

Análisis complejo

2 de marzo de 2023

Índice general

Preliminares	2
1. Conformalidad y funciones abiertas en el disco unidad	7
1.1. Funciones meromorfas	7
1.2. Aplicaciones conformes	8
1.3. Dominios conformemente equivalentes al plano complejo y al plano complejo extendido .	9
1.4. Funciones holomorfas en el disco unidad	12
1.5. El teorema de Schwarz-Pick	13
1.6. Subordinación	16
1.7. La métrica de Poincaré	19
2. Familias normales	23
2.1. Familias normales	23
2.2. El teorema de Montel	23
2.3. El teorema de Stieltjes-Vitali	28
2.4. Teoremas de Hurwitz	30
3. El teorema de Riemann de la aplicación conforme	32
3.1. Preliminares	32
3.2. Dominios simplemente conexos	32
3.3. El teorema de Riemann de la aplicación conforme	35

Preliminares

Definición 0.1. Si $a \in \mathbb{C}$ y $0 \leq R_1 < R_2 \leq \infty$, se define la corona de centro a y radios R_1 y R_2 como:

$$A(a, R_1, R_2) = \{z \in \mathbb{C} : R_1 < |z - a| < R_2\}$$

Teorema 0.1. Si $a \in \mathbb{C}$, $0 \leq R_1 < R_2 \leq \infty$ y f es holomorfa en $A(a, R_1, R_2)$, entonces existe una única sucesión $\{a_n\}_{-\infty}^{\infty}$ en \mathbb{C} tal que:

- $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z - a)^n$ converge para todo $z \in A(a, R_1, R_2)$.
- $f(z) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z - a)^n$ para todo $z \in A(a, R_1, R_2)$.

Para cada $n \in \mathbb{Z}$,

$$a_n = \frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} \frac{f(z)}{(z - a)^{n+1}} dz$$

siendo γ cualquiera camino que esté en $A(a, R_1, R_2)$ con $n(\gamma, a) = 1$

Además, la serie $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z - a)^n$ converge absoluta y uniformemente a cada subconjunto compacto de $A(a, R_1, R_2)$.

A esta serie se le llama desarrollo de Laurent de f en $A(a, R_1, R_2)$.

Definición 0.2. f tiene una singularidad aislada en $a \in \mathbb{C}$ si existe $R > 0$ tal que f está definida y es holomorfa en $D(a, R) \setminus \{a\} = A(a, 0, R)$.

Podemos considerar el desarrollo de Laurent de f en $D(a, R) \setminus \{a\}$. Existe una única sucesión en \mathbb{C} , $\{a_n\}_{-\infty}^{\infty}$, tal que:

$$f(z) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z - a)^n, \quad z \in D(a, R) \setminus \{a\}$$

Como la sucesión $\{a_n\}_{-\infty}^{\infty}$ no depende de R , a este desarrollo se le puede llamar desarrollo de Laurent de f en a o en un entorno perforado de a .

Proposición 0.2. Sea f una función con una singularidad aislada en $a \in \mathbb{C}$ y sea $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z - a)^n$ el desarrollo de Laurent de f en a . Entonces:

1. a es una singularidad evitable de $f \Leftrightarrow a_n = 0$ si $n < 0 \Leftrightarrow \{n < 0 : a_n \neq 0\} = \emptyset$.
2. a es un polo de orden N de $f \Leftrightarrow a_{-N} \neq 0$ y $a_n = 0$ si $n < -N$. Luego a es un polo de $f \Leftrightarrow \{n < 0 : a_n \neq 0\}$ es finito y no vacío.
3. a es una singularidad esencial de $f \Leftrightarrow \{n < 0 : a_n \neq 0\}$ es infinito.

Definición 0.3. f tiene una singularidad aislada en ∞ si existe $R > 0$ tal que f es holomorfa en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$.

1. Es una singularidad evitable de f si $\lim_{z \rightarrow \infty} f(z)$ existe en \mathbb{C} .
2. Es un polo de f si $\lim_{z \rightarrow \infty} f(z) = \infty$.

3. Es una singularidad esencial en otro caso.

Si f tiene una singularidad aislada en ∞ , entonces f es holomorfa en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$ para un cierto $R > 0$. Entonces la función $g(z) = f\left(\frac{1}{z}\right)$ es holomorfa en $D\left(0, \frac{1}{R}\right) \setminus \{0\}$, por lo que tiene una singularidad aislada en 0.

Entonces:

1. f tiene una singularidad evitable en $\infty \Leftrightarrow g$ tiene una singularidad evitable en 0.
2. f tiene un polo en $\infty \Leftrightarrow g$ tiene un polo en 0.
3. f tiene una singularidad esencial en $\infty \Leftrightarrow g$ tiene una singularidad esencial en 0.

Proposición 0.3. Sea f una función con una singularidad aislada en ∞ . Entonces:

1. ∞ es una singularidad evitable de $f \Leftrightarrow f$ está acotada en un entorno perforado de ∞ . Es decir, si existe $R > 0$ tal que f es holomorfa y está acotada en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$.
2. ∞ es un polo de $f \Leftrightarrow$ existe $N \in \mathbb{N}$ tal que $\lim_{z \rightarrow \infty} \frac{f(z)}{z^N}$ existe en \mathbb{C} y es distinto de 0. En este caso, N es único y se denomina el orden de ∞ como polo de f .
3. ∞ es una singularidad esencial de $f \Leftrightarrow f(\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\})$ es denso en \mathbb{C} para todo $R > 0$ suficientemente grande.

Observación. En (2), el orden de ∞ como polo de f coincide con el orden de 0 como polo de $f\left(\frac{1}{z}\right)$.

Si f tiene una singularidad aislada en ∞ , entonces existe $R > 0$ tal que f es holomorfa en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\} = A(0, R, \infty)$. Podemos considerar el desarrollo de Laurent de f en $A(0, R, \infty)$: existe una única sucesión $\{a_n\}_{-\infty}^{\infty}$ en \mathbb{C} tal que:

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n z^n, \quad \text{para todo } z \in \mathbb{C} \text{ con } |z| > R$$

Como no depende de R , se le puede llamar desarrollo de Laurent de f en ∞ .

Proposición 0.4. Sea f una función con una singularidad aislada en ∞ y sea $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n z^n$ el desarrollo de Laurent de f en ∞ . Entonces:

1. ∞ es una singularidad evitable de $f \Leftrightarrow a_n = 0$ si $n > 0$.
2. ∞ es un polo de f de orden $N \Leftrightarrow a_N \neq 0$ y $a_n = 0$ si $n > N$.
3. ∞ es una singularidad esencial de $f \Leftrightarrow \{n > 0 : a_n \neq 0\}$ es infinito.

Definición 0.4. Si f tiene una singularidad aislada en $a \in \mathbb{C}$ y $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n(z-a)^n$ es el desarrollo de Laurent de f en a , se define $\text{Res}(f, a) = a_{-1}$.

Proposición 0.5. Sea $a \in \mathbb{C}$ y f una función con una singularidad aislada en a . Sea $R > 0$ tal que f es holomorfa en $D(a, R) \setminus \{a\}$. Entonces, para todo $r \in (0, R)$, se tiene que:

$$\text{Res}(f, a) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z-a|=r} f(z) dz$$

Proposición 0.6. Sea f una función con una singularidad aislada en ∞ . Sea $R > 0$ tal que f es holomorfa en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$. Se define:

$$\text{Res}(f, \infty) = \frac{-1}{2\pi i} \int_{|z|=r} f(z) dz, \quad \text{siendo } r > R$$

Proposición 0.7. Si f tiene una singularidad aislada en ∞ y $\sum_{-\infty}^{\infty} a_n z^n$ es el desarrollo de Laurent de f en ∞ , entonces $\text{Res}(f, \infty) = -a_{-1}$.

Teorema 0.8 (Teorema de los residuos). Sea D un dominio en \mathbb{C} y sea f holomorfa en D salvo por singularidades aisladas, es decir, existe $A \subset D$, A sin puntos de acumulación en D , tal que f es holomorfa en $D \setminus A$. Sea γ un camino cerrado en $D \setminus A$, con $n(\gamma, z) = 0$ para todo $z \in \mathbb{C} \setminus D$. Entonces:

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f(z) dz = \sum_{a \in A} \text{Res}(f, a) n(\gamma, a)$$

Teorema 0.9 (Teorema de la función inversa). Sea D un dominio en \mathbb{C} y sea f holomorfa en D , con $a \in D$ tal que $f'(a) \neq 0$. Entonces existen U, V abiertos en \mathbb{C} con $a \in U \subset D$, $f(a) \in V$, tales que:

1. f es inyectiva en U .
2. $f(U) = V$.
3. $f'(z) \neq 0$ para todo $z \in U$.
4. $f^{-1} : V \rightarrow U$ es holomorfa y además:

$$(f^{-1})'(f(z)) = \frac{1}{f'(z)}, \quad \forall z \in U$$

Teorema 0.10. Sea D un dominio en \mathbb{C} y sean f holomorfa en D no constante y $a \in D$. Sea n el orden de a como cero de $f - f(a)$, es decir, el primer natural para el que $f^{(n)}(a) \neq 0$. Entonces f es localmente una aplicación $n \rightarrow 1$ cerca de a . Es decir, existe $\alpha > 0$ con $D(a, \alpha) \subset D$ tal que para todo $0 < \varepsilon < \alpha$ existe $\delta > 0$ tal que cada punto $w \in D(f(a), \delta) \setminus \{f(a)\}$ es la imagen de exactamente n puntos distintos $z_1, z_2, \dots, z_n \in D(a, \varepsilon) \setminus \{a\}$. En particular, $f(D(a, \varepsilon)) \supset D(f(a), \delta)$.

Definición 0.5. Sea D abierto en \mathbb{C} y sea f holomorfa en D salvo por polos. Si $a \in D$ es un polo de f , se tiene que $\lim_{z \rightarrow a} f(z) = \infty$. Definimos $f(a) = \infty$. Entonces $f : D \rightarrow \mathbb{C}^*$ y es continua. Se dice que f es meromorfa en D .

Teorema 0.11. Sea D un dominio en \mathbb{C} y sea f meromorfa en D , con $a \in D$ un polo de orden n de f . Entonces f es localmente una aplicación $n \rightarrow 1$ cerca de a . Es decir, existe $\alpha > 0$ tal que $D(a, \alpha) \subset D$, f es holomorfa en $D(a, \alpha) \setminus \{a\}$ y se verifica que para todo $0 < \varepsilon < \alpha$ existe $R > 0$ tal que cada punto $w \in \mathbb{C}$ con $|w| > R$ es la imagen de exactamente n puntos distintos $z_1, z_2, \dots, z_n \in D(a, \varepsilon) \setminus \{a\}$. En particular, $f(D(a, \varepsilon) \setminus \{a\}) \supset \{w \in \mathbb{C} : |w| > R\}$.

Teorema 0.12. Sea f una función con un polo de orden n en ∞ . Entonces f es localmente una aplicación $n \rightarrow 1$ cerca de ∞ . Es decir, existe $R_0 > 0$ tal que f es holomorfa en $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R_0\}$ y se verifica que para todo $R > R_0$ existe $R' > 0$ tal que cada punto $w \in \mathbb{C}$ con $|w| > R'$ es la imagen de exactamente n puntos distintos z_1, \dots, z_n de $\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}$. En particular, $f(\{z \in \mathbb{C} : |z| > R\}) \supset \{w \in \mathbb{C} : |w| > R'\}$.

Teorema 0.13 (Teorema de la aplicación abierta). Sea D un dominio en \mathbb{C} y sea $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ holomorfa y no constante. Entonces f es una aplicación abierta. En particular, $f(D)$ es un dominio.

Lema 0.14. Sea D un dominio en \mathbb{C} y sea f holomorfa en D .

- Sea $a \in D$. Entonces $f'(a) \neq 0$ si y solo si f es inyectiva en un entorno de a .
- Si f es inyectiva en D , entonces $f'(z) \neq 0$ para todo $z \in D$.

Aplicaciones conformes

Definición 0.6. Sea D un dominio en \mathbb{C} y sea $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ holomorfa e inyectiva. Sea $D' = f(D)$. Entonces:

- D' es un dominio en D .
- $f : D \rightarrow D'$ es biyectiva.

- $f^{-1} : D' \rightarrow D$ es holomorfa.

En ese caso decimos que f es una aplicación conforme de D sobre D' .

Observación.

1. Si f es una aplicación conforme de D sobre D' , entonces f^{-1} es una aplicación conforme de D' sobre D .
2. Si D_1 , D_2 y D_3 son dominios en \mathbb{C} con f aplicación conforme de D_1 sobre D_2 y g aplicación conforme de D_2 sobre D_3 , entonces $g \circ f$ es una aplicación conforme de D_1 sobre D_3 .

Definición 0.7. Si D_1 y D_2 son dominios en \mathbb{C} , se dice que D_1 y D_2 son conformemente equivalentes si existe una aplicación conforme f de D_1 sobre D_2 .

En el conjunto de los dominios en \mathbb{C} , se tiene la relación de equivalencia "ser conformemente equivalentes".

Definición 0.8. Sea D un dominio en \mathbb{C} . D es simplemente conexo si $\mathbb{C}^* \setminus D$ es conexo. Equivalentemente, D es simplemente conexo si todo camino cerrado γ en D es homólogo a cero módulo D , es decir, $n(\gamma, z) = 0$ para todo $z \in \mathbb{C} \setminus D$.

Teorema 0.15. Sean D_1 y D_2 dos dominios en \mathbb{C} que son conformemente equivalentes. Entonces D_1 es simplemente conexo si y solo si D_2 es simplemente conexo.

Definición 0.9. Si $z_1, z_2 \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$, el ángulo formado por z_1 y z_2 se define como:

$$\theta(z_1, z_2) = \arg \frac{z_2}{z_1} \in (-\pi, \pi]$$

Observación. Si $z_1, z_2 \in \mathbb{C} \setminus \{0\}$ y $\lambda_1, \lambda_2 > 0$, entonces $\theta(\lambda_1 z_1, \lambda_2 z_2) = \theta(z_1, z_2)$.

Definición 0.10. Sea γ un camino con origen en un punto $a \in \mathbb{C}$. Se dice que γ es regular en a si existe una parametrización \mathcal{C}^1 a trozos de γ , $\gamma : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$, tal que $\gamma'(0) \neq 0$.

Definición 0.11. Sean γ_1 y γ_2 dos caminos con origen $a \in \mathbb{C}$ que son regulares en a . El ángulo que forman γ_1 y γ_2 en a , $\theta_a(\gamma_1, \gamma_2)$, se define como sigue.

Sean $\gamma_1, \gamma_2 : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ parametrizaciones \mathcal{C}^1 a trozos de γ_1, γ_2 respectivamente tales que $\gamma_1'(0), \gamma_2'(0) \neq 0$. Entonces $\theta_a(\gamma_1, \gamma_2) = \theta(\gamma_1'(0), \gamma_2'(0))$.

Definición 0.12. Si γ es una curva en \mathbb{C} y $f : \text{sop}(\gamma) \rightarrow \mathbb{C}$ es continua, se define la curva imagen de γ por f como la curva Γ que tiene por parametrización $f \circ \gamma$, siendo γ una parametrización de γ .

Definición 0.13. Sea D un dominio en \mathbb{C} y sean f holomorfa en D y $a \in D$. Diremos que f preserva ángulos en a o que f es conforme en a si se verifica lo siguiente.

