trenzas.
4. Por la proposición 2.5 sabemos que el elemento inverso de $[\beta] \in B_n$ es $[\beta^{-1}]$, luego $[\beta]^{-1} = [\beta^{-1}]$.

□

2.2.2. Trenzas equivalentes:

Hemos definido \mathcal{B}_n como el conjunto de todas las n -trenzas, siendo estas n -trenzas representadas por palabras. En concreto si tenemos la trenza $\beta \in \mathcal{B}_n$, que consta de m -cruces, la podremos representar como:

$$\beta = \pm\sigma(i_1) \pm \sigma(i_2) \dots \pm \sigma(i_m)$$

Además, hemos visto que el conjunto $B_n = \mathcal{B}_n/\sim$, de todas las n -trenzas no equivalentes entre sí, tiene estructura de grupo al dotarle del producto de trenzas.

En esta sección vamos a ver cuáles son los movimientos que nos permitirán estudiar la equivalencia de dos n -trenzas y posteriormente vamos a reflejar estos movimientos como el conjunto de relaciones que representan al conjunto B_n .

Para analizar cuándo dos trenzas son equivalentes tendremos que ver cuándo las palabras que representan a dichas trenzas son equivalentes. Dos palabras serán equivalentes si y sólo si podemos pasar de una palabra a otra mediante un secuencia de estos tres movimientos:

1. Primer movimiento - M1:

Podemos añadir o eliminar $+\sigma(i) - \sigma(i)$ o $-\sigma(i) + \sigma(i)$ en cualquier palabra. Es claro que la palabra inicial y la palabra final representan a la misma trenza. Podemos verlo en la figura 51.

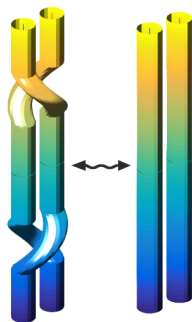


Figura 51: Primer movimiento.

2. Segundo movimiento - M2:

Las palabras $+\sigma(i) + \sigma(i+1) + \sigma(i)$ y $+\sigma(i+1) + \sigma(i) + \sigma(i+1)$ son equivalentes (o bien con cruces negativos). Se puede ver en la figura 52.

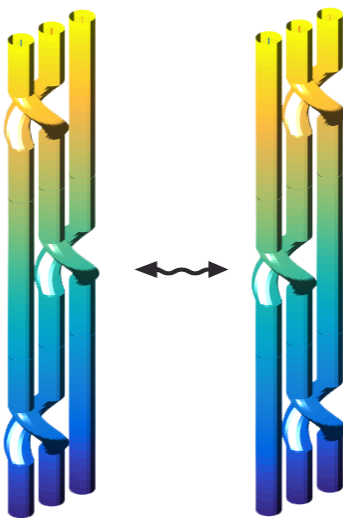


Figura 52: Segundo movimiento.

3. Tercer movimiento - M3:

Las palabras $+\sigma(i) + \sigma(j)$ y $+\sigma(j) + \sigma(i)$ son equivalentes si se verifica que $|i - j| > 1$ (o bien con cruces negativos). Se ve claro en la figura 53.

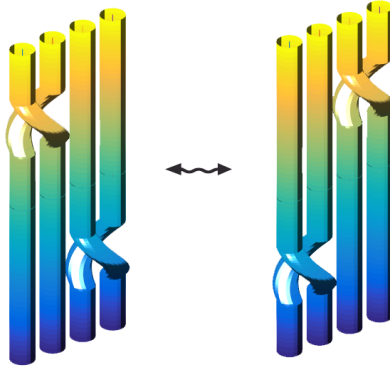


Figura 53: Tercer movimiento.

En la figura 54 podemos ver los movimientos que nos demuestran que dos trenzas dadas más complejas son equivalentes.

Partimos de la trenza $-\sigma_3 + \sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3$ y aplicamos M3 a los dos primeros cruces obteniendo la trenza $+\sigma_1 - \sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_3$ que vemos en la segunda imagen. Por último, aplicamos el movimiento M2 a los tres últimos cruces obteniendo la trenza $+\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3 - \sigma_2$ que vemos en la última imagen.

