
Problemas geométricos que arrancan de la teoría clásica de funciones



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Celia de Frutos Palacios

Universidad Complutense de Madrid

Junio 2018

Documento maquetado con T_EX_S v.1.0.

Este documento está preparado para ser imprimido a doble cara.

Problemas geométricos que arrancan de la teoría clásica de funciones

*Memoria que presenta para optar al título de Graduada en Ingeniería
Informática y Matemáticas*

Celia de Frutos Palacios

Dirigida por la Doctora

Ángeles Prieto Yerro

Universidad Complutense de Madrid

Junio 2018

Copyright © Celia de Frutos Palacios

*A mis padres
y
a tí, lector carísimo*

Agradecimientos

*A todos los que la presente vieron y
entendieron.*

Inicio de las Leyes Orgánicas. Juan Carlos I

Groucho Marx decía que encontraba a la televisión muy educativa porque cada vez que alguien la encendía, él se iba a otra habitación a leer un libro. Utilizando un esquema similar, nosotros queremos agradecer al Word de Microsoft el habernos forzado a utilizar \LaTeX . Cualquiera que haya intentado escribir un documento de más de 150 páginas con esta aplicación entenderá a qué nos referimos. Y lo decimos porque nuestra andadura con \LaTeX comenzó, precisamente, después de escribir un documento de algo más de 200 páginas. Una vez terminado decidimos que nunca más pasaríamos por ahí. Y entonces caímos en \LaTeX .

Es muy posible que hubiéramos llegado al mismo sitio de todas formas, ya que en el mundo académico a la hora de escribir artículos y contribuciones a congresos lo más extendido es \LaTeX . Sin embargo, también es cierto que cuando intentas escribir un documento grande en \LaTeX por tu cuenta y riesgo sin un enlace del tipo “*Author instructions*”, se hace cuesta arriba, pues uno no sabe por donde empezar.

Y ahí es donde debemos agradecer tanto a Pablo Gervás como a Miguel Palomino su ayuda. El primero nos ofreció el código fuente de una programación docente que había hecho unos años atrás y que nos sirvió de inspiración (por ejemplo, el fichero `guionado.tex` de \TeX IS tiene una estructura casi exacta a la suya e incluso puede que el nombre sea el mismo). El segundo nos dejó husmear en el código fuente de su propia tesis donde, además de otras cosas más interesantes pero menos curiosas, descubrimos que aún hay gente que escribe los acentos españoles con el `\'{\i}`.

No podemos tampoco olvidar a los numerosos autores de los libros y tutoriales de \LaTeX que no sólo permiten descargar esos manuales sin coste adicional, sino que también dejan disponible el código fuente. Estamos pensando en Tobias Oetiker, Hubert Partl, Irene Hyna y Elisabeth Schlegl, autores del famoso “The Not So Short Introduction to $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ ” y en Tomás Bautista, autor de la traducción al español. De ellos es, entre otras muchas cosas, el entorno `example` utilizado en algunos momentos en este manual.

También estamos en deuda con Joaquín Ataz López, autor del libro “Creación de ficheros \LaTeX con GNU Emacs”. Gracias a él dejamos de lado a WinEdt y a Kile, los editores que por entonces utilizábamos en entornos Windows y Linux respectivamente, y nos pasamos a emacs. El tiempo de escritura que nos ahorramos por no mover las manos del teclado para desplazar el cursor o por no tener que escribir `\emph` una y otra vez se lo debemos a él; nuestro ocio y vida social se lo agradecen.

Por último, gracias a toda esa gente creadora de manuales, tutoriales, documentación de paquetes o respuestas en foros que hemos utilizado y seguiremos utilizando en nuestro quehacer como usuarios de \LaTeX . Sabéis un montón.

Y para terminar, a Donal Knuth, Leslie Lamport y todos los que hacen y han hecho posible que hoy puedas estar leyendo estas líneas.

Resumen

...

...

...

Índice

Agradecimientos	VII
Resumen	IX
Introducción	1
1. Ejemplos	3
2. Teorema de Fatou y Teorema de Carathéodory	9
2.1. La Integral de Poisson	9
2.2. El Teorema de Fatou	10
2.3. Teorema de Carathéodory y aplicaciones conformes	12
3. Productos infinitos	17
3.1. Productos de Blaschke	18
4. $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ como álgebra de Banach	21
A. Notación	27
Bibliografía	29

Índice de figuras

Índice de Tablas

Introducción

Introducción del TFG ...

Capítulo 1

Ejemplos

Empezar comentando cómo calcular el radio de convergencia, que los ejemplos son de series con radio de convergencia 1 y que vas a mostrar cómo difieren el comportamiento en la frontera de unos a otros.

En esta sección vamos a estudiar el comportamiento de algunas series de potencias en el borde de su disco de convergencia.

Ejemplo 1.0.1. Mostrar que

$$\sum_{n=0}^{\infty} z^n, |z| < 1$$

diverge en todo punto tal que $|z| = 1$.

Demostración. Es fácil ver que $1 - z^{n+1} = (1 - z)(1 + z + z^2 + \cdots + z^n)$. Por lo tanto, si $z \neq 1$, se tiene que

$$1 + z + \cdots + z^n = \frac{1 - z^{n+1}}{1 - z}. \quad (1.1)$$

Si $|z| < 1$ entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} z^n = 0$ y la serie converge a

$$\sum_{n=0}^{\infty} z^n = \frac{1}{1 - z}$$

Si $|z| > 1$ entonces $\lim_{n \rightarrow \infty} z^n = \infty$ y la serie diverge. Pero, ¿qué pasa cuando $|z| = 1$? La serie de potencias $\sum_{n=0}^{\infty} z^n$ diverge en todos los puntos del radio de convergencia pues $|z^n|$ no tiende a 0 cuando $n \rightarrow \infty$.

Sin embargo, $\sum_{n=0}^{\infty} z^n$ puede ser extendida a la función globalmente analítica $\frac{1}{1-z}$ en $\mathbb{C} \setminus \{1\}$ gracias a una cantidad finita de prolongaciones analíticas.

Tomemos a un punto cualquiera de $\mathbb{C} \setminus \{1\}$ y conectémoslo al origen 0 mediante la curva de Jordan $\gamma \subset \mathbb{C} \setminus \{1\}$. Fijemos un punto z_1 en γ que cumpla $|z| < 1$. $\sum_{n=0}^{\infty} z^n$

puede ser extendida analíticamente en z_1 de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \frac{1}{1-z} &= \frac{1}{1-z_1-(z-z_1)} = \frac{1}{1-z_1} \frac{1}{1-\frac{z-z_1}{1-z_1}} = \frac{1}{1-z_1} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{z-z_1}{1-z_1} \right)^n = \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(1-z_1)^{n+1}} (z-z_1)^n, |z-z_1| < |1-z_1|. \end{aligned}$$

De nuevo, tomemos z_2 en γ tal que $|z_2 - z_1| < |1 - z_1|$ y $|z_2| \geq 1$. Podemos extender la serie de potencias a z_2 .

$$\frac{1}{1-z} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(1-z_2)^{n+1}} (z-z_2)^n, |z-z_2| < |1-z_2|.$$

Hacer dibujo, como en el libro de Lin.

