

ANÁLISIS DE VARIABLE COMPLEJA 1

1. Introducción

1.1. Distribución de Zona

Cuadro 1: Zona

5	Tareas	45
2	Parciales	30
5	Parciales Sorpresa	5
1	Final	20
	Total	100

1.2. Clases Introductorias

1.2.1. Surgimiento de los complejos

Los números complejos, surgen (en los cursos), a partir de las ecuaciones cuadráticas, tales como:

$$x^2 + 1 = 0$$

Históricamente, nacen a partir de las ecuaciones cúbicas.

Los complejos son un campo, claramente cumple las propiedades de un campo. Además, los complejos forman un espacio vectorial de dimensión 2 sobre los reales (esto es claro gracias al polinomio minimal). Sabiendo la dimension del EV de los complejos, se escribe un vector cualquiera como combinación lineal de la base, i.e.

$$z = a + bi$$

Notese que, $\text{Re}\{z\} = a$ e $\text{Im}\{z\} = b$, ambas son reales.

1.2.2. Propiedades Algebraicas de los Complejos

Conjugados El conjugado es el reflejo del número complejo, respecto al eje real. Es decir:

$$z = a + bi \Rightarrow \bar{z} = a - bi$$

El signo de la parte imaginaria cambia.

Módulo Es el tamaño del vector, es decir, la hipotenusa del triangulo generado por la parte real y la parte imaginaria. Además, el módulo de z es igual al módulo de su conjugado.

DS: Además, se puede encontrar multiplicando el número por su conjugado, i.e. $z\bar{z} = |z|^2$

Argumento El argumento es el ángulo que hay a partir del eje real positivo. (también es denotado por θ). Esta función esta definida para $\mathbb{C} \setminus \{0\}$.

También se tiene que, el argumento es el mismo independientemente de cuantas vueltas se den, es decir:

$$\arg(z) = \theta + 2k\pi$$

Con $k \in \mathbb{Z}$. De todos estos posibles argumentos, se tiene el **Argumento Principal**; el cual se define como: el argumento el que esté en el intervalo $(-\pi, \pi]$, al que denotaremos como:

$$\text{Arg}(z)$$

1.2.3. Notación para los Complejos

Notación Polar o Trigonométrica Tomando $\theta = \arg(z)$, se tiene que:

$$a = |z| \cos \theta$$

$$b = |z| \sin \theta$$

Para simplificar la notación se define $\text{cis}\theta = \cos \theta + i \sin \theta$, con lo que

$$z = |z| \text{cis}\theta$$

Notación Exponencial o Euleriana

$$z = |z| e^{i\theta}$$

DS: Más adelante se ahondará más en esta notación.

1.2.4. Propiedades

Propiedades de los números complejos: $z, w \in \mathbb{C}$

- 1) $|z| = |\bar{z}|$
- 2) $z\bar{z} = |z|^2$
- 3) $z + \bar{z} = 2\text{Re}\{z\}$
- 4) $z - \bar{z} = 2\text{Im}\{z\}i$
- 5) $\text{Re}\{z\} \leq |z|$
- 6) $\text{Im}\{z\} \leq |z|$
- 7) $\bar{\bar{z}} = z$
- 8) $\overline{z + w} = \bar{z} + \bar{w}$
- 9) $\overline{z\bar{w}} = \bar{z}w$
- 10) $|z + w| \leq |z| + |w|$

Demostración. Desigualdad Triangular:

$$\begin{aligned}
 |z + w|^2 &= (z + w)\overline{(z + w)} \\
 &= (z + w)(\bar{z} + \bar{w}) \\
 &= |z|^2 + |w|^2 + z\bar{w} + \bar{z}w \\
 &= |z|^2 + |w|^2 + 2\operatorname{Re}\{z\bar{w}\} \\
 &\leq |z|^2 + |w|^2 + 2|z||\bar{w}| \\
 |z + w| &\leq |z| + |w|
 \end{aligned}$$

□

11) Si $|z| = 1$, entonces $\bar{z} = \frac{1}{z}$

1.2.5. El Infinito en los Complejos

Así como en los reales, existen relaciones de orden, en \mathbb{C} no, no existe una comparación de orden en los números complejos. Esto es más claro analizando la propiedad de tricotomía:

$i = 0$ Si la unidad imaginaria fuera cero, entonces no tendría sentido hablar de números imaginarios.

$i > 0$ Si un número es positivo, la desigualdad, al multiplicarla por un positivo, se mantiene. Esto no sucede al multiplicar i (considerandolo positivo) por la desigualdad $i > 0$. Por lo que i no es positivo.