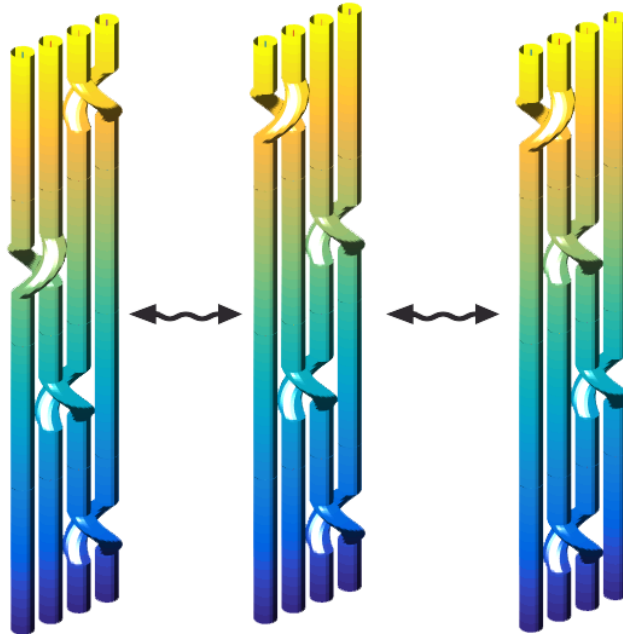


Figura 54: Trenzas equivalentes.

Teorema 2.2. Defino las relaciones:

1. $\sigma(i+1)\sigma(i)\sigma(i+1) = \sigma(i)\sigma(i+1)\sigma(i)$ siendo $i = 2, \dots, n-2$
2. $\sigma(i)\sigma(j) = \sigma(j)\sigma(i)$ siendo $1 \leq i < j \leq n-1, j-i \geq 2$

El grupo B_n tiene la siguiente representación:

$$B_n = \langle \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_{n-1} / \text{ las relaciones 1 y 2 se verifican} \rangle$$

//POSIBLE DEMOSTRACIÓN PENDIENTE. EN A STUDY OF BRAIDS!!!!!!!!!!!!!!

A partir de estas relaciones de equivalencia base podremos construir nuevas relaciones de equivalencia. Vamos a mostrar algunas relaciones de equivalencia que usaremos posteriormente:

1. $\sigma(i+1)\sigma(i) - \sigma(i+1) = -\sigma(i)\sigma(i+1)\sigma(i)$ siendo $i = 2, \dots, n-2$
2. $\sigma(i+1) - \sigma(i) - \sigma(i+1) = -\sigma(i) - \sigma(i+1)\sigma(i)$ siendo $i = 2, \dots, n-2$

En la figura 55 podemos ver que efectivamente son equivalencias ciertas.



Figura 55: Trenzas equivalentes.

2.2.3. Trenzas Markov-equivalentes:

Es claro que si tenemos dos trenzas que son equivalentes, sus trenzas cerradas nos darán nudos que serán equivalentes. Pero...¿puede darse el caso de tener dos trenzas no sean equivalentes y que sus trenzas cerradas sí lo sean? Veamos, mediante el ejemplo de la figura 56 que sí es posible: las trenzas de partida no son equivalentes (tenemos distinto número de cadenas), sin embargo sus trenzas cerradas sí lo son. Lo demostraremos en la figura 59.



Figura 56: Trenzas Markov-equivalentes.

Definición:

Se dice que dos trenzas son **Markov-equivalentes** si sus cierres producen el mismo enlace. En este caso tendremos que los nudos representados por las trenzas son equivalentes.

Teorema 2.3. Teorema de Markov.

Dos trenzas son Markov-equivalentes si y solo si podemos pasar de una trenza a otra mediante una secuencia de las tres operaciones que hemos visto en la subsección 2.2.2 y los movimientos de Markov.

Veamos los movimientos de Markov:

1. Conjugación - Mv1:

Las palabras β y $+\sigma(i)\beta - \sigma(i)$ (o bien $-\sigma(i)\beta + \sigma(i)$) generan trenzas cerradas equivalentes. Se puede ver en la figura 57.

