



TRABAJO FIN DE GRADO.
GRADO EN CIENCIAS MATEMÁTICAS.
DEPARTAMENTO DE MATEMÁTICAS FUNDAMENTALES.

REPRESENTACIONES DE GRUPOS FINITOS.

Alumno:
Angel Blasco Muñoz

Tutor:
Dr. Javier Perez Alvarez

Curso 2018 - 2019

*A Mateo, mi hijo,
por enseñarme que lo imposible solo tarda un poco mas.
A Begoña, mi mujer,
por toda la paciencia que tiene conmigo.
A Angel y Juliana, mis padres,
por todas las oportunidades que me han dado, incluso cuando no las he merecido.*

Agradecimientos.

Quisiera aprovechar este espacio para agradecer a todas aquellas personas que con su profesionalidad, interés, apoyo y ayuda, han hecho posible, de manera directa o indirecta, la redacción de este trabajo.

Así pues, quiero agradecer al equipo docente de la UNED por todo lo que me han enseñado en estos años de estudio, y muy en especial al Dr. Javier Perez Alvarez por su dedicación y sus consejos a la hora de dirigir este trabajo, sin el no hubiese sido posible la realización del mismo. También me gustaria dedicar un agradecimiento al Dr. Jose Maria Leandro (Pepe), con quién he podido fraguar una grata amistad y el cual siempre me ha dado unos valiosos consejos a la hora de enfrentarme a mis estudios.

No puedo dejar pasar la oportunidad de agradecer a mi mujer, Begoña, la paciencia que ha tenido conmigo mientras realizaba el presente trabajo que tantas horas me ha quitado de estar junto a ella en nuestras particulares condiciones familiares.

Evidentemente es obligatorio agradecer a mis padres, Angel y Juliana, que siempre creyeron en mi, incluso en los momentos mas complicados, y nunca dejaron de apoyarme en esta aventura que es estudiar una carrera a distancia. Espero hacer que se sientan orgullosos.

Por último, pero no por ello menos importante, quisiera dar las gracias a una personita que lleva relativamente poco tiempo entre nosotros, pero que sin duda es quien mas tiempo me roba y quien mas feliz me hace, mi hijo, Mateo, el hace que todo esto tenga un sentido y su lucha diaria es fuente de mi inspiración y motivación.

Gracias.

abstract

Este trabajo versa sobre los grupos finitos y sus representaciones. Es importante destacar que en todo el trabajo al referirnos a *grupo* nos referimos a un **conjunto finito** en el cual se definirá una operación que debe cumplir unos condicionantes, al igual que en los grupos algebraicos propiamente dichos. En los grupos finitos se deben cumplir y respetar las mismas propiedades que en los grupos en general.

Se introducirá el concepto de representación de un grupo finito, haciendo especial énfasis en el concepto de irreducibilidad, así como en la teoría de caracteres para la determinación de todas las representaciones irreducibles de un grupo dado. Se definirá a su vez la matriz de caracteres y se calcularán las representaciones irreducibles de algunos grupos finitos.

Índice general

Capítulos	Página
1. Conceptos básicos.	7
1.1. Grupos.	7
1.2. Subgrupos.	8
1.3. Orden de un elemento.	10
1.4. Grupos cíclicos.	11
1.5. Coclasas, índice de un grupo y Teorema de Lagrange.	11
1.6. Subgrupos normales. Grupo cociente.	12
1.6.1. Subgrupos normales.	12
1.6.2. Grupo cociente.	13
1.7. Homomorfismos de grupos.	13
1.7.1. Teorema de Cayley.	14
1.7.2. Factorización de homomorfismos.	15
1.7.3. Teoremas de isomorfía.	15
1.8. Teorema de estructura de los grupos abelianos finitos.	17
1.9. Automorfismos de grupos.	18
1.9.1. Automorfismos interiores.	18
1.9.2. Acción de un grupo sobre un conjunto.	19
1.9.3. Teorema de Sylow.	20
2. Representaciones de grupos.	23
2.1. Representaciones de grupos.	23
2.2. Representaciones equivalentes.	24
2.3. Núcleo de una representación.	26
2.4. Representaciones irreducibles.	26
2.5. FG-módulos.	28
2.5.1. FG-módulos y representaciones equivalentes.	30
2.5.2. FG-submódulos.	31
2.5.3. FG-módulos irreducibles.	31
2.5.4. FG-homomorfismos.	31
2.5.5. Isomorfismos de FG-módulos.	32
2.5.6. Suma directa de FG-módulos.	33
3. Caracteres.	35
3.1. El lema de Schur.	35
3.2. Carácter de una representación.	35
3.3. Relaciones de ortogonalidad de los caracteres y descomposición de la representación regular.	37
3.4. Número de representaciones irreducibles.	39

4. Tabla de caracteres.	43
4.1. Clases de conjugación.	43
4.1.1. Tamaño de las clases de conjugación.	44
4.2. Número de caracteres irreducibles.	45
4.2.1. Funciones de clase.	46
4.3. Tablas de caracteres.	47
4.3.1. Tablas de caracteres.	47
4.3.2. Relaciones de ortogonalidad.	48
4.4. Subgrupos normales y elevación de caracteres.	50
4.4.1. Elevación de caracteres.	51

Introducción.

Hasta el siglo XIX no se tenía claro el concepto de grupo abstracto. Los comienzos llegaron de la mano de Gauss con varios grupos, pero hasta el año 1896 no se introdujo la Teoría de Representaciones en el mundo de las matemáticas. El gran pionero fue *Georg Ferdinand Frobenius*, quién se centró en el estudio de caracteres de grupos finitos (en particular, grupos no abelianos). Otros nombres a destacar son *Hermann Weyl*, *Michael Artin* e *Isaai Schur*, quienes desarrollaron importantes resultados posteriormente.

Durante el siglo XX se siguió profundizando en esta rama algebraica que consiste en la descripción de un grupo (en general, no necesariamente finito) como grupo concreto de transformaciones (o grupo de automorfismos) de un cierto objeto matemático, obteniendo de esta forma resultados muy significativos sobre cuerpos algebraicamente cerrados. Durante este siglo se han obtenido, a su vez, importantes resultados en las relaciones de ortogonalidad en los caracteres de grupos; estos resultados se extendieron a otros objetos y se usaron para definir las representaciones de álgebras definidas sobre un cuerpo k .

Por otra parte, esta teoría se aplica en distintos ámbitos de las matemáticas como por ejemplo en la teoría de códigos de corrección de errores y en combinatoria. Esta teoría también sirve como aplicación en otras ciencias como por ejemplo la cristalografía.

Capítulo 1

Conceptos básicos.

1.1. Grupos.

Comencemos por definir el concepto de grupo:

Definición 1.1.1 *Un grupo es un conjunto no vacío G en el que está definida una operación que toma dos elementos $a, b \in G$ y nos devuelve otro elemento $ab \in G$*

$$G \times G \rightarrow G$$

que escribiremos

$$(a, b) \mapsto ab$$

tal que:

1. $(ab)c = a(bc)$ para cada terna de elementos a, b y c de G . Se dice que la operación es asociativa.

2. Existe un elemento $u \in G$ tal que

$$ua = a = au$$

para todos los elementos a de G . A este elemento le llamaremos elemento neutro o elemento identidad.

3. Para cada elemento $a \in G$ existe $x \in G$ tal que

$$ax = u = xa$$

A este elemento le llamaremos inverso de a .

Diremos que ab es el producto de a por b .

Como ejemplos de grupos (infinitos) podemos citar los conjuntos $\mathbb{Z}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}$ y \mathbb{C} con la suma usual. Otro ejemplo lo podemos tomar escogiendo un conjunto X no vacío compuesto por las aplicaciones $X \rightarrow X$ que son biyectivas, este es un grupo con la operación composición de aplicaciones.

Definición 1.1.2 *Se dice que un grupo G es abeliano si $ab = ba$ para cada par de elementos $a, b \in G$.*

Sobre los grupos abelianos es importante enunciar que todo grupo formado por dos elementos es abeliano, pues si u es el elemento neutro y $a \neq u$ es el elemento restante,

$$uu = uu$$

$$aa = aa$$

$$au = u = ua$$

Definición 1.1.3 El número de elementos de un grupo G se llama orden de G y se denota como $o(G)$. Si $o(G)$ es finito, entonces se dice que G es un grupo finito.

1.2. Subgrupos.

En este apartado se definirá el concepto de subgrupo, y como caracterizarlo, y se enunciarán dos importantes operaciones con subgrupos: la intersección de varios subgrupos y el producto de dos subgrupos.

Definición 1.2.1 Un subconjunto no vacío H de un grupo G es un subgrupo de G si, con la misma operación de G , H es un grupo.

Proposición 1.2.1 Podemos afirmar que un conjunto no vacío H es un subgrupo de G si y solo si:

1. $\forall x, y \in H \rightarrow xy \in H$
2. $1_G \in H$, siendo 1_G el elemento neutro de G
3. $\forall x \in H \rightarrow x^{-1} \in H$

La siguiente proposición puede ser muy útil para caracterizar subgrupos:

Proposición 1.2.2 Un subconjunto no vacío H es un subgrupo de G si y solo si:

$$\forall x, y \in H \rightarrow xy^{-1} \in H$$

Trivialmente se tiene que G es subgrupo de G y 1_G es también subgrupo de G . Estos subgrupos se llaman *impropios*.

Intersección de subgrupos.

Proposición 1.2.3 La intersección de una cantidad cualquiera de subgrupos de G , es otro subgrupo.

Demostración: Sea $\Lambda \neq \emptyset$ un conjunto cualquiera y sea $\{H_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ una familia de subgrupos de G . Entonces,

$$\begin{aligned} x, y \in \bigcap_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda &\rightarrow x, y \in H_\lambda, \forall \lambda \in \Lambda \rightarrow \\ &\rightarrow xy^{-1} \in H_\lambda, \forall \lambda \in \Lambda \rightarrow xy^{-1} \in \bigcap_{\lambda \in \Lambda} H_\lambda. \end{aligned}$$

■

En particular, dados H, K subgrupos de G , se tendrá que $H \cap K$ es subgrupo de G .

Producto de dos subgrupos.

Dados dos subconjuntos no vacíos H y K de un grupo G , el conjunto

$$HK = \{g = xu \mid x \in H, u \in K\}$$

de todos los resultados de operar un elemento de H con otro de K , se nombra como el *producto de H por K* .

Suponiendo que H y K sean subgrupos, en general HK no va a ser otro subgrupo.

Vamos a desarrollar una de las condiciones suficientes para que HK sea subgrupo, y vamos a señalar una propiedad que poseé HK en caso de ser subgrupo.

Proposición 1.2.4 *Si H y K son subgrupos de un grupo abeliano G , se cumple que HK es otro subgrupo de G .*

Demostración: Sea $g = xu$, $h = yv$, donde $x, y \in H$ y $u, v \in K$, dos elementos de HK . Entonces, aplicando las propiedades asociativa y conmutativa, tenemos

$$gh^{-1} = (xu)(yv)^{-1} = (xu)(v^{-1}y^{-1}) = (xy^{-1})(uv^{-1}) \in HK$$

porque, al tratarse de subgrupos, sabemos que

$$x, y \in H \rightarrow xy^{-1} \in H, uv \in K \rightarrow uv^{-1} \in K$$

A su vez, la relación $gh^{-1} \in HK$ implica que HK es subgrupo. ■

Proposición 1.2.5 *Supongamos dos subgrupos H y K de G tales que HK también sea subgrupo. Sea L un tercer subgrupo. Entonces,*

1. $H \cup K \subseteq HK$.
2. $H \cup K \subseteq L \rightarrow HK \subseteq L$.

Demostración:

1. Todo elemento $x \in H$ se puede escribir de la forma xe , con $e \in K$ (recordemos que e representa el elemento neutro), luego $x \in HK$. Igualmente, si $u \in K$ escribiendo $u = eu$ con $e \in H$, vemos que $u \in HK$. Así HK contiene a H y contiene a K , y, por ello,

$$H \cup K \subseteq HK$$

2. Sea L un subgrupo tal que $H \cup K \subseteq L$. Dado un elemento $g \in HK$, se tendrá $g = xu$, donde $x \in H$ y $u \in K$. Como los dos factores pertenecen a $H \cup K$, pertenecerán a L . Siendo L subgrupo, su producto también. Así queda probado que $HK \subseteq L$. ■

Esta proposición significa que si HK es subgrupo, tiene la propiedad de ser el mínimo subgrupo (para la relación de contenido) que contiene a la unión.

Subgrupo generado.

Definición 1.2.2 *Si S es un subconjunto no vacío de un grupo G , el conjunto*

$$\langle S \rangle = \{s_1^{h_1} \dots s_n^{h_n} : n \in \mathbb{N}, s_i \in S, h_i \in \mathbb{Z}, 1 \leq i \leq n\}$$

es un subgrupo de G que contiene a S , llamado subgrupo generado por S .

Un caso particular y muy importante es aquel en que $S = \{a\}$ para algún $a \in G$. Obviamente

$$\langle a \rangle = \{a^k : k \in \mathbb{Z}\}$$

y se le llama *subgrupo generado por a* .

Definición 1.2.3 *Un subconjunto no vacío S de un grupo G se llama sistema generador de G si $G = \langle S \rangle$*

Conjunto conjugado.

Si S es un subconjunto no vacío de un grupo G y $a \in G$, se llama *conjugado de S por a* al conjunto

$$S^a = \{a^{-1}xa : x \in S\}$$

Este conjunto tiene las siguientes propiedades que pasaremos a enunciar:

1. $S \rightarrow S^a : x \mapsto a^{-1}xa$ es biyectiva.
2. $(S^a)^b = S^{ab}$ para cualesquiera $a, b \in G$.
3. $S = S^1$
4. Si S es subgrupo de G , también lo es S^a .
5. Si $S \subset T$, entonces $S^a \subset T^a$.

Normalizador.

Si S es un subconjunto no vacío de un grupo G , se llama *normalizador de S en G* a

$$N_G(S) = \{a \in G : S^a = S\}$$

que es un subgrupo de G .

1.3. Orden de un elemento.

Sea a un elemento de un grupo G de orden g y consideremos la sucesión de potencias de a

$$1_G, a, a^2, a^3, \dots$$

todas las cuales son, por supuesto, elementos de G . Como G es finito, estos elementos no pueden ser todos distintos, debemos tener la igualdad:

$$a^k = a^l$$

en la que podemos suponer $k > l$, por ejemplo. Por consiguiente,

$$a^{k-l} = 1_G$$

lo que demuestra que en un grupo finito cada elemento tiene alguna potencia igual al elemento unidad.

Definición 1.3.1 *El menor entero positivo h , para el que a^h es igual al elemento unidad se llama orden de a .*

De modo que si h es el orden de a entonces $a^h = 1_G$, mientras que $a^x \neq 1_G$ cuando $0 < x < h$. Además, si m es múltiplo de h , es decir $m = hq$, tenemos que:

$$a^m = (a^h)^q = 1_G^q = 1_G$$

Si a es de orden h , entonces $a^m = 1_G$ si y solo si, m es múltiplo de h .