Después de un número finito de iteraciones, dado que la curva es un conjunto compacto, alcanzaremos el punto a y tendremos

$$\frac{1}{1-z} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(1-a)^{n+1}} (z-a)^n, |z-a| < |1-a|.$$

Así, decimos que hemos obtenido la prolongación analítica de $\sum_{n=0}^{\infty} z^n$ que pasa por la curva γ . \square

Ejemplo 1.0.2. Mostrar que

$$g(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n}, |z| < 1$$

diverge en $z = 1$ y converge en el resto de punto tales que $|z| = 1$;

Demostración. En primer lugar, cabe destacar que la serie armónica $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n}$ diverge. Para demostrar que la serie diverge en $z = 1$ y converge en el resto de punto tales que $|z| = 1$ vamos a aplicar el criterio de Dirichlet:

Sean $\{a_n\} \subset \mathbb{R}$ y $\{b_n\} \subset \mathbb{C}$ sucesiones tales que:

1. $\{a_n\}$ es monótona con límite 0
2. Las sumas parciales de la serie $\sum_{n=1}^{\infty} b_n$ están acotadas

entonces $\sum_{n=1}^N a_n b_n$ converge.

En nuestro caso vamos a tomar $a_n = \frac{1}{n}$ y $b_n = z^n$. La primera condición se cumple, veamos la que resta:

$$\left| \sum_{n=1}^N z^n \right| = \left| \frac{z - z^{N+1}}{1-z} \right| \leq \frac{2}{|1-z|}, \text{ si } z \neq 1, \text{ para todo } N \in \mathbb{N}.$$

Esto muestra que la condición se satisface para todo $z \neq 1$ en el disco unidad. Por lo tanto, la serie converge para todo z tal que $|z| \leq 1, z \neq 1$ y diverge para $|z| > 1$.

Vamos a ver que la suma de la serie es $\log \frac{1}{1-z}$. En efecto, derivando tenemos que

$$g'(z) = \sum_{n=1}^{\infty} z^{n-1} \Rightarrow zg'(z) = \sum_{n=1}^{\infty} z^n = \frac{z}{1-z}.$$

Si integramos ahora la expresión de la derecha tenemos que la suma es $\log \frac{1}{1-z}$ puesto que $g(0) = 0$.

□

Ejemplo 1.0.3. Mostrar que

$$f(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n^2}, \quad |z| < 1$$

converge absoluta y uniformemente en $|z| = 1$.

Demostración. Es fácil ver que converge absoluta y uniformemente en $|z| = 1$ dado que

$$\sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{z^n}{n^2} \right| \leq \sum_{n=1}^{\infty} \left| \frac{1}{n^2} \right| < \infty.$$

Esta función f define una función holomorfa y acotada en el disco abierto \mathbb{D} , que además es continua en el disco cerrado $\overline{\mathbb{D}}$. Sin embargo, no puede extenderse con continuidad en $z = 1$.

$$f'(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^{n-1}}{n} \Rightarrow zf'(z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{z^n}{n} = g(z) = \log \frac{1}{1-z}.$$

□

Ejemplo 1.0.4. Mostrar que la serie lagunar,

$$h(z) = \sum_{n=0}^{\infty} z^{2^n}, \quad |z| < 1$$

tiene una singularidad en cada punto tal que $|z| = 1$.

Demostración. Sea $h(z) = \sum_{n=0}^{\infty} z^{2^n} = z + z^2 + z^4 + z^8 + \dots$. Podemos escribir lo siguiente:

$$h(z^2) = h(z) - z, \quad h(z^4) = h(z^2) - z^2,$$

y aplicando inducción tenemos que

$$h(z^{2^k}) = h(z^{2^{k-1}}) - z^{2^{k-1}}$$

Así,

$$h(z) = z + h(z^2) = z + z^2 + h(z^4) = \cdots = z + z^2 + \cdots + z^{2^{k-1}} + h(z^{2^k}).$$

Si $m, n \in \mathbb{N}$ y $r \in (0, 1)$ y llamamos r a $e^{2\pi i \frac{m}{2^n}}$, tenemos que

$$h(r^{2^n}) = \sum_{k=0}^{\infty} (r^{2^n})^{2^k} = \sum_{k=0}^{\infty} r^{2^n \cdot 2^k} = \sum_{k=0}^{\infty} r^{2^{n+k}} = \sum_{k=n}^{\infty} r^{2^k}.$$

Como

$$\sum_{k=n}^{\infty} r^{2^k} \geq \sum_{k=n}^N r^{2^k} > (N+1)r^{2^N} \rightarrow N+1,$$

entonces $\lim_{r \rightarrow 1} |h(re^{2\pi i \frac{m}{2^n}})| = \infty \forall m, n$.

Puesto que $\{e^{2\pi i \frac{m}{2^n}} : m, n \in \mathbb{N}\}$ es denso en $\partial\mathbb{D}$, todos los puntos del borde del disco unidad son singulares. \square

Ejemplo 1.0.5. Mostrar que la función

$$f(z) = \exp\left(\frac{z+1}{z-1}\right), \quad z \in \mathbb{D}$$

es holomorfa, $|f(z)| \leq 1$ para todo $z \in \mathbb{D}$, y $f(t) \rightarrow 0$ cuando $t \rightarrow 1^-$.

Demostración. La función f es holomorfa ya que es la composición de funciones holomorfas. Obsérvese que el único punto singular es $z = 1$.

La función $g(z) = \frac{z+1}{z-1}$ lleva el disco en el semiplano $H = \{w : \operatorname{Re}(w) < 0\}$. Así pues, la exponencial lleva H en \mathbb{D} :

$$|e^z| = |e^{x+iy}| = |e^x(\cos y + i \sin y)| = e^x < 1.$$

La aplicación g es una transformación de Möbius, y las transformaciones de Möbius tienen la propiedad de que llevan circunferencias y rectas en circunferencias y rectas. Como la función lleva -1 a 0 , i a $-i$ y $-i$ a i , la imagen del círculo $|z| = 1$, ha de ser una recta.

Si tomamos una sucesión $\{t_n\}$ en el intervalo $(-1, 1)$ que converge a 1 , se tiene que $g(t_n) \rightarrow -\infty$. Por lo tanto,

$$\frac{t+1}{t-1} \xrightarrow{t \rightarrow 1^-} -\infty \Rightarrow \exp\left(\frac{t+1}{t-1}\right) \xrightarrow{t \rightarrow 1^-} 0.$$

Sin embargo, la función f no tiene límite en 1 . Por ejemplo, si tomamos la sucesión $\{z_n\}$ definida por $z_n = g(w_n)$, siendo $\{w_n\}$ la sucesión de término general $-1 + 2n\pi i$. Entonces,

$$z_n = \frac{2n\pi i}{-2 + 2n\pi i} = \frac{n\pi i}{n\pi i - 1} = \frac{(n\pi i + 1)n\pi i}{-n^2\pi^2 - 1} = \frac{-n^2\pi^2 + in\pi}{-n^2\pi^2 - 1}.$$

Como $g = g^{-1}$ tenemos

$$e^{g(z_n)} = e^{w_n} \rightarrow e^{-1} \neq 0.$$

Extender este ejemplo con lo que hemos visto en el capítulo de espacios de Banach.

□

Capítulo 2

Teorema de Fatou y Teorema de Carathéodory

2.1. La Integral de Poisson

Definición 2.1.1. Se llama núcleo de Poisson a la función P definida por

$$P : (r, t) \in [0, 1) \times \mathbb{R} \mapsto P_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} r^{|n|} e^{int}. \quad (2.1)$$

Podemos considerar el núcleo de Poisson como una función de dos variables r y t o como una familia de funciones de t que dependen de r .