Si γ_1 y γ_2 son caminos con origen a , regulares en a , entonces las curvas imagen de γ_1 y γ_2 por f de γ_1 y γ_2 respectivamente son caminos con origen $f(a)$, que son regulares en $f(a)$ y se tiene que:

$$\theta_{f(a)}(\Gamma_1, \Gamma_2) = \theta_a(\gamma_1, \gamma_2)$$

Teorema 0.16. Sea D un dominio en \mathbb{C} y sean f holomorfa en D y $a \in D$. Si $f'(a) \neq 0$, entonces f es conforme en a .

Demostración. Sean γ_1 y γ_2 caminos en D , con origen en a y regulares en a . Sean $\gamma_1, \gamma_2 : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ parametrizaciones de γ_1 y γ_2 respectivamente, ambas \mathcal{C}^1 a trozos con $\gamma_1'(0), \gamma_2'(0) \neq 0$. Consideramos las curvas imagen de γ_1 y γ_2 por f :

$$\begin{aligned}\Gamma_1 &= f \circ \gamma_1 : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C} \\ \Gamma_2 &= f \circ \gamma_2 : [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}\end{aligned}$$

Γ_1 y Γ_2 son \mathcal{C}^1 a trozos. Además, Γ_1 y Γ_2 son caminos con origen $f(a)$, porque:

$$\Gamma_1(0) = f(\gamma_1(0)) = f(a) = f(\gamma_2(0)) = \Gamma_2(0)$$

Observamos que Γ_1 y Γ_2 son regulares en a :

$$\Gamma'_1(0) = f'(\gamma_1(0))\gamma'_1(0) = f'(a)\gamma_1(0) \neq 0$$

$$\Gamma'_2(0) = f'(\gamma_2(0))\gamma'_2(0) = f'(a)\gamma_2(0) \neq 0$$

Por tanto:

$$\theta_{f(a)}(\Gamma_1, \Gamma_2) = \theta(\Gamma'_1(0), \Gamma'_2(0)) = \arg \frac{\Gamma'_2(0)}{\Gamma'_1(0)} = \theta(\gamma'_1(0), \gamma'_2(0)) = \theta_a(\gamma_1, \gamma_2)$$

□

Ejemplo (Contraejemplo). Sean $D = \mathbb{C}$, $f(z) = z^2$ y $a = 0$. Observamos que $f'(a) = 0$. Sea γ_1 el segmento $[0, 1]$ y γ_2 el segmento $[0, i]$. Es claro que $\theta_0(\gamma_1, \gamma_2) = \frac{\pi}{2}$. Si consideramos las curvas imagen de γ_1 y γ_2 por f , Γ_1 y Γ_2 , podemos ver que Γ_1 es el segmento $[0, 1]$ y Γ_2 el segmento $[0, -1]$, que tienen $\theta_0(\Gamma_1, \Gamma_2) = \pi \neq \frac{\pi}{2}$.

De hecho, se tiene la equivalencia. Sea D un dominio en \mathbb{C} y sean f holomorfa en D y $a \in D$. Entonces $f'(a) \neq 0 \Leftrightarrow f$ es conforme en a .

Capítulo 1

Conformalidad y funciones abiertas en el disco unidad

1.1. Funciones meromorfas

Definición 1.1. Sea D un abierto en \mathbb{C}^* . La función $f : D \rightarrow \mathbb{C}^*$ es meromorfa en D si dado $a \in D$ se verifica una de las siguientes posibilidades:

- $a \in \mathbb{C}$ y f es holomorfa en a .
- $a \in \mathbb{C}$ y f tiene un polo en a , es decir, $f(a) = \infty$.
- $a = \infty$ y f tiene una singularidad evitable en ∞ , es decir, $\lim_{z \rightarrow \infty} f(z) = f(\infty) \in \mathbb{C}$.
- $a = \infty$ y f tiene un polo en a , es decir, $f(\infty) = \infty$.

Entonces $f : D \rightarrow \mathbb{C}^*$ es continua.

Observación. En el caso $D \subset \mathbb{C}$, la definición es la que ya conocíamos de función meromorfa. Si además $f(D) \subset \mathbb{C}$, se tiene una función holomorfa en D .

Observación. Sea D abierto en \mathbb{C}^* y sea $f : D \rightarrow \mathbb{C}^*$ continua. Supongamos que f es holomorfa en $\{z \in D \cap \mathbb{C} : f(z) \in \mathbb{C}\}$ y que el conjunto $\{z \in D : f(z) = z\}$ no tiene puntos de acumulación en D . Entonces f es meromorfa en D .

Observación. Sea D abierto en \mathbb{C}^* y sea $f : D \rightarrow \mathbb{C}^*$, f meromorfa e inyectiva en $A = \{z \in D \cap \mathbb{C} : f(z) \in \mathbb{C}\}$. Entonces f tiene a lo sumo un polo y tal polo es simple. Además, $f'(a) \neq 0$ para todo $a \in A$, por lo que f es conforme en a para todo $a \in A$.

Teorema 1.1 (Teorema de la aplicación abierta). *Sea D un dominio en \mathbb{C}^* y sea $f : D \rightarrow \mathbb{C}^*$ una función meromorfa y no constante en D . Entonces f es una aplicación abierta. En particular, $f(D)$ es un dominio en \mathbb{C}^* .*

Sea D un dominio en \mathbb{C}^* y sea $f : D \rightarrow \mathbb{C}^*$ meromorfa e inyectiva, con $D' = f(D)$. Entonces:

1. D' es un dominio en \mathbb{C}^* .
2. $f^{-1} : D' \rightarrow D$ es meromorfa e inyectiva.

Veamos que (2) es cierto. Como f es una aplicación abierta, se tiene que f^{-1} es continua. Sea $w \in D' \cap \mathbb{C}$ tal que $z = f^{-1}(w) \in \mathbb{C}$, veamos que f^{-1} es holomorfa en w . Como $z \in \mathbb{C} \cap D$ y $f(z) \in \mathbb{C}$, f es holomorfa en z con $f'(z) \neq 0$. Por el teorema de la función inversa, f^{-1} es holomorfa en w .

1.2. Aplicaciones conformes

Definición 1.2. Sea D un dominio en \mathbb{C}^* y sea $f : D \rightarrow \mathbb{C}^*$ meromorfa e inyectiva en D . Sea $D' = f(D)$. Entonces diremos que f es una aplicación conforme de D sobre D' .

En este caso, se tiene que D' es un dominio en \mathbb{C}^* y que $f^{-1} : D' \rightarrow D$ es meromorfa e inyectiva en D' . Por tanto, $f : D \rightarrow D'$ es un homeomorfismo, con f y f^{-1} meromorfas.

Observación.

1. Si f es una aplicación conforme de D sobre D' , entonces f^{-1} es una aplicación conforme de D' sobre D .
2. Si D_1, D_2 y D_3 son dominios en \mathbb{C}^* , con f aplicación conforme de D_1 sobre D_2 y g aplicación conforme de D_2 sobre D_3 , entonces $g \circ f$ es una aplicación conforme de D_1 sobre D_3 .

Se puede comprobar que, sean G_1, G_2 abiertos en \mathbb{C}^* y $f : G_1 \rightarrow \mathbb{C}, g : G_2 \rightarrow \mathbb{C}$ meromorfas tal que $f(G_1) \subset G_2$, entonces $g \circ f : G_1 \rightarrow \mathbb{C}$ es meromorfa.

Definición 1.3. Sean D_1 y D_2 dominios en \mathbb{C}^* . Diremos que D_1 y D_2 son conformemente equivalentes si existe una aplicación conforme f de D_1 sobre D_2 .

En el conjunto de los dominios en \mathbb{C}^* , el ser conformemente equivalentes es una relación de equivalencia.

Definición 1.4. Sea D un dominio en \mathbb{C}^* . Diremos que D es simplemente conexo si $\mathbb{C}^* \setminus D$ es conexo.

Ejemplo.

- $D = \mathbb{C}$.
- $D = \mathbb{C}^* \setminus \{a\}, a \in \mathbb{C}$.
- $D = \mathbb{C}^* \setminus \overline{D}(a, R), a \in \mathbb{C}, R > 0$.
- $D = D(a, R), a \in \mathbb{C}, R > 0$.
- Un semiplano sin ∞ .
- Un sector sin ∞ .
- El plano menos dos semirrectas.
- $D = \mathbb{C} \setminus \{a\}, a \in \mathbb{C}$, no es simplemente conexo, porque $\mathbb{C}^* \setminus D = \{a, \infty\}$ no es conexo.

Lema 1.2. Dado $a \in \mathbb{C}$, la transformación $T : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*, T(z) = \frac{1}{z-a}$ si $z \in \mathbb{C} \setminus \{a\}, T(a) = \infty$ y $T(\infty) = 0$, es una aplicación conforme de \mathbb{C}^* sobre \mathbb{C}^* .

Lema 1.3. Sea H un homeomorfismo de \mathbb{C}^* sobre \mathbb{C}^* . Si D es un dominio simplemente conexo en \mathbb{C}^* , entonces $H(D)$ es un dominio simplemente conexo en \mathbb{C}^* .

Demostración. Como $H : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*$ y D es abierto y conexo en \mathbb{C}^* , entonces $H(D)$ es abierto y conexo en \mathbb{C}^* . Luego $H(D)$ es un dominio en \mathbb{C}^* . Como además $\mathbb{C}^* \setminus D$ es conexo, entonces $\mathbb{C}^* \setminus H(D) = H(\mathbb{C}^* \setminus D)$ es conexo. Por tanto, $H(D)$ es un dominio simplemente conexo. \square

Teorema 1.4. Sean D_1 y D_2 dos dominios en \mathbb{C}^* que son conformemente equivalentes. Entonces D_1 es simplemente conexo si y solo si D_2 es simplemente conexo.

Demostración. Sea $F : D_1 \rightarrow D_2$ aplicación conforme. Consideramos todos los posibles casos teniendo en cuenta que los papeles de D_1 y D_2 son intercambiables.

- Si $D_1, D_2 \subset \mathbb{C}$, se cumple.
- Si $D_1 = \mathbb{C}^*$, como \mathbb{C}^* es cerrado y F es un homeomorfismo, se tiene que D_2 es compacto y por tanto cerrado. Entonces D_2 es abierto y cerrado en \mathbb{C}^* , que es conexo. Por tanto, $D_2 = \mathbb{C}^* = D_1$, ambos simplemente conexos.

- Si $D_1, D_2 \neq \mathbb{C}^*$, consideramos dos casos.
 - Supongamos que $\infty \notin D_1$ y $\infty \in D_2$. D es un dominio en \mathbb{C} y D_2 es un dominio en \mathbb{C}^* . Sea $a \in \mathbb{C}^* \setminus D_2$, de hecho $a \in \mathbb{C} \setminus D_2$. Tomamos la aplicación conforme $T : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*$, $T(z) = \frac{1}{z-a}$ si $z \in \mathbb{C}^* \setminus \{a\}$, $T(a) = \infty$. Tenemos el diagrama:

$$D_1 \xrightarrow{F} D_2 \xrightarrow{T} T(D_2)$$

$T(D_2)$ es un dominio en \mathbb{C}^* . Como $a \notin D_2$, entonces $T(a) = \infty \notin T(D_2)$. Así que $T(D_2)$ es un dominio en \mathbb{C} conformemente equivalente a D_1 . Luego D_1 es simplemente conexo si y solo si $T(D_2)$ es simplemente conexo. Por el lema anterior, esto es equivalente a que D_2 sea simplemente conexo.

- Supongamos que $\infty \in D_1, D_2$. Se sigue de un razonamiento similar usando el apartado anterior.

□

1.3. Dominios conformemente equivalentes al plano complejo y al plano complejo extendido

Veremos que hay tres clases de equivalencia de dominios simplemente conexos en \mathbb{C}^* : \mathbb{C}^* , \mathbb{C} y el disco unidad $\mathbb{D} = D(0, 1) = \{z \in \mathbb{C} : |z| < 1\}$.

\mathbb{C}^* es compacto. Si D es un dominio en \mathbb{C}^* que es conformemente equivalente a \mathbb{C}^* , entonces D es compacto y por tanto cerrado. Como D es abierto, entonces $D = \mathbb{C}^*$.

\mathbb{C} y \mathbb{D} son homeomorfos. Por ejemplo, $T : \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{C}$, $T(z) = \frac{z}{1-|z|}$ es un homeomorfismo.

Proposición 1.5. \mathbb{C} y \mathbb{D} no son conformemente equivalentes.

Demostración. Supongamos que existe una aplicación conforme F de \mathbb{C} sobre \mathbb{D} . Entonces $F : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{D}$ es entera y acotada. Por el teorema de Liouville, F es constante. Esto contradice que F sea una aplicación conforme. □

Proposición 1.6. Sea f entera e inyectiva, entonces f es de la forma

$$f(z) = \alpha z + \beta, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \alpha \neq 0$$

Demostración. Sea $f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$, $z \in \mathbb{C}$, el desarrollo de Taylor de f en 0. Entonces ∞ es una singularidad aislada de f y el desarrollo anterior coincide con el desarrollo de Laurent de f en ∞ .

- Si ∞ es una singularidad evitable de f , entonces $a_n = 0$ si $n \geq 1$, así que f es constante. Esto no es posible.
- Si ∞ es un polo de orden N de f , entonces $a_N \neq 0$ y $a_n = 0$ si $n > N$. Luego f es un polinomio de grado N . f' es un polinomio de grado $N - 1$, con $f'(z) \neq 0$ para todo $z \in \mathbb{C}$. Así que f' es constante, por tanto $N - 1 = 0 \Rightarrow N = 1$.
- Si ∞ es una singularidad esencial de f , entonces $f(\{z \in \mathbb{C} : |z| > 1\})$ es denso en \mathbb{C} . Por el teorema de la aplicación abierta, $f(\{z \in \mathbb{C} : |z| < 1\})$ es abierto en \mathbb{C} . Estos conjuntos son disjuntos por ser f inyectiva, y esto no es posible.

□

Si D es un dominio en \mathbb{C} que es conformemente equivalente a \mathbb{C} , entonces $D = \mathbb{C}$. Veamos que esto es verdad. Sea $f : \mathbb{C} \rightarrow D$ aplicación conforme. f es entera e inyectiva, así que $f(z) = \alpha z + \beta$, con $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$, $\alpha \neq 0$. Luego $D = f(\mathbb{C}) = \mathbb{C}$.

Las aplicaciones conformes de \mathbb{C} sobre \mathbb{C} son de la forma:

$$f(z) = \alpha z + \beta, \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \alpha \neq 0$$

Sea D un dominio en \mathbb{C}^* que es conformemente equivalente a \mathbb{C} .

- Si $\infty \notin D$, entonces D es un dominio en \mathbb{C} conformemente equivalente a \mathbb{C} y, por tanto, $D = \mathbb{C}$.
- Si $\infty \in D$, consideramos $F : \mathbb{C} \rightarrow D$ aplicación conforme. Como sabemos que $D \neq \mathbb{C}^*$, existe $\alpha \in \mathbb{C}^* \setminus D$, de hecho $\alpha \in \mathbb{C} \setminus D$. Sea

$$T : D \rightarrow T(D), \quad T(z) = \frac{1}{z - \alpha}$$

Tenemos el diagrama:

$$\mathbb{C} \xrightarrow{F} D \xrightarrow{T} T(D) = D'$$

D' es un dominio en \mathbb{C} conformemente equivalente a \mathbb{C} , así que $D' = \mathbb{C} = \mathbb{C}^* \setminus \{\infty\}$. Por tanto, $D = \mathbb{C}^* \setminus \{\alpha\}$.

