Apunte Único: Álgebra Lineal Computacional - Práctica 3

Por alumnos de ALC
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
UBA

última actualización 30/07/25 @ 19:11

Choose your destiny:

(click click en el ejercicio para saltar)

Esta Guía 3 que tenés se actualizó por última vez:
30/07/25 @ 19:11
Escaneá el QR para bajarte (quizás) una versión más nueva:

Guía 3

El resto de las guías repo en github para descargar las guías con los últimos updates.

Si querés mandar un ejercicio o avisar de algún error, lo más fácil es por Telegram .

Notas teóricas:

- *Recuerdo nomenclatura de matrices*

  Nombres usados en matrices en $\mathbb{R}$:

  - Ortogonal: $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ con $Q^t Q = I$
    - Las columnas de Q forman una BON de $\mathbb{R}^n$
    - Es ortogonalmente diagonalizable.
    - Preserva la norma en la multiplicación.
    - $\det(U) = 1$
  - Simétrica: $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ con $A^t = A$
    - A tiene autovalores reales.
    - Es ortogonalmente diagonalizable.

  Nombres usados en matrices en $\mathbb{C}$:

  - Unitaria: $U \in \mathbb{C}^{n \times n}$ con $U^* U = I$
    - Las columnas de U forman una BON de $\mathbb{C}^n$
    - Es ortogonalmente diagonalizable.
    - Preserva la norma en la multiplicación.
    - $\det(U) = 1$
  - Hermitiana: $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$ con $A^* = A$
    - A tiene autovalores reales.
    - Es ortogonalmente diagonalizable.

- *Matriz Ortogonal*:

  Una matriz ortogonal tiene sus columnas ortonormales.

  - Si A es una *matriz ortogonal* entonces $A^{-1} = A^*$.
  - Si A y B son *matrices ortogonales* entonces AB es una *matriz ortogonal*.

- *Matriz definida positiva:*

  Sea $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ definida positiva:

  $$\forall x \neq 0 \quad x^t A x > 0 \text{ con } x \in \mathbb{R}^n$$

  Algunas propiedades de las matrices definidas positivas:

  - $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ *simétrica definida positiva* $\implies$ A es inversible
  - Los elementos diagonales de una matriz *simétrica definida positiva* son positivos
  - Las submatrices principales también son matrices definidas positivas

  $$\begin{matrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{matrix}$$

  submatriz 1×1
  submatriz 2×2
  submatriz 3×3
  A 4×4

- *Descomposición LU:* $\quad A = LU$

  1) Sea $A \in K^{n \times n}$, A inversible, entonces:

  $$A \text{ tiene descomposición } LU \Leftrightarrow \underbrace{A(1:k, 1:k)}_{\substack{\text{submatrices}\\\text{principales}}} \textit{ es inversible } \quad \forall k \in [1, n]$$

  2) Sea $A \in K^{n \times n}$, A inversible, entonces:

  $$A \text{ tiene descomposición } LU \implies \text{ esa factorización es única}$$

- *Descomposición LU con swap de filas:* $\quad PA = LU$

- *Descomposición de Cholesky:*

La descomposición de Cholesky para una matriz A simétrica y definida positiva:

$$A = LL^t$$

con L triangular inferior. A partir de la descomposición:

$$A = \overbrace{\tilde{L}U}^{\text{la misma LU de siempre}} \longrightarrow A = \tilde{L}\underset{\substack{\downarrow \\ \text{matriz diagonal} \\ \text{con los elementos} \\ \text{diagonales de } U}}{D}\tilde{L}^t.$$

$A = \tilde{L}D\tilde{L}^t$, es definida positiva si y solo si D lo es. Como D es diagonal, solo es cuestión de ver que $[D]_{ii} > 0$.

Finalmente:

$$A = \tilde{L}D\tilde{L} \Leftrightarrow A = \tilde{L}\sqrt{D}\sqrt{D}\tilde{L}^t \Leftrightarrow A = LL^t$$

- *Proyectores:*

Se llama *Proyector* a una transformación lineal P que cumple que:

- $P(v) = v$
- $P \circ P = P$

Si $P : V \to V$ es proyector, están las siguientes propiedades:

- $v - P(v) \in \mathrm{Nu}(P) \;\; \forall v \in V$
- $\mathrm{Nu}(P) \oplus \mathrm{Im}(P) = V$ lo mismo que decir que $\mathrm{Nu}(P) \cap \mathrm{Im}(P) = \{\mathbf{0}\}$
- P un *proyector ortogonal* $\Leftrightarrow \mathrm{Nu}(P) \perp \mathrm{Im}(P)$
- P es un *proyector ortogonal* expresado en una base *ortonormal* $\implies P = P^t \quad (P = P^* \in \mathbb{C})$
- *Proyector ortogonal sobre un subespacio* $S \subset V$, *con* $\dim(S) = r$ *y* $\dim(V) = n$:

$$\underset{\substack{\downarrow \\ \text{BOG}}}{B_S} = \overbrace{\{s_1, \dots, s_r\}}^{\substack{s_i \cdot s_j = 0 \\ \forall i \neq j}} \xRightarrow[\text{en } S]{\text{proyecto } v} P_S(v) = \underbrace{\frac{s_1^t \cdot v}{\|s_1\|^2} \cdot s_1 + \dots + \frac{s_r^t \cdot v}{\|s_r\|^2} \cdot s_r}_{\substack{\text{es una suma de múltiplos} \\ \text{de los generadores de } S}}$$

Si tenés una BON de S mirá como podés hacer esto más *mecánico*:

$$\underset{\substack{\downarrow \\ \text{BON}}}{B_S} = \overbrace{\{s_1, \dots, s_r\}}^{\substack{s_i \cdot s_j = 0 \\ \|s_i\| = 1 \\ \forall i \neq j}} \xRightarrow[\text{al } S \text{ con matrices}]{\text{me armo el proyector}}$$

$$P_S = \underbrace{\left(\begin{array}{c|c|c} s_1 & \cdots & s_r \end{array} \right)}_{Q} \underbrace{\left(\begin{array}{c} s_1^t \\ \hline \vdots \\ \hline s_r^t \end{array} \right)}_{Q^*}$$

Now behold and be amazed maderfoca!:

$$P_S(v) = \underbrace{\left(\begin{array}{c|c|c} s_1 & \cdots & s_r \end{array} \right)}_{\in K^{n \times r}} \underbrace{\left(\begin{array}{c} s_1^t \\ \hline \vdots \\ \hline s_r^t \end{array} \right)}_{\in K^{r \times n}} \underbrace{\begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}}_{\in K^{n \times 1}} \overset{!}{=} \left(\begin{array}{c|c|c} s_1 & \cdots & s_r \end{array} \right) \underbrace{\left(\begin{array}{c} s_1^t \cdot v \\ \hline \vdots \\ \hline s_r^t \cdot v \end{array} \right)}_{\in K^{r \times 1}} \overset{!}{=}$$

Para hacerlo explicitamente escribo las cordenadas de un vector de S como $s_i = (s_{i_1}, \dots, s_{i_n})$

$$\overset{!}{=} \underbrace{\begin{pmatrix} (s_1^t \cdot v) \cdot s_{1_1} + \cdots + (s_r^t \cdot v) s_{r_1} \\ \hline \vdots \quad \vdots \\ \hline (s_1^t \cdot v) \cdot s_{1_i} + \cdots + (s_r^t \cdot v) s_{r_i} \\ \hline \vdots \quad \vdots \\ \hline (s_1^t \cdot v) \cdot s_{1_n} + \cdots + (s_r^t \cdot v) s_{r_n} \end{pmatrix}}_{\in K^{n\times 1}} \overset{!!}{=} \overbrace{\underbrace{s_1^t \cdot v}_{\in K} \begin{pmatrix} s_{1_1} \\ \vdots \\ s_{1_n} \end{pmatrix} + \cdots + \underbrace{s_r^t \cdot v}_{\in K} \begin{pmatrix} s_{r_1} \\ \vdots \\ s_{r_n} \end{pmatrix}}^{\text{es una suma de múltiplos de los generadores de } S \text{ ⚠}} =$$

$$= (s_1^t \cdot v) \cdot s_1 + \cdots + (s_r^t \cdot v) \cdot s_r = P_S(v)$$

Donde en !! es acomodar ese vector gordo que está a la izquierda como una suma de vectores flacos multiplicados por un escalar. Y listo queda la proyección igual que antes solo que con una base ortonormal.

- *Gram-Schmidt:*

  1) Proceso para construir una base que generá el mismo espacio, pero con elementos perpediculares entre sí.

  $$\underbrace{\{v_1, \dots, v_r\}}_{\text{Base inicial}} \xrightarrow{\text{Gram-Schmidt}} \underbrace{\{u_1, \dots, u_r\}}_{\text{Base final}} \quad \text{con } u_i \cdot u_j = 0 \ \forall i \neq j$$

  2) La mecánica es cuentosa pero razonable:

  1) Agarro el primer vector de la base inicial v_1 como primer vector de la base final:

  $$\{\underset{=v_1}{\underset{\downarrow}{u_1}}\}$$

  2) Agarro el segundo vector de la base inicial v_2 y calculo el segundo vector de la base final:

  $$u_2 = v_2 - \frac{u_1^* \cdot v_2}{\|u_1\|^2} u_1 \xrightarrow[\text{base final}]{\text{actualizo la}} \{u_1, u_2\}$$

  3) Y voy así hasta usar todos los vectores el segundo vector de la base inicial v_2 y calculo el segundo vector de la base final:

  $$u_3 = v_3 - \frac{u_1^* \cdot v_3}{\|u_1\|^2} u_1 - \frac{u_2^* \cdot v_3}{\|u_2\|^2} u_2 \xrightarrow[\text{base final}]{\text{actualizo la}} \{u_1, u_2, u_3\}$$

  4) En general cuando agarre el $i-$ésimo vector de la base inicial y calcule el $i-$ésimo vector de la base final:

  $$u_i = v_i - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{u_k^* \cdot v_i}{\|u_k\|^2} u_k \xrightarrow[\text{base final}]{\text{actualizo la}} \{u_1, \dots, u_i\}$$

  5) Así hasta haber usado todos los vectores de la base inicial, para obtener la base con los vectores ortogonalizados:

  $$\{u_1, \dots, u_r\}$$

  es una base ortogonal, para los amigos una BOG, si quiero que sea una *base ortonormal*, BON:

  $$\left\{ \frac{u_1}{\|u_1\|}, \dots, \frac{u_r}{\|u_r\|} \right\}$$

- *Factorización QR:* $A = QR$

  La factorización QR no tiene un pedo que ver con las LU, Chole y amigos. QR es un fantasma 👻 que sale de *Gram-Schmidt*.

  $$\underbrace{\{v_1, \dots, v_r\}}_{\text{Columnas de } A} \xrightarrow[\text{más normalizar}]{\text{Gram-Schmidt}} \underbrace{\left\{ \frac{u_1}{\|u_1\|}, \dots, \frac{u_r}{\|u_r\|} \right\}}_{\text{Columnas de } Q} \quad \text{con } u_i \cdot u_j = 0 \ \forall i \neq j$$

⊥ 1) Q es una *matriz ortogonal* que va a tener en sus columnas el resultado de ortonormalizar las columnas de A.

⊥ 2) R es una *matriz triangular superior* con las normas de las columnas de Q en la diagonal

⊥ 3) Mini derivación:

$$\overbrace{u_i = v_i - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{u_k^* \cdot v_i}{\|u_k\|_2^2} u_k}^{\text{Gram-Schmidt, duro y puro}} \xrightarrow[\text{y acomodo}]{\text{despejo el } v_i} \overbrace{\underset{\substack{\downarrow \\ \text{col-i} \\ \text{de} A}}{v_i} = u_i + \sum_{k=1}^{i-1} \frac{u_k^* \cdot v_i}{\|u_k\|} \frac{u_k}{\|u_k\|}}^{\bigstar^1}$$

Eso ahora lo uso para armar $A = QR$:

$$\underbrace{\left(\begin{array}{c|c|c} v_1 & v_2 & v_3 \end{array}\right)}_{A} = \underbrace{\left(\begin{array}{c|c|c} \frac{u_1}{\|u_1\|} & \frac{u_2}{\|u_2\|} & \frac{u_3}{\|u_3\|} \end{array}\right)}_{Q} \cdot \underbrace{\left(\begin{array}{c|c|c} \|u_1\| & \frac{u_1^* \cdot v_2}{\|u_1\|} & \frac{u_1^* \cdot v_3}{\|u_1\|} \\ 0 & \|u_2\| & \frac{u_2^* \cdot v_3}{\|u_2\|} \\ 0 & 0 & \|u_3\| \end{array}\right)}_{R}$$

Ya sé que hice el ejemplo matricial en $\mathbb{R}^3$, pero con el poder de tu imaginación fijate que la columna $j-$ésima para una matriz imaginaria de $n \times n$ sería algo así:

$$\text{Col}(A)_j = v_j \overset{\bigstar^1}{=} \sum_{k=1}^{j-1} \frac{u_k^* \cdot v_j}{\|u_k\|} \frac{u_k}{\|u_k\|} + u_j$$

⊥ 4) No sé si ayuda a la notación o no, pero quiero cambiar la notación así:

$$\left\{ \frac{u_1}{\|u_1\|}, \dots, \frac{u_r}{\|u_r\|} \right\} \xrightarrow{\text{le pongo la gorra}} \{\hat{u}_1, \dots, \hat{u}_r\} \text{ donde los } \hat{u}_i \cdot \hat{u}_j \underset{\substack{\downarrow \\ i \neq j}}{=} 0 \quad \text{y} \quad \|\hat{u}_i\| = 1 \ \forall i$$

Dejando así la expresión de la descomposión:

$$\underbrace{\left(\begin{array}{c|c|c} v_1 & v_2 & v_3 \end{array}\right)}_{A} = \underbrace{\left(\begin{array}{c|c|c} \hat{u}_1 & \hat{u}_2 & \hat{u}_3 \end{array}\right)}_{Q \text{ con cols ortonormales}} \cdot \underbrace{\left(\begin{array}{c|c|c} \|u_1\| & \hat{u}_1^* \cdot v_2 & \hat{u}_1^* \cdot v_3 \\ 0 & \|u_2\| & \hat{u}_2^* \cdot v_3 \\ 0 & 0 & \|u_3\| \end{array}\right)}_{R \text{ triangular superior}}$$

Matriz de HouseHolder: ... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicios de la guía:

Ejercicio 1. Sean A y $B \in K^{n\times n}$. Probar que:

(a) Si A y B son triangulares superiores, AB es triangular superior.