Las siguientes propiedades, referentes al orden de un elemento, son de uso frecuente:

1. El único elemento de orden 1 es el elemento unidad.
2. Los elementos a y a^{-1} tienen siempre el mismo orden.
3. Si $b = p^{-1}ap$, en donde p es un elemento arbitrario, entonces a y b son del mismo orden. Porque

$$b^2 = (p^{-1}ap)(p^{-1}ap) = p^{-1}a1_Gap = p^{-1}a^2p$$

y, en general,

$$b^k = p^{-1}a^k p$$

de modo que si $a^k = 1_G$, tenemos $b^k = p^{-1}1_G p = 1_G$, y reciprocamente.

1.4. Grupos cíclicos.

Definición 1.4.1 Se llama grupo cíclico aquel cuyos elementos pueden expresarse por las potencias de uno solo de ellos.

La forma general de un grupo cíclico G de orden c es:

$$G = \{1_G, a, a^2, \dots, a^{c-1}\}$$

en donde c es el menor entero positivo que verifica la igualdad $a^c = 1_G$. Y decimos que a genera el grupo G o que es el *elemento generador* del grupo.

El orden de un grupo cíclico es igual al del elemento generador; reciprocamente, si un grupo de orden c contiene un elemento también de orden c , entonces el grupo es cíclico. El elemento generador no está unívocamente determinado; en efecto, si e es un entero cualquiera primo con c y $0 < e < c$, entonces se puede tomar a^e por elemento generador del grupo.

Todos los grupos cíclicos del mismo orden son isomorfos como se ve haciendo que se correspondan sus elementos generadores; en efecto, existe un grupo cíclico (abstracto) y solo uno para cada orden dado.

Proposición 1.4.1 Todos los grupos cíclicos son abelianos.

Demostración: Sea $G = \langle a \rangle$ un grupo cíclico. Dados $x, y \in G$, sean $x = a^k$, $y = a^l$, para ciertos enteros k y l . Por lo tanto

$$xy = a^{k+l} = yx$$

lo que implica que G es abeliano. ■

1.5. Coclases, índice de un grupo y Teorema de Lagrange.

Definición 1.5.1 Sea H un subgrupo de un grupo G , y sea x un elemento de G . El subconjunto de G formado por los productos hx ($h \in H$) se denomina *coclase derecha* de H en G y se denota por Hx . La *coclase izquierda* de H en G , xH , se define de forma similar.

Definición 1.5.2 El número de las distintas coclases derechas de H se llama *índice* de H en G y se denota por $[G : H]$

Para cada subconjunto S de G , S^{-1} será el conjunto de los elementos inversos de S :

$$S^{-1} = \{s^{-1} : s \in S\}$$

Si S es una coclase derecha de H , entonces $S = Hx$ para algún $x \in G$. La inversa de un elemento de Hx es $x^{-1}h^{-1}$, así que S^{-1} coincide con la coclase izquierda $x^{-1}H$. De igual forma $(yH)^{-1} = Hy^{-1}$. Así que, el número de las distintas coclases derechas de H es igual al número de las distintas coclases izquierdas de H .

Podríamos haber definido el índice usando las coclases izquierdas de igual manera.

A continuación se enunciarán las propiedades básicas de las coclases:

Sea H un subgrupo de G ,

1. Todo elemento $g \in G$ está contenido en una y solo una coclase de H . Esta coclase es Hg .
2. Dos coclases distintas de H no tienen elementos comunes.
3. El grupo G está particionado en una unión disjunta de coclases de H .
4. La función $h \rightarrow hx$ tiene una correspondencia uno-a-uno entre los elementos del conjunto H y los de la coclase Hx . Al tratarse H de un subgrupo finito cada coclase de H tiene el mismo número de elementos que H .
5. Dos elementos $x, y \in G$ están contenidos en la misma coclase de H si y solo si $xy^{-1} \in H$.

Pasemos ahora a enunciar y demostrar el Teorema de Lagrange:

Teorema 1.5.1 (Teorema de Lagrange) Sean G un grupo y H un subgrupo de G , tenemos que $o(G) = o(H) \cdot [G : H]$. En particular, el orden de H y el índice de H en G dividen al orden de G .

Demostracion: Utilizando las propiedades básicas de las coclases, en concreto por 3) y 4), el conjunto G está particionado en una unión disjunta de $[G : H]$ conjuntos que contienen, cada uno, $o(H)$ elementos. Contando el número de elementos en G , obtenemos que:

$$o(G) = o(H) \cdot [G : H].$$

■

El teorema de Lagrange implica los siguientes corolarios que no demostraremos:

Corolario 1.5.1 El orden de un elemento de un grupo finito G divide a $o(G)$.

Corolario 1.5.2 Si el orden de un grupo finito G es n , entonces todo elemento $x \in G$ satisface $x^n = 1_G$.

1.6. Subgrupos normales. Grupo cociente.

1.6.1. Subgrupos normales.

Dado un grupo G y un subgrupo H de G , formaremos un nuevo grupo cuyos elementos son las clases laterales izquierdas de H en G . Estos subgrupos los denominaremos *subgrupos normales* y su definición es:

Definición 1.6.1 Sea G un grupo. Un subgrupo H de G es un subgrupo normal si

$$ghg^{-1} \in H, \forall g \in G, h \in H$$

Si H es un subgrupo normal de G se representa como $H \triangleleft G$.

Teorema 1.6.1 Si G es un grupo abeliano y H es un subgrupo de G , entonces H es un subgrupo normal de G .

Demostración: Como G es abeliano, $ghg^{-1} = hgg^{-1} = h \in H$ para todo $g \in G$ y todo $h \in H$, luego $H \triangleleft G$. ■

Sea G un grupo. Sea $H \triangleleft G$. Recordemos que, para $g \in G$, las clases laterales izquierda y derecha son, respectivamente,

$$gH = \{gh : h \in H\}$$

$$Hg = \{hg : h \in H\}$$

Para un subgrupo normal estas clases son iguales pues si $h \in H$, entonces $ghg^{-1} \in H$, luego $ghg^{-1} = h_1$ para algún $h_1 \in H$, luego $gh = h_1g$. Esto muestra que $gH = Hg$.

Notar también que $gH = Hg$ significa que para cada $h \in H$ hay $h_1 \in H$ tal que $gh = gh_1$.

Lo anterior no ocurre cuando H no es subgrupo normal.

1.6.2. Grupo cociente.

Sea $H \triangleleft G$ (no usamos un símbolo especial para la operación). Denotamos por G/H el conjunto de las clases laterales izquierdas de H en G , es decir

$$G/H = \{gH : g \in G\}$$

Observar que $gH = Hg$ pues H es un subgrupo normal. Definiremos una operación en este conjunto de clases.

Teorema 1.6.2 Sea $H \triangleleft G$. Dados $a, b \in G$ sea

$$(aH)(bH) = (ab)H$$

Esto define una operación en G/H .

Demostración: Si $aH = cH$ y $bH = dH$, queremos probar que $(ab)H = (cd)H$. Como $a \in aH = cH$, entonces $a = ch_1$, algún $h_1 \in H$. De $b \in bH = dH$ obtenemos $b = dh_2$, algún $h_2 \in H$. Ahora $ab = ch_1dh_2$ y ya que $dH = Hd$, hay $h_3 \in H$ tal que $h_1d = dh_3$, luego $ch_1dh_2 = cdh_3h_2 = cdh_4$, donde $h_4 = h_3h_2$. Tenemos entonces que $ab = cdh_4$ y por lo tanto $(ab)H = (cdh_4)H = (cd)H$. ■

Sea $H \triangleleft G$. El conjunto G/H es un grupo con la operación

$$(aH)(bH) = (ab)H$$

1.7. Homomorfismos de grupos.

Definición 1.7.1 Sean G_1 y G_2 grupos, y sea $f : G_1 \rightarrow G_2$ una aplicación entre ellos. Se dice que f es un homomorfismo de grupos si

$$f(xy) = f(x)f(y)$$

Un homomorfismo inyectivo recibe el nombre de monomorfismo; un homomorfismo suprayectivo recibe el nombre de epimorfismo; un homomorfismo biyectivo recibe el nombre de isomorfismo; y un isomorfismo de G en si mismo es un automorfismo.

Si existe un isomorfismo entre G_1 y G_2 se dice que ambos grupos son isomorfos.

Proposición 1.7.1 Sean G y H grupos, y sea $f : G \rightarrow H$ un homomorfismo entre ellos. Entonces, para todo $x, y \in G$

$$f(xy^{-1}) = f(x)f(y)^{-1}$$

$$f(y^{-1}x) = f(y)^{-1}f(x)$$

Demostración: Utilizando que f es un homomorfismo,

$$f(xy^{-1})f(y) = f((xy^{-1})y) = f(x)$$

y basta componer con $f(y)^{-1}$ por la derecha. La demostración de la segunda igualdad es análoga. ■

Proposición 1.7.2 Sean G y H grupos, y sea $f : G \rightarrow H$ un homomorfismo entre ellos. Entonces,

$$1. f(1_G) = 1_H$$

$$2. f(g^{-1}) = f(g)^{-1}, \forall g \in G$$

Demostración: Para 1) basta aplicar la proposición anterior al caso $x = y$. Para 2) basta aplicar la proposición anterior al caso $x = 1_G, y = g$. ■

Definición 1.7.2 Sean G y H grupos, y sea $f : G \rightarrow H$ un homomorfismo entre ellos. Se llaman núcleo e imagen de f a los conjuntos:

$$\ker f = \{g \in G : f(g) = 1_H\}$$

$$\operatorname{im} f = \{h \in H : \exists g \in G : f(g) = h\}$$

Es importante indicar que el núcleo de f es un subgrupo de G , mientras que la imagen de f es un subgrupo de H .

Proposición 1.7.3 Sean G y H grupos, y $f : G \rightarrow H$ un homomorfismo. Si G es abeliano, $f(G)$ es abeliano.

Demostración:

$$f(x)f(y) = f(xy) = f(yx) = f(y)f(x)$$

■

1.7.1. Teorema de Cayley.

Este teorema afirma que todo grupo finito es isomorfo a un subgrupo de un grupo S_n para algún natural n . Primero a cada elemento de un grupo G le asociaremos una función biyectiva.

Teorema 1.7.1 Dado un conjunto no vacío X , el conjunto S_X de todas las funciones biyectivas de X en X es un grupo con la operación \circ de composición de funciones.

La demostración es trivial usando las condiciones que debe cumplir un grupo.

Teorema 1.7.2 Dado un grupo G ,

1. Para cada $g \in G$ la función $\alpha_g : G \rightarrow G$, $\alpha_g(x) = gx$ es biyectiva.
2. La función inversa de α_g es α_g^{-1} .
3. Dados $a, b \in G$, $\alpha_a \circ \alpha_b = \alpha_{ab}$.
4. El conjunto $\{\alpha_g : g \in G\}$ es un grupo de S_G con la operación composición.

Teorema 1.7.3 (Teorema de Cayley.) Si G es un grupo finito de orden n , entonces G es isomorfo a un subgrupo del grupo simétrico S_n .

Demostración: La función $\alpha : G \rightarrow S_G$, $\alpha(g) = \alpha_g$ es un homomorfismo. Si $g \in \ker \alpha$, entonces $\alpha(g)$ es la identidad de S_G , luego $\alpha_g(x) = gx = x$, todo $x \in G$, de donde $g = 1_G$. Así α es inyectiva y G es isomorfo con $\alpha(G)$, que es un subgrupo de S_G .

Ahora si G es un grupo de orden n veremos que S_G es isomorfo con S_n . Si $o(G) = n$, entonces existe una función biyectiva $\beta : G \rightarrow N_n$ y también $\beta^{-1} : N_n \rightarrow G$ es biyectiva. Dado $\sigma \in S_n$, la función $\beta^{-1} \circ \sigma \circ \beta : G \rightarrow G$ es una biyección y la función $S_n \rightarrow S_G : \sigma \mapsto \beta^{-1} \circ \sigma \circ \beta$ es un isomorfismo. ■

1.7.2. Factorización de homomorfismos.

Sean G y G' grupos arbitrarios y $\varphi : G \rightarrow G'$ un homomorfismo de grupos. Sea H un subgrupo de $\ker(\varphi)$; observar que H es subgrupo normal de G porque el núcleo es normal. Sea $\pi : G \rightarrow G/H$ la proyección al cociente. Entonces existe un único homomorfismo de grupos $\bar{\varphi} : G/H \rightarrow G'$ que hace conmutar el siguiente diagrama:

$$\begin{array}{ccc} G & \xrightarrow{\varphi} & G' \\ & \searrow \pi \quad \nearrow \bar{\varphi} & \\ & G/H & \end{array}$$

Es decir, para todo $x \in G$ dicho homomorfismo cumple que $\varphi(x) = \bar{\varphi}(\pi(x))$.

Demostración: Existencia. Sea $\bar{\varphi} : G/H \rightarrow G'$ la aplicación dada por $\bar{x} \mapsto \varphi(x)$. Está bien definida porque si $\bar{x} = \bar{y}$, entonces $1 = \bar{x}\bar{y}^{-1}$, con lo cual $xy^{-1} \in H \subseteq \ker(\varphi)$. Por lo tanto $\varphi(xy^{-1}) = 1$, y entonces $\varphi(x) = \varphi(y)$. Además, define un homomorfismo porque $\bar{\varphi}(\bar{x}\bar{y}) = \varphi(xy) = \varphi(x)\varphi(y) = \bar{\varphi}(\bar{x})\bar{\varphi}(\bar{y})$. Para ver que hace conmutar el diagrama, notar que para todo $x \in G$ se cumple $\varphi(x) = \bar{\varphi}(\bar{x}) = \bar{\varphi}(\pi(x))$.

Unicidad. Para la unicidad, basta observar que la manera en que fue definido el homomorfismo $\bar{\varphi}$ es la única manera de definirlo de tal manera que conmute con el diagrama. Es decir, si se tiene un homomorfismo ψ que conmuta con el diagrama, $\psi(\bar{x}) = \varphi(x)$ para todo $x \in G$, y entonces $\psi = \bar{\varphi}$. ■

1.7.3. Teoremas de isomorfía.

Primer teorema de isomorfía.

Teorema 1.7.4 Sean G y G' grupos arbitrarios y sea $\varphi : G \rightarrow G'$ Un homomorfismo de grupos. Entonces $G/\ker(\varphi) \simeq \text{im}(\varphi)$.

El símbolo \simeq indica que los dos elementos son isomorfos.

Demostracion: Usando la factorización de homomorfismos de grupos sobre el núcleo $\ker(\varphi)$, se tiene que existe un único homomorfismo $\bar{\varphi} : G/\ker(\varphi) \rightarrow G'$ tal que $\varphi = \bar{\varphi} \cdot \pi$.

Si consideramos dicho homomorfismo $\bar{\varphi}$ restringiendo su dominio a $\text{im}(\varphi)$ tendríamos un epimorfismo, porque por definición de la imagen, para todo $y \in \text{im}(\varphi)$ existe un $x \in G$ tal que $\varphi(x) = y$, y por lo tanto $\bar{\varphi}(\bar{x}) = y$.

Además, es un monomorfismo, porque $\bar{\varphi}(\bar{x}) = \varphi(x)$. Entonces si, $\bar{\varphi}(x) = 0$ se tiene que $x \in \ker(\varphi)$, con lo cual $\bar{x} = 0$.

Así, $\bar{\varphi} : G/\ker(\varphi) \rightarrow \text{im}(\varphi)$ resulta un isomorfismo. ■

Segundo teorema de isomorfía.