Hemos probado que si D es un dominio en \mathbb{C}^* conformemente equivalente a \mathbb{C} , entonces $D = \mathbb{C}$ o $D = \mathbb{C}^* \setminus \{\alpha\}$, con $\alpha \in \mathbb{C}$. Es decir, $D = \mathbb{C}^* \setminus \{\alpha\}$, $\alpha \in \mathbb{C}^*$.

Los dominios en \mathbb{C}^* que son conformemente equivalentes a \mathbb{C} son $\mathbb{C}^* \setminus \{\alpha\}$, $\alpha \in \mathbb{C}^*$.

Aplicaciones conformes de \mathbb{C}^* sobre \mathbb{C}^*

Sea $T : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*$ aplicación conforme. Sea $a \in \mathbb{C}^*$ tal que $T(a) = \infty$. Consideramos dos casos:

1. Si $a = \infty$, $T(\infty) = \infty$. $T : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}$ es una aplicación conforme, así que $T(z) = \alpha z + \beta$, con $\alpha, \beta \in \mathbb{C}$, $\alpha \neq 0$.
2. Si $a \in \mathbb{C}$, $T(a) = \infty$. T es holomorfa en $\mathbb{C} \setminus \{a\}$, así que a es un polo simple de T . Consideramos el desarrollo de Laurent de T en a .

$$T(z) = \frac{A_{-1}}{z - a} + \sum_{n=0}^{\infty} A_n(z - a)^n, \quad z \in \mathbb{C} \setminus \{a\}, \quad A_{-1} \neq 0$$

∞ es una singularidad aislada de T . De hecho, es una singularidad evitable.

Sea $F(z) = T(z) - \frac{A_{-1}}{z - a}$, $z \in \mathbb{C} \setminus \{a\}$. F es holomorfa en $\mathbb{C} \setminus \{a\}$. a es singularidad evitable de F y $\lim_{z \rightarrow \infty} F(z) = T(\infty) \in \mathbb{C}$, así que ∞ es una singularidad evitable también. Evitando la singularidad de F en a , tenemos que F es entera y acotada. Por tanto F es constante. Así que $F(z) = a_0$, para todo $z \in \mathbb{C}$. Entonces:

$$T(z) = F(z) + \frac{A_{-1}}{z - a} = a_0 + \frac{A_{-1}}{z - a} = \frac{a_0 z + (A_{-1} - a_0 a)}{z - a}$$

En cualquiera de los dos casos, T es de la forma:

$$T(z) = \frac{\alpha z + \beta}{\gamma z + \delta}, \quad \alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbb{C}$$

No todas las aplicaciones de esta forma son aplicaciones conformes de \mathbb{C}^* sobre \mathbb{C}^* .

Ejemplo (Contraejemplo). No es una aplicación conforme si $\alpha = \beta = 0$ o (α, β) y (γ, δ) son proporcionales. Por ejemplo:

$$T(z) = \frac{3z + 2}{6z + 4} = \frac{1}{2}$$

Para que las aplicaciones de esa forma sean aplicaciones conformes de \mathbb{C}^* sobre \mathbb{C}^* , se tiene que verificar que:

$$\begin{vmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{vmatrix} \neq 0$$

En el caso (1), $T(z) = Az + B = \frac{Az+B}{0z+1}$, con $A, B \in \mathbb{C}$, $A \neq 0$, luego:

$$\begin{vmatrix} A & B \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = A \neq 0$$

En el caso (2),

$$\begin{vmatrix} a_0 & A_{-1} - a_0 a \\ 1 & -a \end{vmatrix} = -a_0 a - A_{-1} + a_0 a = -A_{-1} \neq 0$$

Teorema 1.7. *Las aplicaciones conformes de \mathbb{C}^* en \mathbb{C}^* son de la forma:*

$$T(z) = \frac{\alpha z + \beta}{\gamma z + \delta}, \quad \alpha, \beta, \gamma, \delta \in \mathbb{C}, \quad \alpha\delta - \beta\gamma \neq 0$$

Demostración. Sea $T : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*$ una aplicación de esa forma.

- Si $\gamma = 0$, entonces:

$$T(z) = \frac{\alpha z + \beta}{\delta} = \frac{\alpha}{\delta} z + \frac{\beta}{\delta}, \quad \alpha, \delta \neq 0$$

T es una aplicación conforme de \mathbb{C} sobre \mathbb{C} , con $\lim_{z \rightarrow \infty} T(z) = \infty$. Definiendo $T(\infty) = \infty$, tenemos que $T : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*$ es una aplicación conforme.

- Si $\gamma \neq 0$, entonces $T : \mathbb{C}^* \rightarrow \mathbb{C}^*$,

$$\begin{aligned} T(z) &= \frac{\alpha z + \beta}{\gamma z + \delta}, \quad z \in \mathbb{C} \setminus \left\{ -\frac{\delta}{\gamma} \right\} \\ T\left(-\frac{\delta}{\gamma}\right) &= \infty \\ T(\infty) &= \frac{\alpha}{\gamma} \end{aligned}$$

T es meromorfa en \mathbb{C}^* y T es inyectiva.

Veamos que T es sobreyectiva. Sea $w \in \mathbb{C} \setminus \left\{ \frac{\alpha}{\gamma} \right\}$ y sea $z \in \mathbb{C} \setminus \left\{ -\frac{\delta}{\gamma} \right\}$. Entonces:

$$T(z) = w \Leftrightarrow \frac{\alpha z + \beta}{\gamma z + \delta} = w \Leftrightarrow \alpha z + \beta = \gamma z w + \delta w \Leftrightarrow (\alpha - \gamma w)z = \delta w - \beta \Leftrightarrow z = \frac{\delta w - \beta}{-\gamma w + \alpha}$$

Por tanto, T es una aplicación conforme de \mathbb{C}^* sobre \mathbb{C}^* .

Además, hemos probado que T^{-1} es de la forma:

$$T^{-1}(z) = \frac{\delta z - \beta}{-\gamma z + \alpha}, \quad \begin{vmatrix} \delta & -\beta \\ -\gamma & \alpha \end{vmatrix} = \alpha\delta - \beta\gamma \neq 0$$

Si $\gamma = 0$, también es válida esta expresión. □

1.4. Funciones holomorfas en el disco unidad

Teorema 1.8 (Lema de Schwarz). *Sea φ una función holomorfa en \mathbb{D} tal que $\varphi(0) = 0$ y $\varphi(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Entonces:*

1. $|\varphi(z)| \leq |z|$ para todo $z \in \mathbb{D}$.
2. $|\varphi'(0)| \leq 1$.

Además, se da la igualdad en (1) para algún $z \in \mathbb{D}$ con $z \neq 0$ o bien se da la igualdad en (2) si y solo si φ es una rotación de \mathbb{D} , es decir, si existe $\lambda \in \mathbb{C}$ con $|\lambda| = 1$ tal que $\varphi(z) = \lambda z$ para todo $z \in \mathbb{D}$.

Observación. Si φ es una rotación, entonces se da la igualdad en (1) para todo $z \in \mathbb{D}$ y se da la igualdad en (2).

Observación. El teorema se puede enunciar de forma equivalente con la condición $\varphi(\mathbb{D}) \subset \overline{\mathbb{D}}$ en lugar de $\varphi(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Es decir, si φ es holomorfa en \mathbb{D} con $\varphi(0) = 0$ y $\varphi(\mathbb{D}) \subset \overline{\mathbb{D}}$, entonces $\varphi(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$.

Veamos que esto es cierto. Supongamos que existe $z_0 \in \mathbb{D}$ con $|\varphi(z_0)| = 1$. Como $|\varphi(z)| \leq 1$ para todo $z \in \mathbb{D}$, por el principio del máximo φ es constante, luego $\varphi \equiv \varphi(0) = 0$. Esto contradice que $|\varphi(z_0)| = 1$.

Sea f holomorfa en \mathbb{D} con $(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Sea $a \in \mathbb{D}$ y $b = f(a) \in \mathbb{D}$. Definimos:

$$\begin{aligned} T_a(z) &= \frac{z+a}{1+\bar{a}z}, & T_a \in \mathcal{M}, T_a(\mathbb{D}) &= \mathbb{D}, T_a(0) = a \\ S_b(z) &= \frac{z-b}{1-\bar{b}z}, & S_b \in \mathcal{M}, S_b(\mathbb{D}) &= \mathbb{D}, S_b(b) = 0 \end{aligned}$$

Sea $\varphi = S_b \circ f \circ T_a$. φ es holomorfa en \mathbb{D} , con $\varphi(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$ y $\varphi(0) = 0$. Por el lema de Schwarz,

1. $|\varphi(z)| \leq |z|$ para todo $z \in \mathbb{D}$.
2. $|\varphi'(0)| \leq 1$.

Además, se da la igualdad en (1) para algún $z \in \mathbb{D}$, $z \neq 0$, o bien se da la igualdad en (2) si y solo si φ es una rotación.

Desarrollamos las dos expresiones:

1. Sea $z \in \mathbb{D}$. Consideramos $T_a^{-1}(z) \in \mathbb{D}$.

$$\begin{aligned} |\varphi(T_a^{-1}(z))| &\leq |T_a^{-1}(z)| \Leftrightarrow |S_b(f(z))| \leq |S_a(z)| \Leftrightarrow \left| \frac{f(z)-b}{1-\bar{b}f(z)} \right| \leq \left| \frac{z-a}{1-\bar{a}z} \right| \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \left| \frac{f(z)-f(a)}{1-\overline{f(a)}f(z)} \right| \leq \left| \frac{z-a}{1-\bar{a}z} \right|, \quad \forall z \in \mathbb{D} \end{aligned}$$

Además, si se da la igualdad para algún $z \in \mathbb{D}$, $z \neq a$, entonces φ es una rotación. Entonces, $f = S_b^{-1} \circ \varphi \circ T_a^{-1} \in \mathcal{M}$, con $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$.

2. Por la regla de la cadena, $\varphi'(0) = T'_a(0)f'(a)S'_b(b)$.

$$\begin{aligned} T'_a(z) &= \frac{1+\bar{a}z-(z+a)\bar{a}}{(1+\bar{a}z)^2}, & T'_a(0) &= 1-|a|^2 \\ S'_b(z) &= \frac{1-\bar{b}z+(z-b)\bar{b}}{(1-\bar{b}z)^2}, & S'_b(b) &= \frac{1-|b|^2}{(1-|b|^2)} = \frac{1}{1-|b|^2} \end{aligned}$$

Así que:

$$\varphi'(0) = (1-|a|^2)f'(a)\frac{1}{1-|b|^2}$$

Por tanto:

$$|\varphi'(0)| \leq 1 \Leftrightarrow (1 - |a|^2)f'(a) \frac{1}{1 - |b|^2} \leq 1 \Leftrightarrow \frac{|f'(a)|}{1 - |f(a)|^2} \leq \frac{1}{1 - |a|^2}$$

Además, si se da la igualdad, entonces φ es una rotación y por tanto $f \in \mathcal{M}$, con $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$.

Por tanto, hemos probado lo siguiente:

1. Para todo $z \in \mathbb{D}$,

$$\left| \frac{f(z) - f(a)}{1 - \overline{f(a)}f(z)} \right| \leq \left| \frac{z - a}{1 - \overline{a}z} \right|$$

Si se da la igualdad para algún $z \in \mathbb{D}$ con $z \neq a$ entonces $f \in \mathcal{M}$ y $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$.

2.

$$\frac{|f'(a)|}{1 - |f(a)|^2} \leq \frac{1}{1 - |a|^2}$$

Si se da la igualdad entonces $f \in \mathcal{M}$ y $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$.

1.5. El teorema de Schwarz-Pick

Teorema 1.9 (Teorema de Schwarz-Pick). *Sea f holomorfa en \mathbb{D} con $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Entonces:*

1. Para todo $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$,

$$\left| \frac{f(z_2) - f(z_1)}{1 - \overline{f(z_1)}f(z_2)} \right| \leq \left| \frac{z_2 - z_1}{1 - \overline{z_1}z_2} \right|$$

2. Para todo $z \in \mathbb{D}$,

$$\frac{|f'(z)|}{1 - |f(z)|^2} \leq \frac{1}{1 - |z|^2}$$

Además, se da la igualdad en (1) para algún par de puntos $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$ con $z_1 \neq z_2$ o bien se da la igualdad en (2) para algún $z \in \mathbb{D}$ si y solo si $f \in \mathcal{M}$ y $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$, en cuyo caso se da la igualdad en (1) para todo $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$ y se da la igualdad en (2) para todo $z \in \mathbb{D}$.

Proposición 1.10. *Sea $T \in \mathcal{M}$ con $T(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$. Entonces:*

1. Para todo $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$,

$$\left| \frac{T(z_2) - T(z_1)}{1 - \overline{T(z_1)}T(z_2)} \right| = \left| \frac{z_2 - z_1}{1 - \overline{z_1}z_2} \right|$$

2. Para todo $z \in \mathbb{D}$,

$$\frac{|T'(z)|}{1 - |T(z)|^2} \leq \frac{1}{1 - |z|^2}$$

Definición 1.5. Dados $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$, definimos:

$$\rho(z_1, z_2) = \left| \frac{z_2 - z_1}{1 - \overline{z_1}z_2} \right|$$

Observamos que si $1 - \overline{z_1}z_2 = 0$ entonces $\overline{z_1}z_2 = 1 \Rightarrow |z_1||z_2| = 1$. Como esto no ocurre, ρ está bien definida.

La primera parte del teorema de Schwarz-Pick se puede reescribir usando ρ .

Sea f holomorfa en \mathbb{D} con $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Entonces:

$$\rho(f(z_1), f(z_2)) \leq \rho(z_1, z_2), \quad \text{si } z_1, z_2 \in \mathbb{D}$$

Además, se da la igualdad para algún par de puntos distintos $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$ si y solo si $f \in \mathcal{M}$ y $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$, en cuyo caso se da la igualdad para todo $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$.

Vamos a ver que ρ es una distancia en \mathbb{D} .

$$\begin{aligned} \rho : D \times D &\rightarrow \mathbb{R} \\ (z_1, z_2) &\mapsto \rho(z_1, z_2) = \left| \frac{z_2 - z_1}{1 - \bar{z}_1 z_2} \right| \end{aligned}$$

- $\rho(z_1, z_2) \geq 0$.
- $\rho(z_1, z_2) = \rho(z_2, z_1)$.
- $\rho(z_1, z_2) = 0 \Leftrightarrow z_1 = z_2$.
- $\rho(z_1, z_3) \leq \rho(z_1, z_2) + \rho(z_2, z_3)$.