(b) Si A y B son diagonales, AB es diagonal.

(c) Si A es estrictamente triangular superior (es decir, $a_{ij} = 0$ si $i \geq j$), $A^n = 0$.

(a) Una matriz A va a ser triangular superior si todos los número debajo de la diagonal son cero:

$$A_{ij} \overset{\star^1}{=} \begin{cases} 0 & \text{si} \quad i > j \\ a_{ij} & \text{si} \quad i \leq j \end{cases} \qquad \begin{pmatrix} & a_{ij} \\ 0 & \end{pmatrix}$$

Los a_{ij} no tienen que ser necesariamente distinto a cero. Ahora multiplico dos matrices triangulares superiores:

$$[A \cdot B]_{ij} = \sum_{k=1}^{n} a_{ik} \cdot b_{kj} = a_{i1} \cdot b_{1j} + a_{i2} \cdot b_{2j} + \cdots + a_{in} \cdot b_{nj} \overset{\star^1}{=} \begin{cases} \sum\limits_{i\leq k\leq j} a_{ik} \cdot b_{kj} & \star^2 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Se cumple $\star^2$ son los que tiene las *filas menores o iguales columnas* y *filas menores o iguales columnas*, si no son cero. Básicamente la definición de matriz triangular superior.

(b) Esta es un poco más fácil. Una matriz es diagonal si:

$$A_{ij} \overset{\star^1}{=} \begin{cases} 0 & \text{si} \quad i \neq j \\ a_{ij} & \text{si} \quad i = j \end{cases} \qquad \begin{pmatrix} & 0 \\ 0 & \end{pmatrix}$$

Nuevamente, los elementos diagnonales no tienen que ser necesariamente distintos de cero. Ahora multiplico dos matrices diagonales:

$$[A \cdot B]_{ij} = \sum_{k=1}^{n} a_{ik} \cdot b_{kj} = a_{i1} \cdot b_{1j} + a_{i2} \cdot b_{2j} + \cdots + a_{in} \cdot b_{nj} \overset{\star^1}{=} \begin{cases} a_{ii} \cdot b_{ii} & \star^2 \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

En la sumatoria las columnas de los elementos de A coinciden con las filas de los elementos de B, pero solo cuando estemos multiplicando la fila i con la columna i es que ambos elementos podrían ser no nulos.

(c) Una matriz A va a ser triangular superior estricta si todos los número debajo y de la diagonal son cero:

$$A_{ij} \overset{\star^1}{=} \begin{cases} 0 & \text{si} \quad i \geq j \\ a_{ij} & \text{si} \quad i < j \end{cases} \qquad \begin{pmatrix} 0 & a_{ij} \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Meto inducción porque es un viaje. Quiero probar que:

$p(n) : A$ y $B \in K^{n\times n}$ matrices triangulares superior estrictas, MTSE, entonces $A \cdot B$ también lo es, y además tiene una submatriz también MTSE de un *orden matricial* menos en la esquina superior derecha.

Caso base:

$p(2) : A$ y $B \in K^{2\times 2}$ MTSE, entonces $A \cdot B$ también lo es, y además tiene una submatriz también MTSE de un *orden matricial* menos en la esquina superior derecha.

Cálculo directo

$$A \cdot B = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & b_{12} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

por lo tanto $p(2)$ es verdadera.

Paso inductivo: Voy a asumir que para algún $k \in \mathbb{Z}$

$p(k) : A$ y $B \in K^{k\times k}$ estrictamente triangular superior, entonces $A \cdot B$ también lo es y además tiene una submatriz también MTSE de un *orden matricial* menos en la esquina superior derecha.

es verdadera. Por lo tanto ahora quiero probar que:

$p(k+1) : A$ y $B \in K^{(k+1)\times(k+1)}$ estrictamente triangular superior, entonces $A \cdot B$ también lo es y además tiene una submatriz también MTSE de un *orden matricial* menos en la esquina superior derecha.

Primero voy a ver que onda esto de multiplicar dos MTSE:

$$A \cdot B = \begin{pmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1(k+1)} \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{k(k+1)} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & b_{12} & \cdots & \cdots & b_{1(k+1)} \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & b_{k(k+1)} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Notar que las columnas de A y B tienen la forma:

$$\left\{ \begin{array}{rcl} \mathrm{Col}_1(A) = Ae_1 & = & 0 \\ \mathrm{Col}_2(A) = Ae_2 & = & a_{21}e_1 \\ \mathrm{Col}_3(A) = Ae_3 & = & a_{31}e_1 + a_{32}e_2 \\ \mathrm{Col}_4(A) = Ae_4 & = & a_{41}e_1 + a_{42}e_2 + a_{43}e_3 \\ & \vdots & \\ \mathrm{Col}_k(A) = Ae_k & = & \sum\limits_{i=1}^{k-1} a_{ki}e_i \\ \mathrm{Col}_{(k+1)}(A) = Ae_{k+1} & = & \sum\limits_{i=1}^{k} a_{(k+1)i}e_i \end{array} \right. \quad \text{y} \quad \left\{ \begin{array}{rcl} \mathrm{Col}_1(B) = Be_1 & = & 0 \\ \mathrm{Col}_2(B) = Be_2 & = & b_{21}e_1 \\ \mathrm{Col}_3(B) = Be_3 & = & b_{31}e_1 + b_{32}e_2 \\ \mathrm{Col}_4(B) = Be_4 & = & b_{41}e_1 + b_{42}e_2 + b_{43}e_3 \\ & \vdots & \\ \mathrm{Col}_k(B) = Be_k & = & \sum\limits_{i=1}^{k-1} b_{ki}e_i \\ \mathrm{Col}_{(k+1)}(B) = Be_{k+1} & = & \sum\limits_{i=1}^{k} b_{(k+1)i}e_i \end{array} \right.$$

Entonces al multiplicar $A \cdot B$

$$\left\{ \begin{array}{rcl} \mathrm{Col}_1(A\cdot B) = A \cdot Be_1 & = & A \cdot 0 = 0 \\ \mathrm{Col}_2(A\cdot B) = A \cdot Be_2 & = & b_{21}Ae_1 \overset{!}{=} 0 \\ \mathrm{Col}_3(A\cdot B) = A \cdot Be_3 & = & b_{31}Ae_1 + b_{32}Ae_2 \overset{!}{=} b_{32}a_{21}e_1 \\ \mathrm{Col}_4(A\cdot B) = A \cdot Be_4 & = & b_{41}Ae_1 + b_{42}Ae_2 + b_{43}Ae_3 \overset{!}{=} b_{42}a_{21}e_1 + b_{43}a_{31}e_1 + b_{43}a_{32}e_2 \\ & \vdots & \\ \mathrm{Col}_{(k+1)}(A\cdot B) = A \cdot Be_{k+1} & = & \sum\limits_{i=1}^{k} b_{(k+1)i}A \cdot e_i = \sum\limits_{i=1}^{k}\sum\limits_{j=1}^{k-1} b_{(k+1)i}a_{(k+1)j}e_j \end{array} \right.$$

A esta altura estarás preguntándote ¿que mierda es todo esto?, yo también. Lo que importa es que todas las columnas de AB se construyen con vectores que tienen un cero más que antes, entendiendo por tienen un cero más que antes:

$$(a_1, a_2, a_3, 0) \xrightarrow[\text{multiplicar}]{\text{luego de}} (a'_1, a'_2, 0, 0).$$

La matriz AB tiene $\mathrm{Col}(AB)_1 = \mathrm{Col}(AB)_2 = 0$ y como todos las columnas tienen un cero más abajo es decir que hay una fila de ceros nueva, quedando así una MTSE de un *orden matricial* menor.

$A \cdot B \in K^{(k+1)\times(k+1)}$

MTSE $\in K^{k\times k}$

$$\begin{pmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1(k+1)} \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & a_{k(k+1)} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & b_{12} & \cdots & \cdots & b_{1(k+1)} \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & b_{k(k+1)} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & * & \cdots & * \\ 0 & 0 & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \ddots & * \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$A \in K^{(k+1)\times(k+1)}$ $B \in K^{(n\times n)}$

Por lo tanto probé (creo) por inducción que al multiplicar una matriz MTSE por otra MTSE, se obtiene una nueva MTSE con una submatriz TSE también de un *orden matricial* menor.

Así es cuestión de multiplicar a $A \in K^{n\times n}$ por sí misma n veces para obtener una matriz nula:

$$A^n = 0$$

Dale las gracias y un poco de amor ❤ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:

naD GarRaz

Ejercicio 2. Sea $A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & -2 \\ -3 & 3 & 0 & -1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{4\times 4}$

(a) Escalonar la matriz A multiplicándola a izquierda por matrices elementales $T^{ij}(a), a \in \mathbb{R}, 1 \le i, j \le 4$, con $i \neq j$.

Recordar que $T^{ij}(a) \in K^{n\times n}$ *se define como:*

$$T^{ij}(a) = I_n + aE^{ij}, \quad 1 \le i, j \le n, \quad i \neq j, a \in K,$$

siendo E^{ij} las matrices canónicas de $K^{n\times n}$

(b) Hallar la descomposición LU de A.

(c) Usando la descomposición del ítem anterior resolver el sistema $Ax = b$, para $b = \begin{pmatrix} 1 \\ -7 \\ -5 \\ 1 \end{pmatrix}$.

(a) Hacer una operación entre *filas* es multiplicar por esas matrices T^{ij}, pero dado que el *me da tremenda* *pajómetro* explota, escribo las T^{ij} para la primera *columna* de ceros no más.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & -2 \\ -3 & 3 & 0 & -1 \end{pmatrix} \rightsquigarrow \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{T^{31}(-\frac{2}{1})=I_4+(-\frac{2}{1})E^{31}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & -2 \\ -3 & 3 & 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -4 \\ -3 & 3 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

$$\rightsquigarrow \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{T^{41}(\frac{3}{1})=I_4+(\frac{3}{1})E^{41}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ -3 & 3 & 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \bigstar^1$$

Ahí entonces están las T^{ij} para hacer ceros en la primera *columna*. Y como la *matemagia* en esta materia parece no tener parangón, cuando multiplicás esas matrices T^{ij} da lo mismo que sumar los elementos fuera de la diagonal componente a componente:

$$T^{41} \cdot T^{31} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Es gracias a ese resultado que en el próximo paso podría armar solo una matriz con la info para triangular toda la *segunda columna*. solo un producto matricial. Continúo la triangulación de $\bigstar^1$:

$$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \rightsquigarrow \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{T^{32}(-1)=I_4+(-\frac{1}{1})E^{32}} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & -4 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

Por lo tanto para que la matriz A quede triangulada superiormente:

$$\underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{T^{32}\cdot T^{41}\cdot T^{31}=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & -1 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & -2 \\ -3 & 3 & 0 & -1 \end{pmatrix}}_{A} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & -4 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}}_{U}$$

$$T^{32} \cdot T^{41} \cdot T^{31} \cdot A = U$$

(b) La U está una vez triangulada la matriz A. Encontrar la L sale con las matrices que multiplicamos para obtener la matriz triangulada:

$$L^{-1} \cdot A = U \xRightarrow[L]{\times \text{ izquierda}} L \cdot L^{-1} \cdot A = L \cdot U \Leftrightarrow A = L \cdot U$$

El producto de las matrices elementales me forma la inversa de $L : L^{-1}$. Por suerte encontrar la inversa de $(L^{-1})^{-1}$ es sencillo:

$$L^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -2 & -1 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \Longrightarrow L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ +2 & +1 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Solo hay que cambiarle los signos a los elementos que estás por debajo de la diagonal.

$$A = LU \iff \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 2 & -1 & 0 & -2 \\ -3 & 3 & 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & -4 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix}$$

(c)

$$A \cdot x = b \overset{A=LU}{\Longleftrightarrow} LU \cdot x = b \Leftrightarrow L\underbrace{(U \cdot x)}_{y} = b \Leftrightarrow \begin{cases} L \cdot y = b & \xrightarrow{\bigstar^1} \text{Arranco por acá.} \\ U \cdot x = y & \xrightarrow{\bigstar^2} \text{Sigo por acá una vez encontrado } y. \end{cases}$$

Entonces resuelvo primero $\bigstar^1$:

$$Ly = b \xrightarrow{\text{armo sistema}} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -7 \\ 2 & 1 & 1 & 0 & -5 \\ -3 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array}\right) \implies y \overset{\bigstar^3}{=} \begin{pmatrix} 1 \\ -7 \\ 0 \\ 4 \end{pmatrix}$$

Con la $\bigstar^3$ resuelvo $\bigstar^2$:

$$Ux = y \xrightarrow[\text{con } \bigstar^3]{\text{armo sistema}} \left(\begin{array}{cccc|c} 1 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 4 & 0 & -7 \\ 0 & 0 & -4 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 4 \end{array}\right) \implies \boxed{x = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -2 \\ 2 \end{pmatrix}}$$

Y porque soy un tipazo (y le pifié 1000 veces a las cuentas) acá tenés el código para corroborar:

Si hacés un copy paste de este código debería funcionar lo más bien

```python
import numpy as np
import scipy

# Matriz A
A = np.array([[1, -1, 0, 1], [0, 1, 4, 0], [2, -1, 0, -2], [-3, 3, 0, -1]])
L = np.array([[1, 0, 0, 0], [0, 1, 0, 0], [2, 1, 1, 0], [-3, 0, 0, 1]])
U = np.array([[1, -1, 0, 1], [0, 1, 4, 0], [0, 0, -4, -4], [0, 0, 0, 2]])
b = np.array([[1],[-7],[-5],[1]])

print(f"A =\n {A}")
print(f"L =\n {L}")
print(f"U =\n {U}")

print(f"\nA == LU --> {np.array_equal(A,L @ U)}")
print(f"Ax = b  -->  x = {np.transpose(np.linalg.solve(A,b))}")
```

Dale las gracias y un poco de amor a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:
naD GarRaz Ale S.