$i < 0$ Similarmente, con los números negativos. Si se multiplica un número negativo por una desigualdad, esta cambia de "lado". Realizando esto con i (considerandolo negativo) por la desigualdad $i < 0$, se tiene una contradicción. Por lo que, i no es negativo.

Con esto es claro que en los números complejos no hay relaciones de orden.

Así como en los reales se tienen dos infinitos (los infinitos no pertenecen a los reales), el negativo y el positivo. En los complejos se tienen infinitos en todas las direcciones, se tienen, infinitos infinitos.

Geometría Projectiva: A diferencia de la geometría euclidea, es el postulado de las rectas paralelas. En la geometría proyectiva, dos rectas paralelas si se intersectan.

El espacio proyectivo se define como:

$$\mathbb{P}_{\mathbb{K}}^n := \frac{\mathbb{K} \setminus \{0\}}{\sim}$$

Con la relación de equivalencia:

$$(x_0, \dots, x_n) \sim (y_0, \dots, y_n)$$

Si existe $\lambda \neq 0$ tal que

$$(x_0, \dots, x_n) = \lambda(y_0, \dots, y_n)$$

Ejemplo: Tomando $\mathbb{P}_{\mathbb{R}}^1$, es el conjunto de rectas, en \mathbb{R}^2 , que pasan por el origen. En general, $\mathbb{P}_{\mathbb{R}}^n$, es el conjunto de rectas, n -dimensionales, que pasan por el origen. Esto se cumple para más espacios vectoriales.

DS: Se cumple para más espacios vectoriales? Cómo sería algebraicamente?

Tomando la recta real paralela al eje vertical, es el conjunto que contiene un punto de todas las rectas, excepto del eje vertical. Por lo que:

$$\mathbb{P}_{\mathbb{R}}^1 \cong \mathbb{R} \cup \{p\} \cong \mathbb{R} \cup \{\infty\} \cong \text{Circunferencia}$$

Todo es isomorfo a la circunferencia puesto que la circunferencia contiene un punto de todas las rectas, incluyendo la recta "infinito".

Para los complejos:

$$\mathbb{P}_{\mathbb{C}}^1 \cong \mathbb{C} \cup \{\infty\}$$

Siguiendo con la idea de la circunferencia, como los complejos "tienen" una dimensión más:

$$\mathbb{P}_{\mathbb{C}}^1 \cong \text{Esfera}$$

Esta esfera, es la conocida Esfera de Riemann. Esta esfera es sencilla de ver su generación, si se deforma el espacio complejo todo hacia un punto en un eje vertical perpendicular a dicho espacio complejo.

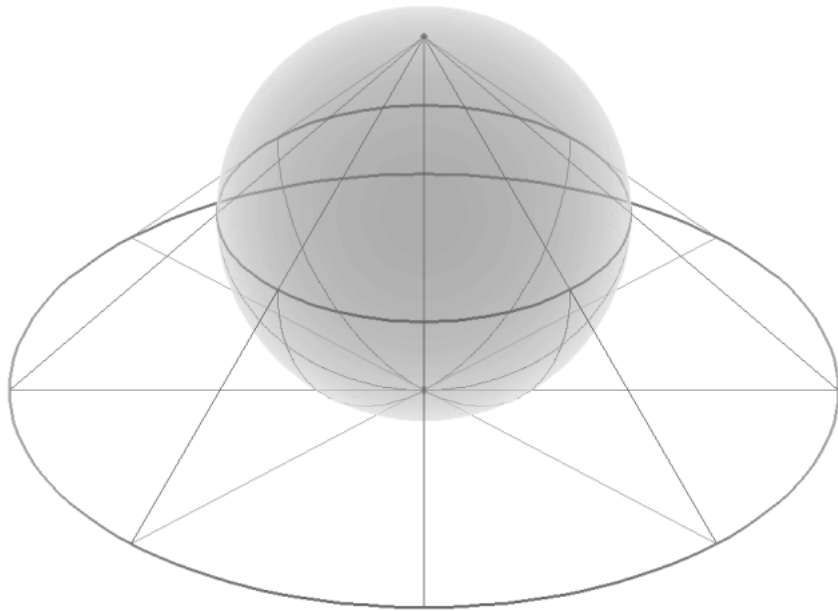


Figura 1: Proyección Estereográfica

Como esta esfera es isomorfa al espacio complejo, existe un isomorfismo entre la esfera y el plano, de modo que todo punto en la esfera tiene asociado un único punto en el espacio complejo.