Dados $z = re^{i\theta}$, con $r \in [0, 1)$ y $\theta \in \mathbb{R}$ se tiene que

$$P_r(\theta - t) = \operatorname{Re} \left[\frac{e^{it} + z}{e^{it} - z} \right] = \frac{1 - r^2}{1 - 2r \cos(\theta - t) + r^2} \quad (2.2)$$

para todo $t \in \mathbb{R}$. En efecto:

$$\begin{aligned} P_r(t) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} r^{|n|} e^{int} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r^n e^{int} + \sum_{n=1}^{\infty} r^n e^{-int} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r^n (e^{int} + e^{-int}) = \\ &= 1 + \sum_{n=1}^{\infty} r^n 2 \operatorname{Re}(e^{int}) = \operatorname{Re} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (re^{it})^n \right] = \operatorname{Re} \left[1 + 2 \frac{re^{it}}{1 - re^{it}} \right] = \operatorname{Re} \left[\frac{1 + re^{it}}{1 - re^{it}} \right]. \end{aligned}$$

Por otra parte

$$\operatorname{Re} \left[\frac{1 + re^{it}}{1 - re^{it}} \right] = \operatorname{Re} \left[\frac{(1 + re^{it})(1 - re^{it})}{|1 - re^{it}|^2} \right] = \frac{1 - r^2}{1 - 2r \cos t + r^2}.$$

Propiedades del núcleo de Poisson:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P_r(t) dt = 1, \forall r \in [0, 1). \quad (2.3)$$

$$P_r(t) > 0, \forall r \in [0, 1), t \in \mathbb{R} \quad (2.4)$$

$$P_r(t) = P_r(-t), \forall r \in [0, 1), t \in \mathbb{R} \quad (2.5)$$

$$P_r(t) < P_r(\delta), 0 < \delta < |t| \leq \pi \quad (2.6)$$

$$\lim_{r \rightarrow 1} P_r(\delta) = 0, \forall \delta \in (0, \pi] \quad (2.7)$$

Definición 2.1.2. Se llama integral de Poisson de una función $f \in L^1(\partial\mathbb{D})$ a la función F dada por

$$F : z = re^{i\theta} \in \mathbb{D} \mapsto F(re^{i\theta}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P_r(\theta - t) f(e^{it}) dt.$$

Algunas veces nos convendrá referirnos a ella como $F = P[f]$.

Además si f lleva $\partial\mathbb{D}$ en los reales, 2.2 nos muestra que

$$P[f] = \operatorname{Re} \left[\frac{1}{2} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{e^{it} + z}{e^{it} - z} f(t) dt \right].$$

2.2. El Teorema de Fatou

Para demostrar el Teorema de Fatou nos vamos a basar en unos resultados clásicos del libro Rudin (1970, chap. 11).

Teorema 2.2.1. Si $f \in L^1(\partial\mathbb{D})$ y $F = P[f]$, entonces

$$\lim_{r \rightarrow 1} F(re^{i\theta}) = f(e^{i\theta})$$

Teorema 2.2.2. Sean $f \in C(\partial\mathbb{D})$, $F = P[f]$ y

$$u(re^{i\theta}) = \begin{cases} f(re^{i\theta}) & \text{si } r = 1 \\ F(re^{i\theta}) & \text{si } 0 \leq r < 1 \end{cases}$$

Entonces u es una función continua en el disco cerrado $\bar{\mathbb{D}}$ que es armónica en \mathbb{D} .

Teorema 2.2.3 (Teorema de Fatou). Para toda función $f \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$, existe una función $f^* \in L^\infty(\partial\mathbb{D})$ definida por

$$f^*(e^{it}) = \lim_{r \rightarrow 1} f(re^{it}) \quad (2.8)$$

en casi todo punto.

Se tiene la igualdad $\|f\|_\infty = \|f^*\|_\infty$. Para todo $z \in U$, la fórmula integral de Cauchy

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_\gamma \frac{f^*(\xi)}{\xi - z} d\xi \quad (2.9)$$

se satisface, donde γ es el círculo unidad positivamente orientado: $\gamma(t) = e^{it}$, $0 \leq t \leq 2\pi$.

Las funciones $f^* \in L^\infty(\partial\mathbb{D})$ que se obtienen mediante este procedimiento son precisamente aquellas que cumplen la siguiente relación

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{-\pi}^{\pi} f^*(e^{it}) e^{-int} dt = 0, n = -1, -2, \dots \quad (2.10)$$

Demostración. La existencia de f^* se sigue de los teoremas 2.2.1 y 2.2.2.

Por 2.8, tenemos que $\|f^*\|_\infty \leq \|f\|_\infty$.

Si $z \in U$ y $|z| < r < 1$, tomemos $\gamma_r(t) = re^{it}$, $0 \leq t \leq 2\pi$. Entonces,

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma_r} \frac{f(\xi)}{\xi - z} d\xi = \frac{r}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f(re^{it})}{re^{it} - z} e^{it} dt$$

Sea $\{r_n\}$ una sucesión tal que $r_n \rightarrow 1$. Por el teorema de la convergencia dominada de Lebesgue tenemos

$$f(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f^*(e^{it})}{1 - ze^{-it}} dt \quad (2.11)$$

Por lo que ya hemos probado 2.9. Por el teorema de Cauchy, se sigue que

$$\int_{\gamma_r} f(\xi) \xi^n d\xi = 0, n = 0, 1, \dots$$

Tomando de nuevo una sucesión $\{r_n\}$ que tienda a 1, el teorema de la convergencia dominada garantiza que f^* cumple 2.10. Además, podemos convertir 2.11 en una integral de Poisson, si $z = re^{i\theta}$,

$$\begin{aligned} f(z) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^*(e^{it}) \sum_{n=0}^{\infty} r^n e^{in(\theta-t)} dt = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f^*(e^{it}) \sum_{n=-\infty}^{\infty} r^{|n|} e^{in(\theta-t)} dt = \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} P_r(\theta - t) f^*(e^{it}) dt \end{aligned}$$

De esto concluimos que $\|f\|_\infty \leq \|f^*\|_\infty$, así que ambas normas coinciden. \square

2.3. Teorema de Carathéodory y aplicaciones conformes

Definición 2.3.1. Aplicación conforme Sean U y $V \subset \mathbb{C}^n$. Una aplicación $f : U \rightarrow V$ se llama conforme en un punto $u \in U$ si preserva la orientación y los ángulos entre curvas que pasan por u .

Proposición 2.3.2. Sea $U \subset \mathbb{C}$. Una aplicación $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ es conforme en U si $f \in \mathcal{H}(U)$ y $f'(z) \neq 0 \forall z \in U$.

Demostración. Supongamos que $f(z)$ es una función holomorfa en U tal que $f'(z) \neq 0$ para $z \in U$ y consideremos $f : z \rightarrow w = f(z)$. Sea $\gamma : [a, b] \rightarrow U$ una curva suave. Consideremos $\lambda = (f \circ \gamma)(t)$. Por la regla de la cadena, λ es continuamente diferenciable y como $f'(\gamma(t)) \neq 0$, tenemos

$$\lambda'(t) = f'(\gamma(t))\gamma'(t). \quad (2.12)$$

Por lo tanto, λ es una curva suave en el plano w .

Sean $\gamma_1, \gamma_2 : [a, b] \rightarrow U$ curvas suaves tales que $c = \gamma_1(a) = \gamma_2(a)$. Definimos el ángulo θ entre γ_1 y γ_2 en c como el argumento de $\frac{\gamma_2'(a)}{\gamma_1'(a)}$. Como el argumento es aditivo para la multiplicación de funciones, tenemos que

$$\begin{aligned} \arg \lambda_1'(a) &= \arg f'(c) + \arg \gamma_1'(a) \\ \arg \lambda_2'(a) &= \arg f'(c) + \arg \gamma_2'(a) \end{aligned}$$

y entonces

$$\arg \frac{\lambda_2'(a)}{\lambda_1'(a)} = \arg \lambda_2'(a) - \arg \lambda_1'(a) = \arg \gamma_2'(a) - \arg \gamma_1'(a) = \arg \frac{\gamma_2'(a)}{\gamma_1'(a)}.$$

Así, el ángulo entre las curvas λ_1 y λ_2 en $d = \lambda_1(a) = \lambda_2(a)$ es igual al ángulo θ entre las curvas γ_1 y γ_2 en c . □

Vamos a probar un resultado recíproco a éste que incluye algunas restricciones adicionales sobre f .