Ejercicio 3. Escribir funciones de `Python` que calculen la solución de un sistema:

(a) $Ly = b$, siendo L triangular inferior.

(b) $Ux = y$, siendo U triangular inferior.

... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicio 4. Escribir funciones de `Python` que realicen las siguientes tareas:

(a) Calcular la descomposición LU de una matriz dada A, asumiendo que no es necesario realizar pivoteos.

(b) Resolver un sistema $Ax = b$, utilizando la función del ítem anterior y las del ejercicio 3. Aplicar esta función para resolver el ítem (c) del ejercicio 2.

(a) El siguiente *snippet* es en gran parte código para generar la matriz y después del cálculo de la triangulación formar las matrices L y U.

Si hacés un `copy paste` de este código debería funcionar lo más bien

```
"""
Eliminacion Gausianna
"""

import numpy as np


def elim_gaussiana(A):
    m = A.shape[0]
    n = A.shape[1]
    Ac = A.copy()

    if m != n:
        print("Matriz no cuadrada")
        return


    for i in range(0, n - 1):
        divisor = Ac[i][i]
        for j in range(i, n - 1):
            coef = Ac[j + 1][i] / divisor
            Ac[j + 1][i:] = np.subtract(Ac[j + 1][i:], coef * Ac[i][i:])
            Ac[j + 1][i] = coef


    L = np.tril(Ac, -1) + np.eye(A.shape[0])
    U = np.triu(Ac)

    return L, U

def main():
    n = 7
    B = np.eye(n) - np.tril(np.ones((n, n)), -1)
    B[:n, n - 1] = 1
    print(f"Matriz B = \n{B}\n")

    L, U = elim_gaussiana(B)
```

```
    print(f"Matriz L = \n{L}\n")
    print(f"Matriz U = \n{U}\n")
    print("B = LU? ", "Sí!" if np.allclose(np.linalg.norm(B - L @ U, 1), 0)
   else "No!")
    print("Norma infinito de U: ", np.max(np.sum(np.abs(U), axis=1)))


if __name__ == "__main__":
    main()
```

Ejercicio 5. Considerar la matriz: $A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{pmatrix}$.

(a) Probar que A no admite descomposición LU.

(b) Hallar la descomposición LU de PA para alguna matriz de permutación P adecuada.

(a) Si la matriz tiene descomposición LU, entonces debería poder escribir:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ l_{21} & 1 & 0 \\ l_{31} & l_{32} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ 0 & u_{22} & u_{23} \\ 0 & 0 & u_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} \\ l_{21}u_{11} & u_{22} & u_{23} \\ l_{31}u_{11} & l_{31}u_{12} + l_{32}u_{22} & l_{31}u_{13} + l_{32}u_{23} + u_{33} \end{pmatrix}$$

Tremenda matriz para que falle enseguida:

$$u_{11} = 0 \implies l_{21}u_{11} = 0 \neq 1 \implies \text{no existe } A = LU$$

(b) Quiero hacer $F_1 \leftrightarrow F_3$

$$PA = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}}_{P} \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 3 \end{pmatrix}}_{A} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Para hacer la factorización $PA = \tilde{A} = LU$ calculo LU como siempre para una matriz $\tilde{A}$:

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad M_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$$

Calculo L con las inversas de las matrices de triangulación:

$$M_1^{-1} \cdot M_2^{-1} = L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix}$$

Por lo tanto para comprobar:

$$\tilde{A} = PA = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}}_{L} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 5 \end{pmatrix}}_{U} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 3 \\ 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$$

Dale las gracias y un poco de amor ❤ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:
♉ naD GarRaz

Ejercicio 6. ... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicio 7. ... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicio 8. ... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicio 9. Considerar la matriz

$$\begin{pmatrix} 4 & 2 & -2 \\ 2 & 5 & 5 \\ -2 & 5 & 11 \end{pmatrix}$$

Mostrar que es definida positiva y calcular su descomposición de Cholesky.

según la definición de matriz definida positiva:

$$\boldsymbol{x}^t \begin{pmatrix} 4 & 2 & -2 \\ 2 & 5 & 5 \\ -2 & 5 & 11 \end{pmatrix} \boldsymbol{x} = 4x^2 - 4xz + 5y^2 + 10yz + 11z^2 \overset{!!}{=} (4x^2 - 4xz + z^2) + 5(y^2 + 2yz + z^2) + 5z^2$$
$$= 5z^2 + 5(y+z)^2 + (2x-z)^2 > 0$$

La matriz cumple la defición de *matriz definida positiva* $\forall \boldsymbol{x} \neq \boldsymbol{0} \in \mathbb{R}^3$. Sí, oka, hacer eso es una locura, más fácil es hacer lo que sigue y mirar los elementos de la matriz D:
Hay un teorema que dice algo así:

Sea $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ una matriz simétrica y definida positiva si y solo sí existe $L \in \mathbb{R}^{n\times n}$ triangular inferior con diagonal positiva tal que $A = LL^t$.

Arranco como buscando la descomposición LU:

$$\begin{pmatrix} 4 & 2 & -2 \\ 2 & 5 & 5 \\ -2 & 5 & 11 \end{pmatrix} \xrightarrow[F_3+\frac{1}{2}F_1]{F_2-\frac{1}{2}F_1} \begin{pmatrix} 4 & 2 & -2 \\ 0 & 4 & 6 \\ 0 & 6 & 10 \end{pmatrix} \xrightarrow{F_3-\frac{3}{2}F_2} \begin{pmatrix} 4 & 2 & -2 \\ 0 & 4 & 6 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = U$$

¡Sí! Ver los valores diagonales de U alcanza para ver que la matriz era efectivamente definida positiva. ¿Pero quién puede quitarnos el placer de haberlo comprobado de ambas formas?

Y ahora me formo la $\tilde{L}$ a partir de la *eliminación gaussiana:*

$$\tilde{L} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{3}{2} & 1 \end{pmatrix}$$

Con esto ya casi estamos:

$$A = \tilde{L}U = \tilde{L}D\tilde{L}^t = \tilde{L}\sqrt{D}\sqrt{D}\tilde{L}^t = \tilde{L}\sqrt{D}(\tilde{L}\sqrt{D})^t = LL^t \text{ con } L = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ -1 & 3 & 1 \end{pmatrix}$$

Pequeña verificación:

```python
import numpy as np

L_tilde = np.array([[1,0,0],[0.5,1,0],[-.5,
      1.5, 1]])
U = np.array([[4,2,-2],[0,4,6],[0, 0, 1]])

print(f"L_tilde U=\n{L_tilde@U}")
#     [ 4 2 -2]
#   = [ 2 5  5]
#     [-2 5 11]
```

```python
import numpy as np

L_tilde = np.array([[1,0,0],[0.5,1,0],[-.5,
      1.5, 1]])
D = np.array([[4,0,0],[0,4,0],[0, 0, 1]])

print(f"D L_tilde_traspuesta=\n{D@np.
      transpose(L_tilde)}")
#    [4 2 -2]
# =  [0 4 6]
#    [0 0 1]
```

```python
import numpy as np

L_tilde = np.array([[1,0,0],[0.5,1,0],[-.5,
      1.5, 1]])
D_sqrt = np.array([[2,0,0],[0,2,0],[0, 0,
      1]])
L_chole = L_tilde @ D_sqrt

print(f"A=LL_traspuesta=\n{L_chole@np.
      transpose(L_chole)}")
#     [4 2 -2]
# = [2 5  5]
#    [-2 5 11]
```

Dale las gracias y un poco de amor ♥ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:
naD GarRaz

Ejercicio 10. Sea $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ una matriz simétrica. Probar que A es definida positiva si y solo si existe un conjunto de vectores linealmente indepedientes $\{\boldsymbol{x}_1, \dots, \boldsymbol{x}_n\} \subseteq \mathbb{R}^n$ tal que $a_{ij} = \boldsymbol{x}_i^t \boldsymbol{x}_j$

($\Rightarrow$) Si A es una matriz simétrica y definida positiva va a admitir la descomposición de Cholesky (mirá acá).

$$A \overset{A=A^t}{\underset{A \text{ def. pos.}}{\Longleftrightarrow}} A = \underset{\text{la de LU}}{\underset{\downarrow}{\tilde{L}}}\overset{d_{ij}>0}{\overset{\uparrow}{D}}\tilde{L}^t \Leftrightarrow A = \tilde{L}\sqrt{D}\sqrt{D}\tilde{L}^t \Leftrightarrow A = LL^t \overset{\times}{\underset{\boldsymbol{x}\neq\boldsymbol{0}}{\Longleftrightarrow}} \begin{array}{rcl} 0 < \boldsymbol{x}^t A\boldsymbol{x} = \boldsymbol{x}^t LL^t\boldsymbol{x} & = & (L^t\cdot\boldsymbol{x})^t(L^t\boldsymbol{x}) \\ & = & \boldsymbol{y}^t\boldsymbol{y} \end{array}$$

Ahora esos $\boldsymbol{y}$ tienen que ser *linealmente independientes*, más fácil, tengo que encontrar un solo conjunto:

$$\boldsymbol{y} = L^t\boldsymbol{x} \overset{\text{elijo}}{\Longrightarrow} \{x_1, \dots, x_n\} = \{e_1, \dots, e_n\} \Longrightarrow \begin{cases} \boldsymbol{y}_1 = L^t e_1 = \text{Col}_1(L^t) \\ \qquad\vdots \\ \boldsymbol{y}_n = L^t e_n = \text{Col}_n(L^t) \end{cases}$$

La matriz L es triangular inferior $\begin{pmatrix} \diagdown & 0 \\ a_{ij} & \end{pmatrix}$, con unos en la diagonal por lo que sus columnas son mega *linealmente independientes*. Y dado que

$$\boldsymbol{x}_i^t A\boldsymbol{x}_j = \boldsymbol{e}_i^t A\boldsymbol{e}_j \overset{!}{=} a_{ij} = \boldsymbol{y}_i^t\boldsymbol{y}_j$$

tenemos que el conjunto que verifica lo pedido:

$$\boxed{\{\text{Col}_1(L^t), \dots, \text{Col}_n(L^t)\} \subseteq \mathbb{R}^n}$$

($\Leftarrow$) La hipótesis ahora me dice que tengo vectores *linealmente independientes* y además que con esos vectores me formo la matriz A. Es decir que $A = X^t X$, con X:

$$X = \left(\boldsymbol{x}_1 \middle| \cdots \middle| \boldsymbol{x}_n\right) \Longrightarrow A = X^t X \overset{\times}{\underset{\boldsymbol{y}\neq\boldsymbol{0}}{\Longleftrightarrow}} \begin{array}{l} \boldsymbol{y}^t A\boldsymbol{y} = \boldsymbol{y}^t X^t X\boldsymbol{y} \\ \Leftrightarrow \quad \boldsymbol{y}^t A\boldsymbol{y} = (X\boldsymbol{y})^t X\boldsymbol{y} = \|X\boldsymbol{y}\|_2^2 > 0 \end{array}$$

Queda demostrado ya que:

$$\boxed{\begin{array}{c} A = X^t X \overset{\text{transpongo}}{\Longrightarrow} A^t = (X^t X)^t = X^t X = A \\ \text{y} \\ \boldsymbol{y}^t A\boldsymbol{y} > 0 \;\; \forall \boldsymbol{y} \neq \boldsymbol{0} \in \mathbb{R}^n \overset{\text{def}}{\Longleftrightarrow} \text{A es definida positiva} \end{array}}$$

Dale las gracias y un poco de amor ♥ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:
naD GarRaz

Ejercicio 11. Sean las matrices $A, B \in \mathbb{R}^{n\times n}$. Demostrar que A es simétrica definida positiva y B es no singular si y solo si BAB^t es simétrica definida positiva.