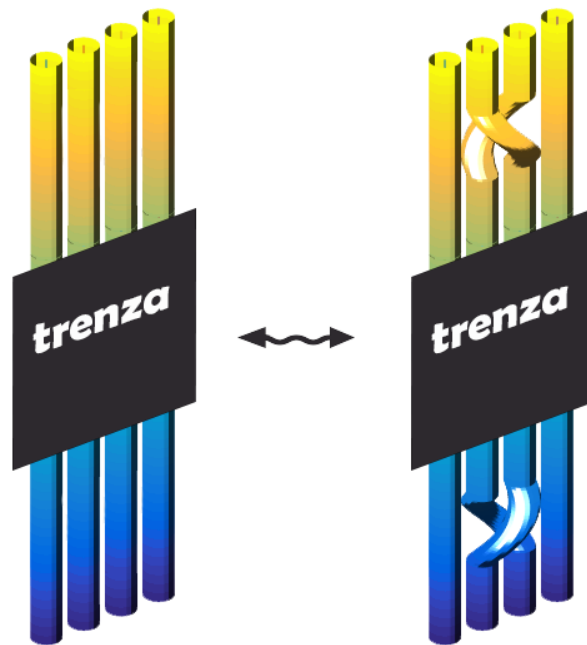


Figura 57: Conjugación Markov.

2. Estabilización - Mv2:

Esta operación nos permite modificar el número de cadenas de las trenzas. Sea la palabra β de n cadenas. Esta palabra genera una trenza cerrada equivalente a $\beta\sigma(n)$ o bien $\sigma(n)\beta$. Se puede ver en la figura 58.

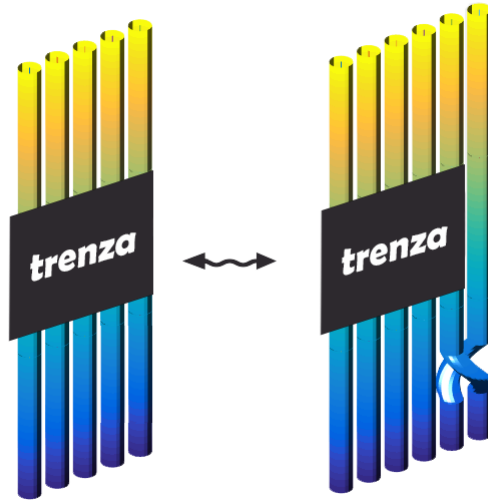


Figura 58: Estabilización Markov.

Podemos ver un ejemplo de dos trenzas Markov-equivalentes en la figura 59.