1.2.6. Proyección Estereográfica

Como $\mathbb{C} \cup \{\infty\} \cong \text{Esfera de Riemann}$, entonces existe un isomorfismo entre ambos espacios. Entonces, a cada punto de la esfera $x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = 1$, se le asocia $z = (x_1 + ix_2)/(1 - x_3)$, es decir: dado $(x_1, x_2, x_3) \in$

Esfera de Riemann

$$(x_1, x_2, x_3) \mapsto \frac{x_1 + ix_2}{1 - x_3}$$

Para demostrar que dicha transformación es invertible, tomamos el módulo de la parte izquierda:

$$|z|^2 = \frac{x_1^2 + x_2^2}{(1 - x_3)^2}$$

Como dicho punto pertenece a la esfera, entonces se tiene:

$$= \frac{1 - x_3^2}{(1 - x_3)^2} = \frac{1 + x_3}{1 - x_3}$$

Despejando x_3 , se tiene:

$$x_3 = \frac{|z|^2 - 1}{|z|^2 + 1}$$

Similarmente, se pueden encontrar expresiones para x_1 y x_2 , con lo que se demuestra que es invertible. Geométricamente, al mapear un punto en la esfera, este punto pertenecerá al plano complejo y a la recta generada por el punto superior de la esfera y el punto de la esfera deseado a mapear.

Ejemplo: Demostrar que todas las raíces de $p(z) = z^3 + 3z + 5$ tienen módulo mayor a 1.

Demostración. Suponiendo que una raíz tiene módulo $|z| \leq 1$, entonces $z^3 + 3z + 5 = 0$, despejando 5 y encontrando el módulo de ello se tiene: $|5| = |z^3 + 3z|$ por desigualdad triangular $|z^3 + 3z| \leq |z|^3 + 3|z|$, por la suposición inicial $\leq 1^3 + 3(1) \leq 4$, lo que es una contradicción, por lo que $|z| > 1$. \square

1.3. Teorema de DeMoivre

Utilizando la notación Eulereana para dos complejos z, w , con argumentos θ, α . Con esto se tiene:

$$z = |z|e^{i\theta} \quad w = |w|e^{i\alpha}$$

Multiplicando ambos:

$$zw = |z||w|e^{i(\theta+\alpha)}$$

Con esta idea, se calcula:

$$z^n = |z|^n e^{in\theta}$$

A esto se le conoce como el **Teorema de DeMoivre**, el cual es cierto, no solo para enteros, sino que para todos los complejos, i.e. $n \in \mathbb{C}$. Esto implica que:

$$z^n = |z|^n (\cos n\theta + i \sin n\theta)$$

1.4. Geometría Analítica en \mathbb{C}

1.4.1. Circunferencia

Se define como el siguiente conjunto:

$$A = \{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\}$$

Sin embargo, para una circunferencia desplazada a z_o con radio r , se tiene:

$$|z - z_o| = r$$

1.4.2. Elipse

La elipse, así como en su definición clásica, para sus focos en los puntos a y b , se tiene:

$$|z - a| + |z - b| = k$$

Donde z es todo punto sobre la elipse.

1.4.3. Recta

Para una recta entre dos complejos, se tiene que, tomando un parámetro $t \in \mathbb{R}$, la recta que pasa por ambos complejos está dada por:

$$z + t(z + w)$$

Segmentando dicha recta, se tiene que, para la distancia entre ambos complejos, se limita t a $0 \leq t \leq 1$. Y en base a esto se puede calcular el punto medio entre dos complejos, el cual es simplemente haciendo el valor de $t = 2$.

1.4.4. Gravicentro

Sabiendo la relación de las medianas y el gravicentro, entonces tomando los segmentos de recta, simplemente se realiza dicho procedimiento. Tomando cualquier lado (en este caso se tomará ac) se tiene que el punto medio entre dichos vértices es:

$$\frac{a + c}{2}$$

Ahora, para el segmento entre este nuevo punto y el vértice restante es:

$$b + t\left(\frac{a + c}{2} - b\right)$$

Por la relación se tiene que $t = 2/3$, con esto y desarrollando se tiene:

$$G = \frac{a + b + c}{3}$$

DS: Ejemplo tarea: Demostrar que: $\tan^2 1 + \dots + \tan^2 89 \in \mathbb{Z}$.