Proposición 2.3.3. Sean $U \subset \mathbb{C}$ y $f : U \rightarrow \mathbb{C}$ una aplicación conforme en U que admite derivadas parciales continuas con respecto a x e y . Entonces $f \in \mathcal{H}(U)$ y $f'(z) \neq 0 \forall z \in U$.

Demostración. Fijemos z un punto arbitrario de U , y elijamos $\varepsilon > 0$ tal que $D(z, \varepsilon) \subset U$. Consideremos la familia de curvas suaves $\gamma_\theta(t) = z + te^{i\theta}$, $0 \leq t \leq \varepsilon$, $\theta \in \mathbb{R}$. Nótese que el ángulo entre γ_0 y γ_θ en z es θ .

Tomemos la familia de curvas $\lambda_\theta = f \circ \gamma_\theta$. Como f es conforme, el ángulo entre λ_0 y λ_θ , es decir, el argumento de $\frac{\lambda_\theta'(0)}{\lambda_0'(0)}$ es igual a θ . Si escribimos el argumento de $\lambda_0'(0)$ como α , el argumento de $\lambda_\theta'(0)$ será $\alpha + \theta$ y, por tanto,

$$e^{-i(\theta+\alpha)}\lambda_\theta'(0) = |\lambda_\theta'(0)| > 0. \quad (2.13)$$

??, nos dice que

$$\begin{aligned}\lambda'_\theta(0) &= u_x \cos \theta + u_y \sin \theta + i(v_x \cos \theta + v_y \sin \theta) = \\ &= (u_x + iv_x) \cos \theta + (u_y + iv_y) \sin \theta = f_x \cos \theta + f_y \sin \theta,\end{aligned}\tag{2.14}$$

por la fórmula de Euler,

$$2\lambda'_\theta(0) = (f_x - if_y)e^{i\theta} + (f_x + if_y)e^{-i\theta}.$$

Entonces por 2.13,

$$(f_x - if_y)e^{-i\alpha} + (f_x + if_y)e^{-2i\theta-i\alpha} = 2|\lambda'_\theta(0)|.$$

Derivando en ambos lados con respecto a θ , obtenemos

$$-2i(f_x + if_y)e^{-2i\theta-i\alpha} = \frac{2d}{d\theta}|\lambda'_\theta(0)|.$$

Como el ángulo θ es arbitrario, $e^{-2i\theta-i\alpha}$ es un giro arbitrario. Como además la parte de la derecha de la igualdad solo toma valores reales, $-2i(f_x + if_y)$ bajo cualquier giro tiene que ser real. De esto se sigue que

$$f_x + if_y = 0$$

por lo que

$$u_x + v_y + i(v_x + u_y) = 0.$$

Como vemos, $u(x, y)$ y $v(x, y)$ satisfacen las ecuaciones de Cauchy-Riemann en U . Luego $f(z) = u(x, y) + iv(x, y)$ es holomorfa en $z = x + iy \in U$. Además se tiene que $f(z) \neq 0, z \in U$. En efecto, como $\lambda'_\theta(0) \neq 0$, 2.14 garantiza que no pueden anularse a la vez u_x y u_y . Por lo tanto, como $|f'(x + iy)|^2 = u_x^2(x, y) + u_y^2(x, y)$, se tiene el resultado. \square

Teorema 2.3.4 (Teorema de Carathéodory). *Sea φ una aplicación conforme del disco unidad \mathbb{D} en un dominio de Jordan Ω . Entonces φ tiene una extensión continua al disco cerrado $\overline{\mathbb{D}}$, y la extensión es inyectiva de $\overline{\mathbb{D}}$ en $\overline{\Omega}$.*

Demostración. Vamos a suponer que Ω está acotado. Fijemos $\zeta \in \partial\mathbb{D}$. Primero vamos a probar que φ tiene una extensión continua en ζ . Sea $0 < \delta < 1$,

$$D(\zeta, \delta) = \{z : |z - \zeta| < \delta\}$$

y tomemos $\gamma_\delta = \mathbb{D} \cap \partial D(\zeta, \delta)$. Entonces $\varphi(\gamma_\delta)$ es una curva de Jordan de longitud

$$L(\delta) = \int_{\gamma_\delta} |\varphi'(z)| ds$$

Por la desigualdad de Cauchy-Schwarz, tenemos

$$L^2(\delta) \leq \pi\delta \int_{\gamma_\delta} |\varphi'(z)|^2 ds$$

entonces para $\rho < 1$

$$\int_0^\rho \frac{L^2(\delta)}{\delta} d\delta \leq \pi \int \int_{\mathbb{D} \cap D(\zeta, \rho)} |\varphi'(z)|^2 dx dy = \pi \text{Área}(\varphi(\mathbb{D} \cap D(\zeta, \rho))) < \infty$$

Añadir figura.

Entonces, existe una sucesión $\{\delta_n\} \downarrow 0$ tal que $L(\delta_n) \rightarrow 0$. Cuando $L(\delta_n) < \infty$, la curva $\varphi(\gamma_{\delta_n})$ tiene extremos $\alpha_n, \beta_n \in \bar{\Omega}$ y ambos puntos deben estar en $\Gamma = \partial\Omega$. De hecho, si $\alpha_n \in \Omega$, entonces algún punto cerca de α_n tiene dos preimágenes distintas en \mathbb{D} y esto es imposible pues φ es inyectiva. Además,

$$|\alpha_n - \beta_n| \leq L(\delta_n) \rightarrow 0 \quad (2.15)$$

Sea σ_n el subarco cerrado de Γ que tiene extremos α_n y β_n y con un diámetro menor. Entonces 2.15 implica que $\text{diam}(\sigma_n) \rightarrow 0$ porque Γ es homeomorfa al círculo. Por el teorema de la curva de Jordan, $\sigma_n \cup \varphi(\gamma_{\delta_n})$ divide al plano en dos regiones, y una de ellas, llamémosla U_n es acotada. Entonces $U_n \subset \Omega$ ya que $\mathbb{C}^* \setminus \bar{\Omega}$ es conexo por arcos. Como

$$\text{diam}(\partial U_n) = \text{diam}(\sigma_n \cup \varphi(\gamma_{\delta_n})) \rightarrow 0, \text{ concluimos que } \text{diam}(U_n) \rightarrow 0. \quad (2.16)$$

Tomamos $D_n = \mathbb{D} \cup \{z : |z - \zeta| < \delta_n\}$. Sabemos que para n suficientemente grande, $\varphi(D_n) = U_n$. Si no, por conexión tendríamos que $\varphi(\mathbb{D} \setminus \bar{D}_n) = U_n$ y

$$\text{diam}(U_n) \geq \text{diam}(\varphi(B(0, 1/2))) > 0$$

que contradice con 2.16. Entonces $\text{diam}(\varphi(D_n)) \rightarrow 0$ y $\bigcap \overline{\varphi(D_n)}$ es un solo punto pues $\varphi(D_{n+1}) \subset \varphi(D_n)$. Esto significa que φ tiene una extensión continua en $\mathbb{D} \cap \{\zeta\}$. La extensión a todos estos puntos define una aplicación continua en $\bar{\mathbb{D}}$.

