

Análisis complejo

28 de febrero 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

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 $z \in D(z_0, \frac{d}{2}) \subset D$, 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 $z_2 \in D(z_1, \frac{d}{2}) \subset D$ y $|\xi - z_1| \leq |z_1 - z_2| < \frac{d}{2}$, $\xi \in D(z_1, \frac{d}{2})$. 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 $D(a, R)$.

5. $\mathcal{F} = \{f : f \text{ es holomorfa en } \mathbb{D} \text{ y } \int_{\mathbb{D}} |f(z)| dx dy \leq M\}$, 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

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

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

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

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 .*

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

Sea $D = \mathbb{C}$, $f_n(z) = \left(1 + \frac{z}{n}\right)^n$, $n \in \mathbb{N}$. 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 $K = \left\{z \in \mathbb{C} : \frac{\cos(\alpha)}{2} \leq |z| \leq \cos(\alpha), |\text{Arg}(z)| \leq \alpha\right\}$. $K \subset D(1, 1)$, K compacto.

□