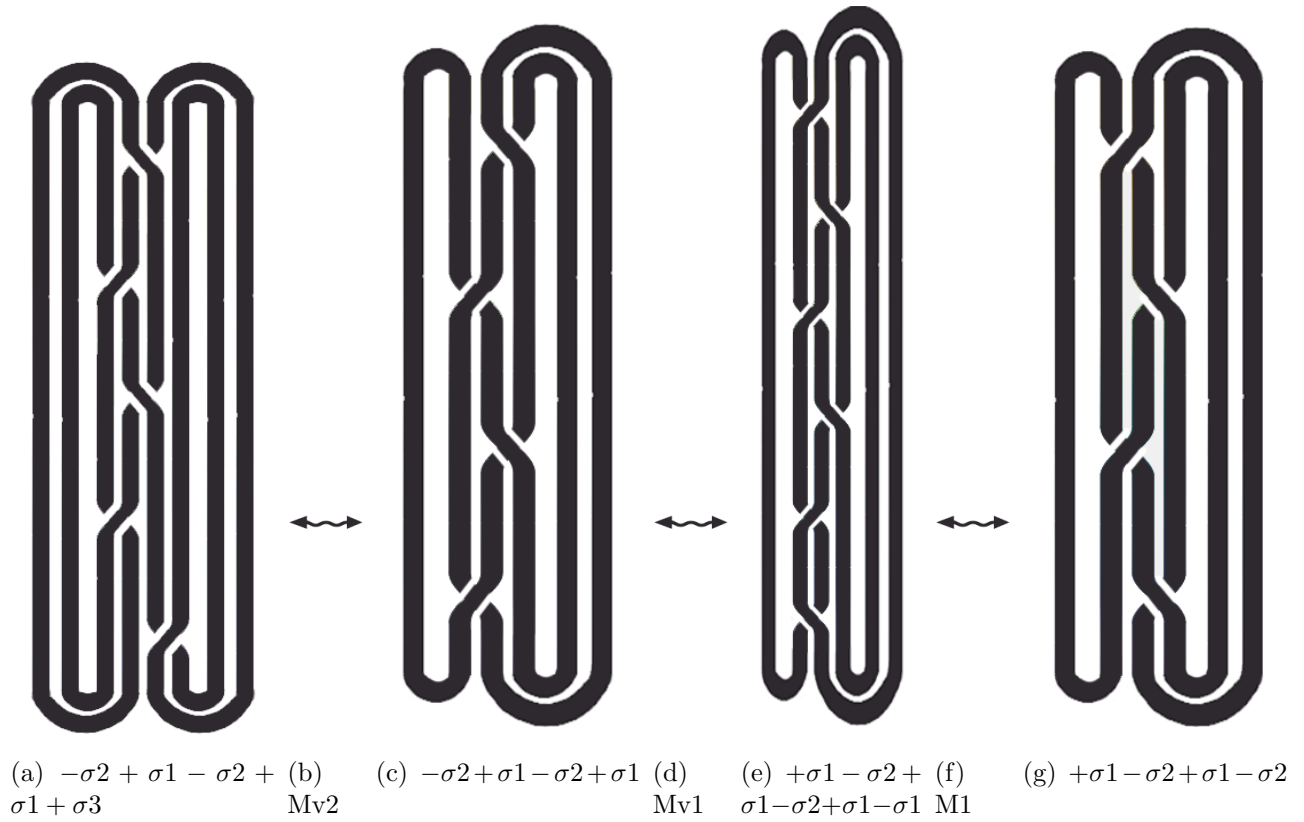


Figura 59: Signo cruce.

2.3. Algunos invariantes.

Ya conocemos cuáles son los movimientos básicos que nos permiten determinar si dos trenzas dadas son equivalentes. Pero al igual que ocurría con los nudos, llevar esta idea a la práctica no es factible.

En esta sección vamos a ver algunos invariantes de trenzas que nos permitirán determinar de forma relativamente rápida si dos trenzas no son equivalentes.

Definición:

Un **invariante** de una trenza es una propiedad que no cambia cuando la trenza sufre deformaciones en el espacio.

Vamos a ver algunos invariantes de trenzas que usaremos posteriormente en la práctica.

2.3.1. Exponente:

Definición:

Sea $\beta \in B_n$ representada como $\beta = e_1\sigma(i_1)e_2\sigma(i_2)\dots e_m\sigma(i_m)$ donde $e_i = \pm 1$. Llamamos **exponente** de β al entero $\sum_{i=1}^m e_i$. Se denotará como $\exp(\beta)$.

El exponente de la trenza $\beta = +\sigma 3 - \sigma 2 - \sigma 3$ de la figura 60 es $+1 - 1 - 1 = -1$.



Figura 60: $+\sigma 3 - \sigma 2 - \sigma 3$

Proposición 2.6. *El exponente de una trenza $\beta \in B_n$ es un invariante.*

Demostración. Veamos que dadas las trenzas $\beta_1, \beta_2 \in B_n$ tales que $\beta_1 \sim \beta_2$, se verifica que $\exp(\beta_1) = \exp(\beta_2)$.

Al ser $\beta_1 \sim \beta_2$, por la definición 2.1, sabemos que existe la secuencia de trenzas equivalentes tal que:

$$\beta_1 = \beta_{1_0} \rightarrow \beta_{1_1} \rightarrow \dots \rightarrow \beta_{1_m} = \beta_2$$

donde cada par de trenzas $\beta_j, \beta_{j+1}, j = 0, \dots, m-1$, está relacionado por un movimiento elemental. Estos movimientos elementales se pueden reducir a las relaciones las 1 y 2 que definen al grupo B_n . Por tanto, para verificar que el exponente de cada par β_j, β_{j+1} es igual, tenemos que ver que estas relaciones de igualdad tienen el mismo exponente:

1. $\sigma(i+1)\sigma(i)\sigma(i+1) = \sigma(i)\sigma(i+1)\sigma(i)$ siendo $i = 2, \dots, n-2$:
 $\exp(+\sigma(i+1) + \sigma(i) + \sigma(i+1)) = \exp(+\sigma(i) + \sigma(i+1) + \sigma(i)).$
2. $\sigma(i)\sigma(j) = \sigma(j)\sigma(i)$ siendo $1 \leq i < j \leq n-1, j-i \geq 2$:
 $\exp(+\sigma(i) + \sigma(j)) = \exp(+\sigma(j) + \sigma(i)).$

□

Haciendo uso de este invariante podremos ver muy fácilmente si dos trenzas dadas tienen distintos exponente y por tanto no son equivalentes. Podemos ver un ejemplo de dos trenzas no equivalentes en la figura 61. La trenza $\beta_1 = +\sigma_2 + \sigma_1 - \sigma_2$ tiene exponente +1, mientras que la trenza $\beta_2 = -\sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_2$ tiene exponente -1.