Denotemos ahora por φ a la extensión $\varphi : \bar{\mathbb{D}} \rightarrow \bar{\Omega}$. Como $\varphi(\mathbb{D}) = \Omega$, φ lleva $\bar{\mathbb{D}}$ en $\bar{\Omega}$. Para probar que φ es inyectiva, supongamos que $\varphi(\zeta_1) = \varphi(\zeta_2)$, $\zeta_1 \neq \zeta_2$. El argumento utilizado para mostrar que $\alpha_n \in \Gamma$, también prueba que $\varphi(\partial\mathbb{D}) = \Gamma$, así que podemos suponer que $\zeta_j \in \partial\mathbb{D}$, $j = 1, 2$. La curva de Jordan

$$\{\varphi(r\zeta_1) : 0 \leq r \leq 1\} \cup \{\varphi(r\zeta_2) : 0 \leq r \leq 1\}$$

acota al dominio $W \subset \Omega$, luego $\varphi^{-1}(W)$ es una de las dos componentes de

$$\mathbb{D} \setminus (\{r\zeta_1 : 0 \leq r \leq 1\} \cup \{r\zeta_2 : 0 \leq r \leq 1\})$$

Pero como $\varphi(\partial\mathbb{D}) \subset \Gamma$,

$$\varphi(\partial\mathbb{D} \cap \partial\varphi^{-1}(W)) \subset \partial W \cap \partial\Omega = \{\varphi(\zeta_1)\}$$

y φ es constante en un arco de $\partial\mathbb{D}$. Se tiene que φ es constante, por el principio de reflexión de Schwarz, y esta contradicción prueba que $\varphi(\zeta_1) \neq \varphi(\zeta_2)$. \square

El resultado que presentamos a continuación es un recíproco parcial del teorema de Carathéodory. Muestra que la inyectividad en el borde del dominio se traslada al interior, en condiciones adecuadas.

Teorema 2.3.5. *Sea Γ una curva simple, cerrada y suave con interior Ω . Sea $f \in \mathcal{H}(\Gamma \cup \Omega)$ una aplicación inyectiva en Γ . Entonces f es holomorfa e inyectiva en Ω .*

Demostración. La aplicación $w = f(z)$ lleva Γ en un camino simple, cerrado y suave Γ' . Sea w_0 un punto arbitrario que no esté en Γ' . Entonces, si llamamos Γ_+ al camino positivamente orientado,

$$n = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma_+} \frac{f'(z)}{f(z) - w_0} dz = \frac{1}{2\pi i} \int_{\Gamma'} \frac{dw}{w - w_0}.$$

Ahora la última integral es cero si w_0 está fuera de Γ' y es ± 1 si w_0 está dentro de Γ' . Sin embargo, n no puede ser negativo pues la primera integral nos da el número de ceros de $f(z) - w_0$ dentro de Γ . Entonces, $n = 1$ si w_0 está dentro de Γ' .

Esto prueba que $f(z) = w_0$ tiene una sola solución si w_0 está dentro de Γ' , que $f(z)$ es holomorfa e inyectiva en Ω y lleva Ω en Ω' (el interior de Γ') y que la dirección positiva de Γ' se corresponde con la dirección positiva de Γ . \square

Capítulo 3

Productos infinitos

Definición 3.0.1. Sea $\{u_n\}$ ($n = 1, 2, \dots$) una sucesión de números complejos. Su producto infinito se define como el límite de los productos parciales $u_1 u_2 \cdots u_N$ cuando N tiende a infinito:

$$\prod_{n=1}^{\infty} u_n = \lim_{N \rightarrow \infty} \prod_{n=1}^N u_n.$$

Además, decimos que el producto converge cuando el límite existe y no es cero. En otro caso, se dice que el producto diverge.

Añadir resultados de convergencia y convergencia absoluta en productos infinitos

Proposición 3.0.2. Sea $\{u_n\}$ ($n = 1, 2, \dots$) una sucesión de números complejos no nulos. Si $\lim u_n = 1$ y la serie

$$\sum_{n=1}^{\infty} \log u_n$$

converge absolutamente, es decir, $\sum_{n=1}^{\infty} |\log u_n|$ converge, entonces el producto infinito

$$\prod_{n=1}^{\infty} u_n$$

converge absolutamente.

Demostración. Si n es suficientemente grande, entonces u_n puede escribirse como $u_n = 1 - \alpha_n$, donde $|\alpha_n| < 1$, y entonces podemos definir $\log u_n$ como $\log(1 - \alpha_n)$. Por hipótesis, se sigue que la serie

$$\sum_{n=1}^{\infty} \log u_n = \sum_{n=1}^{\infty} \log(1 - \alpha_n)$$

converge. Así que las sumas parciales

$$\sum_{n=1}^N \log u_n$$

tienen límite. Como la función exponencial es continua, podemos exponenciar las sumas parciales y vemos que

$$\prod_{n=1}^{\infty} u_n = \lim_{N \rightarrow \infty} \prod_{n=1}^N u_n$$

existe. □

Lema 3.0.3. *Sea $\{\alpha_n\}$ una sucesión de números complejos tales que $\alpha_n \neq 1$ para todo n . Supongamos que*

$$\sum_{n=1}^{\infty} |\alpha_n|$$

converge. Entonces

$$\prod_{n=1}^{\infty} (1 - \alpha_n)$$

converge absolutamente.

Demostración. Para una cantidad finita n , tenemos que $|\alpha_n| < \frac{1}{2}$, así que $\log(1 - \alpha_n)$ está definido por la serie usual, y para alguna constante C , tenemos

$$|\log(1 - \alpha_n)| \leq C |\alpha_n|.$$

Por tanto, el producto converge absolutamente por definición y utilizando la hipótesis de que $\sum_{n=1}^{\infty} |\alpha_n|$ converge. □

Añadir comentario sobre la equivalencia de las tres situaciones.

3.1. Productos de Blaschke

Proposición 3.1.1. *Sea $\{\alpha_n\}$ una sucesión en el disco unidad tal que $\alpha_n \neq 0 \forall n$ y $\sum_{n=1}^{\infty} (1 - |\alpha_n|)$ converge. Entonces el producto*

$$f(z) = \prod_{n=1}^{\infty} \frac{\alpha_n - z}{1 - \overline{\alpha_n} z} \frac{|\alpha_n|}{\alpha_n}$$

converge uniformemente para $|z| \leq r < 1$ y define una función holomorfa en el disco unidad que tiene los mismos ceros que α_n . Además $|f(z)| \leq 1$.

Demostración. Sea

$$b_n(z) = \frac{\alpha_n - z}{1 - \overline{\alpha_n} z} \frac{|\alpha_n|}{\alpha_n}.$$

Por el lema 3.0.3, sabemos que $\prod_{n=1}^{\infty} b_n$ converge uniformemente si $\sum_{n=1}^{\infty} |1 - b_n|$ converge.

$$\begin{aligned} |1 - b_n(z)| &= \left| 1 + \frac{z - \alpha_n}{1 - \overline{\alpha_n}z} \frac{|\alpha_n|}{\alpha_n} \right| = \left| \frac{(1 - \overline{\alpha_n}z)\alpha_n + (z - \alpha_n)|\alpha_n|}{(1 - \overline{\alpha_n}z)\alpha_n} \right| = \\ &= \left| \frac{(1 - |\alpha_n|)(\alpha_n + |\alpha_n|z)}{(1 - \overline{\alpha_n}z)\alpha_n} \right| \leq \frac{1 + |z|}{1 - |z|} (1 - |\alpha_n|). \end{aligned}$$

Entonces si $|z| \leq r$,

$$\sum_{n=1}^{\infty} |1 - b_n(z)| \leq \frac{1 + |z|}{1 - |z|} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - |\alpha_n|) \leq \frac{1 + r}{1 - r} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - |\alpha_n|).$$

Lo que prueba que la serie $\sum_{n=1}^{\infty} |1 - b_n(z)|$ converge absoluta y uniformemente en el disco cerrado de radio r . Por lo que $f(z) = \prod_{n=1}^{\infty} b_n$ converge uniformemente para $|z| \leq r < 1$. Además f define una función holomorfa en el disco unidad ya que b_n son funciones holomorfas y su producto infinito converge uniformemente en los compactos.