Lema 1.11. Para todo $a, z \in \mathbb{D}$,

$$\frac{||z| - |a||}{1 - |a||z|} \leq \left| \frac{z - a}{1 - \bar{a}z} \right| \leq \frac{|z| + |a|}{1 + |a||z|}$$

Observamos que si $a, z \in \mathbb{D}$, tenemos:

$$\rho(a, z) = \left| \frac{z - a}{1 - \bar{a}z} \right| = |S_a(z)| < 1, \quad S_a \in \mathcal{M}, S_a(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$$

Dados $a \in \mathbb{D}$ y $0 < r < 1$, denotamos:

$$\Delta(a, r) = \{z \in \mathbb{D} : \rho(z, a) < r\}$$

Entonces, dado $z \in \mathbb{D}$, se tiene que:

$$z \in \Delta(a, r) \Leftrightarrow \rho(z, a) < r \Leftrightarrow |S_a(z)| < r \Leftrightarrow S_a(z) \in D(0, r) \Leftrightarrow z \in S_a^{-1}(D(0, r)) \Leftrightarrow z \in T_a(D(0, r))$$

Entonces $\Delta(a, r) = T_a(D(0, r))$.

$T_a(\partial D(0, r))$ es una circunferencia C contenida en \mathbb{D} . Sean c y R el centro y el radio de C , con $c \in \mathbb{C}$, $R > 0$. Entonces $T_a(D(0, r)) = D(c, R)$. Por tanto:

$$\Delta(a, r) = T_a(D(0, r)) = D(c, R)$$

Así que $\Delta(a, r)$ es un disco euclídeo. Como $T_a(0) = a$ tenemos que $a \in \Delta(a, r)$, pero a no tiene por qué ser el centro del disco.

Vamos a calcular c y R . Si $a = 0$, $T_a(z) = z$ luego $T_a(D(0, r)) = D(0, r)$. Supongamos que $a \neq 0$. Sea L la recta que pasa por 0 y a . Calculamos $S_a(L)$ hallando la imagen de tres puntos.

$$\begin{aligned} S_a(0) &= -a \\ S_a(a) &= 0 \\ S_a\left(\frac{1}{\bar{a}}\right) &= \infty \end{aligned}$$

$L' = S_a(L)$ es la recta que pasa por 0 y por $-a$, luego L' coincide con L . Como L' es perpendicular a $\partial D(0, r)$ en los dos puntos de corte y T_a preserva ángulos en esos dos puntos, entonces L es perpendicular a C . Por tanto c está en L .

El diámetro $\left[-r\frac{a}{|a|}, r\frac{a}{|a|}\right]$ se aplica mediante T_a en un diámetro de C , que es:

$$\left[T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right), T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right)\right]$$

Entonces:

$$c = \frac{1}{2} \left(T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right) + T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right) \right)$$

$$R = \frac{1}{2} \left| T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right) - T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right) \right|$$

Calculamos:

$$T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right) = \frac{-r\frac{a}{|a|} + a}{1 - \bar{a}r\frac{a}{|a|}} = \frac{-ra + a|a|}{|a| - r|a|^2} = \frac{a(|a| - r)}{|a|(1 - r|a|)}$$

$$T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right) = \frac{r\frac{a}{|a|} + a}{1 + \bar{a}r\frac{a}{|a|}} = \frac{ra + a|a|}{|a| + r|a|^2} = \frac{a(|a| + r)}{|a|(1 + r|a|)}$$

Se llega a que:

$$c = \frac{1 - r^2}{1 - r^2|a|^2}a$$

$$R = \frac{r(1 - |a|^2)}{1 - r^2|a|^2}$$

Observamos que los puntos de mayor y menor módulo de C son $T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right)$ y $T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right)$ Veamos que, de hecho,

$$\left| T_a\left(-r\frac{a}{|a|}\right) \right| = \frac{||a| - r|}{1 - r|a|} \leq \frac{r + |a|}{1 + r|a|} = \left| T_a\left(r\frac{a}{|a|}\right) \right|$$

■ Si $|a| \geq r$,

$$\frac{|a| - r}{1 - r|a|} \leq \frac{r + |a|}{1 + r|a|} \Leftrightarrow |a| + r|a|^2 - r - r^2|a| \leq r + |a| - r^2|a| - r|a|^2 \Leftrightarrow 2r|a|^2 \leq 2r \Leftrightarrow |a| \leq 1$$

■ Si $|a| < r$ se razona de forma análoga.

Entonces, para todo $z \in \partial D(0, r)$ se tiene que:

$$\frac{||a| - r|}{1 - r|a|} \leq T_a(z) \leq \frac{r + |a|}{1 + r|a|} \Leftrightarrow \frac{||a| - r|}{1 - r|a|} \leq \left| \frac{z + a}{1 + \bar{a}z} \right| \leq \frac{r + |a|}{1 + r|a|} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{||a| - |z||}{1 - |z||a|} \leq \left| \frac{z + a}{1 + \bar{a}z} \right| \leq \frac{|z| + |a|}{1 + |z||a|} \leq |z| + |a|$$

Hemos probado esto para $a, z \in \mathbb{D}$, $a, z \neq 0$. Pero si $a = 0$ o $z = 0$ la desigualdad es trivial. Por tanto, esta cadena de desigualdades es cierta para todo $a, z \in \mathbb{D}$.

Cambiando a por $-a$, tenemos:

$$\frac{||a| - |z||}{1 - |z||a|} \leq \left| \frac{z - a}{1 - \bar{a}z} \right| \leq \frac{|z| + |a|}{1 + |z||a|} \leq |z| + |a|, \quad z, a \in \mathbb{D}$$

Las desigualdades primera y segunda corresponden al último lema.

Por otro lado,

$$\rho(a, z) \leq |z| + |a|, \quad z, a \in \mathbb{D}$$

Como $\rho(z_1, 0) = |z_1|$ y $\rho(0, z_2) = |z_2|$, entonces:

$$\rho(a, z) \leq \rho(a, 0) + \rho(0, z), \quad a, z \in \mathbb{D}$$

Esto es un caso particular de la desigualdad triangular.

Sean $z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{D}$. Tenemos, usando el teorema de Schwarz-Pick,

$$\begin{aligned} \rho(z_1, z_3) &= \rho(S_{z_2}(z_1), S_{z_2}(z_3)) \leq \rho(S_{z_2}(z_1), 0) + \rho(0, S_{z_2}(z_3)) = \\ &= \rho(S_{z_2}(z_1), S_{z_2}(z_2)) + \rho(S_{z_2}(z_2), S_{z_2}(z_3)) = \rho(z_1, z_2) + \rho(z_2, z_3) \end{aligned}$$

Así que ρ verifica la desigualdad triangular. Por tanto, ρ es una distancia en \mathbb{D} que se denomina distancia pseudohiperbólica en \mathbb{D} .

$$\rho(z_1, z_2) = \left| \frac{z_2 - z_1}{1 - \bar{z}_1 z_2} \right| = |S_{z_1}(z_2)| < 1$$

Si $a \in \mathbb{D}$ y $0 < r < 1$, el disco pseudohiperbólico de centro a y radio r es:

$$\Delta(a, r) = \{z \in \mathbb{D} : \rho(z, a) < r\}$$

No consideramos $r \geq 1$ porque $\Delta(a, r) = \mathbb{D}$. Sabemos que $\Delta(a, r)$ es un disco euclídeo, en concreto un disco abierto de centro $\frac{1-r^2}{1-r^2|a|^2}a$ y radio $\frac{r(1-|a|^2)}{1-r^2|a|^2}$. Si $a = 0$, $\Delta(a, r) = D(0, r)$.

Esta distancia es equivalente a la distancia euclídea en \mathbb{D} .

Si $T \in \mathcal{M}$ con $T(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$, se tiene que:

$$\rho(T(z_1), T(z_2)) = \rho(z_1, z_2), \quad z_1, z_2 \in \mathbb{D}$$

Además, si f es holomorfa en \mathbb{D} y $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$, se tiene que:

$$\rho(f(z_1), f(z_2)) \leq \rho(z_1, z_2), \quad z_1, z_2 \in \mathbb{D}$$

1.6. Subordinación

Definición 1.6. Sean f, F holomorfas en \mathbb{D} . Diremos que f está subordinada a F , $f \prec F$, si existe w holomorfa en \mathbb{D} , con $w(0) = 0$ y $w(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$ tal que $f = F \circ w$.

Observación. w está en las condiciones del lema de Schwarz.

Veamos algunas propiedades:

- $f(0) = F(w(0)) = F(0)$.
- $f(\mathbb{D}) = F(w(\mathbb{D})) \subset F(\mathbb{D})$.
- Si $0 < r < 1$, veamos que

$$f(D(0, r)) \subset F(D(0, r))$$

Si $z \in D(0, r)$, $f(z) = F(w(z))$. Por el lema de Schwarz,

$$|w(z)| \leq |z| < r$$

- Si $0 < r < 1$, veamos que

$$\max_{|z|=r} |f(z)| \leq \max_{|z|=r} |F(z)|$$

Si $|z| = r$, como por el lema de Schwarz $|w(z)| \leq |z| = r$, entonces:

$$|f(z)| = |F(w(z))| \leq \max_{|z| \leq r} |F(z)| \Rightarrow \max_{|z|=r} |f(z)| \leq \max_{|z| \leq r} |F(z)|$$

- Si $|z| = r$, como por el lema de Schwarz $|w'(0)| \leq 1$ y además $f'(0) = F'(w(0))w'(0) = F'(0)w'(0)$, entonces:

$$|f'(z)| = |F'(w(z))| \leq \max_{|z| \leq r} |F'(z)| \Rightarrow \max_{|z|=r} |f'(z)| \leq \max_{|z| \leq r} |F'(z)|$$

- No se verifica para todo $r \in (0, 1)$ que

$$\max_{|z|=r} |f'(z)| \leq \max_{|z|=r} |F'(z)|$$

Ejemplo (Contraejemplo). Sean $f(z) = z^2$ y $F(z) = z$. Podemos tomar $w(z) = z^2$, que verifica $w(0) = 0$ y $w(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$, luego $f \prec F$. Si $0 < r < 1$,

$$\begin{aligned} \max_{|z|=r} |f'(z)| &= \max_{|z|=r} 2|z| = 2r \\ \max_{|z|=r} |F'(z)| &= 1 \end{aligned}$$

Observamos que no se cumple que $2r \leq 1$ para todo $r \in (0, 1)$.

Por la segunda parte del teorema de Schwarz-Pick,

$$\frac{|w'(z)|}{1 - |w(z)|^2} \leq \frac{1}{1 - |z|^2}, \quad z \in \mathbb{D}$$

Entonces, si $z \in \mathbb{D}$,

$$|f'(z)| = |F'(w(z))||w'(z)| \leq |F'(w(z))| \frac{1 - |w(z)|^2}{1 - |z|^2} \Leftrightarrow (1 - |z|^2)|f'(z)| \leq (1 - |w(z)|^2)|F'(w(z))|$$

Entonces, si $0 < r \leq 1$, tenemos que:

$$\sup_{|z| < r} (1 - |z|^2)|f'(z)| \leq \sup_{|z| < r} (1 - |z|^2)|F'(z)|$$

Veamos que esto es cierto. Si $|z| < r$, como $|w(z)| \leq |z| < r$,

$$(1 - |z|^2)|f'(z)| \leq (1 - |w(z)|^2)|F'(w(z))| \leq \sup_{|z| < r} (1 - |z|^2)|F'(z)|$$

Proposición 1.12. Sean f, F holomorfas en \mathbb{D} , con $f \prec F$. Entonces:

1. $f(0) = F(0)$.
2. $f(\mathbb{D}) \subset F(\mathbb{D})$.
3. Para todo $r \in (0, 1)$,

$$f(D(0, r)) \subset F(D(0, r))$$

4. Para todo $r \in (0, 1)$,

$$\max_{|z|=r} |f(z)| \leq \max_{|z|=r} |F(z)|$$

$$5. |f'(0)| \leq |F'(0)|.$$

6. Para todo $r \in (0, 1]$,

$$\sup_{|z| < r} (1 - |z|^2) |f'(z)| \leq \sup_{|z| < r} (1 - |z|^2) |F'(z)|$$

La última propiedad tiene mucha relación con el espacio de Bloch \mathcal{B} de las funciones holomorfas en \mathbb{D} que satisfacen:

$$\sup_{z \in \mathbb{D}} (1 - |z|^2) |f'(z)| < \infty$$

Observación. Veamos qué se puede decir sobre los coeficientes de Taylor. Sean f y F holomorfas en \mathbb{D} con $f \prec F$. Consideramos los desarrollos de Taylor de f y F para $z \in \mathbb{D}$:

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n z^n$$

$$F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n z^n$$

Usando (1), observamos que:

$$\begin{cases} a_0 = f(0) \\ A_0 = F(0) \end{cases} \Rightarrow a_0 = A_0$$

Con (2), vemos que:

$$\begin{cases} a_1 = f'(0) \\ A_1 = F'(0) \end{cases} \Rightarrow |a_1| \leq |A_1|$$

No podemos decir nada más. Por ejemplo, dado $N \geq 2$, podemos considerar $f(z) = z^N$ y $F(z) = z$. Observamos que $f \prec F$ con $w(z) = z^N$. Observamos que $a_N = 1$ y $A_N = 0$, luego no es cierto que $|a_n| \leq |A_n|$.

Veamos ahora un ejemplo importante de subordinación. Sea F una aplicación conforme de \mathbb{D} sobre D , siendo D un dominio en \mathbb{C} . Si f es holomorfa en \mathbb{D} tal que $f(\mathbb{D}) \subset D$ y $f(0) = F(0)$, entonces $f \prec F$.

Sea $w = F^{-1} \circ f$. w es holomorfa en \mathbb{D} , $w(0) = F^{-1}(f(0)) = F^{-1}(F(0)) = 0$ y $w(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Además, $f = F \circ w$.

Por ejemplo:

$$P(z) = \frac{1+z}{1-z}$$

Esta es una transformación de Möbius que aplica $\partial\mathbb{D}$ en el eje imaginario. $P(\mathbb{D})$ es el semiplano de la derecha $\{z \in \mathbb{C} : \operatorname{Re}(z) > 0\}$ y $P(0) = 1$. Entonces, si f es holomorfa en \mathbb{D} , $f(\mathbb{D}) \subset \{z \in \mathbb{C} : \operatorname{Re}(z) > 0\}$ y $f(0) = P(0)$, entonces $f \prec P$. Es decir, si f es holomorfa en \mathbb{D} , $\operatorname{Re}(f(z)) > 0$ para todo $z \in \mathbb{D}$ y $f(0) = 1$, entonces $f \prec P$.

Sea $\mathcal{P} = \{f \text{ holomorfa en } \mathbb{D} : \operatorname{Re}(f(z)) > 0 \forall z \in \mathbb{D}, f(0) = 1\}$. Entonces:

- $P \in \mathcal{P}$.
- $f \in \mathcal{P} \Rightarrow f \prec P$. De hecho, $\mathcal{P} = \{f \text{ holomorfa en } \mathbb{D} : f \prec P\}$.
- $f \in \mathcal{P} \Rightarrow \frac{1}{f} \in \mathcal{P}$.

Teorema 1.13. Si $f \in \mathcal{P}$, entonces:

1. Para todo $z \in \mathbb{D}$,

$$\frac{1-|z|}{1+|z|} \leq |f(z)| \leq \frac{1+|z|}{1-|z|}$$

$$2. |f'(0)| \leq 2$$

Veamos cuáles son las aplicaciones conformes de \mathbb{D} sobre \mathbb{D} .