Teorema 1.7.5 Sean N y H subgrupos normales de un grupo G , tales que $N \subset H$. Entonces $H/N \triangleleft G/N$ y

$$(G/N)/(H/N) \simeq G/H$$

Demostracion: Consideramos la aplicación

$$f : G/N \rightarrow G/H : aN \mapsto aH$$

que sabemos que esta bien definida, pues si $aN = bN$, entonces $a^{-1}b \in N \subset H$, por lo que $aH = bH$.

Como $f((aN)(bN)) = f(abN) = abH = (aH)(bH) = f(aN)f(bN)$, f es homomorfismo.

Cada $aH \in G/H$ es $aH = f(aN)$, luego f es sobreyectiva. Finalmente $aN \in \ker(f)$ si y solo si $aH = f(aN) = H$, esto es,

$$\ker(f) = \{aN \in G/N : a \in H\} = H/N$$

Como f es un homomorfismo de grupos, aplicando el primer teorema de isomorfía tenemos que

$$(G/N)/\ker(f) \simeq \text{im}(f)$$

esto es,

$$(G/N)/(H/N) \simeq G/H$$

■

Tercer teorema de isomorfía.

Teorema 1.7.6 Sean G un grupo y S, T subgrupos de G . Sea S un subgrupo normal de G . Entonces se tiene que $ST/S = T/(S \cap T)$.

Demostracion: Para empezar, se debe verificar que las expresiones del enunciado están bien definidas. Por un lado ST es subgrupo de G porque S es normal en G . Teniendo esto en cuenta se cumple también que S es subgrupo normal de ST , por que dado cualquier $x \in ST$, en particular $x \in G$, y por lo tanto $xSx^{-1} = S$. Por último $S \cap T$ es subgrupo normal de T . Para ello, dados $t \in T$ y $s \in S \cap T$, se debe ver que $tst^{-1} \in S \cap T$. En efecto, $tst^{-1} \in S$ porque S es normal, y está en T porque todos sus factores lo están.

Para el isomorfismo, vamos a considerar primero la aplicación $\varphi : T \rightarrow ST/S$ definida por $t \mapsto \bar{t} = 1tS$. Se tiene que φ es un homomorfismo de grupos porque $\varphi(tt') = \overline{tt'} = \varphi(t)\varphi(t')$.

Por un lado, φ es un epimorfismo. Para ver esto, considerar un elemento $stS \in ST/S$ arbitrario. Por ser S normal, se sabe que st se escribe como $t\tilde{s}$ para algún $\tilde{s} \in S$. Se tiene entonces que $stS = t\tilde{s}S = tS = \varphi(t)$.

Por otro lado, el núcleo $\ker(\varphi)$ es el conjunto $\{t \in T : tS = S\}$, es decir, $T \cap S$.

Resumiendo, $\varphi : T \rightarrow ST/S$ es un epimorfismo cuyo núcleo es $T \cap S$. Por el primer teorema de isomorfía se concluye entonces que $T/(T \cap S) \simeq ST/S$. ■

1.8. Teorema de estructura de los grupos abelianos finitos.

El teorema de estructura de los grupos abelianos finitos constituye, por su naturaleza, una primera aproximación a la clasificación de los grupos, en nuestro caso de los grupos abelianos finitos.

Apuntemos que todo grupo cíclico es abeliano, pero no todo grupo abeliano es ciclico, ademas, los grupos abelianos finitos son producto directo de grupos ciclicos.

Enunciamos a continuación el teorema de estructura de los grupos abelianos finitos, del cual omitiremos su demostracion:

Teorema 1.8.1 (Estructura de los Grupos Abelianos Finitos.) *Si G es un grupo abeliano finito, existen enteros positivos m_1, \dots, m_r tales que:*

$$G \simeq \mathbb{Z}/m_1\mathbb{Z} \times \dots \times \mathbb{Z}/m_r\mathbb{Z}$$

y cada m_i divide a m_{i-1} .

Queda claro que $o(G) = m_1 \dots m_r$. Ademas, los numeros r, m_1, \dots, m_r son únicos con esta propiedad. Se dice que m_1, \dots, m_r son los coficientes de torsión de G .

Este teorema nos permite calcular el numero de grupos abelianos finitos no isomorfos de un orden dado.

Pongamos un ejemplo aclarador de aplicación de este teorema:

Supongamos que deseamos calcular cuantos grupos abelianos no isomorfos existen de orden 200. El teorema de estructura reduce la cuestión a obtener todas las -uplas (r, m_1, \dots, m_r) tales que $m_1 \dots m_r = 200$ con m_i divide a m_{i-1} . Asi tenemos que para:

$r = 1$:

$$m_1 = 200$$

para $r = 2$:

$$m_1 = 100; m_2 = 2$$

$$m_1 = 40; m_2 = 5$$

$$m_1 = 20; m_2 = 10$$

para $r = 3$:

$$m_1 = 50; m_2 = 2; m_3 = 2$$

$$m_1 = 10; m_2 = 10; m_3 = 2$$

ya no es posible encontrar mas -uplas que cumplan las condiciones del teorema. Por lo tanto hay 6 grupos abelianos, no isomorfos, de orden 200 que son:

$$\mathbb{Z}/200\mathbb{Z}$$

$$\mathbb{Z}/100\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$$

$$\mathbb{Z}/40\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/5\mathbb{Z}$$

$$\mathbb{Z}/20\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/10\mathbb{Z}$$

$$\mathbb{Z}/50\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$$

$$\mathbb{Z}/10\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/10\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$$

por lo tanto, todos los grupos abelianos de orden 200 son isomorfos a alguno de ellos.

1.9. Automorfismos de grupos.

Los homomorfismos biyectivos de un grupo G en si mismo se conocen como los automorfismos de G . Estas funciones conforman un grupo que tiene información importante relativa al grupo G .

1.9.1. Automorfismos interiores.

Veremos la relación entre los automorfismos de un grupo, sus automorfismos interiores y su centro.

Si H es un subgrupo de un grupo G , se llama *centralizador* de H en G a

$$C_G(H) = \{x \in G : ax = xa \forall a \in H\}$$

Al centralizador de G en G , simbolizado por $Z(G)$ y llamado *centro* de G , es un grupo normal de G el cual esta definido como

$$Z(G) = \{x \in G : xa = ax, \forall a \in G\}$$

Notese que G es abeliano si y solo si $G = Z(G)$.

Definicion 1.9.1 Sea G un grupo, un **automorfismo** de G es un homomorfismo biyectivo de G en si mismo. Sea $x \in G$ la función definida por

$$\phi_x : G \rightarrow G$$

$$a \mapsto x^{-1}ax$$

es un automorfismo de G y se denomina **automorfismo interior** de G determinado por x . El conjunto de los automorfismos interiores de G lo denotaremos como $\text{Int}(G)$.

Enunciamos ahora la siguiente proposición que nos sera de utilidad para demostrar el próximo teorema:

Proposicion 1.9.1 Sean G un grupo y H un subgrupo de G . La aplicación

$$\phi : N_G(H) \rightarrow \text{Aut}(H) : a \mapsto \phi_a$$

es homomorfismo de grupos con imagen $\text{Int}(H)$ y núcleo $C_G(H)$.

Teorema 1.9.1 Sea G un grupo, $\text{Aut}(G)$ su colección de automorfismos y sea $\text{Int}(G)$ el conjunto de automorfismos interiores de G . Entonces:

1. $\text{Aut}(G)$ es un subgrupo de grupo S_G de funciones biyectivas de G en G .
2. $\text{Int}(G) \triangleleft \text{Aut}(G)$

Demostracion: 1) La primera afirmación es evidente. 2) Por comodidad, llamando $K = \text{Int}(G)$ se trata de probar, como vimos en la definición 1.6.1, que:

$$K^f \subset K, \forall f \in \text{Aut}(G)$$

Sea pues $g \in K^f$. Asi $f \circ g \circ f^{-1} \in K$, luego existe $a \in G$ tal que $f \circ g \circ f^{-1} = \phi_a$, donde ϕ_a es un automorfismo interior, y asi $g = f^{-1} \circ \phi_a \circ f$. Entonces, dado $x \in G$ y llamando $b = f^{-1}(a)$ se tiene

$$g(x) = (f^{-1} \circ \phi_a)(f(x)) = f^{-1}(af(x)a^{-1}) = bxb^{-1} = \phi_b(x)$$

por tanto, $g = \phi_b \in K$.

Por último, de la proposición 1.9.1 se deduce que la aplicación

$$\phi : G \rightarrow \text{Int}(G) : a \mapsto \phi_a$$

es homomorfismo sobreyectivo con núcleo $Z(G)$, y por ello

$$G/Z(G) \cong \text{Int}(G)$$

■

1.9.2. Acción de un grupo sobre un conjunto.

El concepto de grupo tomó importancia en la matemática cuando Lagrange y luego Galois consideraron las sustituciones de las raíces de una ecuación polinomial; los patrones de intercambios de las raíces aportan información sobre la solubilidad de la ecuación mediante fórmulas explícitas. Posteriormente, Felix Klein enfatizó la importancia de las simetrías admisibles en la clasificación de las geometrías. En los dos casos, los elementos de un grupo aparecen como transformación de otros objetos (raíces de una ecuación algebraica; o puntos de un plano) y los objetos transformados no son menos importantes que las propias transformaciones.

Definición 1.9.2 Una acción (a la izquierda) de un grupo G sobre un conjunto X es una función $\phi : G \times X \rightarrow X$ tal que:

1. $\phi(g, \phi(h, x)) = \phi(gh, x)$ para todo $g, h \in G, x \in X$.
2. $\phi(1_G, x) = x$ para todo $x \in X$.

Se acostumbra a escribir $g \cdot x$ en lugar de $\phi(g, x)$; con esta notación, las propiedades de una acción son:

$$\begin{aligned} g \cdot (h \cdot x) &= (gh) \cdot x \\ 1_G \cdot x &= x \end{aligned}$$

Definición 1.9.3 Una acción de grupo define una relación de equivalencia sobre X : $x \sim y$ si y solo si $x = g \cdot y$ para algún $g \in G$.

La **órbita** de $x \in X$ bajo la acción de G es la clase de equivalencia de x bajo esta relación:

$$G \cdot x = \{g \cdot x \in X : g \in G\} \subseteq X$$

Una acción de un grupo G en un conjunto X se dice que es *transitiva* si para todo par de elementos $x, y \in X$ existe un $g \in G$ tal que $g \cdot x = y$.

Definición 1.9.4 Sea $\phi : G \times X \rightarrow X$ una acción de un grupo sobre un conjunto. El **subgrupo estabilizador** para un elemento $x \in X$ es el subgrupo

$$G_x = \{g \in G : g \cdot x = x\} \subseteq G$$

Proposición 1.9.2 Dada una acción de un grupo G sobre un conjunto X , el número de elementos de la órbita $G \cdot x$ coincide con el índice $[G : G_x]$.

Demostración: Si $h, g \in G$ y $x \in X$, entonces

$$g \cdot x = h \cdot x \iff g^{-1}h \cdot x = x \iff g^{-1}h \in G_x \iff gG_x = hG_x \in G/G_x$$

luego la aplicación $g \cdot x \mapsto gG_x$ es una biyección de la órbita $G \cdot x$ en el conjunto cociente G/G_x . Por lo tanto $o(G \cdot x) = o(G/G_x) = [G : G_x]$ ■

Definición 1.9.5 Una acción $\phi : G \times X \rightarrow X$ es **eficaz** (o **fiel**) si el homomorfismo $\psi : G \rightarrow S_X$ es inyectivo. Una acción es eficaz si $g \cdot x = x$ para todo $x \in X$ implica $g = 1_G$.

Un grupo G también actúa por conjugación sobre el conjunto de todos sus subgrupos, $X = \{H : H \subseteq G\}$. Esta acción está dada por la fórmula $g \cdot H = gHg^{-1}$. La órbita de H bajo esta acción es la familia de subgrupos conjugados de H .

El subgrupo estabilizador de H en este caso es el **normalizador** de H , definido como:

$$N_G(H) = \{g \in G : gHg^{-1} = H\}$$

Se puede observar que $N_G(H)$ es un subgrupo de G , no necesariamente normal, pero H es un subgrupo normal de él: $H \triangleleft N_G(H)$.

1.9.3. Teorema de Sylow.

Antes de enunciar los teoremas de Sylow debemos introducir el concepto de p -grupo y el Teorema de Cauchy.

Definición 1.9.6 Sea p un número primo. Un grupo finito G se denomina p -grupo si $o(G) = p^r$, con $r \in \mathbb{Z}^+$.

Antes de continuar es importante destacar dos resultados que usaremos en la demostración del Teorema de Sylow:

1. *Congruencia de los puntos fijos.* Si G es un p -grupo y G opera sobre un conjunto finito X , entonces:

$$o(X) \equiv o(X_0) \pmod{p}$$

Donde $X_0 \subseteq X$ es el conjunto de puntos fijos,

$$X_0 = \{x \in X; Gx = \{x\}\}$$

2. *Congruencia del normalizador.* Es un caso particular del resultado anterior. Sea H un p -subgrupo de un grupo finito G . Entonces:

$$[N(H) : H] \equiv [G : H] \pmod{p}$$

Teorema 1.9.2 (Teorema de Cauchy) Sea G un grupo finito de orden n y p un número primo que divide a n . Entonces G tiene un elemento (y por lo tanto un subgrupo) de orden p .

Demostración: Sea $X = \{(x_1, \dots, x_p) \in G^p : x_1 \dots x_p = 1\}$. Si $k \in \mathbb{Z}_p$, la relación

$$k(x_1, \dots, x_p) = (x_{k+1}, \dots, x_p, x_1, \dots, x_k)$$

define una acción de \mathbb{Z}_p en X . Como \mathbb{Z}_p es un p -grupo y $o(X) = n^{p-1}$, se tiene que $o(X_0)$ es múltiplo de p , siendo

$$X_0 = \{(x, \dots, x) : x \in G, x^p = 1\}$$

Dado que X_0 contiene el elemento $(1, 1, \dots, 1)$, resulta que G tiene un elemento de orden p . ■

Sea G un grupo finito, ante el problema de estudiar los subgrupos de G es natural empezar con los p -subgrupos, para cada primo p . El conocimiento de estos subgrupos es muy útil para determinar la estructura de G .

Con los teoremas de Sylow podremos conocer, si, dado un grupo finito G y un primo p que divide a $o(G)$, si existen p -subgrupos de cualquier orden permitido por el teorema de Lagrange, cuantos hay, y que relación hay entre ellos.

Teorema 1.9.3 (Primer teorema de Sylow) *Sea G un grupo finito, p un número primo y $r > 0$ un número entero tales que p^r divide a $o(G)$. Entonces existen subgrupos H_1, \dots, H_r de G tales que $o(H_i) = p^i$ para $i = 1, \dots, r$ y de modo que $H_i \triangleleft H_{i+1}$ para $i = 1, \dots, r-1$.*

Demostración: Si $r = 1$ el resultado es consecuencia directa del teorema de Cauchy. Supongamos pues que $r \geq 2$. Entonces existen, por inducción, subgrupos H_1, \dots, H_{r-1} de G tales que $o(H_i) = p^i$ ($1 \leq i \leq r-1$) y con H_i normal en H_{i+1} ($1 \leq i \leq r-2$). Como p divide a $[G : H_{r-1}]$, por la congruencia del normalizador, vemos que p divide a $[N(H_{r-1}) : H_{r-1}]$. Por el teorema de Cauchy el grupo cociente $N(H_{r-1})/H_{r-1}$ tiene un subgrupo H_r/H_{r-1} de orden p , o lo que es lo mismo, H_r es un subgrupo de $N(H_{r-1})$ que contiene a H_{r-1} como subgrupo normal. Como H_r tiene orden p^r , por el teorema de Lagrange, la demostración es completa. ■

Si p es un divisor del orden n , de un grupo finito G , entonces existen p -subgrupos de Sylow de G . Basta con observar que si $n = p^r m$, m primo con p , los p -subgrupos de Sylow de G son los subgrupos de orden p^r . Si G posee un único p -subgrupo de Sylow H , entonces $H \triangleleft G$.