Resolviendo el ejemplo:

Tomando la forma polar de un complejo de módulo 1, se eleva a la 90 potencia:

$$(\cos \alpha + i \sin \alpha)^{90} = \cos 90\alpha + i \sin 90\alpha$$

Por teorema del Binomio:

$$\sum_{k=0}^{90} \binom{90}{k} \cos^{90-k} \alpha i^k \sin^k \alpha = \cos 90\alpha + i \sin 90\alpha$$

Sabiendo que para potencias pares, la identidad imaginaria es real, entonces:

$$\sum_{k=0}^{44} (-1)^k \binom{90}{2k} \cos^{90-2k} \alpha \sin^{2k} \alpha = \cos 90\alpha$$

Reescribiendo el lado izquierdo de la ecuación.

Para α impar:

$$\sum_{k=0}^{44} \binom{90}{2k} (-1)^k \tan^{2k} \alpha = 0$$

Entonces, sustituyendo $x = \tan^2 \alpha$, por Cardano–Vieta, la suma de todas las soluciones da como resultado uno de los coeficientes del polinomio, por ende, la suma propuesta da como resultado un número entero, por lo que queda demostrado. \square

2. Funciones Complejas

Una función compleja, se define igual que las funciones reales, simplemente se tiene que el dominio y el rango son los complejos, es decir:

$$f : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$$

En las funciones complejas, no se tienen gráficas como las que se tienen en funciones de \mathbb{R} o \mathbb{R}^2 . En los complejos, se sabe de, álgebra lineal, que, los complejos son un espacio vectorial de dimensión dos, sobre los reales; de modo que, las funciones son una aplicación de dimension 4, por lo que no se puede visualizar una gráfica. Para graficar las funciones complejas se toman dos espacios complejos, simplemente para comparar el dominio de la función, con el rango de la misma.

2.1. Función Exponencial

Sea $z = x + iy$, se define la exponencial:

$$e^z := e^x e^{iy}$$

La cual es completamente intuitiva.

2.2. Funciones Seno y Coseno

Para definir al seno y al coseno, tomamos una forma exponencial:

$$\sin z := \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}$$

Y

$$\cos z := \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}$$

Para la identidad pitagórica, se sabe que se cumple para todo número real; sin embargo, con estas nuevas definiciones, se tiene que dicha identidad es cierta para todo $z \in \mathbb{C}$.

Teorema 1

$$\sin^2 z + \cos^2 z = 1$$

La demostración es bastante simple, solo se elevan ambas definiciones al cuadrado y por productos notables queda.

Además, cumplen todas las identidades ya conocidas para los números reales.

Teorema 2

La función:

$$f(z) = e^z$$

Es periódica, con periodo $2\pi i$

Lo curioso de esto, es que la función exponencial para valores reales **no** es periódica, pero en los complejos si lo es. Para verificar que la función es periódica simplemente se sustituye la definición de funciones periódicas:

$$f(z) = f(z + T)$$

La demostración es igual de simple que la anterior, simplemente sustituyendo la definición, se tiene la periodicidad.

2.2.1. Funciones Seno y Coseno Hiperbólicos

Para las funciones hiperbólicas, se tienen definiciones muy parecidas a sus respectivas funciones no hiperbólicas, es decir:

$$\sinh z := \frac{e^z - e^{-z}}{2}$$

Y

$$\cosh z := \frac{e^z + e^{-z}}{2}$$

Para todo $z \in \mathbb{C}$.

2.3. Función Logarítmica

La función logarítmica debe cumplir ser la inversa de la exponencial, obviamente, en dominio complejo. Entonces, para $z \in \mathbb{C}$, se tiene:

$$\ln z := \ln |z| + i \arg(z)$$

Para comprobar que la función logarítmica compleja es, efectivamente, la función inversa de la exponencial. Comprobando con:

$$f(f^{-1}) = z \quad f^{-1}(f) = z$$

Comprobando que la definición cumple, se tiene:

$$e^{\ln z} = e^{\ln |z|} e^{i \arg(z)} = z$$

Ahora, para la otra propiedad de las funciones inversas:

$$\ln e^z = \ln |e^z| + i \arg(e^z)$$

Por la forma de la exponencial compleja, se tiene:

$$= \ln e^x + iy = x + iy = z$$

Lo que comprueba las propiedades de función inversa. Cabe recalcar que el logaritmo es una función multivaluada, por lo que se define el logaritmo principal, el cual toma como argumento el argumento principal del complejo. Además, con todo esto, permite encontrar el logaritmo para números negativos. De todo esto, la función logarítmica es válida para $f : \mathbb{C} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{C}$.