Si tuviesen igual exponente tendríamos que estudiar otros invariantes para ver si las trenzas son iguales. Por ejemplo, en la figura 62 vemos que las trenzas $\beta_1 = +\sigma_2 + \sigma_2 - \sigma_3$ y $\beta_2 = -\sigma_3 + \sigma_2 + \sigma_1$ tienen el mismo exponente (+1) luego no podremos saber si son o no equivalentes. Al estudiar el invariante de la siguiente sección veremos que no lo son.



(a) $\exp(\beta_1) = +1$



(b) $\exp(\beta_2) = -1$

Figura 61: Trenzas no equivalentes.



(a) $\exp(\beta_1) = +1$



(b) $\exp(\beta_2) = +1$

Figura 62: Trenzas con mismo exponente.

2.3.2. Permutación:

Definición:

Sea $\beta \in B_n$. Consideramos la cadena i que conecta el punto inicial A_i con el punto final B_{j_i} . Llamaremos **permutación** asociada a la trenza a la matriz:

$$\pi(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & \dots & n \\ j_1 & j_2 & \dots & j_n \end{bmatrix}$$

Por simplicidad podremos denotar la permutación de la trenza como el vector $j_1 j_2 \dots j_n$.

La permutación de la trenza $\beta = +\sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_3$ de la figura 63 es

$$\pi(\beta) = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1 & 4 & 3 & 2 \end{bmatrix}$$

o bien directamente la permutación: 1 4 3 2.



Figura 63: $+\sigma_3 - \sigma_2 - \sigma_3$

Proposición 2.7. *La permutación de una trenza $\beta \in B_n$ es un invariante.*

Demostración. Veamos que dadas las trenzas $\beta_1, \beta_2 \in B_n$ tales que $\beta_1 \sim \beta_2$, se verifica que $\pi(\beta_1) = \pi(\beta_2)$.

Por la definición 2.1, existirá la secuencia de trenzas equivalentes tal que:

$$\beta_1 = \beta_{1_0} \rightarrow \beta_{1_1} \rightarrow \dots \rightarrow \beta_{1_m} = \beta_2$$

donde cada par de trenzas $\beta_j, \beta_{j+1}, j = 0, \dots, m-1$, está relacionado por un movimiento elemental. Los movimientos elementales, por definición, no permiten intercambiar los extremos a los que están sujetas las cuerdas de las trenzas. Por este motivo las permutaciones tienen que ser iguales.

□

Haciendo uso de este invariante podemos ver un ejemplo de dos trenzas que no son equivalentes en la figura 64: la trenza $\beta_1 = +\sigma_2 + \sigma_2 - \sigma_3$ tiene permutación 1 2 4 3 mientras que la trenza $\beta_2 = -\sigma_3 + \sigma_2 + \sigma_1$ tiene permutación 2 3 4 1.

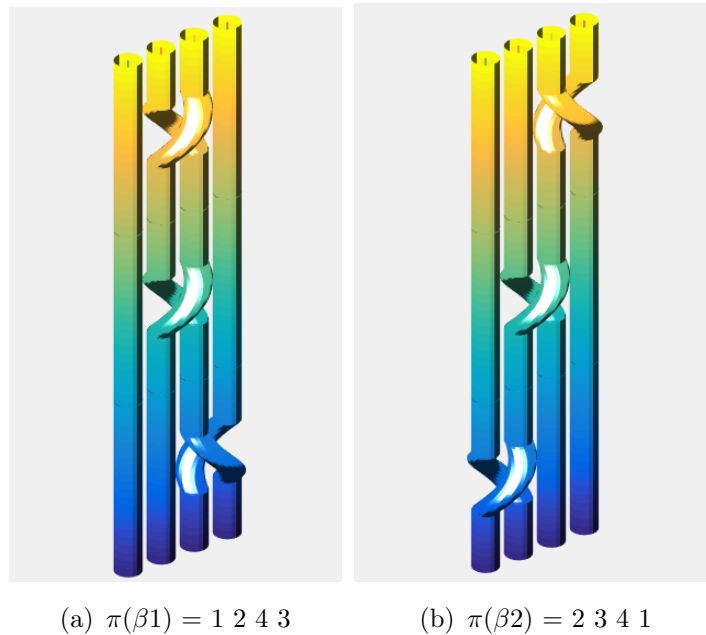


Figura 64: Trenzas con mismo exponente.

