UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE CIENCIAS
ANÁLISIS FUNCIONAL

Sandra Natalia Florez Garcia
Edgar Santiago Ochoa Quiroga
María Alejandra Rodríguez Ríos

Ejercicio 2 Sea E un espacio vectorial, $g, f_1, f_2, \dots, f_k$, $(k+1)$ funcionales lineales sobre E tales que

$$\langle f_i, x\rangle = 0 \quad \forall i = 1, \dots, k \Longrightarrow \langle g, x\rangle = 0$$

Muestre que existen constantes $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathbb{R}$ tales que $g = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i f_i$. Es decir, g es combinación lineal de los f_i.

Demostración. Consideremos la función

$$\begin{aligned} H :& E \to \mathbb{R}^{k+1} \\ & x \mapsto (g(x), f_1(x), \dots, f_k(x)). \end{aligned}$$

Si $R(H)$ es el rango de la función H, sabemos que es un subespacio de $\mathbb{R}^{k+1}$, además como este es de dimensión finita y normado, $R(H)$ es cerrado, es decir $\overline{R(H)} = R(H)$. Luego, observe que $x_0 = (1, 0, \dots, 0) \in \mathbb{R}^{k+1} \setminus R(H)$, ya que en caso contrario $(1, 0, \dots, 0) = (g(x), f_1(x), \dots, f_k(x))$ para algún $x \in E$, pero esto implica que $f_i(x) = 0$ para cada $i = 1, \dots, k$ y $g(x) = 1$, pero por la hipótesis $g(x) = 0$, una contradicción. Así, si consideramos los conjuntos $R(H)$ y $\{x_0\}$, como ambos son no vacíos, convexos, disjuntos, el primero es cerrado y el segundo compacto, por la segunda forma geométrica de Hahn-Banach existe $f \in (\mathbb{R}^{k+1})^*$ tal que $f(x_0) \neq 0$ y $f(y) = 0$ para todo $y \in R(H)$.

Como los funcionales de $\mathbb{R}^{k+1}$ se identifican con el producto interno usual por un vector, sabemos que existe $\beta = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k) \in \mathbb{R}^{k+1}$ tal que $f(y) = \langle \beta, y\rangle$ donde $y \in \mathbb{R}^{k+1}$. Note que si $y = x_0$ tenemos que $\langle \beta, x_0\rangle \neq 0$, por ser el producto interno usual esto implica que $\beta_0 \neq 0$. Ahora, si $y \in R(H)$, es de la forma $y = (g(x), f_1(x), \dots, f_k(x))$, para algún $x \in E$. Luego $\langle \beta, y\rangle = 0$, pero por definición de producto interno esto es

$$\beta_0 g(x) + \sum_{i=1}^{k} \beta_i f_i(x) = 0,$$

como $\beta_0 \neq 0$ podemos despejar $g(x)$, tal que

$$g(x) = \sum_{i=1}^{k} \left(-\frac{\beta_i}{\beta_0}\right) f_i(x).$$

Así como para cada $x \in E$, hay un y como el anterior, si tomamos $\lambda_i = -\dfrac{\beta_i}{\beta_0} \in \mathbb{R}$, obtenemos que

$$g = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i f_i.$$

ʊ̬ʊ

Ejercicio 9 Sea E un espacio de Banach de dimensión infinita. Muestre que cada vecindad débil $\star$ del origen de $E^\star$ no es acotada.

Demostración. Sea V una vecindad débil$\star$ de 0 en $E^\star$. Por definición de la topología $\sigma(E^\star, E)$, podemos expresar V como

$$V = \{f \in E^\star : |\langle f, x_j \rangle| < \varepsilon_j \text{ para } j = 1, \ldots, n\},$$

donde $x_1, \ldots, x_n \in E$ y $\varepsilon_1, \ldots, \varepsilon_n > 0$.Tomemos a $F = \text{span}\{x_1, \ldots, x_n\}$ el cual es un subespacio de E. Como F es de dimensión finita, es cerrado en E, es decir, $F = \overline{F}$. Dado que E es de dimensión infinita y F es de dimensión finita, existe $x_0 \in E \setminus F$. Aplicando el Teorema de Hahn-Banach en su forma geométrica, existe un funcional lineal no nulo $f \in E^\star$ tal que

$$f(x_j) = 0 \quad \text{para todo } j = 1, \ldots, n,$$

pero $f(x_0) \neq 0$. Para cualquier $\lambda \in \mathbb{R}$, el funcional λf satisface que,

$$(\lambda f)(x_j) = \lambda f(x_j) = 0 \quad \text{para todo } j = 1, \ldots, n.$$