3. Fórmula de Euler

Tomando $\cos z + i \sin z$ con $z \in \mathbb{C}$, sustituyendolo por su definición exponencial.

$$\cos z + i \sin z = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2} + i \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}$$

Reduciendo, se tiene que:

$$e^{iz} = \cos z + i \sin z$$

Para $z \in \mathbb{C}$, esta es la famosa **Fórmula de Euler**.

4. Espacios Métricos (Topología de Números Complejos)

La idea principal de los espacios métricos es la posibilidad de medir distancias.

Definición 1

Una función $d : E \times E \rightarrow \mathbb{R}$ es una métrica si:

- a) $d(x, y) \geq 0$, para todo $x, y \in E$.
- b) $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$
- c) $d(x, y) = d(y, x)$ para todo $x, y \in E$
- d) $d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y)$ para todo $x, y, z \in E$

Si $d : E \times E \rightarrow \mathbb{R}$ es una métrica, entonces (E, d) es un espacio métrico. Por ejemplo:

- Tomando $E = \mathbb{C}$ con la métrica definida por el módulo $d(x, y) = |x - y|$, $x, y \in \mathbb{C}$.
- Se tiene $E = \mathbb{C}$, para dos elementos del espacio:

$$d(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{si } x = y \\ 1 & \text{si } x \neq y \end{cases}$$

4.1. Proyección Estereográfica

Tomando un punto en el plano complejo y su respectivo punto en la Esfera de Riemann, la distancia entre dichos dos puntos es:

$$d(z, z') = \frac{2|z - z'|}{\sqrt{(1 + |z|^2)(1 + |z'|^2)}}$$

Donde z es el punto en la esfera y z' es el punto sobre el plano complejo.

4.2. Conjuntos Abiertos y Cerrados

Para iniciar con las definiciones asociadas a ciertos conceptos topológicos, es necesario la base de dichos conceptos, vease, la vecindad, bola, etc. La vecindad se define como:

Definición 2

Sea (E, d) un espacio métrico una **vecindad** centrada en z_o de radio $r > 0$ es:

$$B_r(z_o) := \{z \in E : d(z_o, z) < r\}$$

Además, B es vecindad de w si existe $B_r(z_o)$ tal que:

$$B_r(z_o) \subseteq B$$

Con esto, se define:

Definición 3

Un conjunto C es **abierto** si es vecindad de cada uno de sus puntos.

Definición 4

Un conjunto C es **cerrado** si C^c es abierto.

La definición de conjunto cerrado aparenta ser trivial, sin embargo, la "afirmación": «Un conjunto no es abierto, entonces es cerrado». Puesto que hay conjuntos que son tanto abiertos como cerrados y conjuntos que no son, ni abiertos ni cerrados.

4.3. Sucesiones**Definición 5**

Una **sucesión** de números complejos es una función $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{C}$. Generalmente representadas como $x_n, (x_n), \dots$

Ya que se definieron las sucesiones, es lógico pensar en que ciertas sucesiones tienden a ciertos valores, a esto le llamaremos convergencia.

Definición 6

Una sucesión x_n **converge** a un punto p si para cada $\varepsilon > 0$ existe un $N \in \mathbb{N}$ tal que:

$$d(x_m, p) < \varepsilon$$

Si $m > N$.

Esta idea induce el siguiente teorema:

Teorema 3

Si x_n es convergente, entonces su límite es único

Demostración. Supongamos que $x_n \rightarrow p$ y $x_n \rightarrow q$. Como x_n converge a p , entonces $\forall \varepsilon > 0$ existe N_1 tal que:

$$d(x_m, p) < \frac{\varepsilon}{2} \quad m > N_1$$

De igual forma, como $x_n \rightarrow q$, entonces para todo $\varepsilon > 0$ existe N_2 tal que:

$$d(x_m, q) < \frac{\varepsilon}{2} \quad m > N_2$$

Por desigualdad triangular

$$d(p, q) \leq d(x_m, p) + d(x_m, q) < \varepsilon \quad \text{si } m > \max\{N_1, n_2\}$$

Como se debe de cumplir para todo $\varepsilon > 0$, entonces se tiene $d(p, q) = 0$ y por definición de métrica se concluye que $p = q$. \square

Un teorema más específico para el espacio de los complejos:

Teorema 4

Una sucesión z_n converge a $z = a + bi$ si y solo si

$$\operatorname{Re}\{z_n\} \rightarrow a$$

Y

$$\operatorname{Im}\{z_n\} \rightarrow b$$

DS: Se convierte una sucesión de complejos a dos sucesiones independientes de números reales.