Muestro una doble implicación:

($\Rightarrow$) A es definida positiva: $\forall x \in \mathbb{R}^n$ y $x \neq 0$, entonces $x^t A x > 0$. Y B es no singular, entonces $\det(B) \neq 0$.

$$x^t A x > 0 \Leftrightarrow x^t B^{-1} B A B^t (B^t)^{-1} x > 0 \overset{!}{\Leftrightarrow} ((B^t)^{-1}x)^t BAB^t((B^t)^{-1}x) > 0 \Leftrightarrow \boxed{y^t BAB^t y > 0} \text{ con } y \neq 0$$

Dado que B es inversible sé que $(B^t)^{-1} \neq 0$.
No sé si es necesario mostrar esto o no, pero:

$$(BAB^t)^t = (AB^t)^t B^t = BA^t B^t \overset{!}{==} BAB^t =$$

($\Leftarrow$) Una propiedad de las matrices simétricas definidas positivas es que son inversibles, su definición implica que $\text{Nu} = \{0\}$, así que su determinante es distinto de 0. En un producto matricial:

$$0 \neq \det(BAB^t) = \det(B)\cdot\det(A)\cdot\det(B^t) = (\det(B))^2\cdot\det(A) \implies \det(A) \neq 0 \quad \text{y} \quad \underbrace{\det(B) \neq 0}_{B \text{ no singular}}$$

Para demostrar que A es definida positiva se puede recorrer el camino en reversa que se hizo en ($\Rightarrow$) ahora que se sabe que $\det(B) \neq 0$. Para x e $y \neq 0$, se tiene que $(B^t)^{-1}x = y$ ★[1] entonces por hipótesis:

$$\underset{\text{HIP}}{\underset{\downarrow}{y^t BAB^t y > 0}} \overset{★^1}{\Longleftrightarrow} ((B^t)^{-1}x)^t BAB^t((B^t)^{-1}x) > 0 \Leftrightarrow x^t B^{-1}BAB^t(B^t)^{-1}x > 0 \Leftrightarrow \boxed{x^t A x > 0} \text{ con } x \neq 0$$

`Dale las gracias y un poco de amor ♥ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:`
`♉ naD GarRaz`

Ejercicio 12. Sea $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ tal que $\|A\|_2 < 1$, siendo $\|\cdot\|_2$ la norma matricial inducida por la norma 2 vectorial.

(a) Probar que $I - A^t A$ es simétrica definida positiva.

(b) Probar que la matriz $\begin{pmatrix} I & A \\ A^t & I \end{pmatrix}$ es simétrica definida positiva.

(a) *Para la simetría:*
Transpongo y cruzo los dedos para que quede igual:

$$(I - A^t A)^t \underset{\text{linealidad en la trasposición}}{\underset{\downarrow}{=}} I^t - (A^t A)^t = I - A^t A$$

Sobre la linealidad de la transposición:

$$[A+B]_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \xrightarrow{\text{transpongo}} [A+B]^t_{ij} = [A+B]_{ji} = a_{ji} + b_{ji}$$

Es simétrica.

Para ver si es definida positiva:
Intentamos con la definición de *matriz definida positiva* y vemos que sale:

$$I - A^t A \underset{\boldsymbol{x}\neq \boldsymbol{0}}{\overset{\times}{\Longleftrightarrow}} \boldsymbol{x}^t(I - A^t A)\boldsymbol{x} = \|\boldsymbol{x}\|_2^2 - \boldsymbol{x}^t A^t A \boldsymbol{x} = \|\boldsymbol{x}\|_2^2 - \boldsymbol{x}^t A^t A \boldsymbol{x} = \|\boldsymbol{x}\|_2^2 - \|A\boldsymbol{x}\|_2^2$$

$$\overset{!!}{=} \|\boldsymbol{x}\|_2^2 \left(1 - \frac{\|A\boldsymbol{x}\|_2^2}{\|\boldsymbol{x}\|_2^2}\right) \quad ★^1$$

Y por la definición de la norma inducida:

$$\|A\|_2 = \max_{\boldsymbol{x}\neq\boldsymbol{0}} \frac{\|A\boldsymbol{x}\|_2}{\|\boldsymbol{x}\|_2} \underset{\text{enunciado}}{\underset{\downarrow}{<}} 1 \ \forall \boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^n$$

queda entonces ★[1] $\overbrace{\|\boldsymbol{x}\|_2^2}^{>0} \underbrace{(1 - \overbrace{\frac{\|A\boldsymbol{x}\|_2^2}{\|\boldsymbol{x}\|_2^2}}^{<1})}_{>0} > 0$:

$$\boxed{\boldsymbol{x}^t(I - A^tA)\boldsymbol{x} > 0}$$

(b) *Para la simetría:* Creo que esto se ve a simple vista:

$$\begin{pmatrix} I & A \\ A^t & I \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I & A \\ A^t & I \end{pmatrix}$$

Para ver si es definida positiva: Acá debería usar *Cholesky* resumencito acá click click

> $A = \tilde{L}D\tilde{L}^t$, es definida positiva si y solo si D lo es. Como D es diagonal, solo es cuestión de ver que $[D]_{ii} > 0$.

Acá surge naturalemente la pregunta de ¿Cómo 💩 hago la descomposición?.

$$\begin{pmatrix} I & A \\ A^t & I \end{pmatrix} = \overbrace{\begin{pmatrix} I & 0 \\ M & B \end{pmatrix}}^{L} \overbrace{\begin{pmatrix} I & M^t \\ 0 & B^t \end{pmatrix}}^{L^t} = \begin{pmatrix} I & M^t \\ M & MM^t + BB^t \end{pmatrix}$$

$$\overset{!}{\Leftrightarrow} \begin{cases} A &= M^t \\ A^t &= M \\ I &= MM^t + BB^t \Leftrightarrow I - A^tA = BB^t \end{cases}$$

Y en un giro totalmente inesperado, al menos por mí, quedó que esa expresión del ítem (a). BB^t es una matriz simétrica y definida positiva, por lo tanto tiene factorización de Cholesky,

$$C = BB^t = \tilde{B}\sqrt{D}\sqrt{D}\tilde{B}^t$$

sé que existe esa matriz diagonal D que tiene sus elementos positivos.

Por lo tanto esto demuestra que efectivamente las matrices L y L^t son las matrices de la descomposición de Cholesky de la matriz del enunciado:

$$C = \begin{pmatrix} I & A \\ A^t & I \end{pmatrix} = LL^t$$

Como la matriz C admite descomposición de *Chole*, es simétrica definida positiva.

Ejercicio 13. Sea $B = \{v_1, \dots, v_n\}$ una base de K^n ($K = \mathbb{R}$ o $\mathbb{C}$)

(a) Probar que si B es ortogonal, entonces

$$\boldsymbol{C}_{EB} = \begin{pmatrix} \cdots & \frac{v_1^*}{\|v_1\|_2^2} & \cdots \\ \cdots & \frac{v_2^*}{\|v_2\|_2^2} & \cdots \\ & \vdots & \\ \cdots & \frac{v_n^*}{\|v_n\|_2^2} & \cdots \end{pmatrix}$$

(b) Probar que si B es ortonormal, entonces $C_{EB} = C_{BE}^*$.

(c) Concluir que si B es ortonormal, entonces las coordenadas de un vector v en base B son:

$$(v)_B = (v_1^* v, v_2^* v, \dots, v_n^* v).$$

(d) Calcular $(v)_B$ siendo $v = (1, -i, 3)$, $B = \left\{ (\frac{i}{\sqrt{2}}, \frac{i}{\sqrt{2}}, 0), (-\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0), (0, 0, i) \right\}$.

(a) Si B es una *base ortogonal*, una BOG, entonces sus vectores cumplen que:

$$\boldsymbol{v}_i \cdot \boldsymbol{v}_j = \begin{cases} \|\boldsymbol{v}_i\|_2^2 & \text{si} \quad i = j \\ 0 & \text{si} \quad i \neq j \end{cases}$$

Para calcular la matriz de cambio de base C_{EB} hay que calcular *las coordenadas de los vectores canónicos en la base B*: Ojo que esa llave son ecuaciones vectoriales, todo lo que está en **negrita**, **bold** es vector:

$$\begin{cases} \boldsymbol{e}_1 &=& c_{11}\boldsymbol{v}_1 + c_{12}\boldsymbol{v}_2 + \cdots + c_{n1}\boldsymbol{v}_n \overset{\times \to}{\underset{!\boldsymbol{v}_1^*}{\Longleftrightarrow}} \underbrace{v_1^*}_{\in K} = c_{11}\|\boldsymbol{v}_1\|_2^2 \Leftrightarrow c_{11} = \frac{v_1^*}{\|\boldsymbol{v}_1\|_2^2} \\ \boldsymbol{e}_2 &=& c_{21}\boldsymbol{v}_1 + c_{22}\boldsymbol{v}_2 + \cdots + c_{2n}\boldsymbol{v}_n \overset{\times \to}{\underset{!\boldsymbol{v}_1^*}{\Longleftrightarrow}} v_1^* = c_{21}\|\boldsymbol{v}_2\|_2^2 \Leftrightarrow c_{21} = \frac{v_1^*}{\|\boldsymbol{v}_1\|_2^2} \\ &\vdots& \\ \boldsymbol{e}_n &=& c_{n1}\boldsymbol{v}_1 + c_{n2}\boldsymbol{v}_2 + \cdots + c_{nn}\boldsymbol{v}_n \overset{\times \to}{\underset{!\boldsymbol{v}_1^*}{\Longleftrightarrow}} v_1^* = c_{n1}\|\boldsymbol{v}_n\|_2^2 \Leftrightarrow c_{n1} = \frac{v_1^*}{\|v_1\|_2^2} \end{cases}$$

Esos coeficientes c_{ij} me forman la primera fila, c_{ij} de la matriz C_{EB}:

$$(c_{11}, c_{21}, \dots, c_{n1}) = \left(\frac{v_1^*}{\|\boldsymbol{v}_1\|_2^2}, \frac{v_1^*}{\|\boldsymbol{v}_1\|_2^2}, \cdots, \frac{v_1^*}{\|\boldsymbol{v}_1\|_2^2} \right) \overset{!}{=} \frac{v_1^*}{\|\boldsymbol{v}_1\|_2^2}$$

Cuando quiera calcular la fila j-ésima:

$$(c_{1j}, c_{2j}, \dots, c_{nj}) = \left(\frac{v_j^*}{\|\boldsymbol{v}_j\|_2^2}, \frac{v_j^*}{\|\boldsymbol{v}_j\|_2^2}, \cdots, \frac{v_j^*}{\|\boldsymbol{v}_j\|_2^2} \right) \overset{!}{=} \frac{v_j^*}{\|\boldsymbol{v}_j\|_2^2}$$

Y así me armo la matriz C_{EB} generando fila por fila con este método.

(b) Ahora B es una BON, así que:

$$\boldsymbol{v}_i \cdot \boldsymbol{v}_j = \begin{cases} \|\boldsymbol{v}_i\|_2^2 & \text{si} \quad i = j \\ 0 & \text{si} \quad i \neq j \end{cases}$$

Y con esto la matriz del ítem (a) queda más simple como:

$$\boldsymbol{C}_{EB} = \begin{pmatrix} \hline \boldsymbol{v}_1^* \\ \hline \boldsymbol{v}_2^* \\ \hline \vdots \\ \hline \boldsymbol{v}_n^* \\ \hline \end{pmatrix} \star^1$$

La matriz de cambio de base C_{EB} toma *vectores en coordenadas de E* y da el resultado en *coordenadas de la base B*. Construir el cambio de base C_{BE}, es inmediato el cálculo de coordenadas haciendo el sistema como en el ítem (a) ¡Quedan los vectores de la base B conjugados como columnas de la matriz!

$$\boldsymbol{C}_{BE} = \left(\boldsymbol{v}_1 \middle| \boldsymbol{v}_2 \middle| \dots \middle| \boldsymbol{v}_n\right) \xrightarrow[\implies *]{\text{transpongo y conjugo}} \boxed{\boldsymbol{C}^*_{BE} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{v}_1^* \\ \hline \boldsymbol{v}_2^* \\ \hline \vdots \\ \hline \boldsymbol{v}_n^* \end{pmatrix} \overset{\star^1}{=} \boldsymbol{C}_{EB}}$$

Eso funciona así porque:

$$C^*_{BE} C_{EB} = I$$

(c) Sale con el sistemita del ítem (a) nuevamente:

$$\boldsymbol{v} = c_1 \boldsymbol{v}_1 + c_2 \boldsymbol{v}_2 + \dots + c_n \boldsymbol{v}_n \underset{!\boldsymbol{v}_j^*}{\overset{\times \to}{\Longleftrightarrow}} \boldsymbol{v}_j^* \cdot \boldsymbol{v} = c_j \underbrace{\|\boldsymbol{v}_1\|_2^2}_{=1} \Leftrightarrow \boxed{c_j = \boldsymbol{v}_j^* \cdot \boldsymbol{v}}$$

(d) Pajilla ☺. B es una BON. Usando el ítem (c):

$$(\boldsymbol{v})_B = (\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{v}_1^*, \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{v}_2^*, \boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{v}_3^*) \overset{!}{=} (0, -\frac{2}{\sqrt{2}} i, 3i)$$

`Dale las gracias y un poco de amor ♥ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:`
`naD GarRaz`

Ejercicio 14. ... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicio 15. En cada uno de los siguientes casos construir un proyector $f : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$ que cumpla:

(i) $\text{Im}(f) = \{(x_1, x_2, x_3)/x_1 + x_2 + x_3 = 0\}$

(ii) $\text{Nu}(f) = \{(x_1, x_2, x_3)/x_1 + x_2 + x_3 = 0\}$

(iii) $\text{Nu}(f) = \{(x_1, x_2, x_3)/3x_1 - x_3 = 0\}$ e $\text{Im}(f) = \langle(1, 1, 1)\rangle$

Acá un poco de cosas de proyectores, click, click

(i) Encuentro un *sistema de generadores* de $\text{Im}(f) = \langle(-1, 1, 0), (-1, 0, 1)\rangle$, y dado que el subespacio $\text{Nu}(f) \oplus \text{Im}(f)$, por ejemplo $\text{Nu}(f) = \langle(1, 1, 1)\rangle$.