Sea f una aplicación conforme de \mathbb{D} sobre \mathbb{D} . Sea $a = f(0) \in \mathbb{D}$. Aplicando la segunda parte del teorema de Schwarz-Pick a f en 0, tenemos:

$$\frac{|f'(0)|}{1 - |a|^2} \leq 1$$

y si se diera igualdad, f sería una transformación de Möbius.

Sea $g = f^{-1}$, que es holomorfa en \mathbb{D} y $g(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$. Aplicando lo mismo en el punto a tenemos:

$$|g'(a)| \leq \frac{1}{1 - |a|^2}$$

y si se diera igualdad, g sería una transformación de Möbius.

Tenemos que:

$$|f'(0)| \leq 1 - |a|^2 \leq \frac{1}{|g'(a)|} = |f'(0)|$$

Por tanto se da igualdad, así que f es una transformación de Möbius con $f(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$. En conclusión, las aplicaciones conformes de \mathbb{D} sobre \mathbb{D} son:

$$\{\lambda T_a : \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| = 1, a \in \mathbb{D}\} = \{\lambda S_a : \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| = 1, a \in \mathbb{D}\} = \{\lambda \varphi_a : \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| = 1, a \in \mathbb{D}\}$$

1.7. La métrica de Poincaré

Si γ es un camino en \mathbb{C} y $f : \text{sop}(\gamma) \rightarrow \mathbb{C}$ es continua, entonces:

$$\begin{aligned} \int_{\gamma} f(z) dz &= \int_a^b f(\gamma(t)) \gamma'(t) dt \\ \int_{\gamma} f(z) |dz| &= \int_a^b f(\gamma(t)) |\gamma'(t)| dt \end{aligned}$$

siendo $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ una parametrización \mathcal{C}^1 a trozos de γ .

Veamos algunas propiedades:

1. Si f es real, entonces $\int_{\gamma} f(z) |dz| \in \mathbb{R}$. Si además f es no negativa, entonces $\int_{\gamma} f(z) |dz| \geq 0$.

2. Si $f(z) = 1$,

$$\int_{\gamma} f(z) |dz| = \int_a^b |\gamma'(t)| dt = \text{long}(\gamma)$$

3.

$$\left| \int_{\gamma} f(z) dz \right| \leq \int_{\gamma} |f(z)| |dz| \leq \max_{z \in \text{sop}(\gamma)} |f(z)| \text{long}(\gamma)$$

4. Si $f, g : \text{sop}(\gamma) \rightarrow \mathbb{R}$ continuas y $f \leq g$, entonces:

$$\int_{\gamma} f(z) |dz| \leq \int_{\gamma} g(z) |dz|$$

5.

$$\int_{\gamma_1 + \gamma_2} f(z) |dz| = \int_{\gamma_1} f(z) |dz| + \int_{\gamma_2} f(z) |dz|$$

6.

$$\int_{-\gamma} f(z)|dz| = \int_{\gamma} f(z)|dz|$$

7.

$$\int_{\gamma} (af(z) + bg(z))|dz| = a \int_{\gamma} f(z)|dz| + b \int_{\gamma} g(z)|dz|, \quad a, b \in \mathbb{C}$$

Sean $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$. Sea γ un camino en \mathbb{D} con origen z_1 y extremo z_2 . Podemos considerar la integral

$$\int_{\gamma} \frac{1}{1-|z|^2} |dz| = \int_{\gamma} \frac{|dz|}{1-|z|^2}$$

Como la función $z \in \mathbb{D} \mapsto \frac{1}{1-|z|^2}$ es real y positiva, entonces la integral es no negativa. Definimos:

$$\delta(z_1, z_2) = \inf \left\{ \int_{\gamma} \frac{|dz|}{1-|z|^2} : \gamma \text{ camino en } \mathbb{D} \text{ con origen } z_1 \text{ y extremo } z_2 \right\}$$

Entonces:

- $\delta(z_1, z_2) \geq 0$.
- $\delta(z_1, z_2) = \delta(z_2, z_1)$.
- $\delta(z_1, z_2) = 0 \Leftrightarrow z_1 = z_2$.

Sean $z_1, z_2, z_3 \in \mathbb{D}$. Consideramos:

$$A_{12} = \left\{ \int_{\gamma} \frac{|dz|}{1-|z|^2} : \gamma \text{ camino en } \mathbb{D} \text{ con origen } z_1 \text{ y extremo } z_2 \right\}$$

Se definen de manera análoga A_{13} y A_{23} . Observamos que $A_{12} + A_{23} \subset A_{13}$. Por tanto:

$$\inf(A_{12} + A_{13}) = \inf A_{12} + \inf A_{23} \geq \inf A_{13} \Leftrightarrow \delta(z_1, z_3) \leq \delta(z_1, z_2) + \delta(z_2, z_3)$$

δ es una distancia en \mathbb{D} , denominada distancia hiperbólica en \mathbb{D} .

Proposición 1.14.

1. Si f es holomorfa en \mathbb{D} con $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$, entonces:

$$\delta(f(z_1), f(z_2)) \leq \delta(z_1, z_2), \quad \forall z_1, z_2 \in \mathbb{D}$$

2. Si $T \in \mathcal{M}$ con $T(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$, entonces:

$$\delta(T(z_1), T(z_2)) = \delta(z_1, z_2), \quad \forall z_1, z_2 \in \mathbb{D}$$

Demostración.

1. Sea f holomorfa en \mathbb{D} con $f(\mathbb{D}) \subset \mathbb{D}$ y sean $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$.

$$\begin{aligned} \delta(z_1, z_2) &= \inf \left\{ \int_{\gamma} \frac{|dz|}{1-|z|^2} : \gamma \text{ camino de } z_1 \text{ a } z_2 \right\} \\ \delta(f(z_1), f(z_2)) &= \inf \left\{ \int_{\Gamma} \frac{|dw|}{1-|w|^2} : \Gamma \text{ camino de } f(z_1) \text{ a } f(z_2) \right\} \end{aligned}$$

Sea γ un camino en \mathbb{D} con origen z_1 y extremo z_2 , con parametrización \mathcal{C}^1 a trozos $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$. Entonces $\Gamma = f \circ \gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ es una parametrización \mathcal{C}^1 a trozos de un camino Γ en \mathbb{D} con origen $f(z_1)$ y extremo $f(z_2)$. Tenemos:

$$\int_{\Gamma} \frac{|dw|}{1-|w|^2} = \int_a^b \frac{|\Gamma'(t)|}{1-|\Gamma(t)|^2} dt = \int_a^b \frac{|f'(\gamma(t))||\gamma'(t)|}{1-|f(\gamma(t))|^2} dt$$

Usando la segunda parte del teorema de Schwarz-Pick:

$$\int_a^b \frac{|f'(\gamma(t))||\gamma'(t)|}{1-|f(\gamma(t))|^2} dt \leq \int_a^b \frac{|\gamma'(t)|}{1-|\gamma(t)|^2} dt = \int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2}$$

Luego tenemos que:

$$\delta(f(z_1), f(z_2)) \leq \int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2}, \quad \forall \gamma$$

Por tanto, $\delta(f(z_1), f(z_2)) \leq \gamma(z_1, z_2)$.

2. Se tiene aplicando (1) a T y T^{-1} .

□

Proposición 1.15. Si $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$, entonces:

$$\delta(z_1, z_2) = \frac{1}{2} \text{Log} \frac{1 + \rho(z_1, z_2)}{1 - \rho(z_1, z_2)}$$

Demostración. Si $z_1 = z_2$ es trivial. Supongamos $z_1 \neq z_2$. Consideramos:

$$S_{z_1}(z) = \frac{z - z_1}{1 - \bar{z}_1 z}$$

Se tiene que $S_{z_1} \in \mathcal{M}$, $S_{z_1}(\mathbb{D}) = \mathbb{D}$ y $S_{z_1}(z_1) = 0$. Sabemos que $S_{z_1}(z_2) \neq 0$. Además,

$$\delta(z_1, z_2) = \delta(0, S_{z_1}(z_2))$$

Tomamos $\lambda \in \mathbb{C}$, $|\lambda| = 1$, tal que $\lambda S_{z_1}(z_2) \in (0, 1)$. Sea $r = \lambda S_{z_1}(z_2)$. Entonces:

$$\delta(z_1, z_2) = \delta(0, S_{z_1}(z_2)) = \delta(0, r)$$

Además, $r = |\lambda S_{z_1}(z_2)| = |S_{z_1}(z_2)| = \rho(z_1, z_2)$. Calculamos $\delta(0, r)$.

$$\delta(0, r) = \inf \left\{ \int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2} : \gamma \text{ camino en } \mathbb{D} \text{ con origen } 0 \text{ y extremo } r \right\}$$

Si $\gamma = [0, r]$,

$$\begin{aligned} \int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2} &= \int_0^r \frac{dt}{1-t^2} = \frac{1}{2} \int_0^r \left(\frac{1}{1-t} + \frac{1}{1+t} \right) dt = \frac{1}{2} [-\text{Log}(1-t) + \text{Log}(1+t)]_0^r = \\ &= \frac{1}{2} \left[\text{Log} \frac{1+t}{1-t} \right]_0^r = \frac{1}{2} \text{Log} \frac{1+r}{1-r} \end{aligned}$$

Luego $\delta(0, r) \leq \frac{1}{2} \text{Log} \frac{1+r}{1-r}$.

Sea γ un camino en \mathbb{D} con origen 0 y extremo r . Veamos que

$$\int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2} \geq \frac{1}{2} \text{Log} \frac{1+r}{1-r}$$

Sea $\gamma : [a, b] \rightarrow \mathbb{C}$ una parametrización \mathcal{C}^1 a trozos de γ . Sean $u = \text{Re}(f)$ y $v = \text{Im}(f)$, de forma que $\gamma = u + iv$. $u, v : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$, \mathcal{C}^1 a trozos.

$$\int_\gamma \frac{|dz|}{1-|z|^2} = \int_a^b \frac{|\gamma'(t)|}{1-|\gamma(t)|^2} dt$$

Tenemos que:

$$\begin{cases} |\gamma(t)|^2 \geq u(t)^2 \Rightarrow 0 < 1 - |\gamma(t)|^2 \leq 1 - u(t)^2 \Rightarrow \frac{1}{1 - |\gamma(t)|^2} \geq \frac{1}{1 - u(t)^2} \\ |\gamma'(t)| \geq |u'(t)| \geq 0 \end{cases}$$

Así que:

$$\frac{|\gamma'(t)|}{1 - |\gamma(t)|^2} \geq \frac{|u'(t)|}{1 - u(t)^2} \geq \frac{u'(t)}{1 - u(t)^2}$$

Luego:

$$\begin{aligned} \int_a^b \frac{|\gamma'(t)|}{1 - |\gamma(t)|^2} dt &\geq \int_a^b \frac{u'(t)}{1 - u(t)^2} dt = \frac{1}{2} \int_a^b \left(\frac{u'(t)}{1 - u(t)} + \frac{u'(t)}{1 + u(t)} \right) dt = \\ &= \frac{1}{2} [-\text{Log}(1 - u(t)) + \text{Log}(1 + u(t))]_a^b = \frac{1}{2} \left[\text{Log} \frac{1 + u(t)}{1 - u(t)} \right]_a^b = \frac{1}{2} \text{Log} \frac{1 + r}{1 - r} \end{aligned}$$

porque $u(a) = 0$ y $u(b) = r$. Por tanto,

$$\delta(z_1, z_2) = \delta(0, r) = \frac{1}{2} \text{Log} \frac{1 + r}{1 - r} = \frac{1}{2} \log \frac{1 + \rho(z_1, z_2)}{1 - \rho(z_1, z_2)}$$

□

Observación. Sea $h(x) = \frac{1}{2} \text{Log} \frac{1+x}{1-x}$, $x \in [0, 1)$. Observamos que si $x < 1$, entonces $1 + x \geq 1 - x > 0 \Rightarrow \frac{1+x}{1-x} \geq 1$, así que $h : [0, 1) \rightarrow [0, \infty)$. h es creciente, con $h(0) = 0$ y $\lim_{x \rightarrow 1^-} h(x) = \infty$. Podemos escribir

$\delta = h \circ \rho : \mathbb{D} \times \mathbb{D} \xrightarrow{\rho} [0, 1) \xrightarrow{h} [0, \infty)$. Fijado $a \in \mathbb{D}$, si $\{z_n\}_{n=1}^\infty$ está en \mathbb{D} con $|z_n| \rightarrow 1$, entonces:

$$\rho(a, z_n) = |S_a(z_n)| \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 1$$

Por tanto, $\delta(a, z_n) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \infty$.

\mathbb{D} con esta distancia δ es un modelo de la geometría hiperbólica. Si γ es un camino en \mathbb{D} , la longitud de γ es

$$\int_\gamma \frac{|dz|}{1 - |z|^2}$$

La geodésica que une $z_1, z_2 \in \mathbb{D}$ es el camino γ para el que:

$$\delta(z_1, z_2) = \int_\gamma \frac{|dz|}{1 - |z|^2}$$

Las geodésicas con respecto a δ son los diámetros de $\partial\mathbb{D}$ y los arcos de circunferencia ortogonales a $\partial\mathbb{D}$.

Capítulo 2

Familias normales

2.1. Familias normales

Teorema 2.1 (Teorema de convergencia de Weierstrass). *Sea D abierto en \mathbb{C} y sean $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ una sucesión de funciones holomorfas en D y $f : D \rightarrow \mathbb{C}$. Si $f_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D , entonces f es holomorfa en D y $f'_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f'$ uniformemente en cada subconjunto compacto. Para todo $k \in \mathbb{N}$, $f_n^{(k)} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f^{(k)}$ uniformemente en cada compacto.*

Definición 2.1. Sea D un abierto en \mathbb{C} y sea \mathcal{F} una familia de funciones holomorfas en D . Diremos que \mathcal{F} es finitamente normal si para cada sucesión $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ en \mathcal{F} existe una subsucesión $\{f_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ de $\{f_n\}$ que converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D .

Observación. El límite f de tal subsucesión es una función holomorfa en D , pero no tiene por qué pertenecer a \mathcal{F} .

Definición 2.2. Sea D un abierto en \mathbb{C} y sea \mathcal{F} una familia de funciones holomorfas en D . Diremos que \mathcal{F} es compacta si para cada sucesión $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ en \mathcal{F} existe una subsucesión $\{f_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ de $\{f_n\}$ que converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D a una función que pertenece a \mathcal{F} .

En el conjunto $Hol(D)$ de las funciones holomorfas en D , con D abierto en \mathbb{C} , se puede definir una distancia d tal que $(Hol(D), d)$ es un espacio métrico completo, y en el que:

$$f_n \xrightarrow{d} f \Leftrightarrow f_n \rightarrow f \text{ uniformemente en cada subconjunto compacto de } D$$

Si $\mathcal{F} \subset Hol(D)$, \mathcal{F} es finitamente normal si y solo si \mathcal{F} es relativamente compacto. Los compactos coinciden con la definición de familia compacta dada.

2.2. El teorema de Montel

Lema 2.2. *Sea D un abierto en \mathbb{C} y \mathcal{F} una familia de funciones holomorfas en D . Entonces son equivalentes:*

1. \mathcal{F} está uniformemente acotada en cada subconjunto compacto de D .
2. Para cada $a \in D$ existe $r_a > 0$ con $D(a, r_a) \subset D$ y \mathcal{F} está uniformemente acotada en $D(a, r_a)$.