2.3.3. Polinomio de Alexander:

En la sección 1.5.5 estudiamos el polinomio de Alexander como un invariante para nudos. Por el teorema 2.3, podremos hacer uso de las trenzas como una base para obtener los invariantes de nudos, en concreto, para estudiar este invariante que implementaremos posteriormente.

Para poder obtener el polinomio de Alexander de una trenza, tendremos que ver unos conceptos previos:

Definición:

Sea la trenza $\beta \in B_n$ representada como $\beta = e_1\sigma(i_1)e_2\sigma(i_2)...e_m\sigma(i_m)$ siendo $e_i = \pm 1$, $1 \leq i_1, i_2, ..., i_k \leq n-1$. Podemos definir el homomorfismo

$$\phi_n : B_n \rightarrow M(n, \mathbb{Z}[t, t^{-1}])$$

$$\phi_n(+\sigma(i)) = \begin{bmatrix} I_{i-1} & & & \\ & 1-t & t & \\ & & 1 & 0 \\ & & & I_{n-i-1} \end{bmatrix}$$

donde I_i representa a la matriz $i \times i$ identidad y los espacios en blanco representan matrices nulas. Llamaremos a esta representación como **representación de Burau**.

//POSIBLE DEMOSTRACION DE HOMOMORFISMO EN STUDY OF BRAIDS!!!!!!

Proposición 2.8. *En las mismas condiciones anteriores tenemos:*

$$\phi_n(-\sigma(i)) = \begin{bmatrix} I_{i-1} & & & \\ & 0 & 1 & \\ & t^{-1} & 1-t^{-1} & \\ & & & I_{n-i-1} \end{bmatrix}$$

Veamos la matriz de Burau de la trenza $\beta \in B_n$ representada como $\beta = +\sigma 2 - \sigma 3$.

Matriz Burau de $+\sigma 2$:

$$\phi_4(+\sigma(2)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-t & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matriz Burau de $-\sigma 3$:

$$\phi_4(-\sigma(3)) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & t^{-1} & 1-t^{-1} \end{bmatrix}$$

Por tanto, la matriz Burau de $\beta = +\sigma 2 - \sigma 3$ es:

$$\phi_4(+\sigma 2 - \sigma 3) = \phi_4(+\sigma 2)\phi_4(-\sigma 3) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-t & 0 & t \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t^{-1} & 1-t^{-1} \end{bmatrix}$$

Teorema 2.4. *Sea la trenza $\beta \in B_n$ con representación de Burau $\phi_n(\beta)$. Supongamos que su trenza cerrada genera al nudo K .*

Se verifica que el polinomio $(\pm t^k)\det[\phi_n(\beta) - I_n]_{1,1}$ es un invariante de K (siendo k un entero). A este polinomio, conocido como polinomio de Alexander, se le denota como $\Delta_k(t)$

//POSIBLE DEMOSTRACION EN A STUDY OF BRAIDS!!!

Gracias a este teorema podemos afirmar que si dos trenzas $\beta 1 \in B_n, \beta 2 \in B_m$ cerradas generan el mismo nudo entonces se verificará la igualdad:

$$\det[\phi_n(\beta 1) - I_n]_{1,1} = \pm t^k \det[\phi_m(\beta 2) - I_m]_{1,1}.$$

De este modo, el polinomio de Alexander de la trenza $\beta 1 = +\sigma 1$ se obtendría del siguiente modo:

Por definición tenemos que

$$\phi_2(\beta 1) = \begin{bmatrix} 1-t & t \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

luego

$$\phi_2(\beta 1) - I_2 = \begin{bmatrix} -t & t \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Finalmente tenemos

$$\det(\phi_2(\beta 1) - I_2)_{1,1} = \det([-1]) = -1$$

.