Falta ver que $f(z)$ tiene los mismos ceros que α_n y $|f(z)| \leq 1$.

Sea $B(z) = \prod_{n=1}^{\infty} b_n$ el producto infinito y $B_n(z) = \prod_{k=1}^n b_k$ el producto parcial,

$$\left| \frac{B(0)}{B_n(0)} \right| \leq \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left| \frac{B(e^{i\theta})}{B_n(e^{i\theta})} \right| d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |B(e^{i\theta})| d\theta.$$

Tomando $n \rightarrow \infty$, obtenemos

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} |B(e^{i\theta})| d\theta = 1,$$

y, por consiguiente, $|B(e^{i\theta})| = 1$ en casi todo punto. Es decir, $|f(z)| = 1$ en $\partial\mathbb{D}$. □

Capítulo 4

$\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ como álgebra de Banach

En este capítulo vamos a trabajar con $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ como el álgebra de las funciones holomorfas acotadas en el disco unidad.

Definición 4.0.1. Un espacio vectorial complejo X , dotado de una norma $\|\cdot\|$ se denomina espacio de Banach si es completo.

$\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ es un espacio vectorial complejo, que dotado con la norma infinito

$$\|f\|_\infty = \sup_{|z| < 1} |f(z)|,$$

es normado y completo sobre \mathbb{C} . Atendiendo a la definición anterior, decimos que $(\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D}), \|\cdot\|_\infty)$ es un espacio de Banach.

Definición 4.0.2. Decimos que un álgebra B , dotada de una norma $\|\cdot\|$ es un álgebra de Banach si como espacio normado $(B, \|\cdot\|)$ es un espacio de Banach y, además, para el producto satisface:

$$\forall x, y \in B : \|x \cdot y\| \leq \|x\| \cdot \|y\|.$$

Con las operaciones naturales, podemos ver $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ como un álgebra. En efecto, si $f, g \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ y $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$, entonces

$$\begin{aligned} \alpha f + \beta g &\in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D}) \\ fg &\in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D}). \end{aligned}$$

Así, $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ es un álgebra de Banach conmutativa (con la función constante 1 como elemento unidad) puesto que es un álgebra conmutativa y un espacio de Banach cuya norma asociada cumple la siguiente propiedad:

$$\forall f, g \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D}) : \|f \cdot g\|_\infty \leq \|f\|_\infty \cdot \|g\|_\infty.$$

Definición 4.0.3. Sea B un espacio de Banach. Consideramos B^* el espacio de las aplicaciones $\varphi : B \rightarrow \mathbb{C}$ continuas. B^* es un espacio vectorial y tiene una norma natural dada por:

$$\|\varphi\| = \sup_{\|x\| \leq 1} |\varphi(x)|.$$

Con esta norma, B^* es un espacio de Banach al que llamamos espacio dual de B .

Además de la topología inducida por la norma en el espacio dual B^* , vamos a considerar otra topología denominada topología débil-* en B^* . Está definida de la siguiente manera. Sea $\varphi_0 \in B^*$ y tomemos una cantidad finita de elementos $x_1, \dots, x_n \in B$ y $\varepsilon > 0$. Sea

$$U = \{\varphi \in B^* : |\varphi(x_k) - \varphi_0(x_k)| < \varepsilon, k = 1, \dots, n\}.$$

un entorno φ_0 . Un abierto de esta topología será, por tanto, cualquier unión de tales entornos U .

Esta topología se denota por $\sigma(B^*, B)$. Es la topología más débil de B^* tal que todas las funciones $\varphi \rightarrow \varphi(x)$ son continuas de B^* en \mathbb{C} , con $x \in B$.

Observación. La bola unidad cerrada de B^* es compacto en la topología débil-*.

Recordemos que $\phi : \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D}) \rightarrow \mathbb{C}$ es un homomorfismo de álgebras si para todos $f, g \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ y $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$ se cumple:

$$\begin{aligned} \phi(\alpha f + \beta g) &= \alpha \phi(f) + \beta \phi(g) \\ \phi(f \cdot g) &= \phi(f) \cdot \phi(g). \end{aligned} \tag{4.1}$$

El espectro de $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$, denotado por $\mathfrak{M} = \mathfrak{M}(\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D}))$, es el espacio de los homomorfismos $\phi : \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D}) \rightarrow \mathbb{C}$ no nulos. Observamos que tales homomorfismos verifican que son continuos y $\|\phi\| = 1$.

\mathfrak{M} es un subconjunto del espacio dual $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})^*$ y, de hecho, está contenido en la bola unidad de $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})^*$. Además, \mathfrak{M} es cerrado en la topología débil estrella en B^* .

Como la bola unidad en $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})^*$ equipada con la topología débil-* es compacto, se sigue que \mathfrak{M} (como subconjunto de $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})^*$) equipado con la topología débil estrella es un espacio Hausdorff compacto. ?

En este punto queremos asociar a cada elemento de x de B con una función continua que estará sobre $\mathfrak{M}(B)$. Para ello vamos a definir la siguiente aplicación:

$$\begin{aligned} \widehat{x} : \mathfrak{M}(B) &\rightarrow \mathbb{C} \\ \varphi &\mapsto \varphi(x). \end{aligned}$$

Cada \widehat{x} es una función continua en $\mathfrak{M}(B)$. De hecho, por definición, la topología débil-* es la topología más débil de $\mathfrak{M}(B)$ que hace que cada \widehat{x} sea continua. Así pues, tenemos la siguiente representación a la que se le suele denominar **transformada de Gelfand**

$$x \rightarrow \widehat{x}.$$

La imagen de B bajo este homomorfismo es el álgebra $\widehat{B} = \{\widehat{x} : \mathfrak{M}(B) \rightarrow \mathbb{C} \mid x \in B\}$.

Lo que hemos comentado puede aplicarse a $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$. Así tenemos la siguiente aplicación

$$\begin{aligned}\widehat{f} : \mathfrak{M} &\rightarrow \mathbb{C} \\ \phi &\mapsto \phi(f),\end{aligned}$$

con $x \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$, que da lugar a la representación $f \rightarrow \widehat{f}$. Vamos a poder interpretar $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ como el álgebra de las funciones continuas en el espacio compacto de los ideales maximales \mathfrak{M} . Hay que hablar más de la relación de \mathfrak{M} y los ideales maximales.

\widehat{f} es continua sobre el espectro.

Al espacio \mathfrak{M} se le suele llamar el espacio de ideales maximales de $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$. Para cada $\phi \in \mathfrak{M}$, el kernel de ϕ es un ideal maximal en el álgebra $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$. Recíprocamente, todo ideal maximal en $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ se corresponde con el núcleo de un homomorfismo en \mathfrak{M} . Vamos a estudiar la estructura de este espacio.

Los únicos homomorfismos complejos evidentes de $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ son las evaluaciones

$$\delta_z(f) = f(z).$$

Hablar más de las evaluaciones. Las evaluaciones en puntos del disco abierto son elementos del espectro.

Existe una aplicación continua que lleva \mathfrak{M} en el disco unidad cerrado. Si denotamos por id la función identidad de \mathbb{D} ,

$$\text{id}(z) = z, z \in \mathbb{D},$$

la proyección que buscamos lleva los homomorfismos $\phi \in \mathfrak{M}$ en su correspondiente valor en la función id . Así pues, la aplicación que nos interesa es $\widehat{\text{id}}$. Para evitar confusiones, vamos a introducir una notación alternativa para referirnos a la función $\widehat{\text{id}}$. Si $\phi \in \mathfrak{M}$,

$$\begin{aligned}\pi : \mathfrak{M} &\rightarrow \overline{\mathbb{D}} \\ \phi &\mapsto \phi(\text{id}).\end{aligned}\tag{4.2}$$

Aquí conviene decir que la función identidad tiene norma 1 y cada φ también, por lo que $|\pi(\varphi)| \leq 1$. Es decir, que la imagen de π está contenida en el disco unidad cerrado.