Con esa data defino el proyector:

$$\begin{cases} f(-1, 1, 0) &= (-1, 1, 0) \\ f(-1, 0, 1) &= (-1, 0, 1) \\ f(1, 1, 1) &= (0, 0, 0) \end{cases}$$

Si tomo como base $B = \{(-1, 1, 0), (-1, 0, 1), (1, 1, 1)\}$:

$$[f]_{BE} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Busco f, para lo cual multiplico por:

$$[C]_{BE} = \begin{pmatrix} -1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 \end{pmatrix} \xrightarrow[\text{inversa}]{\text{calculo la}} [C]_{EB} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \end{pmatrix}$$

Por lo tanto:

$$[f]_{EE} = [f]_{BE} \cdot [C]_{EB} = \begin{pmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{pmatrix}$$

$$\boxed{f(x,y,z) = \frac{1}{3}(2x - y - z, -x + 2y - z, -x - y + 2z)}$$

(ii) Usando lo mismo de antes pero resuelvo de otra forma: Ahora tengo que una base del $\text{Nu}(f)$:

$$B_{\text{Nu}(f)} = \{(-1,1,0), (-1,0,1)\}$$

Completo esa base teniendo en cuenta que el vector que agrego va a ser un elemento de la $\text{Im}(f)$:

$$B_V = \{\underbrace{(-1,1,0), (-1,0,1)}_{\in \text{Nu}(f)}, \underbrace{(0,0,1)}_{\in \text{Im}(f)}\} = \mathbb{R}^3$$

Importante que $\text{Nu}(f) \cap \text{Im}(f) = 0$, en $\mathbb{R}^3$ parece obvio, pero ya en $\mathbb{R}^4$ es más engañoso.

$$\star^1 \left\{ \begin{array}{rcl} f(-1,1,0) & = & (0,0,0) \\ f(-1,0,1) & = & (0,0,0) \\ f(0,0,1) & = & (0,0,1) \end{array} \right.$$

Voy a encontrar la expresión funcional de este proyector. La idea es escribir a esa base, B_V, en función de (x_1, x_2, x_3) para luego transformarla usando la propiedades de las viejas y queridas *transformaciones lineales*:

$$(x_1, x_2, x_3) \overset{\star^2}{=} a \cdot (-1,1,0) + b(-1,0,1) + c(0,0,1) \xrightarrow[\text{forma matricial}]{\text{sistema en}} \left(\begin{array}{ccc|c} -1 & -1 & 0 & x_1 \\ 1 & 0 & 0 & x_2 \\ 0 & 1 & 1 & x_3 \end{array}\right)$$

Resolviendo ese sistema obtengo:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = x_2 \\ b = -x_1 - x_2 \\ c = x_1 + x_2 + x_3 \end{array} \right. ,$$

es decir que $\star^2$ es:

$$(x_1, x_2, x_3) = x_2 \cdot (-1,1,0) + (-x_1 - x_2) \cdot (-1,0,1) + (x_1 + x_2 + x_3) \cdot (0,0,1)$$

Aplicando f:

$$\begin{array}{rcl} f(x_1,x_2,x_3) & = & f\big(x_2 \cdot (-1,1,0) + (-x_1 - x_2) \cdot (-1,0,1) + (x_1 + x_2 + x_3) \cdot (0,0,1)\big) \\ f(x_1,x_2,x_3) & = & x_2 \cdot f(-1,1,0) + (-x_1 - x_2) \cdot f(-1,0,1) + (x_1 + x_2 + x_3) \cdot f(0,0,1) \\ f(x_1,x_2,x_3) & \overset{\star^1}{=} & x_2 \cdot (0,0,0) + (-x_1 - x_2) \cdot (0,0,0) + (x_1 + x_2 + x_3) \cdot (0,0,1) \\ f(x_1,x_2,x_3) & = & (0, 0, x_1 + x_2 + x_3) \end{array}$$

Si por alguna razón quiero esto en forma matricial, transformo los canónicos y pongo los transformados como columnas:

$$[f]_{EE} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\left\{ \begin{array}{rcl} f(1,0,0) & = & (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}) \\ f(0,1,0) & = & (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}) \\ f(0,0,1) & = & (\frac{1}{3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3}) \end{array} \right.$$

$$\boxed{f(x,y,z) = \frac{1}{3}(x + y + z, x + y + z, x + y + z)}$$

(iii) Ahora $\text{Nu}(f) = \langle (3,0,1),(0,1,0) \rangle$

$$\begin{cases} f(3,0,1) & = & (0,0,0) \\ f(0,1,0) & = & (0,0,0) \\ f(1,1,1) & = & (1,1,1) \end{cases}$$

Aprovechando que hay muchos ceros en la matriz, puedo encontrar los transformados de los *vectores canónicos* con un par de cuentas usando nuevamente propiedades de *transformaciones lineales*:

$$\begin{cases} f(3,0,1) & = & (0,0,0) \\ f(0,1,0) & = & (0,0,0) \\ f(1,1,1) & = & (1,1,1) \end{cases} \xrightarrow{3F_3 - F_1 \to F_3} \begin{cases} f(3,0,1) & = & (0,0,0) \\ f(0,1,0) & = & (0,0,0) \\ f(0,3,2) & = & (3,3,3) \end{cases} \xrightarrow{F_3 - 3F_2 \to F_3} \begin{cases} f(3,0,1) & = & (0,0,0) \\ f(0,1,0) & = & (0,0,0) \\ f(0,0,2) & = & (3,3,3) \end{cases}$$

$$\xrightarrow{2F_1 - 3F_3 \to F_1} \begin{cases} f(6,0,0) & = & (-3,-3,-3) \\ f(0,1,0) & = & (0,0,0) \\ f(0,0,2) & = & (3,3,3) \end{cases}$$

$$\xrightarrow[\frac{1}{2}F_3 \to F_3]{\frac{1}{6}F_1 \to F_1} \begin{cases} f(1,0,0) & = & (-\frac{1}{2},-\frac{1}{2},-\frac{1}{2}) \\ f(0,1,0) & = & (0,0,0) \\ f(0,0,1) & = & (\frac{3}{2},\frac{3}{2},\frac{3}{2}) \end{cases}$$

En forma matricial quedaría:

$$[f]_{EE} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & 0 & \frac{3}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{3}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{3}{2} \end{pmatrix}$$

Multiplicando a $[f]_{EE}$ por (x_1, x_2, x_3) se obtiene la forma funcional:

$$[f]_{EE} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}x_1 + \frac{3}{2}x_3 \\ -\frac{1}{2}x_1 + \frac{3}{2}x_3 \\ -\frac{1}{2}x_1 + \frac{3}{2}x_3 \end{pmatrix}$$

A mí me gusta escrito así:

$$\boxed{f(x_1,x_2,x_3) = \frac{1}{2} \cdot (-x_1 + 3x_3, -x_1 + 3x_3, -x_1 + 3x_3)}$$

Dale las gracias y un poco de amor ♥ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:
naD GarRaz

Ejercicio 16.

(a) Sea $B = \{(1,-1,0),(0,1,-1),(0,0,1)\}$ base de $\mathbb{R}^3$ y sea $f : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$ la transformación lineal tal que:

$$f(1,-1,0) = (1,-1,0), \ f(0,1,-1) = (0,1,-1), \ f(0,0,1) = (0,0,0).$$

Calcular $[f]_B$ y comprobar que f es un proyector.

(b) Construir un proyector $f : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$ tal que $\text{Nu}(f) = \langle (1,1,1) \rangle$ e $\text{Im}(f) = \{x \in \mathbb{R}^3 / x_1 + x_2 - 3x_3 = 0\}$. ¿Es f una proyección ortogonal?

Acá te dejo resumencito de proyector, click, click

(a) Para calcular $[f]_B$ o $[f]_{BB}$ que me parece más descriptivo:

$$[f]_{BE} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Para calcular $[f]_{BB}$ hay que calcular las coordenadas en base B de los transformados de la base B.

$$\begin{cases} (f(1,-1,0))_B & = & (1,-1,0)_B & \overset{!}{=} & (1,0,0) \\ (f(0,1,-1))_B & = & (0,1,-1)_B & \overset{!}{=} & (0,1,0) \\ (f(0,0,1))_B & = & (0,0,0)_B & \overset{!}{=} & (0,0,0) \end{cases}.$$

Salen a ojo esas coordenadas, porque son los casi mismos vectores que la base B. Si no lo ves, planteá las combinetas lineales para calcular las coordenadas y vas a llegar a lo mismo.

$$[f]_{BB} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Si f es un proyector, lo va a ser en cualquier base, voy con la definición: $f \circ f = f$

$$[f]_{BB} \circ [f]_{BB} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = [f]_{BB}$$

(b) De ese subespacio saco uno de los muchos sistemas de generadores para $\text{Im}(f)$:

$$\text{Im}(f) = \langle(-1, 1, 0), (-3, 0, 1)\rangle$$

Propongo un proyector f con la condición de que $\text{Nu}(f) = \langle(1, 1, 1)\rangle$:

$$\bigstar^1 \begin{cases} f(-1, 1, 0) &= (-1, 1, 0) \\ f(-3, 0, 1) &= (-3, 0, 1) \\ f(1, 1, 1) &= (0, 0, 0) \end{cases}$$

Las cuentas estas que voy a hacer no son necesarias para contestar, pero quiero ver que no me quede simétrico.

Ojo que eso definido en ★[1] sería algo como $[f]_{BE}$ con $B = \{(-1, 1, 0), (3, 0, 1), (1, 1, 1)\}$ para encontrar el proyector es su forma *más mejor*:

$$\begin{cases} f(-1, 1, 0) &= (-1, 1, 0) \\ f(3, 0, 1) &= (3, 0, 1) \\ f(1, 1, 1) &= (0, 0, 0) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} f(1, 0, 0) &= (\frac{4}{5}, -\frac{1}{5}, -\frac{1}{5}) \\ f(0, 1, 0) &= (-\frac{1}{5}, \frac{4}{5}, -\frac{1}{5}) \\ f(0, 0, 1) &= (-\frac{3}{5}, -\frac{3}{5}, \frac{2}{5}) \end{cases}$$

También se podría haber usado lo de la combinación lineal:

$$(x_1, x_2, x_3) = a(-1, -1, 0) + b(3, 0, 1) + c(1, 1, 1)$$

para luego transformarlo y llegar a la expresión funcional de f. Mirá el ejercicio **15.**(b)

El proyector en forma matricial en base E queda:

$$[f]_{EE} = \begin{pmatrix} \frac{4}{5} & -\frac{1}{5} & -\frac{3}{5} \\ -\frac{1}{5} & \frac{4}{5} & -\frac{3}{5} \\ -\frac{1}{5} & -\frac{1}{5} & \frac{2}{5} \end{pmatrix}$$

El proyector P no es *un proyector ortogonal*. Por un lado no se cumple que $\text{Nu}(P) \perp \text{Im}(P)$, dado que $\underbrace{(1, 1, 1)}_{\in \text{Nu}(P)} \cdot \underbrace{(3, 0, 1)}_{\in \text{Im}(P)} \neq 0$. Además la expresión matricial tampoco cumple $P = P^t$.

Se puede encontrar una base en la que el proyector sí va a ser simétrico. En este caso particular:

$$[f]_{BB} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

igual que en el ítem (a), pero si bien es simétrica la expresión matricial no se puede concluir en esta base que sea un *proyector ortogonal*, debería estar expresado en una *base ortonormal* para ver ese resultado.

Dale las gracias y un poco de amor ❤ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:
♉ naD GarRaz

Ejercicio 17. Sea $v \in \mathbb{C}^n$ un vector columna tal que $\|v\|_2 = 1$. Probar que:

(a) La transformación lineal definida por la matriz vv^* es la proyección ortogonal sobre $\langle v \rangle$.

(b) Si $\{v_1, \ldots, v_m\}$ es una base ortonormal del subespacio S, entonces $A = \sum_{i=1}^{m} v_i v_i^*$ es la proyección ortogonal sobre S.

(c) Si A es como en el ítem anterior, $I - A$ es la proyección ortogonal sobre $S^\perp$.

(d) Eligiendo $v \in \mathbb{R}^2$ tal que $\|v\|_2 = 1$, corroborar gráficamente en `Python` que $R = I - 2vv^*$ es la reflexión respecto de $\langle v \rangle^\perp$.