Veamos ahora el polinomio de Alexander de la trenza más compleja, en concreto de la trenza $\beta 2 = +\sigma 2 - \sigma 3$. Ya sabemos que

$$\phi_4(\beta 2) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1-t & 0 & t \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & t^{-1} & 1-t^{-1} \end{bmatrix}$$

luego

$$\phi_4(\beta 2) - I_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -t & 0 & t \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & t^{-1} & t^{-1} \end{bmatrix}$$

.

Finalmente tenemos

$$\det(\phi_4(\beta 2) - I_n)_{1,1} = \det\left(\begin{bmatrix} -t & 0 & t \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & t^{-1} & t^{-1} \end{bmatrix}\right) = -1 + 1 = 0.$$

.

Por tanto tenemos que las trenzas $\beta 1$ y $\beta 2$ no pueden generar nudos equivalentes pues sus polinomios de Alexander son distintos.

2.4. El problema de las palabras.

En esta sección vamos a tratar de ver si dos trenzas dadas son equivalentes entre sí sin hacer uso de invariantes. Vamos a apoyarnos en la idea que vimos en la sección 2.2:

Consideramos el grupo B_n con la representación que vimos en el teorema 2.2. El problema de ver si dos trenzas dadas son equivalentes se puede ver como el problema de las palabras del grupo B_n .

Problema de las palabras del grupo de las trenzas:

Dadas dos palabras de trenzas $\beta_1, \beta_2 \in B_n$ tratamos de encontrar algún método que nos permita confirmar si son o no equivalentes.

Ver si dos palabras (de trenzas) dadas $\beta_1, \beta_2 \in B_n$ son equivalentes se puede ver cómo el problema de ver si la palabra $\beta_1\beta_2^{-1}$ es equivalente a la palabra vacía (trenza trivial). Por tanto el problema de las palabras se puede reducir a distinguir si una palabra es equivalente o no a la palabra vacía.

En este proyecto vamos a ver un método que nos permite reducir las palabras de trenzas dadas hasta una forma específica que nos permitirá ver si la palabra es igual a la cadena vacía. Para verlo con más detalle necesitamos ver algunas ideas previas.

Definición:

Diremos que una palabra es **libremente reducida** sino contiene palabras de la forma $-\sigma(i) + \sigma(i)$ ni $+\sigma(i) - \sigma(i)$.

Por ejemplo, la palabra $+\sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_1 - \sigma_3$ que representa a la trenza de la figura 65 es libremente reducida pues contiene la palabra $-\sigma_1 + \sigma_1$.

Definición:

Sea la palabra $\beta \in B_n$. Llamaremos **generador principal** de β al generador de β de menor índice.

Por ejemplo, la palabra $+\sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_1 - \sigma_3$ tiene como generador principal el 1, mientras que la palabra $+\sigma_2 - \sigma_4$ tiene como generador principal el número 2.

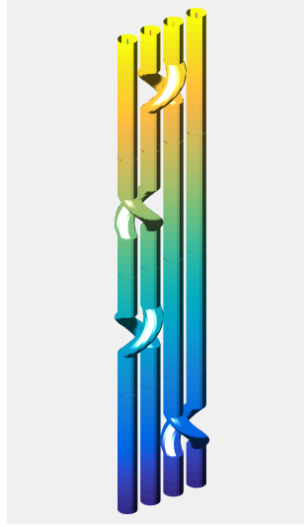


Figura 65: Trenza no libremente reducida.

Definición: Diremos que una palabra $\beta \in B_n$ es **reducida** si se cumple alguna de estas condiciones:

1. β es la palabra cadena vacía.
2. El generador principal de β se presenta sólo positiva o negativamente.

Por ejemplo, la palabra $+\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3 + \sigma_1$ no es reducida pues el generador principal (1) se encuentra en un cruce positivo y en un cruce negativo. La palabra $+\sigma_2 + \sigma_1 - \sigma_3 + \sigma_1$ sí sería reducida pues el generador principal (1) se presenta sólo como cruces positivos.

Proposición 2.9. *Una palabra reducida no vacía no puede ser equivalente a la cadena vacía.*

Por tanto, si encontramos un método para obtener la palabra reducida de una palabra, podremos resolver el problema de las palabras:

Si la palabra β_1 reducida es equivalente a la palabra β_2 , entonces β_2 es equivalente a la cadena vacía si y sólo si β_1 es la cadena vacía.

Proposición 2.10. *Cualquier palabra admite una palabra reducida.*