Como $|\langle \lambda f, x_j \rangle| = 0 < \varepsilon_j$ para todo j, se cumple que $\lambda f \in V$ para todo $\lambda \in \mathbb{R}$, por lo que $\{\lambda f : \lambda \in \mathbb{R}\} \subset V$. La norma de λf cumple que,

$$\|\lambda f\| = |\lambda| \cdot \|f\|.$$

Como f es no nula, entonces $\|f\| > 0$ y cuando $|\lambda| \to \infty$, se tiene $\|\lambda f\| \to \infty$. Por lo tanto, V contiene elementos de norma arbitrariamente grandes y, por lo cual, no es acotada. $\square$

Ejercicio 11 Sea K un espacio métrico compacto que no es finito. Demuestre que $C(K)$ (con la norma del supremo $\|\cdot\|_{L^\infty}$) no es reflexivo.

Demostración. Dado que K es compacto e infinito, necesariamente contiene un punto de acumulación. Sea $a \in K$ uno de ellos, y sea (a_n) una sucesión de puntos distintos en K tal que

$$\begin{aligned} &a_n \to a, \\ &a_n \neq a \quad \text{para todo } n. \end{aligned}$$

Tal sucesión puede construirse eligiendo, para cada n, un punto $a_n \in K$ distinto de a tal que

$$d(a_n, a) < \frac{1}{n},$$

lo cual es posible ya que todo entorno de a contiene infinitos puntos de K distintos de a.
A partir de esta sucesión, para cada $n \in \mathbb{N}$, construiremos una función $g_n \in C(K)$ tal que $g_n(a_m) = 1$ si $1 \leq m \leq n$, $g_n(a_m) = 0$ si $m > n$, y $g_n(a) = 0$. Esto se puede lograr

utilizando el teorema de Tietze–Urysohn–Brouwer, como K es métrico, K es un espacio normal, y los conjuntos finitos $\{a_1, \dots, a_n\}$ y $\{a_{n+1}, a_{n+2}, \dots\} \cup \{a\}$ son disyuntos y cerrados. Así, existe una función continua $g_n : K \to [0, 1]$ tal que,

$$\begin{aligned} g_n(a_m) &= 1 \quad \text{si } 1 \leq m \leq n, \\ g_n(a_m) &= 0 \quad \text{si } m > n, \\ g_n(a) &= 0. \end{aligned}$$

Además, $\|g_n\|_\infty = 1$ para todo n.
Como $C(K)$ es un espacio de Banach y la sucesión (g_n) está acotada, tiene una subsucesión débilmente convergente (g_{n_k}), es decir, existe $g \in C(K)$ tal que $g_{n_k} \rightharpoonup g$ débilmente. Entonces, para todo funcional lineal continuo $\phi \in C(K)^*$ se cumple que

$$\phi(g_{n_k}) \to \phi(g).$$

En particular, esto se aplica a los funcionales de evaluación $\pi_x(f) := f(x)$ para cada $x \in K$, los cuales pertenecen a $C(K)^*$. Por tanto, para cada $x \in K$,

$$g_{n_k}(x) \to g(x).$$

Para cada $m \in \mathbb{N}$ fijo, existe k_0 tal que $n_k \geq m$ para todo $k \geq k_0$. Entonces, por la definición de g_{n_k},

$$g_{n_k}(a_m) = 1 \quad \text{para todo } k \geq k_0,$$

lo que implica que

$$g(a_m) = \lim_{k \to \infty} g_{n_k}(a_m) = 1.$$

Como $a_n \to a$ y g es continua, se sigue que

$$g(a) = \lim_{m \to \infty} g(a_m) = 1.$$

Sin embargo, por construcción $g_{n_k}(a) = 0$ para todo k, y por tanto,

$$g(a) = \lim_{k \to \infty} g_{n_k}(a) = 0,$$

lo cual es una contradicción. Esto prueba que la sucesión (g_n) no tiene ninguna subsucesión débilmente convergente.
En consecuencia, como encontramos una sucesión acotada en $C(K)$ que no posee ninguna subsucesión débilmente convergente, $C(K)$ no es reflexivo.