(a) Tenemos que:

$$\|v\|_2 = 1 \overset{\text{def}}{\Longleftrightarrow} v^* \cdot v \overset{\star^1}{=} 1$$

Un *proyector ortogonal sobre* $\langle v \rangle$, P *cumple*:

$$P \cdot v \overset{\text{def}}{=} v, \quad P \cdot v^\perp \overset{\text{def}}{=} 0, \quad P = P^* \quad \text{y} \quad \operatorname{Nu} P \perp \operatorname{Im} P$$

Entonces si esta *gaver* vv^* cumple eso, ganamos 💩:

$$\overbrace{vv^*}^{P} \cdot v \overset{!}{=} v(v^* \cdot v) \overset{\star^1}{=} v,$$

that was easy. Vamos a por la otra. Agarro algún $w \in \mathbb{C}^n$:

$$\begin{aligned} vv^* \cdot \underbrace{(Pw - w)}_{\perp v} = 0 \quad &\Leftrightarrow \quad vv^* \cdot Pw - vv^* \cdot w = 0 \\ &\overset{!}{\Leftrightarrow} \quad v(P^* v)^* w - vv^* w = 0 \\ &\overset{!!}{\Leftrightarrow} \quad v(Pv)^* w - vv^* w = 0 \\ &\overset{\text{def}}{\Longleftrightarrow} \quad vv^* w - vv^* w \overset{\checkmark}{=} 0 \end{aligned}$$

Me doy cuenta que podría haber probado que $(vv^*)^* = vv^*$ ¿Pero quien me quita lo bailado?:

(b) Si tengo una base del subespacio, entonces puedo escribir a un vector genérico $w \in S$ como una combineta de los vectores de la base:

$$w = \sum_{j=1}^{m} a_j v_j = a_1 v_1 + a_2 v_2 + \cdots + a_n v_n$$

Transformo teniendo en cuenta que $v_i^*(a_j v_j) = \begin{cases} a_i & \text{si} \quad i = j \\ 0 & \text{si} \quad i \neq j \end{cases}$, recordando que $\|v_i\|_2 = 1$:

$$Aw = \sum_{i=1}^{m} v_i v_i^* w = \sum_{i=1}^{m} a_i v_i = w \implies Aw = w$$

Me doy cuenta que podría haber probado que $A = A^*$ ¿Pero quien me quita lo bailado?:

$$A^* = \left(\sum_{i=1}^{m} v_i v_i^* \right)^* \overset{!}{=} \sum_{i=1}^{m} (v_i v_i^*)^* = \sum_{i=1}^{m} v_i v_i^* = A$$

(c) Medio que usé algo de esto en el ítem (a). Un *proyector ortogonal* sobre S, va a mandar todo elemento del *complemento ortogonal* de S, $S^\perp$ al 0.
Es decir, si $w \in S^\perp$:

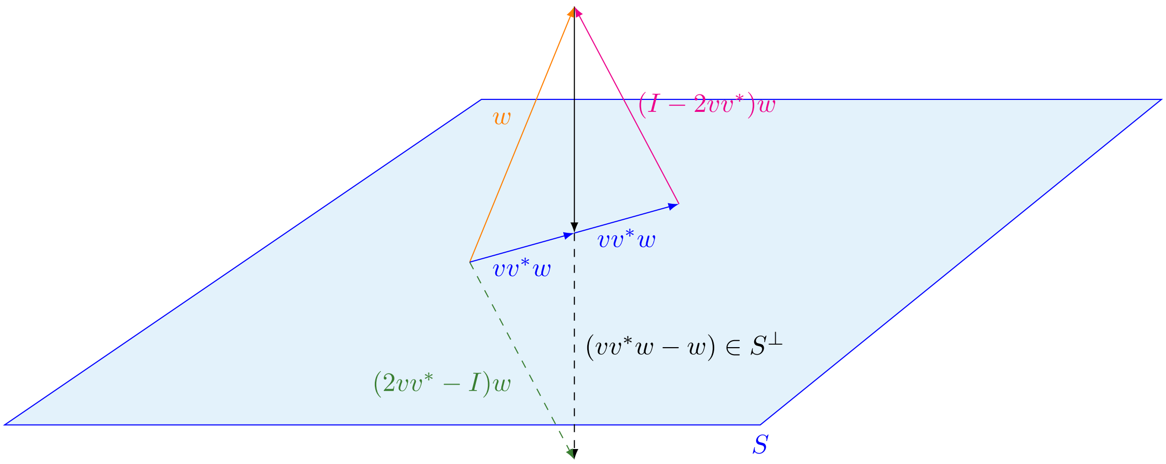
$$Aw = 0 \quad \text{y} \quad (I - A)w = w \implies A\underbrace{(I - A)w}_{w} = (A - A^2)w \overset{!}{=} (A - A)w = 0.$$

Podemos decir que $A(I - A)$ es el operador nulo.
En general para cualquier elemento v del *espacio vectorial* V: Puedo escribir $v = s + s^\perp$, una combineta única de elementos de S y $S^\perp$, ya que $S \oplus S^\perp$.

$$A(I - A)v = A(I - A)(s + s^\perp) = A(s + s^\perp - As - As^\perp) = As + As^\perp - As - A^2 s^\perp \overset{!}{=} 0$$

Los *proyectores ortogonales* cumplen que $\text{Nu}(P) \perp \text{Im}(P)$, donde la imagen es el S al que se proyecta y el núcleo es el $S^\perp$.

(d) Sí,lo sé, esto no es una implementación en `Python`.



Dale las gracias y un poco de amor a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:
naD GarRaz

Ejercicio 18. Sea $A = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$. Calcular la matriz de la proyección ortogonal sobre $\text{Im}(A)$.

Una proyección ortogonal P debe cumplir con que $\text{Im}(P) \perp \text{Nu}(P)$:

$$\text{Im}(P) = \{(1, 0, 1), (0, 1, 0)\} \quad \text{y} \quad \text{Nu}(P) = \{(-1, 0, 1)\}$$

Por lo tanto mi candidato a *proyector ortogonal*:

$$\begin{cases} P(1, 0, 1) = (1, 0, 1) \\ P(0, 1, 0) = (0, 1, 0) \\ P(-1, 0, 1) = (0, 0, 0) \end{cases}$$

Voy a buscar la expresión funcional del proyector:

$$(x_1, x_2, x_3) \overset{\star^1}{=} a \cdot (1, 0, 1) + b \cdot (0, 1, 0) + c \cdot (-1, 0, 1) \xrightarrow[\text{forma matricial}]{\text{resolver en}} \left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & -1 & x_1 \\ 0 & 1 & 0 & x_2 \\ 1 & 0 & 1 & x_3 \end{array}\right)$$

Eso queda:

$$\begin{cases} a = \frac{1}{2}x_1 + \frac{1}{2}x_3 \\ b = x_2 \\ c = \frac{1}{2}x_1 - \frac{1}{2}x_3 \end{cases} \xrightarrow[\text{y transformando}]{\text{reemplazando en } \star^1} P(x_1, x_2, x_3) = \left(\frac{1}{2}x_1 + \frac{1}{2}x_3, x_2, \frac{1}{2}x_1 + \frac{1}{2}x_3\right)$$

Transformo los canónicos para hallar P en forma matricial:

$$[P]_{EE} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

Quedó hermosamente simétrico, porque es un *proyector ortogonal* expresado en una *base ortonormal.*

`Dale las gracias y un poco de amor ♥ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:`
`♉ naD GarRaz`

Ejercicio 19. Sea $Q \in \mathbb{R}^{n\times n}$. Probar que son equivalentes:

(a) $Q^{-1} = Q^t$.

(b) Las columnas de Q forman un conjunto ortonormal.

(c) Las filas de Q forman un conjunto ortonormal.

(d) $\|Qx\|_2 = \|x\|_2$ para todo $x \in \mathbb{R}^n$.

Interpretar (d) geométricamente.
Sugerencia: Para demostrar la implicación ((d) $\implies$ (b)) usar que $x^t y = \frac{1}{4}(\|x+y\|_2^2 - \|x-y\|_2^2)$.

---

a) Quiero probar que:

$$\text{Si} \quad \underbrace{Q^{-1} = Q^t}_{\text{hipótesis}} \implies \underbrace{\text{las columnas de } Q \text{ forman un conjunto ortonormal}}_{\text{tesis}}$$

$$Q^{-1}\cdot Q = I \overset{\text{HIP}}{\iff} Q^t \cdot Q = I \overset{\text{zoom}}{\iff} \underbrace{\left(\begin{array}{c} \boldsymbol{q}_1^t \\ \hline \vdots \\ \hline \boldsymbol{q}_n^t \end{array}\right)\left(\begin{array}{c|c|c} \boldsymbol{q}_1 & \cdots & \boldsymbol{q}_n \end{array}\right)}_{\begin{pmatrix} \boldsymbol{q}_1^t\boldsymbol{q}_1 & \boldsymbol{q}_1^t\boldsymbol{q}_2 & \cdots & \boldsymbol{q}_1^t\boldsymbol{q}_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \boldsymbol{q}_n^t\boldsymbol{q}_1 & \boldsymbol{q}_n^t\boldsymbol{q}_2 & \cdots & \boldsymbol{q}_n^t\boldsymbol{q}_n \end{pmatrix}} = \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}$$

Estaría quedando que:

$$Q^t Q = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad i = j \\ 0 & \text{si} \quad i \neq j \end{cases} \implies \text{Col}(Q) = \{\boldsymbol{q}_1, \boldsymbol{q}_2, \cdots, \boldsymbol{q}_n\} \text{ es un conjunto ortonormal}$$

b) Quiero probar que:

$$\text{Si} \quad \underbrace{\text{Col}(Q) \text{ es un conjunto ortonormal}}_{\text{hipótesis}} \implies \underbrace{\text{Fila}(Q) \text{ es un conjunto ortonormal}}_{\text{tesis}}$$

Antes vi que si la columnas de Q forman un conjunto ortonormal, entonces $Q^tQ = I$.

$$I = Q^t \cdot Q \overset{!}{\Leftrightarrow} I = Q \cdot Q^t = \left(\begin{array}{c|c|c} \boldsymbol{q}_1 & \cdots & \boldsymbol{q}_n \end{array}\right)\left(\begin{array}{c} \boldsymbol{q}_1^t \\ \hline \vdots \\ \hline \boldsymbol{q}_n^t \end{array}\right) = \underbrace{\left(\begin{array}{c} \text{Fila}_1(Q)\cdot Q^t \\ \hline \vdots \\ \hline \text{Fila}_n(Q)\cdot Q^t \end{array}\right) = \left(\begin{array}{ccc} 1 & \cdots & 0 \\ \hline \vdots & \ddots & \vdots \\ \hline 0 & \cdots & 1 \end{array}\right)}_{\star^1}$$

En $\star^1$ está de un lado el producto de las filas de Q con la matriz Q^t que tiene como columnas a las filas de Q. Por lo tanto, para la primera fila, *el producto con todas las filas de* Q da $\boldsymbol{e}_1^t$, en general voy a tener:

$$\text{Fila}_i(Q)\cdot \text{Fila}_j(Q)^t = \begin{cases} 1 & \text{si} \quad i = j \\ 0 & \text{si} \quad i \neq j \end{cases}$$

c) Quiero probar que:

$$\underbrace{\text{Si Fila}(Q) \text{ es un conjunto ortonormal}}_{\text{hipótesis}} \implies \underbrace{\|Qx\|_2 = \|x\|_2 \quad \forall x \in \mathbb{R}^n}_{\text{tesis}}.$$

... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

d) ... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicio 20. Hallar la factorización QR de las siguientes matrices:

$$\text{a) } A = \begin{pmatrix} 0 & -4 \\ 0 & 0 \\ -5 & -2 \end{pmatrix}, \qquad \text{b) } A = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 4 & 5 \end{pmatrix}$$

Acá un poco de lore $A = QR$ click click

a) La matriz no es cuadrada. A la descomposición QR le chupa un huevo. ¡Gram-Schimdteo a Col(A)!

$$\text{Col}(A) = \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -4 \\ 0 \\ -2 \end{pmatrix} \right\} \longrightarrow \text{Col}(A)_{\text{BOG}} = \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -5 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\xrightarrow{\text{normalizo}} \text{Col}(A)_{\text{BON}} = \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{-5}{\|(0,0,-5)\|} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \frac{-4}{\|(0,0,-4)\|} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

$$\xrightarrow[\text{queda}]{\text{cocinado}} \text{Col}(A)_{\text{BON}} = \left\{ \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \right\}$$

Listo, ahora expreso a A como:

$$A = \underbrace{\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 0 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix}}_{Q} \cdot \underbrace{\begin{pmatrix} 5 & -2 \\ 0 & 4 \end{pmatrix}}_{R}$$

Fijate que:

$$A = QR \xrightarrow[\text{M.A.M.}]{\times Q^*} Q^*A = \underbrace{Q^*Q}_{I \in \mathbb{R}^{2\times 2}} R = \overset{\substack{\text{triangular}\\ \text{superior} \\ \uparrow}}{R} \Leftrightarrow Q^*A = R$$

La Q^* te triangula la A.

b) Cuando te ponen una matriz de 2×2, sabés que las cuentas van a ser un cosa horrible:

$$\text{Col}(A) = \left\{ \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 5 \end{pmatrix} \right\} \longrightarrow \text{Col}(A)_{\text{BOG}} = \left\{ \begin{pmatrix} 3 \\ 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{28}{25} \\ \frac{21}{25} \end{pmatrix} \right\}$$

$$\xrightarrow{\text{normalizo}} \text{Col}(A)_{\text{BON}} = \left\{ \begin{pmatrix} \frac{3}{5} \\ \frac{4}{5} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{4}{5} \\ \frac{3}{5} \end{pmatrix} \right\}$$ ¡ quedó hermosa!

Listo expreso a A como:

$$A = \underbrace{\begin{pmatrix} \frac{3}{5} & -\frac{4}{5} \\ \frac{4}{5} & \frac{3}{5} \end{pmatrix}}_{Q} \underbrace{\begin{pmatrix} 5 & \frac{26}{5} \\ 0 & \frac{7}{5} \end{pmatrix}}_{R}$$

Dale las gracias y un poco de amor a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:
naD GarRaz

Ejercicio 21.
... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicio 22.
... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicio 23.
... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicio 24.
... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

Ejercicios de parciales:

1. Sea $c \in \mathbb{R}, c \neq 0$ y las siguientes matrices

$$\begin{pmatrix} 0 & c & c \\ c & c & 0 \\ c & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad \begin{pmatrix} 1 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

a) Probar que no existen matrices L triangular inferior con unos en la diagonal y U triangular superior tales que $C = LU$.

b) Hallar $P, L, U \in \mathbb{R}^{3\times 3}$ tales que $PP = I_3$ y $PC = LU$ con L triangular inferior con unos en la diagonal y U trianfular superior.

c) ¿Cuántas factorizaciones LU (L con unos en la diagonal) existen para la matriz CB? Si no existe ninguna, demostrarlo; si existe solo una, hallarla; si existe más de una, decir cuántas y mostrar dos distintas.

d) Probar que $\text{cond}_1(C + B) \to \infty$ para $c \to -3$.