Teorema 1.9.4 (Segundo teorema de Sylow) *Sea G un grupo finito, H un p -subgrupo de G y S un p -subgrupo de Sylow de G . Entonces existe $x \in G$ tal que*

$$H \subseteq xSx^{-1}$$

en particular, dos p -subgrupos de Sylow de G son conjugados.

Demostración: Consideremos la acción de H en $X = G/S$ por traslaciones por la izquierda. Una clase $xS \in X$ es invariante por la acción anterior si y solo si $hxS = xS$ para todo $h \in H$, es decir, si y solo si $x^{-1}hx \in S$ para todo $h \in H$. Como esta relación es equivalente a $H \subseteq xSx^{-1}$, vemos que

$$X_0 = \{xS \in X : H \subseteq xSx^{-1}\}$$

Ahora bien, como H es un p -grupo y $o(X) = [G : S]$, la congruencia de puntos fijos nos da

$$o(X_0) \equiv [G : S] \pmod{p}$$

Como p no divide a $[G : S]$, concluimos que X_0 no es divisible por p y por tanto que X_0 no es vacío. ■

El segundo teorema de Sylow se deduce trivialmente que la condición de que G posea un único p -subgrupo de Sylow es equivalente a que G posea un p -subgrupo de Sylow normal.

Teorema 1.9.5 (Tercer teorema de Sylow) *Sea G un grupo finito, y n_p el número de p -subgrupos de Sylow de G . Entonces $n_p = [G : N(S)]$, para todo p -subgrupo de Sylow S de G . Puesto que $[G : N(S)]$ divide a $[G : S]$, en particular tenemos que n_p divide a $[G : S]$ para todo p -subgrupo de Sylow S de G . Por último, se verifica que $n_p \equiv 1 \pmod{p}$.*

Demostración: Por el segundo teorema de Sylow, n_p es el cardinal de la órbita de un p -subgrupo de Sylow S por la acción de G (por conjugación) en el conjunto de subgrupos de G . De ello se deduce que

$$n_p = [G : N(S)]$$

dado que el grupo estabilizador de S es $N(S)$. La primera parte del enunciado se sigue de la relación

$$[G : S] = [G : N(S)][N(S) : S]$$

Sea ahora X el conjunto de p -subgrupos de Sylow de G . Consideremos la acción de S en X por conjugación. Entonces

$$X_0 = \{T \in X : sTs^{-1} = T, \forall s \in S\} = \{T \in X : S \subseteq N(T)\}$$

Veamos que $X_0 = \{S\}$. En efecto, si $T \in X_0$, entonces S y T son p -subgrupos de Sylow de $N(T)$ y $T \triangleleft N(T)$, de donde, por el segundo teorema de Sylow, $T = S$. Como $o(X) = n_p$ y $o(X_0) = 1$, obtenemos la congruencia enunciada usando la congruencia de puntos fijos. ■

Capítulo 2

Representaciones de grupos.

Una representación de un grupo finito G nos proporciona una manera de visualizar G como un grupo de matrices. Para ser mas preciso diremos que una representación es un homomorfismo de G en el grupo de matrices invertibles.

La estructura de estos homomorfismos y sus propiedades seran objeto de estudio en este capitulo.

2.1. Representaciones de grupos.

Sea V un espacio vectorial sobre el cuerpo \mathbb{C} de los números complejos, y sea $GL(V)$ el grupo de isomorfismos de V . Un elemento $a \in GL(V)$ es, por definición, una aplicación lineal de V en V que admite inversa a^{-1} ; a^{-1} es también lineal. Si V admite una base finita (e_i) de n elementos, toda aplicación lineal $a : V \rightarrow V$ se representa por una matriz cuadrada (a_{ij}) de orden n . Los coeficientes a_{ij} son números complejos; se calculan expresando $a(e_j)$ en la base (e_i) :

$$a(e_j) = \sum_i a_{ij} e_i$$

Decir que a es un isomorfismo equivale a decir que el determinante de a es no nulo. El grupo $GL(V)$ se identifica así como el grupo de matrices cuadradas invertibles de orden n . En algunas ocasiones escribiremos $GL(n, V)$.

Definición 2.1.1 Sea G un grupo finito. Una representación de G en V es un homomorfismo ρ del grupo G en el grupo $GL(V)$:

$$\rho : G \rightarrow GL(V)$$

de modo que:

$$\rho(st) = \rho(s)\rho(t)$$

cualesquiera que sean $s, t \in G$.

Supongamos que V es de dimensión finita, y sea n su dimensión; se dice también que n es el *grado* de la representación considerada.

Ejemplo 2.1.1 Sea G el grupo dihedral $D_8 = \langle a, b : a^4 = b^2 = 1, b^{-1}ab = a^{-1} \rangle$. Definimos las matrices A y B como:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

se comprueba que:

$$A^4 = B^2 = I, B^{-1}AB = A^{-1}$$

la función

$$\rho : G \rightarrow GL(2, V)$$

definida como $\rho : a^i b^j \rightarrow A^i B^j$ para $0 \leq i \leq 3$, $0 \leq j \leq 1$, es una representación de D_8 sobre V . Es una representación de grado 2.

En la siguiente tabla se representan las imágenes de ρ para cada elemento de D_8 :

g	$\rho(g)$
1	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
a	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$
a^2	$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$
a^3	$\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$
b	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$
ab	$\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$
a^2b	$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
a^3b	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$

Cuadro 2.1: Representación del grupo dihedral 8.

Ejemplo 2.1.2 Sea G un grupo cualquiera. Definimos $\rho : G \rightarrow GL(n, V)$ como $\rho(g) = I_n$ para todo $g \in G$, donde I_n es la matriz identidad $n \times n$. Entoces:

$$\rho(gh) = I_n = I_n I_n = \rho(g)\rho(h)$$

para todo $g, h \in G$, por lo tanto, ρ es una representación de G . Esto nos indica que todo grupo tiene representaciones de cualquier grado.

2.2. Representaciones equivalentes.

Sean ρ y ρ' representaciones lineales de un grupo G en espacios vectoriales V y V' respectivamente. Se dice que estas representaciones son equivalentes (o isomorfas) si existe un isomorfismo lineal $\tau : V \rightarrow V'$ que transforma ρ en ρ' , es decir, que verifica la identidad:

$$\tau \cdot \rho(s) = \rho'(s) \cdot \tau$$

para todo $s \in G$.

Si ρ y ρ' se dan en forma matricial por R y R' respectivamente, el isomorfismo se traduce en una matriz invertible T tal que:

$$T \cdot R = R' \cdot T$$

o, equivalentemente, tal que:

$$R' = T R T^{-1}$$

Sea $\rho : G \rightarrow GL(V)$ una representación, Y sea T una matriz invertible $n \times n$ de V . Para todas las $n \times n$ matrices A y B tenemos:

$$(T^{-1}AT)(T^{-1}BT) = T^{-1}(AB)T$$

Usamos esto para crear una representacion σ desde ρ ; definimos

$$\sigma(g) = T^{-1}\rho(g)T$$

para todo $g \in G$. Por lo tanto, para todo $g, h \in G$, tenemos:

$$\begin{aligned}\sigma(gh) &= T^{-1}\rho(gh)T \\ &= T^{-1}\rho(g)\rho(h)T \\ &= T^{-1}\rho(g)T \cdot T^{-1}\rho(h)T \\ &= \sigma(g)\sigma(h)\end{aligned}$$

por lo que, σ es, en efecto, una representación.

Con esto podemos ya dar la siguiente definición:

Definicion 2.2.1 Sean $\rho : G \rightarrow GL(m, V)$ y $\sigma : G \rightarrow GL(n, V)$ representaciones de G sobre V . Decimos que ρ es equivalente a σ si $n = m$ y existe una matriz invertible $n \times n$ T tal que, para todo $g \in G$,

$$\sigma(g) = T^{-1}\rho(g)T$$

Dadas las representaciones ρ , σ y τ de G sobre V , se tiene que:

1. ρ es equivalente a ρ . (Prop. Reflexiva).
2. si ρ es equivalente a σ , entonces σ es equivalente a ρ . (Prop. Simétrica).
3. si ρ es equivalente a σ y σ es equivalente a τ , entonces ρ es equivalente a τ . (Prop. Transitiva).

Esto nos indica que ser equivalentes es una relación de equivalencia.

Demostracion: Sean ρ , σ y τ representaciones de G sobre V , y sea $g \in G$. Tenemos:

1. Prop. Reflexiva:

Sea I la matriz identidad, que ademas es una matriz cuadrada e invertible, siempre podemos poner

$$\rho(g) = I^{-1}\rho(g)I$$

por lo que ρ es equivalente a ρ .

2. Prop. Simétrica:

Por ser ρ equivalente a σ , tenemos que existe una matriz cuadrada invertible T que cumple:

$$\sigma(g) = T^{-1}\rho(g)T$$

$$T\sigma(g) = \rho(g)T$$

$$T\sigma(g)T^{-1} = \rho(g)$$

lo que concluye que σ es equivalente a ρ .

3. Prop. Transitiva.

Por ser ρ equivalente a σ , tenemos que existe una matriz cuadrada invertible T que cumple:

$$\sigma(g) = T^{-1}\rho(g)T$$

Del mismo modo, por ser σ equivalente a τ , tenemos que existe una matriz cuadrada invertible P que cumple:

$$\tau(g) = P^{-1}\sigma(g)P$$

Sustituyendo tenemos que:

$$\tau(g) = P^{-1}T^{-1}\rho(g)TP$$

$$\tau(g) = (TP)^{-1}\rho(g)TP$$

por lo que ρ es equivalente a τ . ■

2.3. Núcleo de una representación.

Sea una representación $\rho : G \rightarrow GL(V)$. El núcleo de una representación consiste en un grupo de elementos $g \in G$ para los cuales $\rho(g)$ es la matriz identidad.

$$Ker \rho = \{g \in G : \rho(g) = I_n\}$$

El núcleo de ρ es un subgrupo normal de G .

Puede ocurrir que el núcleo de una representación es el propio grupo G .

Definición 2.3.1 Una representación $\rho : G \rightarrow GL(1, V)$ definida como:

$$\rho(g) = 1_G$$

para todo $g \in G$, se denomina representación trivial de G .

2.4. Representaciones irreducibles.

Sea $\rho : G \rightarrow GL(V)$ una representación lineal y sea W un subespacio de V . Si W es estable para la acción de G , es decir

$$gW \subset W, \forall g \in G$$

entonces ρ define por restricción una representación $\rho' : G \rightarrow GL(W)$.

Si W' es otro subespacio del mismo, se dice que V es suma directa de W y W' si todo $v \in V$ se puede expresar de la forma $v = w + w'$, $w \in W$, $w' \in W'$ y $W \cap W' = 0$. Se escribe entonces $V = W \oplus W'$ y se dice que W' es un suplementario de W en V . La aplicación p que hace corresponder a cada vector $v \in V$ su componente $w \in W$ es llamada proyector de V sobre W asociado a la descomposición $V = W \oplus W'$; en consecuencia p verifica las condiciones $Im(p) = W$ y $p(w) = w$ si $w \in W$. Recíprocamente cualquier aplicación lineal p que verifique estas condiciones cumple $p^2 = p$. La expresión $v = p(v) + v - p(v)$ para todo $v \in V$, da una descripción explícita de la suma $V = W + Ker(p)$. Fácilmente se comprueba que $W \cap Ker(p) = 0$, con lo que $V = W \oplus Ker(p)$. Se establece así una correspondencia biyectiva entre los proyectores de V sobre W y los suplementarios de W en V .

Antes de dar una definición de representación irreducible veamos un resultado que nos va a ser útil en breve:

Teorema 2.4.1 Sea $\rho : G \rightarrow GL(V)$ una representación lineal de G en V y sea W un subespacio vectorial de V estable por la acción de G . Existe un subespacio complementario W' de W en V el cual es estable por la acción de G .

Demostración: Sea p cualquier proyector de V sobre W . Consideremos la suma de Poincaré P de p :

$$P(v) = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} gp(g^{-1}v)$$

se cumple que P es también un proyector de V sobre W . En efecto, como W es estable por G , la expresión para P dice que $Im(P) \subset W$. Además si $w \in W$, como también $g^{-1}w \in W$, se tiene $gp(g^{-1}w) = gg^{-1}w = w$, lo que implica que $P(w) = w$ y en consecuencia $P^2 = Id$ y P es un proyector sobre W .

Por ser P una suma de Poincaré, se cumple $P(gv) = gP(v)$, $\forall g \in G$, con lo que $Ker(P)$ es estable por G . Como $V = W \oplus Ker(P)$ se concluye el enunciado. ■

Supongamos que V está dotado de un producto escalar $\langle x, y \rangle$ satisfaciendo las condiciones de linealidad en x , bilinealidad en y , y $\langle x, x \rangle > 0$ si $x \neq 0$. Supongamos que este producto escalar permanece invariante por la acción de G , $\langle \rho(s)x, \rho(s)y \rangle = \langle x, y \rangle$; podemos reemplazar $\langle x, y \rangle$ por $\sum_{t \in G} \langle \rho(t)x, \rho(t)y \rangle$. Bajo esta hipótesis el complementario ortogonal W' de W en V es un subespacio complementario de W estable por G ; y así, obtenemos una demostración alternativa al anterior teorema (2.4.1). Observemos el hecho de que como el producto escalar $\langle x, y \rangle$ es invariante, implica que, si (e_i) es una base ortonormal de V , la matriz $\rho(s)$ con respecto a esa base es la matriz unitaria.

Manteniendo las hipótesis y notación del teorema 2.4.1, sea $x \in V$, y sean w y w' proyecciones en W y W' respectivamente. Tenemos $x = w + w'$, de donde $\rho(s)x = \rho(s)w + \rho(s)w'$, por lo que w y w' son estables por G , tenemos que $\rho(s)w \in W$ y $\rho(s)w' \in W'$; así que $\rho(s)w$ y $\rho(s)w'$ son proyecciones de $\rho(s)x$.

Se sigue, entonces, que las representaciones de W y W' determinan la representación de V . Decimos que V es suma directa de W y W' , y lo escribimos como $V = W \oplus W'$. Podemos definir los elementos de V como un par (w, w') con $w \in W$ y $w' \in W'$. Si W y W' son dados en forma matricial por R_s y R'_s , $W \oplus W'$ estará dado en forma matricial como:

$$\begin{pmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R'_s \end{pmatrix}$$

Definición 2.4.1 Una representación lineal $\rho : G \rightarrow GL(V)$ se dice irreducible si $V \neq 0$ y ningún subespacio de V es estable por G , excepto, claro está, 0 y V .

Debido al teorema 2.4.1 la segunda condición equivale a decir que V no es suma directa de dos representaciones, salvo la descomposición trivial $V = 0 \oplus V$.