$\square$

Ejercicio 15 Sea E un espacio de Banach reflexivo. Sea $a : E \times E \to \mathbb{R}$ una forma bilineal que es continua, es decir, existe $M > 0$ tal que $|a(x, y)| \leq M\|x\|\|y\|$, para todo $x, y \in E$. Asuma que a es coerciva, esto es, existe $\alpha > 0$ tal que para todo $x \in E$

$$a(x, x) \geq \alpha\|x\|^2$$

(a) Dado $x \in E$, defina $A_x(y) = a(x, y)$, para todo $y \in E$. Muestre que $A_x \in E^\star$, para cada $x \in E$. Además, concluya que la función $x \mapsto A(x) = A_x$ satisface $A \in \mathcal{L}(E, E^\star)$.

Demostración. Para ver que $A_x \in E^*$ tenemos que ver que sea lineal y acotada. Sean $y_1, y_2 \in E$ y $\lambda \in \mathbb{R}$, tenemos que

$$\begin{aligned} A_x(y_1 + \lambda y_2) &= a(x, y_1 + \lambda y_2) \\ &= a(x, y_1) + \lambda a(x, y_2) \\ &= A_x(y_1) + \lambda A_x(y_2). \end{aligned}$$

Note que esto se sigue del hecho de que a es bilineal, por lo que es lineal en la segunda componente. Ahora note que por la continuidad de a tenemos que

$$\begin{aligned} |A_x(y)| &= |a(x, y)| \\ &\leq M\|x\|\|y\| \\ &= M_1\|y\|. \end{aligned}$$

Como para cada $x \in E$ se define el A_x, en cada operador $\|x\|$ es un número, por lo que es correcto tomar $M_1 = M\|x\| > 0$ para cada A_x, así tenemos que $A_x \in E^*$.

Ahora queremos ver que la función

$$\begin{aligned} A :& E \to E^* \\ & x \mapsto A(x) = A_x \end{aligned}$$

pertenece a $\mathcal{L}(E, E^\star)$. Claramente esta función está bien definida ya que $A_x \in E^*$. Luego nuevamente tenemos que ver que es lineal y acotada, para la linealidad, sean $x_1, x_2 \in E$ y $\lambda \in \mathbb{R}$, luego para $y \in E$

$$\begin{aligned} A_{x_1+\lambda x_2}(y) &= a(x_1 + \lambda x_2, y) \\ &= a(x_1, y) + \lambda a(x_2, y) \\ &= A_{x_1}(y) + \lambda A_{x_2}(y). \end{aligned}$$

Nuevamente esto se tiene del hecho de que a es bilineal. Por lo que $A_{x_1+\lambda x_2} = A_{x_1} + \lambda A_{x_2}$ pero esto es $A(x_1 + \lambda x_2) = A(x_1) + \lambda A(x_2)$, obteniendo así que A es lineal. Ahora veamos que A está acotada

$$\begin{aligned} \|A(x)\| &= \|A_x\| \\ &= \sup_{\substack{y \in E \\ \|y\| \leq 1}} |A_x(y)| \\ &= \sup_{\substack{y \in E \\ \|y\| \leq 1}} |a(x, y)| \\ &\leq \sup_{\substack{y \in E \\ \|y\| \leq 1}} M\|x\|\|y\| \\ &= M\|x\| \sup_{\substack{y \in E \\ \|y\| \leq 1}} \|y\| \\ &\leq M\|x\|. \end{aligned}$$

Esto es gracias a la continuidad de a. Así concluimos que $A \in \mathcal{L}(E, E^\star)$.

ʊ̬ʊ

(b) Muestre que A como en (a) es una función sobreyectiva.

Demostración. Primero veamos que la desigualdad $\|A_x\| \geq \alpha\|x\|$ se tiene para todo $x \in E$, es claro que cuando $x = 0$ la desigualdad es cierta ya que $\|x\| = 0$. Ahora si $x \neq 0$ tenemos que

$$\begin{aligned}
\|A_x\| &= \sup_{\substack{y \in E \\ y \neq 0}} \frac{|A_x(y)|}{\|y\|} \\
&\geq \frac{|A_x(x)|}{\|x\|} \\
&= \frac{|a(x,x)|}{\|x\|} \\
&\geq \frac{\alpha\|x\|^2}{\|x\|} \\
&= \alpha\|x\|.
\end{aligned}$$