---

a) Planteo existencia con una LU genérica y llego a contradicción.

b) row swap y luego voy a encontrar:

$$P_{13}C = LU \quad \text{con} \quad L = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

c) ... hay que hacerlo!

Si querés mandá la solución → al grupo de Telegram, o mejor aún si querés subirlo en LaTeX→ una *pull request* al .

d) Matriz singular a usar:

$$\begin{pmatrix} 1 & c+1 & 0 \\ c & c & 0 \\ c+1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

---

2. Sean $S_1 = \langle(2, 1, 3)\rangle$ y $S_2 = \langle(4, 2, 6), (1, 0, 4)\rangle$.

a) Mostrar que $S_1 \subset S_2$.

b) Sea P el proyector ortogonal sobre S_2. Probar que $S_1 \subset \text{Nu}(I - P^T)$.

c) Calcular la distancia de (-2, 6, 4) a S_2 usando P(-2, 6, 4).

---

a) Busco ecuación de S_2:

$$a(4, 2, 6) + b(1, 0, 4) = (x_1, x_2, x_3) \xrightarrow{\text{armo sistema}} \left(\begin{array}{cc|c} 4 & 1 & x_1 \\ 2 & 0 & x_2 \\ 6 & 4 & x_3 \end{array}\right)$$

resolviendo ese sistema obtengo:

$$B_S = \left\{(x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^3 \,/ -8x_1 + 10x_2 + 2x_3 = 0\right\}$$

Saco de paso y barato mirando los coeficientes de la ecuación de S:

$$B_{S^\perp} = \{(-4, 5, 1)\}$$

Volviendo al ejercicio ¿$S_1 \subset S_2$?: Sí, porque cumple la ecuación del subespacio.

b) La papa está acá $I - P_{S_2}^t$, un *proyector ortogonal* cumple que su expresión matricial es simétrica:

$$I - P_{S_2}^t = I - P_{S_2}$$

Por lo tanto si quiero buscar ver si un vector pertenece al núcleo de $I - \mathrm{Nu}(P_{S_2})$:

$$S_1 \subset S_2 \implies P_{S_2}(S_1) = S_1$$

Por lo tanto:

$$(I - P_{S_2})S_1 = S_1 - P_{S_2}S_1 = S_1 - S_1 = 0$$

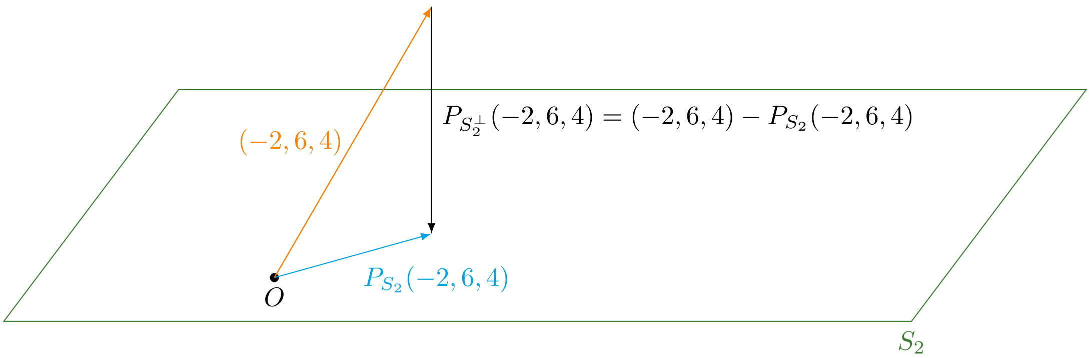
c) La distancia la puedo calcular como :

$$\|(-2,6,4) - P_{S_2}(-2,6,4)\|$$

Calculo una BON para S_2 y $S_2^\perp$:

$$BON_{S_2} = \left\{ \left(-\frac{1}{\sqrt{3}}, -\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{1}{\sqrt{3}} \right), \left(\frac{2}{\sqrt{14}}, \frac{1}{\sqrt{14}}, \frac{3}{\sqrt{14}} \right) \right\}$$

$$BON_{S_2^\perp} = \left\{ \left(-\frac{4}{\sqrt{42}}, \frac{5}{\sqrt{42}}, \frac{1}{\sqrt{42}} \right) \right\}$$



Viendo el gráfico conviene calcular para hacer quinientas cuentas menos:

$$\left\| P_{S_2^\perp}(-2,6,4) \right\| = \left\| \Big(\underbrace{(-2,6,4) \cdot (-\tfrac{4}{\sqrt{42}}, \tfrac{5}{\sqrt{42}}, \tfrac{1}{\sqrt{42}})}_{\frac{42}{\sqrt{42}} = \sqrt{42}} \Big) \Big((-\tfrac{4}{\sqrt{42}}, \tfrac{5}{\sqrt{42}}, \tfrac{1}{\sqrt{42}}) \Big) \right\| = |\sqrt{42}| \underbrace{\left\| (-\tfrac{4}{\sqrt{42}}, \tfrac{5}{\sqrt{42}}, \tfrac{1}{\sqrt{42}}) \right\|}_{=1} = \sqrt{42}$$

Por lo tanto la distancia buscada:

$$d((-2,6,4), S_2) = \sqrt{42}$$

Oka, decía usando P_{S_2}, pero, pero... me chupa un huevo.
Pero bueh, ahí queda la base $BON_{S_2} = \{v_1, v_2\}$, calculá con $v = (-2,4,6)$:

$$P_{S_2}(v) = (v_1 \cdot v) \cdot v_1 + (v_2 \cdot v) \cdot v_2$$

eso sería la proyección azul del gráfico, entonces para calcular la longitud del vector negro:

$$\|v - (v_1 \cdot v) \cdot v_1 + (v_2 \cdot v) \cdot v_2\| = d((-2,6,4), S_2)$$

Si querés armar el proyector sobre el subespacio S con matrices, mirá acá como funciona esto click click:

$$P_s = QQ^t = \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{2}{\sqrt{14}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{14}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{3}{\sqrt{14}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{2}{\sqrt{14}} & \frac{1}{\sqrt{14}} & \frac{3}{\sqrt{14}} \end{pmatrix}$$

Dale las gracias y un poco de amor a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:
naD GarRaz

3. Sea $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ una matriz inversible con $A^tA = LL^t$ la factorización de Cholesky de la matriz A^tA. Si llamamos $L^{-t} = (L^t)^{-1}$.

a) Probar que AL^{-t} es una matriz ortogonal.

b) Calcular la factorización QR de A en función de A y L.

c) Sea

$$B = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \sqrt{3} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = LL^t$$

la factorización de Cholesky de la matriz B. Sin calcular B explícitamente, calcular la factorización QR de L y usarla para hallar la factorización QR de B.

---

a) Una matriz A es ortogonal si su $\text{Col}(A)$ es un conjunto *ortonormal*. Más propiedades de estas matrices acá click click. Una *matriz ortogonal* tiene por inversa a sí misma transpuesta y conjugada. A ver si pasa eso

$$\begin{array}{rcl} AL^{-t}\cdot(AL^{-t})^t \overset{\text{def}}{\underset{?}{=}} I & \overset{\times\rightarrow}{\underset{A^t}{\Longleftrightarrow}} & A^tAL^{-t}\cdot(AL^{-t})^t = A^t \\ & \Leftrightarrow & LL^t(L^t)^{-1}\cdot(AL^{-t})^t = A^t \\ & \overset{!}{\Leftrightarrow} & L\cdot(AL^{-t})^t = A^t \\ & \Leftrightarrow & L\cdot(L^{-t})^tA^t = A^t \\ & \overset{\times\leftarrow}{\underset{A}{\Longleftrightarrow}} & L\cdot(L^{-t})^tA^tA = A^tA \\ & \Leftrightarrow & L\cdot(L^{-t})^tLL^t = A^tA \\ & \Leftrightarrow & L\cdot(L^tL^{-t})^tL^t = A^tA \\ & \Leftrightarrow & LL^t \overset{\text{def}}{\underset{\checkmark}{=}} A^tA \end{array}$$

b) En el ítem a) se mostró que $A(L^t)^{-1}$ es una *matriz ortogonal*, al igual que lo debe ser Q. R tiene que ser una matriz diagonal superior como lo es L^t que sale de la descomposición de Cholesky. El resto es historia:

$$A = QR = A(L^t)^{-1}\cdot L^t = A\cdot(\underbrace{(L^t)^{-1}\cdot L^t}_{I})^{-1} = A$$

La descomposición $A = QR$:

$$\boxed{A = \underbrace{AL^{-t}}_{Q}\underbrace{L^t}_{R}}$$

c) Calculo primero la descomposición QR de L:

$$L = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sqrt{3} & 1 \end{pmatrix}$$

Calculo una BOG y luego la BON del espacio columna de L con *Gram Schmidt*:

$$BOG = \Big\{\underbrace{(2,0,0)}_{\|\cdot\|=2}, \underbrace{(0,1,\sqrt{3})}_{\|\cdot\|=2}, \underbrace{\left(0,-\tfrac{\sqrt{3}}{4},\tfrac{1}{4}\right)}_{\|\cdot\|=\frac{1}{2}}\Big\} \quad \text{y} \quad BON = \left\{(1,0,0), \left(0,\tfrac{1}{2},\tfrac{\sqrt{3}}{2}\right), \left(0,-\tfrac{\sqrt{3}}{2},\tfrac{1}{2}\right)\right\}$$

La matriz Q tiene como columnas a los elementos de la *base ortonormal*, mientras que R tiene en la diagonal las normas de los elementos de la *base ortogonal* y por sobre la diagonal la longitud de las proyecciones en cada vector de la base, ver acá click click sobre la diagonal la longitud de la proyección en cada unos de los vectores de en cada columna respectivamente.

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \qquad \text{y} \qquad R = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}$$

$$LL^t = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}}_{L} \underbrace{\begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \sqrt{3} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{L^t} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix}}_{Q_B} \underbrace{\begin{pmatrix} 4 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}}_{R_B} = B$$

Este último resultado está diciendo que las columnas de B son colineales con los vectores de la *base ortonormal*, hecho que se desprende de que R haya quedado diagonal.

`Dale las gracias y un poco de amor a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:`
`naD GarRaz`

---

4. Para cada $a \in \mathbb{R}$ sea la matriz $A(a) = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & -1 & 3 \\ -1 & 1 & 2 & -4 \\ 1 & 1 & 1 & a \end{pmatrix}$.

a) Hallar la descomposición LU de $A(a)$ para cada $a \in \mathbb{R}$.

b) Calcular $\text{cond}_\infty(A(a))$ cuando $a \to 1$.

c) Explicar las razones por las cuales $M(a) = \begin{pmatrix} 0 & 2 & -1 & 3 \\ -1 & 1 & 2 & -4 \\ 1 & -1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & a \end{pmatrix}$

---

a) Triángulo y después le cambio los signos para encontrar la L.

$$A = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}}_{L} \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & -1 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & a-1 \end{pmatrix}}_{U}$$

b) Cómo calcular la condición cuando $a \to 1$. En esta clase de ejercicio hay que usar la cota para la condición:

$$\text{cond}(A) \geq \sup\left\{ \frac{\|A\|}{\|A-B\|} : B \text{ es singular} \right\}.$$

Una B singular:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & -1 & 3 \\ -1 & 1 & 2 & -4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

La elección de esa B sale con ayuda de la U del ítem a), donde si $a = 1$ me queda una fila de ceros.

$$\lim_{a\to 1} \text{cond}_\infty(A(a)) \geq \lim_{a\to 1} \frac{\|A(a)\|_\infty}{\|A(a)-B\|_\infty} = \lim_{a\to 1} \frac{8}{|a-1|} = +\infty$$

Por lo tanto:

$$\boxed{\lim_{a\to 1} \text{cond}_\infty(A(a)) = +\infty}$$

c) No voy a poder encontrar una descomposición que cumpla con las condiciones que tienen que cumplir tanto la matriz L como la M:

$$A = L \cdot U \implies [A]_{11} = 0 = [L]_{11}[U]_{11} \Leftrightarrow [U]_{11} = 0$$

dado que L tienen unos en su diagonal. Luego:

$$[A]_{21} = -1 = [L]_{21} \underbrace{[U]_{11}}_{=0} = 0 \quad \text{absurdo.}$$

Puedo permutar filas para hacer que $M(a) \to A(a)$:

$$P_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{y} \quad P_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Por lo tanto:

$$PM(a) = P_2 P_1 M(a) = A(a) \quad \text{con} \quad P = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Dale las gracias y un poco de amor ❤ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:
naD GarRaz

5.

(a) Sean $L_1 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x = y, \ z = 0\}$ y $L_2 = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 : x = y = z\}$. Describir $S = L_1 + L_2$ y dar una base ortonormal para dicho subespacio.

(b) Sea $P \in \mathbb{R}^{3\times 3}$ el proyector ortogonal a S. A partir de $P(0, -2, 5)$ calcular la distancia de $(0, -2, 5)$ a S.

(c) Sea $Q = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$. Probar que $(QP)^t Q = P$.