Toda representación de grado 1 es evidentemente irreducible.

Teorema 2.4.2 Toda representación es suma directa de representaciones irreducibles.

Demostración: Sea V una representación lineal de G . Se razona por inducción sobre $dim(V)$. Si $dim(V) = 0$, el teorema es evidente, 0 es suma directa de la familia vacía de representaciones irreducibles. Si $dim(V) \geq 1$ y V es irreducible no hay nada que demostrar. De lo contrario, debido al teorema 2.4.1, V puede ser descompuesto como suma directa $V' \oplus V''$. Por hipótesis de inducción V' y V'' son suma directa de representaciones irreducibles, y lo mismo es cierto

para V . ■

Sea V una representación y sea $V = W_1 \oplus \dots \oplus W_k$ una descomposición de V en suma directa de representaciones irreducibles, podemos preguntarnos si la descomposición es única. En el caso donde todas las representaciones $\rho(s)$ son iguales a 1 muestra que esto no es cierto en general. Sin embargo, mas adelante, veremos que el número de W_i isomorfas a una representación irreducible dada, no depende de la descomposición elegida.

2.5. FG-módulos.

Sea G un grupo, y sea $F = \mathbb{R}$ o $F = \mathbb{C}$. Escribiremos como $V = F^n$ el espacio vectorial formado por los vectores fila $(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ con $\lambda_i \in F$. Para todo $v \in V$ y $g \in G$, el producto matricial

$$v\rho(g)$$

de el vector fila v con la matriz de dimensión $n \times n$ $\rho(g)$, es un vector fila en V .

Basandonos en el producto matricial $v\rho(g)$ definimos el FG-módulo.

Definición 2.5.1 *Sea V un espacio vectorial sobre F y sea G un grupo. Entonces V es un FG-módulo si esta definida la multiplicación vg , para $v \in V$ y $g \in G$, y ademas satisfacen las siguientes condiciones para todo $u, v \in V$, $\lambda \in F$ y $g, h \in G$:*

1. $vg \in V$
2. $v(gh) = (vg)h$
3. $v1 = v$
4. $(\lambda v)g = \lambda(vg)$
5. $(u + v)g = ug + vg$

Las condiciones (1), (4) y (5) de la definición aseguran que para todo $g \in G$, la función

$$v \rightarrow vg$$

es un endomorfismo de V .

Sea V un FG-módulo, y sea \mathcal{B} una base de V . Para cada $g \in G$, denotamos como

$$[g]_{\mathcal{B}}$$

a la matriz del endomorfismo $v \rightarrow vg$ de V , relativo a la base \mathcal{B} .

La relación entre los FG-módulos y las representaciones de G sobre F se verá en el siguiente teorema:

Teorema 2.5.1 (1) *Si $\rho : G \rightarrow GL(F)$ es una representación de G sobre F , y $V = F^n$, entonces V sera un FG-módulo si definimos la multiplicación vg como*

$$vg = v\rho(g)$$

ademas, existe una base \mathcal{B} de V tal que

$$\rho(g) = [g]_{\mathcal{B}}$$

para todo $g \in G$.

(2) Sea V un FG-módulo y sea \mathcal{B} una base de V . Entonces la función

$$g \rightarrow [g]_{\mathcal{B}}$$

es una representación de G sobre F .

Demostración: (1) Sabemos que $v\rho(g) \in F^n$, además por ser ρ un homomorfismo tenemos que $v(\rho(gh)) = v(\rho(g)\rho(h))$ y $v(\rho(1)) = v$. Del mismo modo, por las propiedades de la multiplicación matricial tenemos que $(\lambda v)\rho(g) = \lambda(v\rho(g))$ y $(u+v)\rho(g) = u\rho(g) + v\rho(g)$ para todo $u, v \in F^n$, $\lambda \in F$ y $g, h \in G$.

Por lo tanto, F^n se convertirá en un FG-módulo si definimos

$$vg = v\rho(g)$$

para todo $v \in F^n, g \in G$.

Además, si consideramos la base \mathcal{B} como

$$(1, 0, 0, \dots, 0), (0, 1, 0, \dots, 0), \dots, (0, 0, 0, \dots, 1)$$

de F^n , entonces $\rho(g) = [g]_{\mathcal{B}}$ para todo $g \in G$.

(2) Sea V un FG-módulo con base \mathcal{B} . De $v(gh) = (vg)h$ para todo $g, h \in G$ y todo $v \in \mathcal{B}$, se sigue que

$$[gh]_{\mathcal{B}} = [g]_{\mathcal{B}}[h]_{\mathcal{B}}$$

En particular,

$$[1]_{\mathcal{B}} = [g]_{\mathcal{B}}[g^{-1}]_{\mathcal{B}}$$

para todo $g \in G$. Ahora $v1 = v$ para todo $v \in V$, así que $[1]_{\mathcal{B}}$ es la matriz identidad.

Por lo tanto cada matriz $[g]_{\mathcal{B}}$ es invertible.

Hemos probado que la función $g \rightarrow [g]_{\mathcal{B}}$ es un homomorfismo de G a $GL(F)$ y por lo tanto es una representación de G sobre F . ■

Podemos construir FG-módulos sin usar una representación. Para hacer esto transformamos un espacio vectorial V sobre F en un FG-módulo especificando la acción de los elementos del grupo en una base v_1, \dots, v_n de V y haciendo que sea lineal la acción en el entorno de V , es decir, primero definimos $v_i g$ para cada i y cada $g \in G$, y entonces definimos

$$(\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n)g$$

para $\lambda_i \in F$, como

$$\lambda_1(v_1 g) + \dots + \lambda_n(v_n g)$$

Como era de esperar existen restricciones a la hora de definir los vectores $v_i g$.

Teorema 2.5.2 Sea v_1, \dots, v_n una base de un espacio vectorial V sobre F . Supongamos que tenemos una multiplicación vg para todo $v \in V$ y $g \in G$, la cual satisface las siguientes condiciones para todo i con $1 \leq i \leq n$, para todo $g, h \in G$ y para todo $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in F$:

1. $v_i g \in V$
2. $v_i(gh) = (v_i g)h$
3. $v_i 1 = v_i$

$$4. (\lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n)g = \lambda_1(v_1 g) + \dots + \lambda_n(v_n g)$$

Entonces V es un FG -módulo.

Demostración: Es trivial ver de (3) y (4) que $v1 = v$ para todo $v \in V$. Las condiciones (1) y (4) nos aseguran que, para todo $g \in G$, la función $v \rightarrow vg$ ($v \in V$) es un endomorfismo de V . Esto es:

$$vg \in V,$$

$$(\lambda v)g = \lambda(vg),$$

$$(u + v)g = ug + vg,$$

para todo $u, v \in V$, $\lambda \in F$ y $g \in G$. Por lo tanto

$$(\lambda_1 u_1 + \dots + \lambda_n u_n)h = \lambda_1(u_1 h) + \dots + \lambda_n(u_n h)$$

para todo $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in F$, todo $u_1, \dots, u_n \in V$, y todo $h \in G$.

Ahora sea $v \in V$ y $g, h \in G$. Entonces $v = \lambda_1 v_1 + \dots + \lambda_n v_n$ para algún $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in F$, y

$$\begin{aligned} v(gh) &= \lambda_1(v_1(gh)) + \dots + \lambda_n(v_n(gh)) \\ &= \lambda_1((v_1 g)h) + \dots + \lambda_n((v_n g)h) \\ &= (\lambda_1(v_1 g) + \dots + \lambda_n(v_n g))h \\ &= (vg)h \end{aligned}$$

Con esto hemos comprobado todos los axiomas requeridos para que V sea un FG -módulo. ■

Definición 2.5.2 El FG -módulo trivial es un espacio vectorial V sobre F 1-dimensional con

$$vg = v$$

para todo $v \in V$, $g \in G$.

Definición 2.5.3 Un FG -módulo V es fiel si el elemento unitario de G es el único elemento g para el cual

$$vg = v$$

para todo $v \in V$.

2.5.1. FG -módulos y representaciones equivalentes.

Veamos ahora las relaciones entre los FG -módulos y las representaciones equivalentes de G sobre F . Un FG -módulo tiene varias representaciones, todas de la forma

$$g \rightarrow [g]_{\mathcal{B}}$$

para una base \mathcal{B} de V . El siguiente resultado muestra que todas estas representaciones son equivalentes entre sí.

Teorema 2.5.3 Sea V un FG -módulo con una base \mathcal{B} , y sea ρ la representación de G sobre F definida por

$$\rho : g \rightarrow [g]_{\mathcal{B}}$$

(1) Si \mathcal{B}' es una base de V , entonces la representación

$$\phi : g \rightarrow [g]_{\mathcal{B}'}$$

de G es equivalente a ρ .

(2) Si σ es una representación de G la cual es equivalente a ρ , entonces existe una base \mathcal{B}'' de V tal que

$$\sigma : g \rightarrow [g]_{\mathcal{B}''}$$

Demostración: (1) Sea T la matriz del cambio de base de \mathcal{B} a \mathcal{B}' . Para todo $g \in G$, tenemos

$$[g]_{\mathcal{B}} = T^{-1}[g]_{\mathcal{B}'}T$$

Por lo tanto ϕ es equivalente a ρ .

(2) Supongamos que ρ y σ son representaciones equivalentes de G . Entonces, para la matriz invertible T tenemos

$$g\rho = T^{-1}(g\sigma)T$$

para todo $g \in G$. Sea \mathcal{B}'' la base de V para la cual la matriz del cambio de base de \mathcal{B} a \mathcal{B}'' es T . Entonces para todo $g \in G$

$$[g]_{\mathcal{B}} = T^{-1}[g]_{\mathcal{B}''}T$$

por lo que $g\sigma = [g]_{\mathcal{B}''}$. ■

2.5.2. FG-submódulos.

En lo sucesivo G sera un grupo y F sera \mathbb{R} o \mathbb{C} .

Definición 2.5.4 Sea V un FG-módulo. Un subconjunto W de V se dice que es un FG-submódulo de V si W es un subespacio y $wg \in W$ para todo $w \in W$ y $g \in G$.

2.5.3. FG-módulos irreducibles.

Definición 2.5.5 Un FG-módulo V se dice que es irreducible si es diferente a $\{0\}$ y no tiene FG-submódulos aparte de $\{0\}$ y V .

Si V tiene un FG-submódulo W donde W es distinto a $\{0\}$ o V , entonces V es reducible.

Del mismo modo, una representación $\rho : G \rightarrow GL(F)$ es irreducible si el correspondiente FG-módulo F^n dado por

$$vg = v(\rho(g))$$

es irreducible; y ρ es reducible si F^n es reducible.

Supongamos ahora que V es un FG-módulo reducible, por lo tanto hay un FG-submódulo W con $0 < \dim W < \dim V$. Tomando una base \mathcal{B} de W y extendiéndola a una base \mathcal{B} de V . Entonces para todo $g \in G$, la matriz $[g]_{\mathcal{B}}$ tiene la forma

$$\left(\begin{array}{c|c} X_g & 0 \\ \hline Y_g & Z_g \end{array} \right) \quad (2.5.1)$$

para las matrices X_g , Y_g y Z_g , donde X_g es $k \times k$ para $k = \dim(W)$.

Una representación de grado n es reducible si, y solo si, es equivalente a una representación de la forma (2.6.1), donde X_g es $k \times k$ y $0 < k < n$. Notemos que en (2.6.1), las funciones $g \rightarrow X_g$ y $g \rightarrow Z_g$ son representaciones de G .

2.5.4. FG-homomorfismos.

Definición 2.5.6 Sean V y W FG-módulos. Una función $\vartheta : V \rightarrow W$ se dice que es un FG-homomorfismo si ϑ es una transformación lineal y

$$\vartheta(vg) = \vartheta(v)g$$

En otras palabras, si ϑ envía v a w entonces envía vg a wg .

Como G es un grupo finito y $\vartheta : V \rightarrow W$ es un FG-homomorfismo, entonces para todo $v \in V$ y $r = \sum_{g \in G} \lambda_g g \in FG$, tenemos

$$\vartheta(vr) = \vartheta(v)r$$

Proposición 2.5.1 *Sea V y W FG-módulos y sea $\vartheta : V \rightarrow W$ un FG-homomorfismo. Entonces $\text{Ker } \vartheta$ es un FG-submódulo de V y $\text{Im } \vartheta$ es un FG-submódulo de W .*

Demostración: $\text{Ker } \vartheta$ es un subespacio de V y $\text{Im } \vartheta$ es un subespacio de W ya que ϑ es una transformación lineal.

Sea $v \in \text{Ker } \vartheta$ y $g \in G$, entonces

$$\vartheta(vg) = \vartheta(v)g = 0g = 0$$

así que $vg \in \text{Ker } \vartheta$. Además $\text{Ker } \vartheta$ es un FG-submódulo de V .

Sea $w \in \text{Im } \vartheta$, tal que $w = \vartheta(v)$ para algún $v \in V$. Para todo $g \in G$,

$$wg = \vartheta(v)g = \vartheta(vg) \in \text{Im } \vartheta$$

por lo que $\text{Im } \vartheta$ es un FG-submódulo de W . ■

2.5.5. Isomorfismos de FG-módulos.

Definición 2.5.7 *Sean V y W FG-módulos. Decimos que $\vartheta : V \rightarrow W$ es un FG-isomorfismo si ϑ es un FG-homomorfismo y además posee inversa. Si $\vartheta : V \rightarrow W$ es un FG-isomorfismo, entonces V y W son FG-módulos isomorfos y los representaremos como $V \cong W$.*

En el siguiente teorema veremos que si $V \cong W$ entonces $W \cong V$.

Teorema 2.5.4 *Si $\vartheta : V \rightarrow W$ es un FG-isomorfismo, entonces la inversa $\vartheta^{-1} : W \rightarrow V$ es también un FG-isomorfismo.*

Demostración: Es evidente que ϑ^{-1} es una transformación lineal invertible, por lo que, únicamente, debemos demostrar que ϑ^{-1} es un FG-homomorfismo. Sean $w \in W$ y $g \in G$,

$$\vartheta(\vartheta^{-1}(w)g) = g(\vartheta(\vartheta^{-1}(w)))$$

como ϑ es un FG-homomorfismo,

$$\begin{aligned} &= wg \\ &\vartheta(\vartheta^{-1}(wg)) \end{aligned}$$

Así que $\vartheta^{-1}(w)g = \vartheta^{-1}(wg)$ como se buscaba. ■

Sea $\vartheta : V \rightarrow W$ un FG-isomorfismo, entonces podemos usar ϑ y ϑ^{-1} para cambiar entre los FG-módulos isomorfos V y W , y probar que V y W comparten la mismas propiedades estructurales; algunos ejemplos pueden ser:

1. $\dim V = \dim W$ (cada v_1, \dots, v_n es una base de V si y solo si $\vartheta(v_1), \dots, \vartheta(v_n)$ es base de W).
2. V es irreducible si y solo si W es irreducible (cada X es un FG-submódulo de V si y solo si $\vartheta(X)$ es un FG-submódulo de W).

3. V contiene un FG-submódulo trivial si y solo si W contiene un FG-submódulo trivial (cada X es un FG-submódulo trivial de V si y solo si $\vartheta(X)$ es un FG-submódulo trivial de W).