Ahora con ayuda de esta desigualdad probemos que $R(A)$ es cerrado. Sea $f \in \overline{R(A)}$, luego existe una sucesión $\{A_{x_n}\}_{n\in\mathbb{N}} \subseteq R(A)$ tales que $A_{x_n} \to f$, note que tomamos la sucesión de esa forma ya que son elementos del rango de la aplicación A. Como esta aplicación es lineal y por la desigualdad anterior tenemos que

$$\begin{aligned}
\|A_{x_n} - A_{x_m}\| &= \|A_{x_n - x_m}\| \\
&\geq \alpha\|x_n - x_m\|.
\end{aligned}$$

Así, $\|x_n - x_m\| \leq \dfrac{1}{\alpha}\|A_{x_n} - A_{x_m}\|$, como $\{A_{x_n}\}$ es convergente y estamos en un espacio normado, esta secuencia es Cauchy. Dado $\varepsilon > 0$ existe $N \in \mathbb{N}$ tal que si $n, m \geq M$, $\|A_{x_n} - A_{x_m}\| < \varepsilon$, esto implica que $\|x_n - x_m\| < \dfrac{\varepsilon}{\alpha}$. Así la sucesión $\{x_n\}$ es Cauchy en E, pero este espacio es Banach, por lo que $x_n \to x \in E$. Luego podemos considerar la función $A(x) = A_x$. Note que

$$\begin{aligned}
\|A_x - f\| &= \|A_x - A_{x_n} + A_{x_n} - f\| \\
&\leq \|A_x - A_{x_n}\| + \|A_{x_n} - f\| \\
&= \|A_{x - x_n}\| + \|A_{x_n} - f\| \\
&\leq \|A\|\|x - x_n\| + \|A_{x_n} - f\|,
\end{aligned}$$

por lo que cuando $n \to \infty$ tenemos por la convergencia que $\|x - x_n\| \to 0$ y $\|A_{x_n} - f\| \to 0$. Concluyendo así que $A_x = f$, por lo que $f \in R(A)$, mostrando que el rango de la aplicación A es cerrado.

Ahora veamos por contradicción que la función es sobreyectiva. Como $R(A) = \overline{R(A)}$, si no es sobreyectiva, $\overline{R(A)} \neq E^*$, luego por Hahn-Banach existe $f \in E^{**}$ tal que $f \not\equiv 0$ y

$f|_{R(A)} = 0$. Esto quiere decir que para cualquier $A_x \in R(A)$, con $x \in E$, tenemos que

$$\langle f, A_x \rangle = 0.$$

Pero como E es reflexivo sabemos que la aplicación canónica $J : E \to E^{**}$ es sobreyectiva, como $f \in E^{**}$, existe un $x_0 \in E$, tal que $f = J_{x_0}$. Luego

$$\begin{aligned} 0 &= \langle f, A_x \rangle \\ &= \langle J_{x_0}, A_x \rangle \\ &= \langle A_x, x_0 \rangle \\ &= a(x, x_0). \end{aligned}$$

Por lo que si tomamos $x = x_0$, como a es coerciva tenemos que $0 = a(x_0, x_0) \geq \alpha \|x_0\|^2$. de eso concluimos que $x_0 = 0$, pero esto implicaría que $f = J_{x_0} = J_0 = 0$, una contradicción ya que f era no nulo. Así concluimos que $R(A) = \overline{R(A)} = E^*$ mostrando que A es sobreyectiva.

ʊ̬ʊ

(c) Deduzca que para cada $f \in E^\star$, existe un único $x \in E$ tal que $a(x, y) = \langle f, y \rangle$, $\forall y \in E$. Esto es, la forma bilineal coerciva a representa todo funcional lineal continuo.

Demostración. Tomemos $f \in E^*$, por (b), como A es sobreyectiva, existe $x_1 \in E$ tal que $A(x_1) = A_{x_1} = f$, es decir que para todo $y \in E$, $a(x_1, y) = A_{x_1}(y) = f(y)$. Si no existe otro además de x_1 hemos acabado. En caso contrario, suponga que existe un $x_2 \in E$ tal que $a(x_2, y) = f(y)$ para todo y, luego como a es bilineal

$$\begin{aligned} 0 &= f(y) - f(y) \\ &= a(x_1, y) - a(x_2, y) \\ &= a(x_1 - x_2, y). \end{aligned}$$

Como es para todo $y \in E$, si tomamos $y = x_1 - x_2$, tenemos que $a(x_1 - x_2, x_1 - x_2) = 0$, pero como a es coerciva, existe $\alpha > 0$ tal que

$$0 = a(x_1 - x_2, x_1 - x_2) \geq \alpha \|x_1 - x_2\|^2.$$

Así tenemos que $\|x_1 - x_2\|^2 = 0$. Por lo que $x_1 - x_2 = 0$, así $x_1 = x_2$, concluyendo así la unicidad. ʊ̬ʊ

Ejercicio 18 Sea E un espacio de Banach

(a) Demuestre que existe un espacio topológico compacto K y una isometría de E en $(C(K), \|\cdot\|_\infty)$.