Lema 2.3. *Sea D abierto en \mathbb{C} y sean $f_n : D \rightarrow \mathbb{C}$ para $n = 1, 2, \dots$ y $f : D \rightarrow \mathbb{C}$. Entonces son equivalentes:*

1. $f_n \rightarrow f$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D .
2. Para cada $a \in D$ existe $r_a > 0$ con $D(a, r_a) \subset D$ tal que $f_n \rightarrow f$ uniformemente en $D(a, r_a)$.

Lema 2.4. Sean $C_1, C_2 \in \mathbb{C}$, con $C_1 \cap C_2 = \emptyset$ y $C_1, C_2 \neq \emptyset$. Si C_1 es compacto y C_2 es cerrado, entonces:

$$\text{dist}(C_1, C_2) = \inf\{|z_1 - z_2| : z_1 \in C_1, z_2 \in C_2\} > 0$$

Observación. Si C_1 no es compacto no es cierto en general.

Lema 2.5. Sea $A \subset \mathbb{C}$, $A \neq \emptyset$ y sea

$$F : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{R}, F(z) = \text{dist}(z, A) = \inf\{|z - a| : a \in A\}$$

Entonces F es continua y $F(z) = 0$ para todo $z \in A$. Si además A es cerrado, entonces $F(z) = \min\{|z - a| : a \in A\}$ para todo $z \in \mathbb{C}$.

Lema 2.6. Sea $A \subset \mathbb{C}$, $A \neq \emptyset$ y sea $\varepsilon > 0$. Consideramos los conjuntos:

$$B = \{z \in \mathbb{C} : \text{dist}(z, A) < \varepsilon\}$$

$$C = \{z \in \mathbb{C} : \text{dist}(z, A) \leq \varepsilon\}$$

Entonces B es abierto y C es cerrado, con $A \subset B \subset C$. Si además A es acotado, entonces B es acotado y C es compacto.

Proposición 2.7. Sea D un abierto en \mathbb{C} y \mathcal{F} una familia de funciones holomorfas en D . Supongamos que \mathcal{F} está uniformemente acotada en D . Sea K un subconjunto compacto de D . Entonces existe $A > 0$ tal que:

$$|f(z_2) - f(z_1)| \leq A|z_2 - z_1|, \quad \forall z_1, z_2 \in K, \forall f \in \mathcal{F}$$

Demostración. Sea $M > 0$ tal que $|f(z)| \leq M$ para todo $z \in D$ y para toda $f \in \mathcal{F}$. Sean $K \subset D$, K compacto. Sea $d > 0$ con $d < \text{dist}(K, \mathbb{C} \setminus D)$. Si $D = \mathbb{C}$, tomamos $d > 0$ cualquiera. Sea $z_0 \in K$. Entonces $D(z_0, d) \subset D$. De hecho, podemos tomar $\varepsilon > 0$ tal que $D(z_0, d + \varepsilon) \subset D$. Dada $f \in \mathcal{F}$, por la fórmula de Cauchy,

$$f'(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|\xi - z_0|=d} \frac{f(\xi)}{(\xi - z)^2} d\xi \quad \text{si } z \in D\left(z_0, \frac{d}{2}\right)$$

Entonces:

$$|f'(z)| \leq \frac{1}{2\pi} 2\pi \max_{|\xi - z_0|=d} \frac{|f(\xi)|}{|\xi - z|^2}$$

Podemos acotar:

$$|\xi - z| = |(\xi - z_0) + (z_0 - z)| \geq |\xi - z_0| - |z_0 - z| \geq d - \frac{d}{2} = \frac{d}{2}$$

Así que $|\xi - z|^2 \geq \frac{d^2}{4} > 0$. Luego:

$$|f'(z)| \leq d \frac{M}{d^2/4} = \frac{4M}{d}$$

Hemos probado que si $z_0 \in K$, $f \in \mathcal{F}$ y $z \in D\left(z_0, \frac{d}{2}\right) \subset D$, entonces $|f'(z)| \leq \frac{4M}{d}$.

Ahora, sean $z_1, z_2 \in K$ y $f \in \mathcal{F}$. Supongamos que $|z_1 - z_2| < \frac{d}{2}$. Si $\xi \in [z_1, z_2]$, entonces $z_2 \in D\left(z_1, \frac{d}{2}\right) \subset D$ y $|\xi - z_1| \leq |z_1 - z_2| < \frac{d}{2}$, $\xi \in D\left(z_1, \frac{d}{2}\right)$. Entonces $\xi \in D$ y $|f'(\xi)| \leq \frac{4M}{d}$. Por tanto:

$$|f(z_2) - f(z_1)| = \left| \int_{[z_1, z_2]} f'(\xi) d\xi \right| \leq |z_2 - z_1| \max_{\xi \in [z_1, z_2]} |f'(\xi)| \leq |z_2 - z_1| \frac{4M}{d}$$

Entonces, si $z_1, z_2 \in K$, $|z_1 - z_2| < \frac{d}{2}$ y $f \in \mathcal{F}$, se tiene que:

$$|f(z_2) - f(z_1)| \leq A|z_2 - z_1|$$

Ahora, si $z_1, z_2 \in K$, $|z_2 - z_1| \geq \frac{d}{2}$ y $f \in \mathcal{F}$, tenemos:

$$|f(z_2) - f(z_1)| \leq |f(z_2)| + |f(z_1)| \leq 2M = 2M \frac{d}{2} \leq \frac{4M}{d} |z_2 - z_1| = A |z_2 - z_1|$$

□

Teorema 2.8 (Teorema de Arzelá-Ascoli). Sean (X_1, d_1) y (X_2, d_2) dos espacios métricos, siendo (X_1, d_1) separable y (X_2, d_2) completo. Sea \mathcal{F} una familia de aplicaciones continuas de X_1 en X_2 que verifica:

1. \mathcal{F} es puntualmente equicontinua. Es decir, dado $x \in X_1$ se verifica que, para todo $\varepsilon > 0$, existe $\delta > 0$ tal que si $y \in X_1$ con $d_1(x, y) < \delta$, entonces $d_2(f(x), f(y)) < \varepsilon$ para toda $f \in \mathcal{F}$.
2. Para todo $x \in X_1$, el conjunto $\{f(x) : f \in \mathcal{F}\}$ es relativamente compacto.

Entonces, si $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ es una sucesión en \mathcal{F} , existe una subsucesión $\{f_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ de $\{f_n\}$ que converge uniformemente en cada subconjunto compacto de X_1 .

Teorema 2.9 (Teorema de Montel). Sea D un abierto en \mathbb{C} y sea \mathcal{F} una familia de funciones holomorfas en D . Entonces son equivalentes:

1. \mathcal{F} es finitamente normal.
2. \mathcal{F} está uniformemente acotada en cada subconjunto compacto de D . Es decir, para cada $K \subset D$, K compacto, existe $M_K > 0$ tal que $|f(z)| \leq M_K$ para toda $f \in \mathcal{F}$ y para todo $z \in K$.

Demostración.

\Rightarrow Sea D abierto en \mathbb{C} y sea \mathcal{F} una familia de funciones holomorfas en D , con \mathcal{F} finitamente normal. Supongamos por reducción al absurdo que existe $K \subset D$, K compacto, tal que \mathcal{F} no está uniformemente acotada en K . Entonces existen $\{z_n\}_{n=1}^\infty$ en K y $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ en \mathcal{F} tales que $|f_n(z_n)| \rightarrow \infty$.

Como \mathcal{F} es una familia finitamente normal, existe $\{f_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ subsucesión de $\{f_n\}$ tal que $\{f_{n_k}\}$ converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D a una función f holomorfa en D . Como f es continua en K y K es compacto, existe $M > 0$ tal que $|f(z)| \leq M$ para todo $z \in K$. Por otro lado, como $f_{n_k} \xrightarrow[k \rightarrow \infty]{} f$ uniformemente en K , existe $k_0 \in \mathbb{N}$ tal que $k \geq k_0$, $z \in K \Rightarrow |f_{n_k}(z) - f(z)| < 1$. Entonces $|f_{n_k}(z)| \leq |f_{n_k}(z) - f(z)| + |f(z)| < 1 + M$, $z \in K$, $k \geq k_0$. En particular, $|f_{n_k}(z_{n_k})| < 1 + M$ si $k \geq k_0$. Esta es una contradicción.

\Leftarrow Sea D abierto en \mathbb{C} y sea \mathcal{F} una familia de funciones holomorfas en D , uniformemente acotada en cada subconjunto compacto de D . Tomamos $X_1 = D$ y $X_2 = \mathbb{C}$.

1. Sea $z_0 \in \mathbb{C}$. Dado $\varepsilon > 0$, veamos que existe $\delta > 0$ tal que, si $z_1 \in D$, $|z_1 - z_0| < \delta$, $f \in \mathcal{F}$, entonces $|f(z_1) - f(z_0)| < \varepsilon$. Sea $R > 0$ con $\overline{D}(0, R) \subset D$. \mathcal{F} está uniformemente acotada en $\overline{D}(z_0, R)$ y por tanto en $D(z_0, R)$. Sea $K = \overline{D}(z_0, \frac{R}{2})$, que es un subconjunto compacto de $D(z_0, R)$. Por la proposición anterior, existe $A > 0$ tal que

$$|f(z_2) - f(z_1)| \leq A |z_2 - z_1|, \quad \text{si } z_1, z_2 \in K, f \in \mathcal{F}$$

Entonces, si $\delta = \min\left(\frac{\varepsilon}{A}, \frac{R}{2}\right)$, $z_1 \in D$, $|z_1 - z_0| < \delta$ y $f \in \mathcal{F}$, entonces $z_1 \in \overline{D}(z_0, \frac{R}{2}) = K$, así que:

$$|f(z_1) - f(z_0)| \leq A |z_1 - z_0| < A\delta \leq A \frac{\varepsilon}{A} = \varepsilon$$

2. Sea $z \in D$. El conjunto $\{f(z) : f \in \mathcal{F}\}$ está acotado, ya que \mathcal{F} está uniformemente acotada en $\{z\}$. Por tanto, su clausura es compacta.

Entonces, por el teorema de Arzelá-Ascoli, existe una subsucesión $\{f_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ de $\{f_n\}$ que converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D . Por tanto, \mathcal{F} es finitamente normal.

□

Observación.

1. Sea D un abierto en \mathbb{C} . Si \mathcal{F} es una familia finitamente normal de funciones holomorfas en D , entonces la familia $\mathcal{F}' = \{f' : f \in \mathcal{F}\}$ es finitamente normal. En general, si $k \in \mathbb{N}$, la familia $\mathcal{F}^{(k)} = \{f^{(k)} : f \in \mathcal{F}\}$ es finitamente normal.
Sea $\{g_n\}_{n=1}^\infty$ en \mathcal{F}' . Entonces $g_n = f'_n$, $f_n \in \mathcal{F}$. Existe $\{f_{n_k}\}_{k=1}^\infty$ subsucesión de $\{f_n\}$ que converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D a una función f holomorfa en D . Entonces $g_{n_k} = f'_{n_k} \rightarrow f'$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D .
2. Sea D abierto en \mathbb{C} y sea \mathcal{G} familia finitamente normal de funciones holomorfas en D con $\mathcal{F} \subset \mathcal{G}$. Entonces \mathcal{F} es finitamente normal.
3. Si $a \in \mathbb{C}$, $R > 0$ y $K \subset D(a, R)$, K compacto, entonces existe $r \in (0, R)$ tal que $K \subset \overline{D}(a, r)$.

Ejemplo.

1. $\mathcal{F} = \{f : f \text{ es entera y } |f(z)| \leq n \text{ si } |z| = n, n = 1, 2, \dots\}$. Sea $K \subset \mathbb{C}$, K compacto, y sea $f \in \mathcal{F}$. Existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $K \subset \overline{D}(0, n_0)$. Además, $|f(z_0)| \leq n_0$ si $|z| = n_0$. Por el principio del máximo, $|f(z)| \leq n_0$ si $|z| \leq n_0$. En particular, $|f(z)| \leq n_0$ si $z \in K$ y $f \in \mathcal{F}$. \mathcal{F} está uniformemente acotada en K . Por el teorema de Montel, \mathcal{F} es finitamente normal.
2. $\mathcal{P} = \{f : f \text{ es holomorfa en } \mathbb{D}, f(0) = 1, \operatorname{Re}(f(z)) > 0 \forall z \in \mathbb{D}\}$. Sea $K \subset \mathbb{D}$, K compacto. Si $f \in \mathcal{P}$ y $z \in K$,

$$|f(z)| \leq \frac{1 + |z|}{1 - |z|}$$

Existe $R \in (0, 1)$ tal que $K \subset \overline{D}(0, R)$. Entonces, si $f \in \mathcal{P}$ y $z \in K$,

$$|f(z)| \leq \frac{1 + |z|}{1 - |z|} \leq \frac{1 + R}{1 - R}$$

\mathcal{P} está uniformemente acotada en K para todo subconjunto compacto K de \mathbb{D} . Por el teorema de Montel, \mathcal{P} es finitamente normal.

Observación. Si quitamos la condición $f(0) = 1$ en \mathcal{P} , la familia deja de ser finitamente normal. Por ejemplo, $f_n(z) = n$, $n = 1, 2, \dots$, $\{f_n : n = 1, 2, \dots\} \subset \mathcal{P}$. Si tomamos $K = \{0\}$, \mathcal{P} no está uniformemente acotada en K , así que \mathcal{P} no es finitamente normal.

Recordemos que $\mathcal{P} = \{f : f \text{ es holomorfa en } \mathbb{D}, f \prec P\}$, con $P(z) = \frac{1+z}{1-z}$. Esto es un caso particular del siguiente ejemplo.

3. Sea F holomorfa en \mathbb{D} y sea

$$\mathcal{F}_F = \{f : f \text{ holomorfa en } \mathbb{D}, f \prec F\}$$

Entonces \mathcal{F}_F es finitamente normal.

4. Sean $a \in \mathbb{C}$ y $R > 0$. Sea \mathcal{F} una familia finitamente normal de funciones holomorfas en $D(a, R)$. Para cada $f \in \mathcal{F}$, consideramos el desarrollo de Taylor de f centrado en a

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n(f)(z-a)^n, \quad z \in D(a, R)$$

Entonces $M_n = \sup_{f \in \mathcal{F}} |a_n(f)| < \infty$ para cada n y la serie de potencias $\sum_{n=0}^{\infty} M_n(z-a)^n$ tiene radio de convergencia mayor o igual que R , y por tanto define una función holomorfa en $D(a, R)$.