Teorema 4.0.4. *La aplicación $\pi : \mathfrak{M} \rightarrow \overline{\mathbb{D}}$ definida por 4.2 es continua. π es inyectiva sobre el disco abierto \mathbb{D} y π^{-1} aplica homeomórficamente \mathbb{D} sobre un abierto de \mathfrak{M} .*

En esta prueba llamo λ a los puntos del disco y z a la variable de la función f .

Demostración. π es continua por definición. Veamos que π lleva \mathfrak{M} en el disco cerrado. En efecto, ya hemos observado antes que cada punto del disco abierto \mathbb{D} está en la imagen de π puesto que $\pi(\delta_\lambda) = \lambda$. Como \mathfrak{M} es un conjunto compacto que contiene a \mathbb{D} , y la imagen de un compacto por una aplicación continua es también un compacto, entonces $\pi(\mathfrak{M})$ es compacto. Así pues, como $\pi(\mathfrak{M})$ es un conjunto compacto que contiene a \mathbb{D} , contiene todo el disco cerrado $\overline{\mathbb{D}}$.

Veamos ahora que π es inyectiva sobre el disco. Para ello supongamos que $|\lambda| < 1$ y $\pi(\phi) = \phi(\text{id}) = \lambda$, con $\phi \in \mathfrak{M}$. Si $f(\lambda) = 0$, entonces $f(z) = (z - \lambda)g(z)$ y

$$\phi(f) = \phi(z - \lambda)\phi(g) = 0 \cdot \phi(g) = 0.$$

Si $f(\lambda) = c$, entonces $f(z) = c + g(z)$, con $g(\lambda) = 0$ y

$$\phi(f) = \phi(c) + \phi(g) = c + 0 = c.$$

Por lo tanto, $\phi(f) = f(\lambda)$ para toda $f \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$, es decir, ϕ es la evaluación en λ . Esto prueba que π es inyectiva sobre los puntos del disco unidad \mathbb{D} .

Si tomamos $\Delta = \pi^{-1}(\mathbb{D}) = \{\phi_z : z \in \mathbb{D}\}$, entonces π lleva Δ homeomórficamente en el disco \mathbb{D} ya que la topología de Δ es la topología débil definida por las aplicaciones \hat{f} y la topología de \mathbb{D} es la topología débil definida por las aplicaciones $f \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$. ?

□

Si $|\alpha| = 1$, decimos que $\pi^{-1}(\alpha)$ es la fibra de \mathfrak{M} sobre α y lo denotamos por \mathfrak{M}_α :

$$\mathfrak{M}_\alpha = \pi^{-1}(\alpha) = \{\phi \in \mathfrak{M} : \phi(\text{id}) = \alpha\}.$$

La fibra \mathfrak{M}_α es un conjunto cerrado de \mathfrak{M} . Intuitivamente, los elementos de \mathfrak{M}_α son los homomorfismos complejos de \mathfrak{M} que se comportan como la “evaluación en α ”, es decir, los homomorfismos $\phi \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ que llevan cada $f \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ en algo parecido al valor límite $f(z)$ cuando z se aproxima a α . Vamos a ver esto con más detalle a continuación.

Observemos que la imagen de toda función constante por cualquier elemento del espectro es ella misma. Además, la identidad es una función de $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ de norma 1.

Las fibras sobre los puntos del disco abierto tienen un único elemento, pero que sobre los números del borde del disco la fibra tiene muchos.

Teorema 4.0.5. *Sea f una función en $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ y sea α un punto del círculo unidad. Sea $\{z_n\}$ una sucesión de puntos en el disco unidad \mathbb{D} que converge a α , y supongamos que el límite*

$$\zeta = \lim_{n \rightarrow \infty} f(z_n)$$

existe. Entonces existe un homomorfismo complejo ϕ en la fibra \mathfrak{M}_α tal que $\phi(f) = \zeta$.

Demostración. Sea $J = \{h \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D}) : \lim_{n \rightarrow \infty} h(z_n) = 0\}$ un ideal propio en $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$. J está contenido en un ideal maximal M , esto es, existe un homomorfismo complejo ϕ de $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ del que M es el núcleo. En particular, $\phi(h) = 0$ para todo $h \in J$. Las funciones $(z - \alpha)$ y $(f - \zeta)$ están ambas en J . Entonces, $\phi(z) = \alpha$ y $\phi(f) = \zeta$. Por lo tanto ϕ es el homomorfismo buscado. \square

Teorema 4.0.6. *Sea f una función en $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ y sea α un punto del círculo unidad. La función \hat{f} es constante en la fibra \mathfrak{M}_α si y solo si f se puede extender con continuidad a $\mathbb{D} \cup \{\alpha\}$.*

Demostración. Supongamos primero que f se puede extender con continuidad a $\mathbb{D} \cup \{\alpha\}$. Esto significa que existe un número complejo ζ tal que $\lim_{z_n \rightarrow \alpha} f(z_n) = \zeta$ para toda sucesión $\{z_n\}$ en \mathbb{D} que converge a α . Queremos mostrar que \hat{f} vale constantemente ζ en la fibra \mathfrak{M}_α , es decir, $\phi(f) = \zeta$ para todo $\phi \in \mathfrak{M}_\alpha$.

Podemos suponer que $\zeta = 0$. Sea $h(z) = \frac{1}{2}(1 + z\alpha^{-1})$, así que $h(\alpha) = 1$ y $|h| < 1$ en cualquier otro lugar dentro del disco unidad cerrado. Como f es continua en α y toma el valor 0, es fácil ver que $(1 - h^n)f$ converge uniformemente a f cuando $n \rightarrow \infty$. Si ϕ es un homomorfismo complejo de $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ que yace en la fibra \mathfrak{M}_α , es decir, $\phi(z) = \alpha$, entonces $\phi(h) = 1$. Por lo tanto, $\phi[(1 - h^n)f] = 0$, y, como ϕ es continua, $\phi(f) = 0$. Así, \hat{f} es la función idénticamente nula en \mathfrak{M}_α .

Si \hat{f} es constante en la fibra \mathfrak{M}_α , entonces el Teorema 4.0.5 muestra directamente que f se puede extender con continuidad a $\mathbb{D} \cup \{\alpha\}$. \square

Podemos ahora hacernos algunas preguntas de carácter topológico sobre el espacio de ideales maximales de $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$. Las evaluaciones punto a punto llevan el disco unidad abierto en un conjunto abierto Δ de \mathfrak{M} . El resto de homomorfismos yacen en las fibras \mathfrak{M}_α . La cuestión que nos planteamos es la siguiente: ¿son esos homomorfismos realmente límites de δ_z en la topología de \mathfrak{M} ? En otras palabras, ¿es el disco \mathbb{D} denso en \mathfrak{M} ? A esta pregunta se le ha denominado El Problema de la Corona. A continuación vamos a dar una formulación algebraica equivalente.

Teorema 4.0.7 (Teorema de la Corona). *El problema de la corona es equivalente a: Sean $f_1, \dots, f_n \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ y $\delta > 0$ tales que para cada $z \in \mathbb{D}$ se tiene*

$$|f_1(z)| + \dots + |f_n(z)| \geq \delta,$$

entonces existen $g_1, \dots, g_n \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ tales que $f_1g_1 + \dots + f_ng_n = 1$.