Teorema 2.5.5 *Sea V un FG-módulo con una base \mathcal{B} , y sea W un FG-módulo con una base \mathcal{B}' . Entonces V y W son isomorfas si y solo si las representaciones*

$$\rho : g \rightarrow [g]_{\mathcal{B}}$$

$$\sigma : g \rightarrow [g]_{\mathcal{B}'}$$

son equivalentes.

Demostración: Para la demostración del anterior teorema primero estableceremos lo siguiente:

1. Los FG-módulos V y W son isomorfos si y solo si existe una base \mathcal{B}_1 de V y una base \mathcal{B}_2 de W tal que

$$[g]_{\mathcal{B}_1} = [g]_{\mathcal{B}_2}$$

para todo $g \in G$.

Para ver esto supongamos, primero, que ϑ es un FG-isomorfismo de V a W , y sea v_1, \dots, v_n una base \mathcal{B}_1 de V ; entonces $\vartheta(v_1), \dots, \vartheta(v_n)$ es una base de \mathcal{B}_2 de W . Sea $g \in G$. Ya que $\vartheta(v_i g) = \vartheta(v_i)g$ para cada i , se sigue que $[g]_{\mathcal{B}_1} = [g]_{\mathcal{B}_2}$.

De modo inverso, supongamos que v_1, \dots, v_n una base \mathcal{B}_1 de V y w_1, \dots, w_n una base \mathcal{B}_2 de W tal que $[g]_{\mathcal{B}_1} = [g]_{\mathcal{B}_2}$ para todo $g \in G$. Sea ϑ la transformación lineal invertible de V a W para la cuál $\vartheta(v_i) = w_i$. Y que $[g]_{\mathcal{B}_1} = [g]_{\mathcal{B}_2}$, se deduce que $\vartheta(v_i g) = \vartheta(v_i)g$ y por lo tanto cada ϑ es un FG-isomorfismo. Esto completa la demostración de (1).

Ahora asumimos que V y W son FG-módulos isomorfos. Por (1) hay una base \mathcal{B}_1 de V y una base \mathcal{B}_2 de W tal que $[g]_{\mathcal{B}_1} = [g]_{\mathcal{B}_2}$ para todo $g \in G$. Definimos ahora una representación ϕ de G como $\phi : g \rightarrow [g]_{\mathcal{B}_1}$. Según el teorema 2.6.3(1), ϕ es equivalente a ρ y a σ , por lo que ρ y σ son equivalentes.

A la inversa, supongamos que ρ y a σ son equivalentes, entonces, por el teorema 2.6.3(2) hay una base \mathcal{B}'' de V tal que $\sigma(g) = [g]_{\mathcal{B}''}$ para todo $g \in G$; esto es, $[g]_{\mathcal{B}'} = [g]_{\mathcal{B}''}$ para todo $g \in G$. Por lo tanto V y W son FG-módulos isomorfos, por (1). ■

2.5.6. Suma directa de FG-módulos.

Sea V un FG-módulo, y supongamos que

$$V = U \oplus W$$

donde U y W son FG-submódulos de V . Sea u_1, \dots, u_m una base \mathcal{B}_1 de U , y w_1, \dots, w_n una base \mathcal{B}_2 de W . Entonces sabemos, por los primeros cursos de álgebra lineal, que $u_1, \dots, u_m, w_1, \dots, w_n$ es una base \mathcal{B} de V , y para $g \in G$

$$\left(\begin{array}{c|c} [g]_{\mathcal{B}_1} & 0 \\ \hline 0 & [g]_{\mathcal{B}_2} \end{array} \right)$$

Generalizando aun mas, si $V = U_1 \oplus \dots \oplus U_r$, es suma directa de los FG-submódulos U_i y \mathcal{B}_i es una base de U_i , entonces podemos unir $\mathcal{B}_1, \dots, \mathcal{B}_r$, para obtener una base \mathcal{B} de V , y para $g \in G$,

$$[g]_{\mathcal{B}} = \begin{pmatrix} [g]_{\mathcal{B}_1} & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & [g]_{\mathcal{B}_r} \end{pmatrix}$$

Proposición 2.5.2 *Sea V un FG-módulo, y supongamos que*

$$V = U_1 \oplus \dots \oplus U_r$$

donde cada U_i es un FG-submódulo de V . Para $v \in V$, tenemos que $v = u_1 + \dots + u_r$ para $u_i \in U_i$, y definimos $\pi_i : V \rightarrow V$ como

$$\pi_i(v) = u_i$$

Entonces cada π_i es un FG-homomorfismo, y es, además, una proyección de V .

Demostración: Evidentemente π_i es una transformación lineal; y es también un FG-homomorfismo, ya que para $v \in V$ con $v = u_i + \dots + u_r$ siendo $u_j \in U_j$ para todo j , y $g \in G$, tenemos que

$$\pi_i(vg) = \pi_i(u_1g + \dots + u_rg) = u_ig = \pi_i(v)g$$

por lo tanto

$$\pi_i^2(v) = \pi_i(u_i) = u_i = \pi_i(v)$$

así que $\pi_i^2 = \pi_i$. Lo que implica que π_i es una proyección. ■

Veamos, por último, un resultado concerniente a la suma de FG-módulos irreducibles del cual no daremos una demostración.

Proposición 2.5.3 *Sea V un FG-módulo, y supongamos que*

$$V = U_1 + \dots + U_r$$

donde cada U_i es un FG-submódulo irreducible de V . Entonces V es una suma directa de algunos FG-submódulos U_i .

Capítulo 3

Caracteres.

3.1. El lema de Schur.

Teorema 3.1.1 (Lema de Schur.) Sea $f : V \rightarrow V'$ una aplicación lineal entre G -módulos irreducibles. Entonces, o bien $f = 0$, o bien f es un isomorfismo; además, en este caso, f es una homotecia.

Demostración: Como $\text{Ker}(f)$ es un G -submódulo estable de V , o bien $\text{Ker}(f)=V$, lo que significa que $f = 0$, o bien $\text{Ker}(f)=0$. En este caso la condición $f(gv) = gf(v)$, para $v \in V$, implica que $\text{Im}(f)$ es también un G -submódulo invariante de V' , con lo que $\text{Im}(f)=V'$. Sobre los números complejos f ha de tener algún valor propio λ , ello supone que $f - \lambda Id$ tiene núcleo no nulo, con lo que por lo anterior $f - \lambda Id$ es el morfismo nulo y por lo tanto $f = \lambda Id$. ■

Corolario 3.1.1 Toda representación irreducible V de un grupo abeliano es de grado 1.

Demostración: Sea g un elemento de G y consideremos la aplicación lineal que induce $g : V \rightarrow V$. Puesto que para todo $h \in G$ se cumple que $gh = hg$, se tiene que g es un morfismo de G -módulos, con ello g es una homotecia. Así la representación de G en V convierte a G en un grupo de homotecias. Puesto que una homotecia deja invariante cualquier espacio, si V es irreducible ha de ser de dimensión 1. ■

3.2. Carácter de una representación.

Para comprender lo que es el carácter de una representación necesitamos conocer primero el concepto de traza. Este concepto se estudió en los primeros cursos de Álgebra Lineal, pero debido a su importancia en esta sección procedemos, de nuevo, a dar su definición:

Definición 3.2.1 Sea V un espacio vectorial de dimensión n y a un endomorfismo, cuya matriz, en una base (e_i) de V , es (a_{ij}) . La traza de a es el escalar

$$\text{Tr}(a) = \sum_i a_{ii}$$

la traza de a no depende de la base (e_i) elegida.

Sea $\rho : G \rightarrow GL(V)$ una representación lineal de un grupo finito G en el espacio vectorial V . Dado $s \in G$, pongamos

$$\chi_\rho(s) = \text{Tr}(\rho(s))$$

Se obtiene así una aplicación χ_ρ definida en G , a valores complejos

$$\chi_\rho : G \rightarrow \mathbb{C}$$

llamada *carácter* de la representación ρ , la importancia de esta aplicación proviene de que caracteriza la representación considerada.

Proposición 3.2.1 *Si χ es el carácter de una representación ρ de grado n , entonces,*

1. $\chi(1) = n$
2. $\chi(s^{-1}) = \chi(s)^*$ para todo $s \in G$
3. $\chi(sts^{-1}) = \chi(s)$ cualquiera que sean $s, t \in G$

(Si x es un número complejo, denotamos a su conjugado por x^* .)

Demostración: Como $\rho(1) = 1$ y $Tr(1) = n$ por ser V de dimensión n , tendremos $\chi(1) = n$.

$\rho(s)$ es de orden finito; sus valores propios $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ también serán de orden finito y por lo tanto de módulo 1. Entonces:

$$\chi(s^*) = Tr(\rho(s^*)) = \sum \lambda_i^* = \sum \lambda_i^{-1} = Tr(\rho(s^{-1})) = \chi(s^{-1})$$

■

Una aplicación f definida en G que verifica la identidad 3), o, equivalentemente, la identidad $f(uv) = f(vu)$, se llama una *función central*.

Proposición 3.2.2 *Sean $\rho_1 : G \rightarrow GL(V_1)$ y $\rho_2 : G \rightarrow GL(V_2)$, dos representaciones lineales de G , y sean χ_1 y χ_2 sus caracteres. Entonces*

1. *El carácter χ de la representación suma directa $V_1 \oplus V_2$ es igual a $\chi_1 + \chi_2$.*
2. *El carácter ψ de la representación producto tensorial $V_1 \otimes V_2$ es igual a $\chi_1 \cdot \chi_2$.*

Demostración: Expresamos ρ_1 y ρ_2 en forma matricial: R_s^1 y R_s^2 . La forma matricial de la representación $V_1 \oplus V_2$ es

$$R_s = \begin{pmatrix} R_s^1 & 0 \\ 0 & R_s^2 \end{pmatrix}$$

de donde $Tr(R_s) = Tr(R_s^1) + Tr(R_s^2)$, es decir, $\chi(s) = \chi_1(s) + \chi_2(s)$. Sabemos que:

$$\chi_1(s) = \sum_{i_1} r_{i_1 i_1}(s)$$

$$\chi_2(s) = \sum_{i_2} r_{i_2 i_2}(s)$$

$$\psi(s) = \sum_{i_1, i_2} r_{i_1 i_1}(s) \cdot r_{i_2 i_2}(s) = \chi_1(s) \cdot \chi_2(s)$$

■

Veamos esto con un ejemplo.

Ejemplo 3.2.1 *Sea $G = D_8 = \langle a, b; a^4 = b^2 = 1, b^{-1}ab = a^{-1} \rangle$, y sea $\rho : G \rightarrow GL(2, \mathbb{C})$ la representación definida como*

$$\rho(a) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\rho(b) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Sea χ el carácter de esta representación. En la siguiente tabla podemos ver los valores que toma $\rho(g)$ y $\chi(g)$ en función de g .

Cuadro 3.1: Valores de los caracteres.

g	$\rho(g)$	$\chi(g)$
1	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	2
a	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$	0
a^2	$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	-2
a^3	$\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	0
b	$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$	0
ab	$\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}$	0
a^2b	$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$	0
a^3b	$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$	0

3.3. Relaciones de ortogonalidad de los caracteres y descomposición de la representación regular.

Introduzcamos la siguiente notación: si φ y ψ son funciones del tipo $\varphi, \psi : G \rightarrow \mathbb{C}$, pondremos

$$\langle \varphi, \psi \rangle = \frac{1}{|G|} \sum_{t \in G} \varphi(t)^* \psi(t)$$

siendo $|G|$ el orden de G . Esta expresión es un producto escalar.

Teorema 3.3.1 *Si χ es el carácter de una representación irreducible, $\langle \chi, \chi \rangle = 1$. Si χ y χ' son los caracteres de dos representaciones irreducibles no isomorfas, entonces $\langle \chi, \chi' \rangle = 0$, es decir, son ortogonales.*

Demostración: Sea $\rho : G \rightarrow GL(V)$ la representación irreducible cuyo carácter es χ , y sea n su grado. Entonces:

$$\langle \chi, \chi \rangle = \frac{1}{|G|} \sum_{t \in G} \chi(t)^* \chi(t) = \frac{1}{|G|} \sum_{t \in G} \chi(t^{-1}) \chi(t)$$

Ahora bien, si ponemos ρ en forma matricial $\rho(t) = [r_{ij}(t)]$, $\chi(t) = \sum_i r_{ii}(t)$, y por lo tanto

$$\langle \chi, \chi \rangle = \frac{1}{|G|} \sum_{t, i, j} r_{ii}(t^{-1}) r_{jj}(t)$$

lo que implica que

$$\frac{1}{|G|} \sum_{t \in G} r_{ii}(t^{-1}) r_{jj}(t)$$

es igual a 0 si $i \neq j$ y a $\frac{1}{n}$ si $i = j$. ■

Teorema 3.3.2 *Sea V una representación lineal de G , de carácter φ , descomponemos V en suma directa de representaciones irreducibles*

$$V = W_1 \oplus \dots \oplus W_k$$

Entonces, si W es una representación irreducible de carácter χ , el número de las W_i isomorfas a W es igual al producto escalar $\langle \varphi, \chi \rangle$.

Sea χ_i el carácter de W_i , sabemos que

$$\varphi = \chi_1 + \dots + \chi_k$$

y por lo tanto $\langle \varphi, \chi \rangle = \langle \chi_1, \chi \rangle + \dots + \langle \chi_k, \chi \rangle$. Por el teorema anterior $\langle \chi_i, \chi \rangle$ es igual a 1 (o a 0) según que W_i sea (o no) isomorfa a W .

Del anterior teorema podemos afirmar que el número de las W_i isomorfas a W no depende de la descomposición elegida; además, dos representaciones del mismo carácter son isomorfas, ya que ambas contienen el mismo número de veces toda representación irreducible dada.

Estos resultados permiten reducir el estudio de las representaciones al de los caracteres. Si χ_1, \dots, χ_h son los caracteres de las representaciones irreducibles de G y W_1, \dots, W_h son sus correspondientes representaciones, toda representación V es isomorfa a una suma directa

$$V = m_1 W_1 \oplus \dots \oplus m_h W_h$$

para m_i entero mayor o igual a 0.

El carácter φ de V es igual a $m_1 \chi_1 + \dots + m_h \chi_h$, y $m_i = \langle \varphi, \chi_i \rangle$. Las relaciones de ortogonalidad entre los χ_i implican que

$$\langle \varphi, \varphi \rangle = \sum_{i=1}^h m_i^2$$

de donde obtenemos el siguiente teorema.

Teorema 3.3.3 *Si φ es el carácter de una representación V , $\langle \varphi, \varphi \rangle$ es un entero y $\langle \varphi, \varphi \rangle = 1$ si y sólo si V es irreducible.*

Demostración: En efecto, $\sum m_i^2$ vale 1 si y solo si uno de los m_i es igual a 1 y los demás iguales a 0, es decir, si y solo si V es isomorfo a una de las W_i . ■

Se ha obtenido así un *criterio de irreducibilidad* muy cómodo.

Con los siguientes resultados describiremos la descomposición de una representación regular:

Proposición 3.3.1 *El carácter φ de la representación regular viene dado por las siguientes fórmulas:*

$$\varphi(1) = |G|$$

donde $|G|$ es el orden de G . Y

$$\varphi(s) = 0$$

si $s \neq 1$.