Demostración. Considere el conjunto $K = \mathcal{B}_{E^\star} = \{f \in E^\star : \|f\|_{E^\star} \leq 1\}$. Luego K es un espacio topológico compacto en la topología débil*. Definamos la función

$$T \colon (E, \|\cdot\|_E) \to (C(K), \|\cdot\|_\infty)$$

donde $x \mapsto Tx \colon \mathcal{B}_{E^\star} \to \mathbb{R}$ y $f \mapsto (Tx)(f) = f(x) = J_x(f)$, por definición de las funciones

J_x sabemos que Tx es continua en la topología débil $\star$, ahora veamos que T es lineal, sean $x, y \in E$ y $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$, entonces,

$$T(\alpha x + \beta y)(f) = \langle f, \alpha x + \beta y \rangle = \alpha \langle f, x \rangle + \beta \langle f, y \rangle = \alpha(T(x)(f)) + \beta(T(y)(f)).$$

Por último, veamos que T es una isometría.

$$\|T(x)\|_\infty = \sup_{f \in K} |T(x)(f)| = \sup_{\substack{f \in E^\star \\ \|f\|_{E^\star} \leq 1}} |\langle f, x \rangle| \leq \|x\|,$$

como T es lineal, acotada tenemos que T es continua. Además, por un corolario de la forma analítica de Hahn-Banach, tenemos que para cada $x \in E$ existe $f \in E^\star$ tal que

$$\langle f, x \rangle = \|x\|, \quad \text{con } \|f\| = 1,$$

por lo que tenemos $\|T(x)\|_\infty = \|x\|$, así T es isometría.

□

(b) Asuma que E es separable. Entonces muestre que existe una isometría de E en l^∞ (vea el Ejercicio 14 para la definición del espacio).

Demostración. Como E es separable, la bola unitaria es cerrada $K = B_{E^\star}$ del dual $E^\star$ es compacta y metrizable en la topología débil $\star$ por el Teorema de Banach-Alaoglu y la separabilidad de E. Además, sabemos que todo espacio métrico compacto es segundo-contable y, por tanto, separable. Así, existe un subconjunto denso numerable $\{f_n\}_{n=1}^\infty \subseteq K$.

Definamos

$$T : E \to \ell^\infty, \quad x \mapsto T(x) := \{f_n(x)\}_{n=1}^\infty.$$

Veamos que T está bien definido, como $\|f_n\| \leq 1$ para todo $n \in \mathbb{N}$, tomando un x fijo, tenemos que

$$\sup_{n \in \mathbb{N}} |f_n(x)| \leq \|x\| \sup_{n \in \mathbb{N}} \|f_n\| \leq M\|x\| \quad \text{donde } M \in \mathbb{R}, M \geq 1.$$

Ahora veamos que T es lineal. Sean $x, y \in E$, y $\alpha, \beta \in \mathbb{R}$

$$T(\alpha x + \beta y) = \{f_n(\alpha x + \beta y)\} = \alpha\{f_n(x)\} + \beta\{f_n(y)\},$$

luego T es lineal. Por lo que T es continua ya que es lineal y acotada. Ahora, sólo nos falta ver que T es una isometría, por el corolario de Hahn-Banach en forma analítica, existe $f \in K \subseteq E^\star$ tal que $|f(x)| = \|x\|$, al ser f_n denso en K, existe una subsucesión $\{f_{n_k}\}$ tal que $f_{n_k} \to f$ en $\sigma(E^\star, E)$, y en particular $f_{n_k}(x) \to f(x)$, así,

$$|f(x)| = \limsup_{k \to \infty} |f_{n_k}(x)| \leq \sup_{n \in \mathbb{N}} |f_n(x)| = \|T(x)\|_\infty \leq \|x\|.$$

Con lo que

$$\|T(x)\|_\infty = \|x\|,$$

concluyendo así que $T(x)$ es una isometría.

$\square$