Demostración. Supongamos que \mathbb{D} es denso. Sean $f_1, \dots, f_n \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ y $\delta > 0$ tales que para cada $z \in \mathbb{D}$ se tiene

$$|f_1(z)| + \dots + |f_n(z)| \geq \delta.$$

Si la función constante 1 no se pudiera escribir de la forma $f_1g_1 + \cdots + f_ng_n$, con $g_1, \dots, g_n \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$, tomemos $\phi \in \mathfrak{M}$ no nulo tal que el ideal maximal $\ker \phi$ contiene al ideal propio generado por f_1, \dots, f_n .

Como \mathbb{D} es denso en \mathfrak{M} para w^* , existe una red $\{z_\alpha\} \subset \mathbb{D}$ que tiende w^* a ϕ . En particular, para cada f_j se tiene que $\lim_\alpha f_j(z_\alpha) = \widehat{f_j}(\phi) = 0$, $1 \leq j \leq n$. Esto contradice la acotación relativa a $|f_1(z)| + \cdots + |f_n(z)|$.

Recíprocamente, supongamos que \mathbb{D} no es denso en \mathfrak{M} , entonces existe un elemento no nulo $\phi_0 \in \mathfrak{M}$ que no está en la adherencia de \mathbb{D} . Por definición de la topología de \mathfrak{M} , existen funciones $f_1, \dots, f_n \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ y $\delta > 0$ tales que $\phi_0(f_j) = 0$, $j = 1, \dots, n$ y el abierto

$$\{\phi \in \mathfrak{M} : |\phi(f_j)| < \delta, 1 \leq j \leq n\}$$

no corta a \mathbb{D} . En particular, para cada $z \in \mathbb{D}$ se cumple que

$$|f_1(z)| + \cdots + |f_n(z)| \geq \delta$$

y las funciones f_1, \dots, f_n están en un ideal propio de $J \subset \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ ya que $J \subset \ker \phi_0$.

La afirmación de que f_1, \dots, f_n están en un ideal propio es equivalente a la afirmación de que la función constante 1 no se puede escribir de la forma $f_1g_1 + \cdots + f_ng_n = 1$, con $g_1, \dots, g_n \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$, ya que $\phi(1) = 1$ y $\phi(f_1g_1 + \cdots + f_ng_n) = \phi(f_1)\phi(g_1) + \cdots + \phi(f_n)\phi(g_n) = 0$.

□

Introducir la noción de $Cl(f, \alpha)$ y explicitar que el otro contenido también es cierto.

Proposición 4.0.8. *Para todo $f \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ y α tal que $|\alpha| = 1$ se cumple que*

$$\widehat{f}(\mathfrak{M}_\alpha) \subset Cl(f, \alpha).$$

Demostración. Sea $\phi \in \mathfrak{M}_\alpha$. Veamos que existe una sucesión $\{z_n\} \subset \mathbb{D}$ tal que

$$(III) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} z_n = \alpha$$

$$(IV) \quad \lim_{n \rightarrow \infty} f(z_n) = \widehat{f}(\phi).$$

Como \mathbb{D} es denso en \mathfrak{M} para w^* , se cumple que existe $\{z_\alpha\} \subset \mathbb{D}$ tal que $\delta_{z_\alpha} \rightarrow \phi$. Es decir, para toda función $h \in \mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ se tiene que $h(z_\alpha) \rightarrow \widehat{h}(\phi)$. En particular, para la función identidad es cierto por lo que, como $\phi \in \mathfrak{M}_\alpha$, tenemos

$$\widehat{\text{id}}(\phi) = \pi(\text{id}) = \alpha.$$

Si tomamos ahora $\{z_{\alpha_n}\}$ una subsucesión de $\{z_\alpha\}$ cumplirá que $\lim_{n \rightarrow \infty} z_n = \alpha$ y, además, $\lim_{n \rightarrow \infty} f(z_n) = \widehat{f}(\phi)$. Es decir, $\widehat{f}(\phi) \in Cl(f, \alpha)$.

□

En este teorema y en el anterior hablo de w^* , pero creo que está mal y debería poner simplemente topología débil-* o ponerlo como lo he denotado antes con σ .

Apéndice A

Notación

$\mathcal{H}(U)$: espacio de las funciones holomorfas en U .

$\mathcal{H}^\infty(U)$: espacio de las funciones holomorfas y acotadas en U .

\mathbb{D} : disco unidad.

$\overline{\mathbb{D}}$: disco unidad cerrado.

$\partial\mathbb{D}$: borde del disco unidad.

$L^\infty(U)$: espacio de funciones medibles en U , esencialmente acotadas.

$\mathfrak{M}(B)$: espacio de los homomorfismos complejos del álgebra B .

Bibliografía

- CONWAY, J. B. *Functions of One Complex Variable II*. Springer, 1995. ISBN 0387944605.
- DETTMAN, J. W. *Applied Complex Variables*. Dover Publications, 1984. ISBN 048664670X.
- GARNETT, J. B. y MARSHALL, D. E. *Harmonic measure*. Cambridge University Press, 2005. ISBN 0521720605.
- HOFFMAN, K. *Banach Spaces of Analytic Functions*. Dover Publications, 1988. ISBN 048665785X.
- KODAIRA, K. *Complex Analysis*. Cambridge University Press, 2007. ISBN 9780511804045.
- LANG, S. *Complex Analysis*. Springer, 1999. ISBN 0387985921.
- LIN, I.-H. *Classical Complex Analysis: A Geometric Approach (Volume 2)*. World Scientific, 2010. ISBN 9814271292.
- NEEDHAM, T. The geometry of harmonic functions. *Mathematics Magazine*, vol. 67(2), páginas 92–108, 1994.
- NEEDHAM, T. *Visual Complex Analysis*. Oxford University Press, 1997. ISBN 0198534477.
- RUDIN, W. *Real and Complex Analysis*. McGraw-Hill, 1970.

*–¿Qué te parece desto, Sancho? – Dijo Don Quijote –
Bien podrán los encantadores quitarme la ventura,
pero el esfuerzo y el ánimo, será imposible.*

*Segunda parte del Ingenioso Caballero
Don Quijote de la Mancha
Miguel de Cervantes*

*–Buena está – dijo Sancho –; fírmela vuestra merced.
–No es menester firmarla – dijo Don Quijote–,
sino solamente poner mi rúbrica.*

*Primera parte del Ingenioso Caballero
Don Quijote de la Mancha
Miguel de Cervantes*

Todo list

■ Empezar comentando cómo calcular el radio de convergencia, que los ejemplos son de series con radio de convergencia 1 y que vas a mostrar cómo difieren el comportamiento en la frontera de unos a otros.	3
■ Hacer dibujo, como en el libro de Lin.	4
■ Extender este ejemplo con lo que hemos visto en el capítulo de espacios de Banach. . .	7
■ Añadir figura.	14
■ Añadir resultados de convergencia y convergencia absoluta en productos infinitos . . .	17
■ Añadir comentario sobre la equivalencia de las tres situaciones.	18
■ Falta ver que $f(z)$ tiene los mismos ceros que α_n y $ f(z) \leq 1$	19
■ Hablar más de las evaluaciones. Las evaluaciones en puntos del disco abierto son elementos del espectro.	23
■ Aquí conviene decir que la función identidad tiene norma 1 y cada φ también, por lo que $ \pi(\varphi) \leq 1$. Es decir, que la imagen de π está contenida en el disco unidad cerrado. . .	23
■ Observemos que la imagen de toda función constante por cualquier elemento del espectro es ella misma. Además, la identidad es una función de $\mathcal{H}^\infty(\mathbb{D})$ de norma 1.	24
■ Las fibras sobre los puntos del disco abierto tienen un único elemento, pero que sobre los números del borde del disco la fibra tiene muchos.	24
■ Introducir la noción de $Cl(f, \alpha)$ y explicitar que el otro contenido también es cierto. .	26
■ En este teorema y en el anterior hablo de w^* , pero creo que está mal y debería poner simplemente topología débil-* o ponerlo como lo he denotado antes con σ	26