Corolario 3.3.1 *Cada representación irreducible W_i está contenida en la representación regular un número de veces igual a su grado n_i .*

Demostración: Por el teorema 3.3.2, este número es igual a $\langle \varphi, \chi_i \rangle$. Ahora bien

$$\langle \varphi, \chi_i \rangle = \frac{1}{|G|} \sum_{s \in G} \varphi(s)^* \chi_i(s) = \frac{1}{|G|} |G| \chi_i(1) = \chi_i(1) = n_i$$

■

Corolario 3.3.2 *Los grados n_i verifican la relación $\sum_{i=1}^h n_i^2 = |G|$.*

Demostración: En efecto, el corolario 3.3.1 asegura que $\varphi = \sum n_i \chi_i$ y aplicando ambos miembros a dicho corolario resulta $|G| = \sum_{i=1}^h n_i^2$. ■

Este resultado se puede usar cuando se buscan las representaciones irreducibles de G ; supongamos construidas representaciones irreducibles no isomorfas dos a dos, de grados n_1, \dots, n_k ; a fin de que sean todas las representaciones irreducibles de G (salvo isomorfismos) es necesario y suficiente que $n_1^2 + \dots + n_k^2 = |G|$.

3.4. Número de representaciones irreducibles.

Una aplicación f definida en G se llama *central* si $f(tst^{-1}) = f(s)$ cualesquiera que sean $s, t \in G$.

Proposición 3.4.1 *Sea f una función central definida en G , y $\rho : G \rightarrow GL(V)$ una representación lineal de G . Sea ρ_f el endomorfismo de V definido por:*

$$\rho_f = \sum_{t \in G} f(t) \rho(t)$$

Si V es irreducible, de grado n y de carácter χ , ρ_f es una homotecia de razón λ , donde

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{t \in G} f(t) \chi_t = \frac{|G|}{n} (f^*|_{\chi})$$

Demostración: Calculamos $\rho(s)^{-1} \rho_f \rho(s)$:

$$\rho(s)^{-1} \rho_f \rho(s) = \sum_{t \in G} f(t) \rho(s)^{-1} \rho(t) \rho(s) = \sum_{t \in G} f(t) \rho(s^{-1}ts)$$

y poniendo $u = s^{-1}ts$, resulta

$$\rho(s)^{-1} \rho_f \rho(s) = \sum_{u \in G} f(sus^{-1}) \rho(u) = \sum_{u \in G} f(u) \rho(u) = \rho_f$$

De modo que $\rho_f \rho(s) = \rho(s) \rho_f$. Esta igualdad implica que ρ_f es una homotecia de razón λ . La traza de λ es $n\lambda$; y la de ρ_f es

$$\sum_{t \in G} f(t) \text{Tr}(\rho(t)) = \sum_{t \in G} f(t) \chi(t)$$

de donde

$$\lambda = \frac{1}{n} \sum_{t \in G} f(t) \chi_t = \frac{|G|}{n} (f^*|_{\chi})$$

■

Introduzcamos ahora el espacio vectorial H de las funciones centrales de G . Los caracteres χ_1, \dots, χ_k de las representaciones irreducibles de G son elementos de H .

Teorema 3.4.1 *Los caracteres χ_1, \dots, χ_h forman una base ortonormal de H .*

Demostración: El teorema 3.3.1 demuestra que χ_1, \dots, χ_h es un sistema ortonormal de H . Falta demostrar que este sistema es completo, es decir, que todo elemento de H ortogonal a los χ_i es nulo. Para ello, sea f un elemento de H ortogonal a los χ_i . Si $\rho : G \rightarrow GL(V)$ es una representación de G , ponemos

$$\rho_f^* = \sum_{t \in G} f(t)^* \rho(t)$$

La proposición 3.4.1 muestra que ρ_f^* es nula si V es irreducible; descomponiendo en suma directa concluimos que ρ_f^* es siempre nula. Aplicando este resultado a la representación regular R y calculando la imagen del vector e_1 de la base por ρ_f^* :

$$\rho_f^* e_1 = \sum_{t \in G} f(t)^* \rho(t) e_1 = \sum_{t \in G} f(t)^* e_t$$

Como ρ_f^* es nula, esta igualdad implica que $f(t)^* = 0$ para todo t , de donde $f = 0$, lo cual termina la demostración. ■

Recordemos que dos elementos t y t' de G se dicen conjugados si existe $s \in G$ tal que $t' = sts^{-1}$; esta relación es de equivalencia y divide a G en clases.

Teorema 3.4.2 *El número de representaciones irreducibles de G (salvo isomorfismos) es igual al número de clases de G .*

Demostración: Sean C_1, \dots, C_k las clases de G . Una función f definida en G es central si y solo si es constante en cada una de las clases C_1, \dots, C_k y por tanto una tal función está determinada por k valores $\lambda_1, \dots, \lambda_k$, que se pueden poner al azar. Resulta de ello que la dimensión del espacio H de funciones centrales es igual a k . Por otra parte, esta dimensión es igual, según el teorema 3.4.1, al número de representaciones irreducibles de G (salvo isomorfismos). ■

Otra consecuencia del teorema 3.4.1 es que siendo $s \in G$, el número de elementos de la clase de s y f_s la función igual a 1 sobre esta clase e igual a 0 en el complementario. Como esta función es central, por el teorema 3.4.1 tendremos:

$$f_s = \sum_{i=1}^{i=h} x_i \chi_i$$

donde

$$x_i = \langle \chi_i, f_s \rangle = \frac{c_s}{|G|} \chi_i(s)^*$$

Así pues, para todo $t \in G$

$$f_s(t) = \frac{c_s}{|G|} \sum_{i=1}^{i=h} \chi_i(s)^* \chi_i(t)$$

Si explicitamos resultan las formulas siguientes:(para $t = s$):

$$\sum_{i=1}^{i=h} \chi_i(s)^* \chi_i(s) = \frac{|G|}{c_s}$$

(para t no conjugado de s):

$$\sum_{i=1}^{i=h} \chi_i(s)^* \chi_i(t) = 0$$

Ejemplo 3.4.1 Sea G el grupo de permutaciones de 3 letras. Entonces $|G| = 6$, y tiene tres clases: el elemento identidad, tres transposiciones y dos permutaciones cíclicas. Sea t una transposición, y c una permutación cíclica. Tenemos $t^2 = 1$, $c^3 = 1$, $tc = c^2t$; de donde hay solo dos caracteres de grado 1: el carácter identidad χ_1 y el carácter χ_2 que nos varia el signo de la permutación.

El último teorema nos muestra que existe otro carácter irreducible θ ; si n es su grado debemos tener $1 + 1 + n^2 = 6$, por lo que $n = 2$. Los valores de θ pueden ser deducidos del hecho de que $\chi_1 + \chi_2 + 2\theta$ es el carácter de la representación regular de G . Obtenemos la siguiente tabla de caracteres de G :

	1	t	c
χ_1	1	1	1
χ_2	1	-1	1
θ	2	0	-1

Cuadro 3.2: Tabla de caracteres de G .

Capítulo 4

Tabla de caracteres.

Antes de hablar sobre las tablas de caracteres vamos a ampliar la información sobre un tema de la teoría de grupos que será necesario más adelante: las clases de conjugación. Los resultados que veremos ahora serán de gran importancia para la creación de las tablas de caracteres.

4.1. Clases de conjugación.

Definición 4.1.1 Sean $x, y \in G$. Decimos que x es un conjugado de y en G si

$$y = g^{-1}xg$$

para $g \in G$.

El conjunto de todos los elementos conjugados de x en G es

$$x^G = \{g^{-1}xg : g \in G\}$$

y se llama clase de conjugación de x en G .

Ahora daremos un primer resultado que muestra que dos clases de conjugación no tienen elementos en común.

Proposición 4.1.1 Si $x, y \in G$, entonces $x^G = y^G$ o $x^G \cap y^G$ es vacío.

Demostración: Supongamos que $x^G \cap y^G$ no es vacío, tomemos $z \in x^G \cap y^G$. Entonces existe $g, h \in G$ tal que

$$z = g^{-1}xg = h^{-1}yh$$

por lo tanto $x = gh^{-1}yhg^{-1} = k^{-1}yk$, donde $k = hg^{-1}$. Así que

$$a \in x^G \Rightarrow a = b^{-1}xb$$

para $b \in G$

$$\Rightarrow a = b^{-1}k^{-1}ykb$$

$$\Rightarrow a = c^{-1}yc$$

donde $c = kb$

$$\Rightarrow a \in y^G$$

De este modo $x^G \subseteq y^G$. Del mismo modo $y^G \subseteq x^G$, usando $y = kxk^{-1}$, y por lo tanto $x^G = y^G$. ■

Cada elemento $x \in G$ se encuentra en la clase de conjugación x^G , como $x = 1^{-1}x1$ con $1 \in G$, G es la unión de sus clases de conjugación.

Corolario 4.1.1 *Todo grupo es una unión de sus clases de conjugación. Las clases de conjugación distintas son disjuntas.*

Definición 4.1.2 *Si $G = x_1^G \cup \dots \cup x_l^G$, donde las clases de conjugación x_1^G, \dots, x_l^G son distintas, llamamos a x_1, \dots, x_l representantes de las clases de conjugación de G .*

Ejemplo 4.1.1 *Sea $G = D_6 = \langle a, b : a^3 = b^2 = 1, b^{-1}ab = a^{-1} \rangle$. Los elementos de G son $1, a, a^2, b, ab, a^2b$. Cada $g^{-1}ag$ es a o a^2 para todo $g \in G$, y $b^{-1}ab = a^2$, tenemos*

$$a^G = \{a, a^2\}$$

Además, $a^{-i}ba^i = a^{-2i}b$ para todo entero i , así que

$$b^G = \{b, ab, a^2b\}$$

Por lo tanto las clases de conjugación de G son

$$\{1\}, \{a, a^2\}, \{b, ab, a^2b\}$$

La siguiente proposición puede ser útil a la hora de calcular las clases de conjugación.

Proposición 4.1.2 *Sean $x, y \in G$. Si x es conjugado de y en G , entonces x^n es conjugado de y^n en G para todo entero n . x e y tienen el mismo orden.*

Demostración: Observemos que para $a, b \in G$, tenemos

$$g^{-1}abg = (g^{-1}ag)(g^{-1}bg)$$

Así que $g^{-1}x^ng = (g^{-1}xg)^n$. Supongamos que x es conjugado de y en G , así que $y = g^{-1}xg$ para algún $g \in G$. Entonces $y^n = g^{-1}x^ng$ y por lo tanto x^n es conjugado de y^n en G . Sea x de orden m , entonces $y^m = g^{-1}x^mg = 1$, y para $0 < r < m$, $y^r = g^{-1}x^rg \neq 1$, así que y tiene orden m . ■

4.1.1. Tamaño de las clases de conjugación.

El próximo teorema determina el tamaño de las clases de conjugación en G , pero antes daremos la siguiente definición:

Definición 4.1.3 *Sea $x \in G$. El centralizador de x en G , escrito $C_G(x)$, es el conjunto de elementos de G los cuales conmutan con x ; es decir*

$$C_G(x) = \{g \in G : xg = gx\}$$

$C_G(x)$ es un subgrupo de G .

Teorema 4.1.1 *Sea $x \in G$. El tamaño de la clase de conjugación x^G está dado por*

$$|x^G| = |G : C_G(x)| = |G|/|C_G(x)|$$

En particular, $|x^G|$ divide a $|G|$.

Demostración: Observemos primero que para $g, h \in G$, tenemos

$$g^{-1}xg = h^{-1}xh \Leftrightarrow hg^{-1}x = xhg^{-1}$$

$$\Leftrightarrow hg^{-1} \in C_G(x)$$

$$\Leftrightarrow C_G(x)g = C_G(x)h$$

teniendo esto en cuenta, podemos definir una función inyectiva f definida por:

$$f : g^{-1}xg \rightarrow C_G(x)$$

Es evidente que f es sobreyectiva. Así que f es una biyección, lo que prueba que $|x^G| = |G : C_G(x)|$. ■

Antes de avanzar hagamos la siguiente observación

$$|x^G| = 1 \Leftrightarrow g^{-1}xg = x$$

para todo $g \in G$

$$\Leftrightarrow x \in Z(G)$$

donde $Z(G)$ es el centro de G .

Definición 4.1.4 (Ecuación de clases.) Sean x_1, \dots, x_l representantes de las clases de conjugación de G . Entonces

$$|G| = |Z(G)| + \sum_{x_i \notin Z(G)} |x_i^G|$$

donde $|x_i^G| = |G : C_G(x_i)|$ y ambos, $|Z(G)|$ y $|x_i^G|$ divide a $|G|$.

Existen determinados paquetes informáticos que tienen como objeto trabajar con los distintos grupos algebraicos, uno de ellos es GAP, el cual puede ser descargado de forma gratuita desde www.gap-system.org. GAP permite calcular las clases de conjugación de un grupo determinado, en el siguiente ejemplo veremos como calcular las clases de conjugación del grupo simétrico S_3 .

Creamos el grupo:

```
gap> s3:=SymmetricGroup(3);
Sym( [ 1 .. 3 ] )
```

Tiene 3 clases de conjugaciones de elementos:

```
gap> cc:=ConjugacyClasses(s3);
[ ()^G, (1,2)^G, (1,2,3)^G ]
gap> Length(cc);
3
```

Tomemos por ejemplo el segundo de ellos:

```
gap> c:=cc[2];
(1,2)^G
```

Vemos que contiene 3 elementos

```
gap> Size(c);
3
```

Generamos una lista con todos los elementos de la clase escogida

```
gap> AsList(c);
[ (1,2), (2,3), (1,3) ]
```

4.2. Número de caracteres irreducibles.

En este punto desarrollaremos un resultado que afirma que el número de caracteres irreducibles de un grupo finito es igual al número de clases de conjugación de el grupo.

4.2.1. Funciones de clase.

Definición 4.2.1 Una función de clase en G es una función $\psi : G \rightarrow \mathbb{C}$ tal que $\psi(x) = \psi(y)$ donde x e y son elementos conjugados de G .

Sabemos que los caracteres de G son funciones de clase G . El conjunto C de todas las funciones de clase en G es un subespacio de el espacio vectorial de todas las funciones de G a \mathbb{C} . Una base de C estaria dada por aquellas funciones que toman el valor 1 en una clase de conjugación y 0 en el resto. Asi que, si l es el número de clases de conjugación de G , entonces

$$\dim(C) = l$$

Teorema 4.2.1 El número de caracteres irreducibles de G es igual al numero de clases de conjugación de G .

Demostracion: Sea χ_1, \dots, χ_k los caracteres irreducibles de G y sea l el numero de clases de conjugaciones de G . χ_1, \dots, χ_k son elementos linealmente independientes de C , lo que implica que $k \leq l$.

Para demostrar $l \leq k$ consideraremos los $\mathbb{C}G$ -módulos regulares. Si V_1, \dots, V_k es un conjunto completo de $\mathbb{C}G$ -módulos irreducibles no isomorfos, entonces:

$$\mathbb{C}G = W_1 \oplus \dots \oplus W_k$$

donde para cada i , W_i es isomorfo a la suma directa de V_i .

Cada $\mathbb{C}G$ contiene el elemento identidad, por lo que podemos poner

$$1 = f_1 + \dots + f_k$$

con $f_i \in W_i$ para $1 \leq i \leq k$.