Demostración. Fijado n , si $f \in \mathcal{F}$ tenemos:

$$a_n(f) = \frac{f^{(n)}(a)}{n!} \Rightarrow |a_n(f)| = \frac{|f^{(n)}(a)|}{n!}$$

La familia $\mathcal{F}^{(n)}$ es finitamente normal y por tanto está uniformemente acotada en el conjunto $\{a\}$, por lo que $\{f^{(n)}(a) : f \in \mathcal{F}\}$ está acotado. Es decir, $\sup_{f \in \mathcal{F}} |f^{(n)}(a)| < \infty$. Entonces $M_n = \sup_{f \in \mathcal{F}} |a_n(f)| = \sup_{f \in \mathcal{F}} \frac{|f^{(n)}(a)|}{n!} < \infty$. Consideramos la serie de potencias:

$$\sum_{n=0}^{\infty} M_n (z-a)^n$$

Si $r \in (0, R)$, tenemos que \mathcal{F} está uniformemente acotada en $\overline{D}(a, r)$, y por tanto existe $M(r) > 0$ tal que $|f(z)| \leq M(r)$ si $z \in \overline{D}(a, r)$ y $f \in \mathcal{F}$. Si $f \in \mathcal{F}$, por la fórmula de Cauchy,

$$a_n(f) = \frac{f^{(n)}(a)}{n!} = \frac{1}{2\pi i} \int_{|z-a|=r} \frac{f(z)}{(z-a)^{n+1}} dz, \quad \text{si } r \in (0, R), n = 0, 1, 2, \dots$$

Así que:

$$|a_n(f)| \leq \frac{1}{2\pi} 2\pi r \max_{|z-a|=r} \frac{|f(z)|}{|z-a|^{n+1}} \leq r \frac{M(r)}{r^{n+1}} = \frac{M(r)}{r^n}, \quad \text{si } r \in (0, R), n = 0, 1, 2, \dots, f \in \mathcal{F}$$

Tomando supremo en $f \in \mathcal{F}$ tenemos que:

$$|M_n| = M_n \leq \frac{M(r)}{r^n} \Rightarrow \sqrt[n]{M_n} \leq \frac{\sqrt[n]{M(r)}}{r}, \quad \text{si } r \in (0, R), n = 0, 1, 2, \dots$$

Por tanto:

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{M_n} \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sqrt[n]{M(r)}}{r} = \frac{1}{r}, \quad \text{si } r \in (0, R)$$

Haciendo $r \rightarrow R$,

$$\limsup_{n \rightarrow \infty} \sqrt[n]{M_n} \leq \frac{1}{R}$$

Entonces el radio de convergencia es mayor o igual que R . □

5. $\mathcal{F} = \{f : f \text{ es holomorfa en } \mathbb{D} \text{ y } \int \int_{\mathbb{D}} |f(z)| dx dy \leq M\}$, siendo $M > 0$. Veamos que \mathcal{F} es finitamente normal.

Sea $K \subset \mathbb{D}$, K compacto. Tomamos $r \in (0, 1)$ con $K \subset D(0, r)$. Sea $f \in \mathcal{F}$ y $z \in K$, por la fórmula de Cauchy

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|\xi|=\rho} \frac{f(\xi)}{\xi - z} d\xi = \frac{1}{2\pi i} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{f(\rho e^{i\theta})}{\rho e^{i\theta} - z} \rho d\theta, \quad r \leq \rho < 1$$

$$|f(z)| \leq \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{|f(\rho e^{i\theta})|}{|\rho e^{i\theta} - z|} \rho d\theta, \quad r \leq \rho < 1$$

$$\int_{\frac{1+r}{2}}^1 |f(z)| d\rho \leq \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{1+r}{2}}^1 \int_{-\pi}^{\pi} \frac{|f(\rho e^{i\theta})|}{|\rho e^{i\theta} - z|} \rho d\theta d\rho = \frac{1}{2\pi} \int \int_{\frac{1+r}{2} < |w| < 1} \frac{|f(w)|}{|w - z|} dx dy$$

Como $|w - z| \geq |w| - |z| > \frac{1+r}{2} - r = \frac{1-r}{2} > 0$,

$$\begin{aligned} \frac{1}{2\pi} \int \int_{\frac{1+r}{2} < |w| < 1} \frac{|f(w)|}{|w - z|} dx dy &\leq \frac{1}{2\pi} \frac{2}{1-r} \int \int_{\frac{1+r}{2} < |w| < 1} |f(w)| dx dy \leq \\ &\leq \frac{1}{\pi(1-r)} \int \int_{\mathbb{D}} |f(w)| dx dy \leq \frac{M}{\pi(1-r)} \end{aligned}$$

Por otro lado,

$$\int_{\frac{1+r}{2}}^1 |f(z)| d\rho = |f(z)| \left(1 - \frac{1+r}{2}\right) = |f(z)| \frac{1-r}{2}$$

Entonces:

$$|f(z)| \frac{1-r}{2} \leq \frac{M}{\pi(1-r)} \Rightarrow |f(z)| \leq \frac{2M}{\pi(1-r)^2}$$

Por tanto, \mathcal{F} está uniformemente acotada en K .

Teorema 2.10. Sean $a \in \mathbb{C}$ y $R > 0$. Sea \mathcal{F} una familia de funciones holomorfas en $D(a, R)$. Las siguientes condiciones son equivalentes:

1. \mathcal{F} es finitamente normal.
2. Existe una sucesión $\{M_n\}_{n=0}^\infty$ con $M_n \geq 0$ para todo n tal que la serie de potencias $\sum_{n=0}^\infty M_n(z-a)^n$ tiene radio de convergencia mayor o igual que R y tal que, si para cada $f \in \mathcal{F}$,

$$f(z) = \sum_{n=0}^\infty a_n(f)(z-a)^n, \quad z \in D(a, r)$$

se tiene que $|a_n(f)| \leq M_n$ para todo n y para toda $f \in \mathcal{F}$.

Demostración.

$$\Rightarrow M_n = \sup_{f \in \mathcal{F}} |a_n(f)|.$$

\Leftarrow Sea $K \subset D(a, R)$, K compacto. Existe $r \in (0, R)$ tal que $K \subset \overline{D}(a, r)$. Si $z \in K$ y $f \in \mathcal{F}$, se tiene:

$$|f(z)| = \left| \sum_{n=0}^\infty a_n(f)(z-a)^n \right| \leq \sum_{n=0}^\infty |a_n(f)| |z-a|^n \leq \sum_{n=0}^\infty M_n |z-a|^n \leq \sum_{n=0}^\infty M_n r^n < \infty$$

ya que $\sum_{n=0}^\infty M_n(z-a)^n$ converge para $z = a + r$. \mathcal{F} está uniformemente acotada en K .

□

2.3. El teorema de Stieltjes-Vitali

Teorema 2.11 (Teorema de Stieltjes-Vitali). Sea D un dominio en \mathbb{C} y \mathcal{F} una familia finitamente normal de funciones holomorfas en D . Sea $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ una sucesión en \mathcal{F} . Si existe $A \subset D$ tal que A tiene algún punto de acumulación en D , para el que existe $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(a) \in \mathbb{C}$ para todo $a \in A$, entonces $\{f_n\}$ converge uniformemente en cada subconjunto compacto de D .

Demostración.

1. Veamos que $\{f_n\}$ converge puntualmente en D . Sea $z^* \in D$. Supongamos por reducción al absurdo que $\{f_n(z^*)\}$ no converge. Como \mathcal{F} está uniformemente acotada en el conjunto $\{z^*\}$, tenemos que $\{f_n(z^*)\}$ está acotado. Por tanto, existen $\{f_{n_i}\}_{i=1}^\infty$ y $\{f_{m_i}\}_{i=1}^\infty$ subsucesiones de $\{f_n\}$, y $w_1, w_2 \in \mathbb{C}$ distintos, tales que $f_{n_i}(z^*) \xrightarrow{i \rightarrow \infty} w_1$, $f_{m_i}(z^*) \xrightarrow{i \rightarrow \infty} w_2$. Como \mathcal{F} es finitamente normal, existen $\{g_k\}_{k=1}^\infty$ y $\{h_k\}_{k=1}^\infty$ subsucesiones de $\{f_{n_i}\}$ y $\{f_{m_i}\}$, respectivamente, que convergen uniformemente en cada subconjunto compacto de D . Sean g y h los respectivos límites. Entonces g y h son holomorfas en D . Tenemos que:

$$\begin{aligned} g_k(z^*) &\xrightarrow{k \rightarrow \infty} w_1, & g(z^*) &= w_1 \\ h_k(z^*) &\xrightarrow{k \rightarrow \infty} w_2, & h(z^*) &= w_2 \end{aligned}$$

Si $a \in A$, existe $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(a) \in \mathbb{C}$, así que $g(a) = h(a)$. g y h son holomorfas en D , $g = h$ en A y A tiene algún punto de acumulación en D . Por el teorema de identidad, $g = h$ en D . Pero $g(z^*) = w_1 \neq w_2 = h(z^*)$. Esto contradice nuestro supuesto.

2. Sea $K \subset D$, K compacto. Sea $\alpha > 0$ tal que $2\alpha < \text{dist}(K, \mathbb{C} \setminus D)$. Si $D = \mathbb{C}$, tomamos $\alpha > 0$ cualquiera. Sean $G = \{z \in \mathbb{C} : \text{dist}(z, K) < \alpha\}$ y $K_1 = \{z \in \mathbb{C} : \text{dist}(z, K) \leq \alpha\}$. G es abierto, K_1 es compacto y $K \subset G \subset K_1 \subset D$.

Veamos que $K_1 \subset D$. Si $z \in K_1$, $\text{dist}(z, K) \leq \alpha$. Supongamos que $z \in D$. Tomamos $w \in K$ con $|z - w| < 2\alpha$. Entonces $2\alpha < \text{dist}(K, \mathbb{C} \setminus D) \leq |w - z| < 2\alpha$. Esto contradice nuestra hipótesis.

\mathcal{F} está uniformemente acotada en K_1 y por tanto en G . $K \subset G$, K compacto. Por una proposición previa, existe $A > 0$ tal que $|f(z_2) - f(z_1)| \leq A|z_2 - z_1|$ si $z_1, z_2 \in K$ y $f \in \mathcal{F}$. Vamos a ver que $\{f_n\}$ es uniformemente de Cauchy en K . Sea $\varepsilon > 0$ y sea $\delta = \frac{\varepsilon}{3A} > 0$. Tenemos que si $z_1, z_2 \in K$, $|z_1 - z_2| < \delta$ y $n \in \mathbb{N}$, entonces $|f_n(z_1) - f_n(z_2)| \leq A|z_1 - z_2| < A\delta = \frac{\varepsilon}{3}$. Consideramos la familia $\{D(z, \delta) : z \in K\}$. Como K es compacto, existen $z_1, z_2, \dots, z_N \in K$ tales que $K \subset \bigcup_{j=1}^N D(z_j, \delta)$. Para cada $j \in \{1, \dots, N\}$, la sucesión $\{f_n(z_j)\}_{n=1}^\infty$ es de Cauchy, ya que $\{f_n\}$ converge puntualmente en D . Por tanto, existe $n_j \in \mathbb{N}$ tal que $n, m \geq n_j \Rightarrow |f_n(z_j) - f_m(z_j)| < \frac{\varepsilon}{3}$. Sea $n_0 = \max\{n_j : j = 1, \dots, N\}$. Si $n, m \geq n_0$ y $z \in K$, hay que probar que $|f_n(z) - f_m(z)| < \varepsilon$. Tomamos $j \in \{1, \dots, N\}$ con $z \in D(z_j, \delta)$.

$$|f_n(z) - f_m(z)| \leq |f_n(z) - f_n(z_j)| + |f_n(z_j) - f_m(z_j)| + |f_m(z_j) - f_m(z)| < \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} + \frac{\varepsilon}{3} = \varepsilon$$

□

Ejemplo. Para $x \geq 0$, tenemos que $(1 + \frac{x}{n})^n$ es una sucesión creciente y

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n = e^x$$

Veamos que $\lim_{n \rightarrow \infty} (1 + \frac{z}{n})^n = e^z$ para todo $z \in \mathbb{C}$, siendo la convergencia uniforme en cada subconjunto compacto de \mathbb{C} .

Sea $D = \mathbb{C}$, $f_n(z) = (1 + \frac{z}{n})^n$, $n \in \mathbb{N}$. Cada f_n es una función entera. Veamos que \mathcal{F} es finitamente normal.

Sea $K \subset \mathbb{C}$, K compacto. Tomamos $R > 0$ con $K \subset \overline{D}(0, R)$. Si $k \in K$ y $n \in \mathbb{N}$,

$$|f_n(z)| = \left|1 + \frac{z}{n}\right|^n \leq \left(1 + \frac{|z|}{n}\right)^n \leq \left(1 + \frac{R}{n}\right)^n \leq e^R$$

Sea $A = [0, 1]$. A tiene puntos de acumulación en \mathbb{C} y $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = e^x$ para todo $x \in A$. Por el teorema de Stieltjes-Vitali, $\{f_n\}$ converge uniformemente en cada subconjunto compacto de \mathbb{C} . Sea f el límite, entonces f es entera. Si $x \in A$, $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = f(x) = e^x$. Por el teorema de identidad, $f(z) = e^z$ si $z \in \mathbb{C}$.

Teorema 2.12 (Teorema de Lindelöf). Sea f holomorfa y acotada en \mathbb{D} . Sea $\xi \in \partial\mathbb{D}$ y supongamos que existe el límite radial, es decir, $\lim_{r \rightarrow 1^-} f(r\xi) = L \in \mathbb{C}$. Entonces para todo $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$ existe el límite tangencial de f en ξ , es decir,

$$\lim_{z \rightarrow \xi, z \in S_\alpha(\xi)} f(z) = L$$

siendo $S_\alpha(\xi)$ el vector de vértice ξ y ángulo 2α , simétrico con respecto al segmento $[0, \xi]$.

Teorema 2.13. Sea f holomorfa y acotada en $D(1, 1)$. Supongamos que existe $\lim_{x \rightarrow 0^+} f(x) = L \in \mathbb{C}$. Entonces para todo $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$ existe

$$\lim_{z \rightarrow 0, |\text{Arg}(z)| < \alpha} f(z) = L$$

Demostración. Sea $M > 0$ tal que $|f(z)| \leq M$ si $z \in D(1, 1)$. Consideramos la sucesión $\{f_n\}_{n=1}^\infty$, $f_n(z) = f\left(\frac{z}{n}\right)$. Cada f_n es holomorfa en $D(1, 1)$. La familia $\mathcal{F} = \{f_n : n \in \mathbb{N}\}$ está uniformemente acotada en D , porque si $z \in D$ y $n \in \mathbb{N}$ se tiene que $|f_n(z)| = \left|f\left(\frac{z}{n}\right)\right| \leq M$. Así que \mathcal{F} es finitamente normal.

Sea $A = (0, 1)$. Si $x \in A$, $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f\left(\frac{x}{n}\right) = L$. Por el teorema de Stieltjes-Vitali, $\{f_n\}$ converge uniformemente en cada subconjunto compacto de $D(1, 1)$. Sea g el límite, entonces g es holomorfa en $D(1, 1)$ y $g(x) = L$ para todo $x \in A$. Por el teorema de identidad, $g(z) = L$ para todo $z \in D(1, 1)$. Hemos probado que $f_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} L$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D .

Sea $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$. Sea $K = \left\{z \in \mathbb{C} : \frac{\cos(\alpha)}{2} \leq |z| \leq \cos(\alpha), |\text{Arg}(z)| \leq \alpha\right\}$. K es un subconjunto compacto de $D(1, 1)$, así que $f_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} L$ uniformemente en K . Es decir, existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que, si $n \geq n_0$ y $z \in K$, entonces $|f_n(z) - L| < \varepsilon$.