(a) Los subespacios L_1 y L_2 en generadores:

$$L_1 = \langle (1, 1, 0) \rangle \quad \text{y} \quad L_2 = \langle (1, 1, 1) \rangle$$

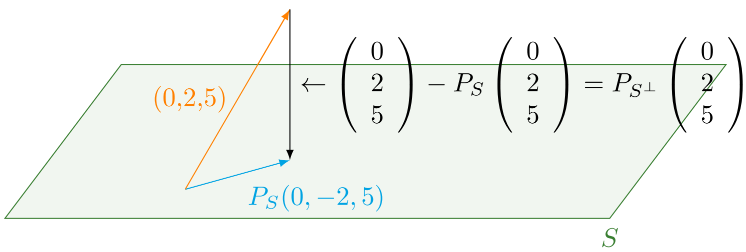
Para calcular el espacio suma $S = L_1 + L_2$, dado que son dos vectores *linealmente independientes*:

$$S = \{(1, 1, 0), (1, 1, 1)\} \quad \text{con la } \textit{base ortonormal} \quad BON_S = \left\{ (\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0), (0, 0, 1) \right\}$$

La base ortonormal la podés conseguir con Gram-Schmidt. De yapa hago una *base ortonormal* del complemento ortogonal de S, $S^\perp$:

$$BON_{S^\perp} = \left\{ (\frac{1}{\sqrt{2}}, -\frac{1}{\sqrt{2}}, 0) \right\}$$

(b)



La distancia se puede calcular como:

$$\begin{aligned} d\left(\begin{pmatrix}0\\2\\5\end{pmatrix}, S\right) = \left\| \begin{pmatrix}0\\2\\5\end{pmatrix} - P_S\begin{pmatrix}0\\2\\5\end{pmatrix} \right\| &= \left\| P_{S^\perp}\begin{pmatrix}0\\2\\5\end{pmatrix}\right\| \\ &= \left\| (\tfrac{1}{\sqrt{2}}, -\tfrac{1}{\sqrt{2}}, 0)\cdot \begin{pmatrix}0\\2\\5\end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}\\ -\frac{1}{\sqrt{2}}\\ 0\end{pmatrix}\right\| \\ &= |-\sqrt{2}| \left\| \begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{2}}\\ -\frac{1}{\sqrt{2}}\\ 0\end{pmatrix}\right\| \\ &= \sqrt{2} \end{aligned}$$

(c) Notando que:

$$Q \cdot Q^t = I_3,$$

sale en 2 patadas, si no lo notás, calculá el proyector ortogonal sobre el subespacio S, P, al final se explica como. (acá dice bien como click click 🖱).

$$(QP)^t Q = P \Leftrightarrow (QP)^t Q Q^t = P Q^t \Leftrightarrow (QP)^t = PQ^t \Leftrightarrow P^t Q^t = PQ^t \overset{!!}{\Longleftrightarrow} PQ^t = PQ^t$$

P es un *proyector ortogonal* ¡Su expresión matricial es simétrica! $P = P^t$, después de todo el proyector se calcula como $P = CC^t$ donde C es la matriz que tiene como columnas los elementos de la BON_S y es evidente que si:

$$P \overset{\star 1}{=} CC^t \overset{\text{transpongo}}{\Longleftrightarrow} P^t = (CC^t)^t = (C^t)^t C^t = CC^t \overset{\star 1}{=} P$$

🔥**6.** [final 19/12/2024] Sea $A \in \mathbb{R}^{n\times n}$ una matriz inversible y sea $B = \begin{pmatrix} 1 & \boldsymbol{c}^t \\ \boldsymbol{b} & A \end{pmatrix}$ con $\boldsymbol{b}, \boldsymbol{c} \in \mathbb{R}^n$.

a) Si $\boldsymbol{c} = 0$, probar que B tiene factorización LU si y solo si A tiene factorización LU.

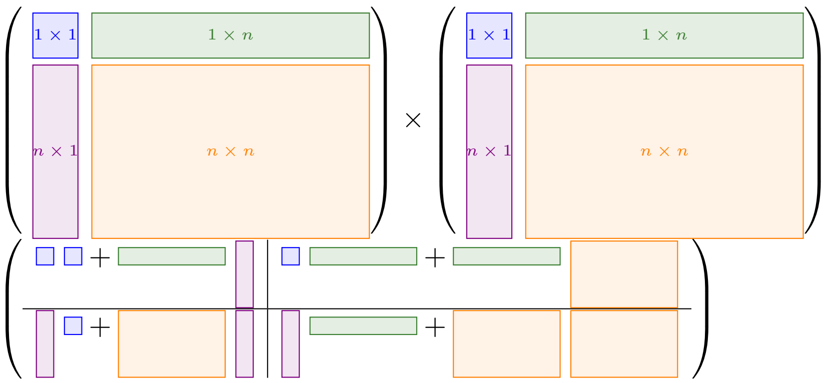
b) Si $\boldsymbol{c} \neq 0$, mostrar que la afirmación del ítem anterior no es verdadera, escribiendo un contraejemplo para ciertos $\boldsymbol{b}$, $\boldsymbol{c}$ y A inversible. Justificar.

c) Si $\boldsymbol{c} = 0$, ¿Qué condiciones deben cumplirse sobre $\boldsymbol{b}$ y A para que B sea ortogonal?

---

a) ($\Rightarrow$) Por hipótesis tengo que $\boldsymbol{c} = \boldsymbol{0}$ y $B = LU$. El producto en bloques tiene la pinta:

$B = L \cdot U \quad =$



$$\underbrace{\left(\begin{array}{c|c} 1 & \boldsymbol{0}^t \\ \hline \boldsymbol{b} & A \end{array}\right)}_{B} = \underbrace{\left(\begin{array}{c|c} 1 & \boldsymbol{0}^t \\ \hline \boldsymbol{d} & \tilde{L} \end{array}\right)}_{L} \cdot \underbrace{\left(\begin{array}{c|c} 1 & \boldsymbol{e}^t \\ \hline \boldsymbol{0} & \tilde{U} \end{array}\right)}_{U} = \left(\begin{array}{c|c} 1\cdot 1 + \boldsymbol{0}^t \cdot \boldsymbol{0} & 1 \cdot \boldsymbol{e}^t + \boldsymbol{0}^t \cdot \tilde{U} \\ \hline \boldsymbol{d}\cdot 1 + \tilde{L}\cdot \boldsymbol{0}^t & \boldsymbol{d}\cdot \boldsymbol{e}^t + \tilde{L}\cdot\tilde{U} \end{array}\right)$$

Donde $\tilde{L}$ y $\tilde{U}$ son triangular inferior y triangular superior respectivamente, Para que ese último producto dé B, necesito que $\boldsymbol{e}^t = \boldsymbol{0}^t$ en la primera fila y que $\boldsymbol{d} = \boldsymbol{b}$ para la primera columna. Luego obtengo que:

$$\boldsymbol{d} \cdot \boldsymbol{0}^t + \tilde{L} \cdot \tilde{U} = A \implies \boxed{A = \tilde{L}\tilde{U}}$$

($\Leftarrow$) Para hacer la vuelta tengo la hipótesis de que $A = LU$. Dado que A es una matriz inversible y además tiene descomposición LU, entonces todas las *submatrices esquina*, *submatrices principales*, *sus menores*, son inversibles.

Sea $A \in K^{n\times n}$, A inversible, entonces:

$$A \text{ tiene descomposición } LU \iff \underbrace{A(1:k, 1:k)}_{\substack{\text{submatrices}\\ \text{principales}}} \textit{ es inversible } \quad \forall k \in [1, n]$$

$$B = \left(\begin{array}{c|ccc} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline \vdots & a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \overset{b}{\vdots} & \vdots & \overset{A}{\ddots} & \vdots \\ \vdots & a_{31} & \cdots & a_{nn} \end{array}\right)$$

Si mirás eso con un poco de amor ♥, vas a notar que las submatrices de B son todas inversibles, dado que sus respectivos determinantes son:

$$\det\big(B(1:k, 1:k)\big) = 1 \cdot \underbrace{\det\big(A(1:(k-1), 1:(k-1)\big)}_{\neq 0} = A(1:(k-1), 1:(k-1)) \ \ \forall k \in [1, n]$$

Es así que si todas las submatrices principales de B son inversibles, entonces:

$$\boxed{B \text{ tiene descomposición } LU}$$

b) Me armo una matriz A inversible que no tenga LU. Y elijo a $\boldsymbol{b}$ y $\boldsymbol{c} \neq \boldsymbol{0}$ de forma tal de que tenga en el elemento $[B]_{22} = 0$ y $[B]_{31} = 1$, ese 1 está por debajo de la diagonal de B, no voy a poder triangular sin permutar.

$$\boldsymbol{c}^t = (0\ 1\ \cdots\ 1), \quad \boldsymbol{b}^t = (0\ 1\ \cdots\ 1), \quad A = \begin{pmatrix} e_2 \\ \hline e_1 \\ \hline \vdots \\ \hline e_n \end{pmatrix}$$

c) Para que $B \in \mathbb{R}^{(n+1)\times(n+1)}$ sea una matriz ortogonal debe cumplir que $B \cdot B^t = I_{n+1}$

$$\underbrace{\left(\begin{array}{c|c} 1 & \boldsymbol{0}^t \\ \hline \boldsymbol{b} & A \end{array}\right)}_{B} \cdot \underbrace{\left(\begin{array}{c|c} 1 & \boldsymbol{b}^t \\ \hline \boldsymbol{0} & A^t \end{array}\right)}_{B^t} = \left(\begin{array}{c|c} 1 \cdot 1 + \boldsymbol{0}^t \cdot \boldsymbol{0} & 1 \cdot \boldsymbol{b}^t + \boldsymbol{0}^t \cdot A^t \\ \hline \boldsymbol{b} \cdot 1 + A \cdot \boldsymbol{0}^t & \boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{b}^t + A \cdot A^t \end{array}\right) = \left(\begin{array}{c|c} 1 & \boldsymbol{b}^t \\ \hline \boldsymbol{b} & \boldsymbol{b} \cdot \boldsymbol{b}^t + A \cdot A^t \end{array}\right) = \underbrace{\left(\begin{array}{c|c} 1 & \boldsymbol{0}^t \\ \hline \boldsymbol{0} & I_n \end{array}\right)}_{I_{n+1}}$$

Para que B sea una matriz ortogonal, debe cumplirse que:

$$\boxed{A \text{ debe ser una matriz ortogonal y } \boldsymbol{b} = 0}$$

---

7. [final 18/12/23]

a) Probar que si $P : \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}^n$ es un proyector no nulo y $A = |P|_{\mathcal{E}}$ es la matriz P en la base canónica, entonces $\|A\| \geq 1$.

b) Dada la base $B = \{(1,0,0);(1,1,0);(1,0,1)\}$ de $\mathbb{R}^3$ y la transformación lineal $f : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$ tal que

$$|f|_{BB} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

i) Decidir si f es un proyector.

ii) Construir $g : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$ proyector ortogonal distinto de la identidad tal que $g(v) = v$ para todo $v \in \text{Im}(f)$

---

a) Si A es un proyector por defición cumple que:

$$Av = v \qquad \forall v \in \text{Im}(P).$$

La definición de norma vectorial inducida:

$$\|A\|_2 = \max_{\|v\|_2=1} \{\|Av\|_2\} \geq \|Av\| \overset{\text{def}}{=} \|v\| = 1$$

b) i) De los cambios de base y por definición de proyector sé que :

$$|f|^2_{\mathcal{E}\mathcal{E}} \overset{\text{def}}{=} |f|_{\mathcal{E}\mathcal{E}} \quad \text{y} \quad |f|_{\mathcal{E}\mathcal{E}} = C_{B\mathcal{E}}|f|_{BB}\underbrace{C_{\mathcal{E}B}}_{C^{-1}_{B\mathcal{E}}}$$

$$|f|^2_{\mathcal{E}\mathcal{E}} = C_{B\mathcal{E}}|f|^2_{BB}C_{\mathcal{E}B} \overset{!!}{\iff} |f|_{BB} = |f|^2_{BB}$$

Multiplico la matriz del enunciado y veo si cumple:

$$|f|^2_{BB} = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \neq |f|_{BB}$$

No es un proyector

ii) No es necesario, pero las cuentas parecen simples así que voy a pasar ese proyector a base canónica:

$$|f|_{\mathcal{E}\mathcal{E}} = C_{B\mathcal{E}}|f|_{BB}\underbrace{C_{\mathcal{E}B}}_{C^{-1}_{B\mathcal{E}}} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

En base canónica es más fácil ver que $\text{Im}(f) = \{(1,0,0),(1,1,0)\}$ y el $\text{Nu}(f) = \{(1,0,1)\}$. Para armarme ese proyector ortogonal g necesito que el $\text{Nu}(g) \perp \text{Im}(p)$:

$$\boxed{\begin{cases} g(1,0,0) &= (1,0,0) \\ g(1,1,0) &= (1,1,0) \\ g(0,0,1) &= (0,0,0) \end{cases}} \quad \text{donde} \quad \begin{cases} \text{Nu}(g) &= \{(0,0,1)\} \\ \text{Im}(g) &= \{(1,0,0),(1,1,0)\} \end{cases} \quad \text{y} \quad \text{Nu}(g) \perp \text{Im}(g)$$

$g \neq I_3$ es un proyector ortogonal que cumple que para todo $v \in \text{Im}(f)$, $g(v) = v$

`Dale las gracias y un poco de amor ♥ a los que contribuyeron! Gracias por tu aporte:`
`naD GarRaz`