Sea $z \in Z(\mathbb{C}G)$, el centro de $\mathbb{C}G$, para cada i existe $\lambda_i \in \mathbb{C}$ tal que para todo $v \in V_i$

$$vz = \lambda_i v$$

por lo tanto $wz = \lambda_i w$ para todo $w \in W_i$, en particular, de

$$f_i z = \lambda_i f_i$$

se sigue que

$$\begin{aligned} z = 1z &= (f_1 + \dots + f_k)z = f_1 z + \dots + f_k z \\ &= \lambda_1 f_1 + \dots + \lambda_k f_k \end{aligned}$$

Esto prueba que $Z(\mathbb{C}G)$ está contenido en el subespacio de $\mathbb{C}G$ generado por f_1, \dots, f_k . Como cada $Z(\mathbb{C}G)$ tiene dimensión l deducimos que $l \leq k$. Esto completa la prueba de que $k = l$. ■

Corolario 4.2.1 Los caracteres irreducibles χ_1, \dots, χ_k de G forman una base de el espacio vectorial de todas las funciones de clase en G . En efecto, si ψ es una función de clase, entonces

$$\psi = \sum_{i=1}^k \lambda_i \chi_i$$

donde $\lambda_i = \langle \psi, \chi_i \rangle$ para $1 \leq i \leq k$

Proposición 4.2.1 Sean $g, h \in G$. Entonces g es conjugado de h si, y solo si, $\chi(g) = \chi(h)$ para todos los caracteres χ de G .

Demostración: Es sabido que si g es conjugado de h entonces $\chi(g) = \chi(h)$.

A la inversa, supongamos que $\chi(g) = \chi(h)$ para todos los caracteres χ de G . Por el anterior corolario $\psi(g) = \psi(h)$ para todas las funciones de clase ψ de G . En particular, esto es cierto para las funciones de clase ψ la cuales toman el valor 1 en la clase de conjugación de g y toma el valor 0 en el resto. Entonces $\psi(g) = \psi(h) = 1$, y, por lo tanto, g es conjugado de h . ■

Corolario 4.2.2 Sea $g \in G$. Entonces g es conjugado de g^{-1} si, y solo si, $\chi(g)$ es real para todos los caracteres χ de G .

Ejemplo 4.2.1 A continuación veremos un simple ejemplo con GAP en el cual se verifica el teorema 4.2.1 que afirma que el número de caracteres irreducibles de G es igual al número de clases de conjugación de G .

Creamos un grupo, en este caso el grupo dihedral asociado a un cuadrado

```
gap> d8:=DihedralGroup(IsPermGroup, 8);
Group([ (1,2,3,4), (2,4) ])
```

Comprobamos que tiene 5 caracteres irreducibles

```
gap> cir:=Irr(d8);
[ Character( CharacterTable( Group([ (1,2,3,4), (2,4) ]) ), [ 1, 1, 1, 1, 1 ] ),
  Character( CharacterTable( Group([ (1,2,3,4), (2,4) ]) ), [ 1, -1, -1, 1, 1 ] ),
  Character( CharacterTable( Group([ (1,2,3,4), (2,4) ]) ), [ 1, -1, 1, -1, 1 ] ),
  Character( CharacterTable( Group([ (1,2,3,4), (2,4) ]) ), [ 1, 1, -1, -1, 1 ] ),
  Character( CharacterTable( Group([ (1,2,3,4), (2,4) ]) ), [ 2, 0, 0, 0, -2 ] ) ]
gap> Size(cir);
5
```

Comprobamos que tiene 5 clases de conjugacion

```
gap> cc:=ConjugacyClasses(d8);
[ ()^G, (2,4)^G, (1,2)(3,4)^G, (1,2,3,4)^G, (1,3)(2,4)^G ]
gap> Size(cc);
5
```

4.3. Tablas de caracteres.

Los caracteres irreducibles de un grupo finito G son funciones de clase, y el número de ellos es igual al número de las clases de conjugación de G . En ocasiones es conveniente anotar los valores de los caracteres irreducibles de G en una matriz cuadrada. Esta matriz se llama *tabla de caracteres de G* .

4.3.1. Tablas de caracteres.

Definición 4.3.1 Sean χ_1, \dots, χ_k los caracteres irreducibles de G , y sean g_1, \dots, g_k representantes de las clases de conjugación de G . La matriz cuadrada $k \times k$ cuya ij -ésima entrada es $\chi_i(g_j)$, para todo i, j con $1 \leq i \leq k$, $1 \leq j \leq k$, se llama *tabla de caracteres de G* .

Es normal nombrar los caracteres irreducibles y las clases de conjugación de G de tal modo que $\chi_1 = 1_G$ sea el carácter trivial, y $g_1 = 1$ el elemento identidad de G . Mas allá de esto, se nombran de modo arbitrario. Señalar que en las tablas de caracteres las filas están indexadas por los caracteres irreducibles de G , mientras que las columnas están indexadas por las clases de conjugación.

Proposición 4.3.1 *La tabla de caracteres de G es una matriz invertible.*

Demostración: La demostración de esta proposición se sigue inmediatamente del hecho de que los caracteres irreducibles de G , y por lo tanto las filas de la tabla de caracteres, son linealmente independientes. ■

4.3.2. Relaciones de ortogonalidad.

Las relaciones de ortogonalidad,

$$\langle \chi_r, \chi_s \rangle = \delta_{rs}$$

de las cuales ya se habló en el capítulo anterior, pueden ser expresadas en términos de filas de la tabla de caracteres escribiendo las relaciones como

$$\sum_{i=1}^k \frac{\chi_r(g_i) \chi_s^*(g_i)}{|C_G(g_i)|} = \delta_{rs}$$

Las mismas relaciones existen para las columnas de la tabla de caracteres como veremos en el siguiente resultado:

Teorema 4.3.1 *Sean χ_1, \dots, χ_k caracteres irreducibles de G , y sean g_1, \dots, g_k representantes de las clases de conjugación de G . Las siguientes relaciones se mantienen para cualquier $r, s \in \{1, \dots, k\}$*

1. *Relación de ortogonalidad asociada a las filas de la tabla de caracteres:*

$$\sum_{i=1}^k \frac{\chi_r(g_i) \chi_s^*(g_i)}{|C_G(g_i)|} = \delta_{rs}$$

2. *Relación de ortogonalidad asociada a las columnas de la tabla de caracteres:*

$$\sum_{i=1}^k \chi_i(g_r) \chi_i^*(g_s) = \delta_{rs} |C_G(g_r)|$$

Demostración: Para las relaciones de ortogonalidad asociadas a las filas de la tabla de caracteres denotamos por g_i^G la clase de conjugación de G que contiene a g_i . Ya que los caracteres son constantes en cada clase de conjugación

$$\sum_{g \in g_i^G} \chi(g) \psi^*(g) = |g_i^G| \chi(g_i) \psi^*(g_i)$$

Como

$$G = \cup_{i=1}^l g_i^G$$

y

$$|g_i^G| = |G| / |C_G(g_i)|$$

Tenemos que

$$\begin{aligned} \langle \chi, \psi \rangle &= \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \chi(g) \psi^*(g) = \frac{1}{|G|} \sum_{i=1}^l \sum_{g \in g_i^G} \chi(g) \psi^*(g) \\ &= \sum_{i=1}^l \frac{|g_i^G|}{|G|} \chi(g_i) \psi^*(g_i) \end{aligned}$$

$$= \sum_{i=1}^l \frac{1}{|C_G(g_i)|} \chi(g_i) \psi^*(g_i)$$

Pasamos ahora a dar una demostración para para las relaciones de ortogonalidad asociadas a las columnas de la tabla de caracteres:

Para $1 \leq s \leq k$, sea ψ_s una función de clase que satisface

$$\psi_s(g_r) = \delta_{rs}$$

Por el corolario 4.2.1, ψ_s es una combinación lineal de χ_1, \dots, χ_k , ya que

$$\psi_s = \sum_{i=1}^k \lambda_i \chi_i$$

como $\langle \chi_i, \chi_j \rangle = \delta_{ij}$, tenemos

$$\lambda_i = \langle \psi_s, \chi_i \rangle = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \psi_s(g) \chi_i^*(g)$$

$\phi_s(g) = 1$ si g es conjugado de g_s , y $\phi_s(g) = 0$ en cualquier otro caso; así que hay $|G|/|C_G(g_s)|$ elementos de G conjugados de g_s por el teorema 4.1.1.

Así que

$$\lambda_i = \frac{1}{|G|} \sum_{g \in G} \psi_s(g) \chi_i^*(g) = \frac{\chi_i^*(g_s)}{|C_G(g_s)|}$$

Por lo tanto

$$\delta_{rs} = \psi_s(g_r) = \sum_{i=1}^k \lambda_i \chi_i(g_r) = \sum_{i=1}^k \frac{\chi_i(g_r) \chi_i^*(g_s)}{|C_G(g_s)|}$$

■

Veamos todo lo tratado hasta ahora con un ejemplo:

Ejemplo 4.3.1 Consideremos el grupo simétrico S_3 . Las clases de conjugación son $\{1\}$, $\{(12), (13), (23)\}$, y $\{(123), (132)\}$, con lo que existen 3 caracteres irreducibles χ_1, χ_2, χ_3 . Con GAP lo haríamos como sigue:

```
# Creamos el grupo simetrico s3
gap> s3:=SymmetricGroup(IsPermGroup, 3);
Sym( [ 1 .. 3 ] )
# Calculamos sus clases de conjugacion
gap> cc:=ConjugacyClasses(s3);
[ ()^G, (1,2)^G, (1,2,3)^G ]
# Vemos que tiene 3 clases de conjugacion, procedemos a analizarlas
gap> Elements(cc[1]);
[ () ]
gap> Elements(cc[2]);
[ (2,3), (1,2), (1,3) ]
gap> Elements(cc[3]);
[ (1,2,3), (1,3,2) ]
# Como tiene 3 clases de conjugacion tendra 3 caracteres irreducibles, lo comprobamos
gap> cir:=Irr(s3);
[ Character( CharacterTable( Sym( [ 1 .. 3 ] ) ), [ 1, -1, 1 ] ),
```

```

Character( CharacterTable( Sym( [ 1 .. 3 ] ) ), [ 2, 0, -1 ] ),
Character( CharacterTable( Sym( [ 1 .. 3 ] ) ), [ 1, 1, 1 ] ) ]
gap> Length(cir);
3

```

Si consideramos la representación

$$\rho_2 : S_3 \rightarrow S^1$$

asignando a cada permutación en S_3 su signo, obtenemos:

$$\begin{pmatrix} \chi_1(1) = 1 & \chi_1(12) = 1 & \chi_1(123) = 1 \\ \chi_2(1) = 1 & \chi_2(12) = -1 & \chi_2(123) = 1 \\ \chi_3(1) = n_3 & \chi_3(12) & \chi_3(123) \end{pmatrix}$$

Como $6 = |S_3| = 1 + 1 + n_3^2$, se tiene $n_3 = 2$. La ortogonalidad de las dos primeras columnas implica

$$1 \cdot 1 + 1 \cdot (-1) + 2 \cdot \chi_3(12) = 0$$

de lo que $\chi_3(12) = 0$. Mientras, la ortogonalidad de las columnas primera y tercera proporciona

$$1 \cdot 1 + 1 \cdot 1 + 2 \cdot \chi_3(123) = 0$$

por lo que $\chi_3(123) = -1$.

En conclusion tenemos:

$$\begin{pmatrix} \chi_1(1) = 1 & \chi_1(12) = 1 & \chi_1(123) = 1 \\ \chi_2(1) = 1 & \chi_2(12) = -1 & \chi_2(123) = 1 \\ \chi_3(1) = 2 & \chi_3(12) = 0 & \chi_3(123) = -1 \end{pmatrix}$$

en GAP seria como sigue:

La tabla de caracteres del grupo s3 sera:

```

gap> ct:=CharacterTable(s3);
CharacterTable( Sym( [ 1 .. 3 ] ) )
gap> Display(ct);
CT1

```

```

2  1  1  .
3  1  .  1

```

```

1a 2a 3a
2P 1a 1a 3a
3P 1a 2a 1a

```

```

X.1    1 -1  1
X.2    2  . -1
X.3    1  1  1

```

4.4. Subgrupos normales y elevación de caracteres.

Si N es un subgrupo normal de el grupo finito G , y $N \neq \{1\}$ el grupo cociente G/N es menor que G . Los caracteres de G/N deberian ser mas sencillos de calcular que los caracteres de

G . De hecho, podemos usar los caracteres de G/N para conseguir algunos caracteres de G por un procedimiento conocido como *elevación*. Los subgrupos normales nos ayudan a encontrar caracteres de G . En la dirección opuesta, la tabla de caracteres de G nos permite encontrar los subgrupos normales de G .

Los caracteres lineales de G se obtienen por elevación de los caracteres irreducibles de G/N en el caso en el que N es un subgrupo derivado de G . Los caracteres lineales pueden ser usados para obtener nuevos caracteres irreducibles a partir de un caracter irreducible dado.

4.4.1. Elevación de caracteres.

Comenzaremos por obtener un carácter de G a partir de un carácter de G/N .

Proposición 4.4.1 *Sea $N \triangleleft G$, y sea $\tilde{\chi}$ un carácter de G/N . Definimos $\chi : G \rightarrow \mathbb{C}$ por:*

$$\chi(g) = \tilde{\chi}(Ng)$$

Entonces χ es un carácter de G , y χ y $\tilde{\chi}$ tienen el mismo grado.

Demostración: Sea $\tilde{\rho} : G/N \rightarrow GL(n\mathbb{C})$ una representación de G/N con carácter $\tilde{\chi}$. La función $\rho : G \rightarrow GL(n\mathbb{C})$ dada por la composición

$$g \rightarrow Ng \rightarrow \tilde{\rho}(Ng)$$

es un homomorfismo de G en $GL(n, \mathbb{C})$. Entonces ρ es una representación de G . El carácter χ de ρ satisface

$$\chi(g) = \text{tr}(\rho(g)) = \text{tr}(\tilde{\rho}(Ng)) = \tilde{\chi}(Ng)$$

para todo $g \in G$. Por lo tanto, $\chi(1) = \tilde{\chi}(N)$, así que χ y $\tilde{\chi}$ tienen el mismo grado. ■

Bibliografía

- [1] J. L. Alperin, R. B. Bell, *Groups and representations*, Springer-Verlag, 1995.
- [2] E. Bujalance, J. J. Etayo, J. M. Gamboa, *Teoría elemental de grupos*, Publicaciones UNED, Madrid, 2007.
- [3] E. Bujalance, J. A. Bujalance, A. F. Costa, E. Martinez, *Elementos de matemática discreta*, Sanz y Torres, Madrid, 2005.
- [4] W. Lederman, *Grupos finitos*, Dossat, Manchester, 1952.
- [5] W. Fulton, J. Harris, *Representation theory*, Springer-Verlag, 1991.
- [6] D. Griffiths, D. Higham, *Learning LaTeX*, Society for Industrial and Applied Mathematics, Filadelfia, 1997.
- [7] G. James, M. Liebeck, *Representations and characters of groups*, Cambridge University Press, Londres, 2001.
- [8] J. P. Serre, *Representaciones lineales de los grupos finitos*, Omega, Barcelona, 1970.
- [9] J. C. Varilly, *Grupos y anillos*, Escuela de Matemática, Universidad de Costa Rica, 2014.
- [10] M. Suzuki, *Group theory I*, Springer-Verlag, 1982.
- [11] S. Xambó, F. Delgado, C. Fuertes, *Introducción al álgebra*, Editorial Complutense, Madrid, 1993.