Sea $\delta = \frac{\cos(\alpha)}{2n_0} > 0$. Sea z tal que $0 < |z| < \delta$ y $|\text{Arg}(z)| < \alpha$. Observamos que $|z| < \frac{\cos(\alpha)}{2n_0} \leq \frac{\cos(\alpha)}{2}$. Tomamos n_z el primer natural para el que $n_z|z| \geq \frac{\cos(\alpha)}{2}$. Como $|z| < \frac{\cos(\alpha)}{2n_0} \Leftrightarrow n_0|z| < \frac{\cos(\alpha)}{2}$, entonces $1 \leq n_0 < n_z$. Por otro lado,

$$(n_z - 1)|z| < \frac{\cos(\alpha)}{2} \Leftrightarrow n_z|z| - |z| < \frac{\cos(\alpha)}{2} \Leftrightarrow n_z|z| < |z| + \frac{\cos(\alpha)}{2} < \frac{\cos(\alpha)}{2} + \frac{\cos(\alpha)}{2} = \cos(\alpha)$$

Así que $\frac{\cos(\alpha)}{2} \leq n_z|z| = |n_z z| < \cos(\alpha)$. Además, $|\text{Arg}(n_z z)| = |\text{Arg}(z)| < \alpha$. Por tanto, $n_z z \in K$. Entonces:

$$|f_{n_k}(n_z z) - L| = |f(z) - L| < \varepsilon$$

□

2.4. Teoremas de Hurwitz

Teorema 2.14 (Teorema de Rouché). *Sea D un dominio simplemente conexo en \mathbb{C} y sea J un camino de Jordan en D . Sean f y g funciones holomorfas en D tales que*

$$|f(z) - g(z)| < |f(z)| \quad \text{si } z \in J$$

Entonces:

1. $I(J) \subset D$.
2. Ni f ni g se anulan en J .
3. f y g tienen el mismo número de ceros en $I(J)$.

Teorema 2.15 (Primer teorema de Hurwitz). *Sea D un dominio en \mathbb{C} y sea $\{f_n\}_{n=1}^\infty$ una sucesión de funciones holomorfas y nunca nulas en D , que converge uniformemente en cada subconjunto de D a una función f . Entonces f es nunca nula en D o bien f es idénticamente nula en D .*

Demostración. Si $f \equiv 0$ en D , no hay nada que hacer. Supongamos que $f \not\equiv 0$ en D . Supongamos por reducción al absurdo que existe $a \in D$ con $f(a) = 0$. Entonces a es un cero aislado de f . Podemos tomar $R > 0$ tal que $D(a, 2R) \subset D$ y f no tiene ceros en $D(a, 2R) \setminus \{a\}$.

Sea C_R la circunferencia $|z - a| = R$. Como f no tiene ceros en C_R , existe $\alpha > 0$ tal que $|f(z)| > \alpha$ para todo $z \in C_R$. Como $f_n \rightarrow f$ uniformemente en C_R , existe $n_0 \in \mathbb{N}$ tal que $n \geq n_0, z \in C_R \Rightarrow |f_n(z) - f(z)| < \alpha$. Entonces, si $n \geq n_0$ y $z \in C_R$, se tiene que

$$|f_n(z) - f(z)| < \alpha < |f(z)|$$

Por el teorema de Rouché, f_n y f tienen el mismo número de ceros en $D(a, R)$. Pero f_n es nunca nula en D , por lo que no tiene ceros en $D(a, R)$, mientras que $f(a) = 0$. Esta es una contradicción. Entonces f es nunca nula en D . □

Teorema 2.16 (Segundo teorema de Hurwitz). *Sea D un dominio en \mathbb{C} y sea $\{f_n\}_{n=1}^{\infty}$ una sucesión de funciones holomorfas e inyectivas en D . Si $\{f_n\}$ converge uniformemente a f en cada subconjunto compacto de D , entonces f es inyectiva o constante.*

Demostración. Sabemos que f es holomorfa en D . Supongamos que f no es constante. Sean $a, b \in D$ con $a \neq b$. Veamos que $f(a) \neq f(b)$. $D \setminus \{a\}$ es un dominio en \mathbb{C} . Para cada $n \in \mathbb{N}$, sea $g_n(z) = f_n(z) - f_n(a)$ si $z \in D \setminus \{a\}$. Cada g_n es holomorfa y nunca nula en $D \setminus \{a\}$. $f_n \rightarrow f$ uniformemente en cada subconjunto compacto de D . Sea $g(z) = f(z) - f(a)$, $z \in D \setminus \{a\}$. Entonces $g_n \rightarrow g$ uniformemente en cada subconjunto compacto de $D \setminus \{a\}$. Por el teorema anterior, $g \equiv 0$ en $D \setminus \{a\}$ o bien g es nunca nula en $D \setminus \{a\}$.

1. Si $g \equiv 0$ en $D \setminus \{a\}$, entonces $f(z) = f(a)$ si $z \in D \setminus \{a\} \Rightarrow f(z) = f(a)$ si $z \in D$. f es constante, lo que contradice nuestra hipótesis.
2. Si $g(z) \neq 0$ si $z \in D \setminus \{a\}$, en particular $g(b) = f(b) - f(a) \neq 0 \Rightarrow f(a) \neq f(b)$.

□

Capítulo 3

El teorema de Riemann de la aplicación conforme

3.1. Preliminares

Recordemos algunos conceptos y resultados.

Definición 3.1. Sea D un dominio en \mathbb{C} y sea f una función holomorfa en D .

- g es una rama de \sqrt{f} en D si $g : D \rightarrow \mathbb{C}$ es una función continua tal que $g(z)^2 = f(z)$ para todo $z \in D$.
- g es una rama de $\log(f)$ en D si $g : D \rightarrow \mathbb{C}$ es una función continua tal que $e^{g(z)} = f(z)$ para todo $z \in D$.

Proposición 3.1. Sean D un dominio en \mathbb{C} y f una función holomorfa y nunca nula en D .

1. Si g es una rama de \sqrt{f} en D , entonces g es holomorfa en D y $g'(z) = \frac{f'(z)}{2g(z)}$ para todo $z \in D$.
2. Si g es una rama de $\log(f)$ en D , entonces g es holomorfa en D y $g'(z) = \frac{f'(z)}{f(z)}$ para todo $z \in D$.
3. Existe una rama de $\log(f)$ en D si y solo si $\frac{f'}{f}$ tiene primitiva en D .

Proposición 3.2. Sean D un dominio en \mathbb{C} y $f : D \rightarrow \mathbb{C}$ una función continua en D . Entonces f tiene primitiva en D si y solo si $\int_{\gamma} f(z)dz = 0$ para todo camino cerrado γ en D .

Definición 3.2. Si D es un dominio en \mathbb{C} y Γ es un ciclo en D , se dice que Γ es homólogo a cero módulo D , y se denota $\Gamma \sim 0(\text{mod } D)$, si $n(\Gamma, a) = 0$ para todo $a \in \mathbb{C} \setminus D$.

Teorema 3.3 (Versión general del teorema de Cauchy). Sea D un dominio en \mathbb{C} y sea Γ un ciclo en D . Las dos siguientes condiciones son equivalentes:

1. $\Gamma \sim 0(\text{mod } D)$.
2. $\int_{\Gamma} f(z)dz = 0$ para toda función f holomorfa en D .

3.2. Dominios simplemente conexos

Definición 3.3. Si D es un dominio en \mathbb{C} , se dice que D es simplemente conexo si $\mathbb{C}^* \setminus D$ es conexo.

Hay una serie de caracterizaciones para los dominios simplemente conexos, que se pueden deducir de los resultados anteriores.

Teorema 3.4. Sea D un dominio en \mathbb{C} . Las siguientes condiciones son equivalentes:

1. D es simplemente conexo.
2. Todo ciclo en D es homólogo a cero módulo D .
3. Todo camino cerrado en D es homólogo a cero módulo D .
4. $\int_{\Gamma} f(z)dz = 0$ para toda f holomorfa en D y para todo ciclo Γ en D .
5. $\int_{\gamma} f(z)dz = 0$ para toda f holomorfa en D y para todo camino cerrado γ en D .
6. Toda función holomorfa en D tiene primitiva.
7. Para toda función f holomorfa y nunca nula en D , existe una rama de $\log(f)$ en D .
8. Para toda función f holomorfa y nunca nula en D , existe una rama de \sqrt{f} en D .

Recordamos que:

- Dos dominios D_1 y D_2 en \mathbb{C}^* son conformemente equivalentes si existe una aplicación conforme f de D_1 sobre D_2 .
- En el conjunto de los dominios en \mathbb{C}^* , el ser conformemente equivalentes es una relación de equivalencia.
- Si D_1 y D_2 son dos dominios en \mathbb{C}^* que son conformemente equivalentes, entonces D_1 es simplemente conexo si y solo si D_2 es simplemente conexo.
- \mathbb{C}^* , \mathbb{C} y el disco unidad $\mathbb{D} = \{z \in \mathbb{C} : |z| < 1\}$ son tres dominios simplemente conexos en \mathbb{C}^* , que no son conformemente equivalentes.
- El único dominio en \mathbb{C}^* conformemente equivalente a \mathbb{C}^* es \mathbb{C}^* .

Vamos a ver que, además de \mathbb{C}^* , \mathbb{C} y \mathbb{D} , no hay más dominios simplemente conexos en \mathbb{C}^* módulo la relación de equivalencia. Es decir, si D es un dominio simplemente conexo en \mathbb{C}^* , entonces D es conformemente equivalente a uno de los tres: \mathbb{C}^* , \mathbb{C} o \mathbb{D} . Por tanto se tendrá que, si D es un dominio simplemente conexo en \mathbb{C} , con $D \neq \mathbb{C}$, entonces D es conformemente equivalente a \mathbb{D} .

Definición 3.4. Sea D un dominio en \mathbb{C}^* . Llamamos automorfismos de D a aquellas aplicaciones conformes de D sobre D . El conjunto de todos los automorfismos de D se denota $Aut(D)$, y tiene estructura de grupo con la composición.

Tenemos que

$$\begin{aligned}
 Aut(\mathbb{C}^*) &= \mathcal{M} \\
 Aut(\mathbb{C}) &= \{f_{\alpha,\beta} : f_{\alpha,\beta}(z) = \alpha z + \beta, \alpha, \beta \in \mathbb{C}, \alpha \neq 0\} = \{T \in \mathcal{M} : T(\mathbb{C}) = \mathbb{C}\} \\
 Aut(\mathbb{D}) &= \{\lambda T_a : \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| = 1, a \in \mathbb{D}\} = \{T \in \mathcal{M} : T(\mathbb{D}) = \mathbb{D}\}
 \end{aligned}$$

Ejemplo. Veamos algunos ejemplos de dominios en \mathbb{C} para los que podemos encontrar una aplicación conforme del dominio sobre \mathbb{D} .

1. Un disco abierto, $D(a, R)$, $a \in \mathbb{C}, R > 0$.

$$\begin{aligned}
 \mathbb{D} &\rightarrow D(a, R) \\
 z &\mapsto a + rz
 \end{aligned}$$

2. Un semiplano.

$$\begin{aligned}
 \mathbb{D} &\rightarrow \mathbb{H} = \{z \in \mathbb{C} : \operatorname{Re}(z) > 0\} \\
 z &\mapsto P(z)
 \end{aligned}$$

donde $P(z) = \frac{1+z}{1-z}$, es una aplicación conforme.

Componiendo con una rotación y una traslación, vemos que \mathbb{D} es conformemente equivalente a cualquier semiplano.

$$\begin{aligned}\mathbb{D} &\rightarrow \mathbb{C} \\ z &\mapsto a + e^{i\theta} P(z)\end{aligned}$$

con $a \in \mathbb{C}$ y $\theta \in \mathbb{R}$.

3. El exterior de un disco, $\{z \in \mathbb{C} : |z - a| > R\} \cup \{\infty\}$, $a \in \mathbb{C}$, $R > 0$.

$$\begin{aligned}D(a, R) &\rightarrow \{z \in \mathbb{C} : |z - a| > R\} \cup \{\infty\} \\ z &\mapsto \frac{1}{z}\end{aligned}$$

4. El plano menos una semirrecta, $\mathbb{C} \setminus \{a + re^{i\theta}, r \geq 0\}$, $a \in \mathbb{C}$, $\theta \in \mathbb{R}$.

$$\begin{aligned}\mathbb{H} &\rightarrow \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0] \\ z &\mapsto z^2\end{aligned}$$

es una aplicación conforme. Así que

$$\begin{aligned}\mathbb{H} &\rightarrow \mathbb{C} \setminus (-\infty, 0] \\ z &\mapsto P(z)^2 = \left(\frac{1+z}{1-z}\right)^2\end{aligned}$$

es una aplicación conforme.

Componiendo con una rotación y una traslación, vemos que \mathbb{D} es conformemente equivalente al plano menos una semirrecta cualquiera.

5. La función exponencial no es inyectiva.

$$z = x + iy_0 \mapsto e^z = e^{x+iy_0} = e^x(\cos(y_0) + i \sin(y_0))$$

Es inyectiva en cualquier banda horizontal abierta de amplitud menor o igual que 2π . Por ejemplo,

$$\exp : \left\{ z \in \mathbb{C} : |\operatorname{Im}(z)| < \frac{\pi}{2} \right\} \rightarrow \mathbb{H}$$

es una aplicación conforme. Como \mathbb{H} es conformemente equivalente a \mathbb{D} , tenemos que esta banda es conformemente equivalente a \mathbb{D} .

Componiendo con el producto por un número real, una rotación y una traslación, vemos que \mathbb{D} es conformemente equivalente a cualquier banda.

6. Sectores.

$$\left\{ z \in \mathbb{C} : |\operatorname{Im}(z)| < \frac{\alpha}{2} \right\} \xrightarrow{\exp} S$$

donde S es el sector de vértice 0 y amplitud α , es una aplicación conforme.

7. $\mathbb{D}^+ = \{z \in \mathbb{D} : \operatorname{Im}(z) > 0\}$.

$$\mathbb{D}^+ \xrightarrow{P} \{z \in \mathbb{C} : \operatorname{Re}(z) > 0, \operatorname{Im}(z) > 0\}$$

es una aplicación conforme. El dominio $\{z \in \mathbb{C} : \operatorname{Re}(z) > 0, \operatorname{Im}(z) > 0\}$ es un sector, así que es conformemente equivalente a \mathbb{D} .

3.3. El teorema de Riemann de la aplicación conforme

Teorema 3.5 (Teorema de Riemann de la aplicación conforme). *Sea D un dominio simplemente conexo en \mathbb{C} con $D \neq \mathbb{C}$ y sea $z_0 \in D$. Entonces existe una única aplicación conforme f de D sobre \mathbb{D} tal que $f(z_0) = 0$ y $f'(z_0) > 0$.*

Observación.

1. Existen infinitas aplicaciones conformes de D sobre \mathbb{D} . Basta cambiar el punto z_0 o componer con una rotación.
2. Para la demostración, las condiciones
 - a) D simplemente conexo.
 - b) $D \neq \mathbb{C}$.

solo las vamos a utilizar para deducir que:

- $\mathbb{C} \setminus D$ tiene más de un punto.
- Si h es holomorfa y nunca nula en D , existe una rama de \sqrt{h} en D .

Teorema 3.6. *Sea D un dominio en \mathbb{C} tal que:*

1. $\mathbb{C} \setminus D$ tiene más de un punto.
2. Para toda función h holomorfa y nunca nula en D , existe una rama de \sqrt{h} en D .

Sea $z_0 \in D$. Entonces existe una única aplicación conforme f de D sobre \mathbb{D} tal que $f(z_0) = 0$ y $f'(z_0) > 0$.