



# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y construcción de un electrolizador mediante fabricación  
aditiva*

## Grado en Ingeniería Mecánica

**ALUMNO:** Pablo Linares Goenaga

**DIRECTORES:** Jorge Feijoo Conde  
Jesús del Val García

**CURSO ACADÉMICO:** 2025-2026

Universida<sub>de</sub>Vigo





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño y construcción de un electrolizador mediante fabricación  
aditiva*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Infantería de Marina

UniversidadeVigo



# **RESUMEN**

El presente TFG se centra en el diseño y construcción de un electrolizador para la desalación y consolidación de materiales porosos, con potencial aplicación en el ámbito constructivo. Estos electrolizadores permiten la movilización de iones mediante la aplicación de un campo eléctrico, favoreciendo su movilización en profundidad. Para ello, se diseñan y fabrican distintos prototipos mediante fabricación aditiva, evaluando materiales como PLA y ABS en función de sus propiedades mecánicas y su comportamiento frente a la humedad. Posteriormente, se realiza un análisis estructural mediante elementos finitos con el objetivo de estudiar el comportamiento de los dispositivos en condiciones cercanas a la realidad. Además, el sistema incorpora una solución electrónica integrada en compartimentos acoplados al electrolizador, que incluye un sensor de humedad y un regulador de voltaje gestionados mediante un microcontrolador tipo Nano Arduino, permitiendo monitorizar y optimizar su funcionamiento. El trabajo se apoya en los fundamentos de la electrocinética, considerando fenómenos como la electromigración y la electroósmosis. En conjunto, integra diseño, simulación y control electrónico, aportando una solución innovadora para la desalación de estructuras.

## **PALABRAS CLAVE**

Electrolizadores, Electrocínética, Fabricación aditiva, Modelado 3D, Desalación, Consolidación



# AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo agradecer especialmente a mi tutor, el profesor Feijoo, por su implicación, disponibilidad y orientación constante durante el desarrollo de este trabajo. Sus conocimientos, así como sus recomendaciones y correcciones, han sido clave para enfocar adecuadamente el proyecto y mejorar su calidad. También al sr Del Val por todo su apoyo en la parte electrónica del trabajo.

Quiero aprovechar dar gracias también a Dios por haberme dotado de todas las capacidades, la constancia y la fortaleza necesarias sin las cuales no habría sido posible llegar hasta este punto. A lo largo de este camino, estas cualidades han sido fundamentales para afrontar los distintos retos y culminar este trabajo.

Asimismo, quiero mostrar mi agradecimiento a mi familia, por su apoyo incondicional, su paciencia y su confianza en mí en todo momento. Han sido un pilar fundamental durante todo este camino, brindándome el ánimo necesario en los momentos más exigentes.

Por último, agradecer a mis amigos, por su compañía, comprensión y apoyo a lo largo de esta etapa. Su presencia ha contribuido a hacer este proceso más llevadero y enriquecedor.







## CONTENIDO

|                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Contenido .....                                                                           | 1  |
| Índice de Figuras .....                                                                   | 3  |
| Índice de Tablas.....                                                                     | 6  |
| 1 Introducción y objetivos .....                                                          | 7  |
| 1.1 Introducción y motivación .....                                                       | 7  |
| 1.2 Objetivos .....                                                                       | 8  |
| 1.3 Estructura del trabajo .....                                                          | 8  |
| 2 Estado del arte .....                                                                   | 10 |
| 2.1 Definición de la Electrocínética .....                                                | 10 |
| 2.2 Principales usos y mecanismo de funcionamiento en ingeniería civil.....               | 12 |
| 2.2.1 Desalación electrocinética .....                                                    | 12 |
| 2.2.2 Consolidación electrocinética .....                                                 | 13 |
| 2.3 Ventajas y limitaciones de esta técnica frente a los tratamientos convencionales..... | 14 |
| 2.3.1 Ventajas de la electrocinética .....                                                | 14 |
| 2.3.2 Limitaciones de la electrocinética .....                                            | 15 |
| 2.4 Electrolizadores existentes .....                                                     | 17 |
| 2.5 Fabricación aditiva.....                                                              | 18 |
| 2.5.1 Introducción.....                                                                   | 18 |
| 2.5.2 Clasificación de técnicas.....                                                      | 19 |
| 2.5.3 FDM: ventajas e inconvenientes.....                                                 | 21 |
| 3 Desarrollo del TFG.....                                                                 | 23 |
| 3.1 Diseño físico del sistema.....                                                        | 23 |
| 3.1.1 Inventor como herramienta base de diseño .....                                      | 23 |
| 3.2 Construcción mediante FDM .....                                                       | 24 |
| 3.3 Prototipos .....                                                                      | 26 |
| 3.3.1 Especificaciones .....                                                              | 26 |
| 3.3.2 Tipos de prototipos diseñados .....                                                 | 26 |
| 3.3.2.1 Prototipo I .....                                                                 | 26 |
| 3.3.2.2 Prototipo II.....                                                                 | 27 |
| 3.3.2.3 Prototipos IIIa IIIb .....                                                        | 28 |
| 3.3.2.4 Prototipo IVa-IVb.....                                                            | 28 |
| 4 Resultados .....                                                                        | 29 |
| 4.1 Prototipo I .....                                                                     | 29 |

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.1 Vista en explosionado.....                                     | 29 |
| 4.1.2 Análisis de las piezas impresas y su acoplamiento.....         | 29 |
| 4.1.3 Ensayo carga real.....                                         | 33 |
| 4.1.4 Análisis de esfuerzos .....                                    | 35 |
| 4.2 Prototipo II.....                                                | 37 |
| 4.2.1 Vista en explosionado.....                                     | 37 |
| 4.2.2 Análisis de las piezas impresas y su acoplamiento.....         | 37 |
| 4.2.3 Parte electrónica. Material y conexiones .....                 | 42 |
| 4.2.4 Análisis de esfuerzos .....                                    | 46 |
| 4.3 Prototipo IIIa y IIb .....                                       | 48 |
| 4.3.1 Vista en explosionado.....                                     | 48 |
| 4.3.2 Descripción de ánodo y cátodo.....                             | 49 |
| 4.3.3 Montaje en obra .....                                          | 53 |
| 4.4 Prototipo IVa y IVb.....                                         | 55 |
| 4.4.1 Vista en explosionado.....                                     | 55 |
| 4.4.2 Descripción de la modificación de superficie de contacto ..... | 56 |
| 4.4.3 Montaje en obra .....                                          | 57 |
| 5 Conclusiones y líneas futuras .....                                | 58 |
| 5.1 Conclusiones .....                                               | 58 |
| 5.2 Líneas Futuras .....                                             | 59 |
| 6 Bibliografía.....                                                  | 60 |
| Anexo I: Implicaciones Económicas .....                              | 63 |
| Anexo II: Reflexiones Sociales .....                                 | 65 |
| Anexo III: CODIGO SENSOR HUMEDAD.....                                | 67 |
| Anexo IV: PLANOS DE LOS PROTOTIPOS .....                             | 69 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2-1 Esquema del proceso de desalación electrocinética .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 13 |
| Figura 2-2 Esquema del proceso de consolidación electrocinética .....                                                                                                                                                                                                                                                                 | 14 |
| Figura 2-3 Modos de funcionamiento de las técnicas electrocinéticas en función de la disposición de los electrodos.....                                                                                                                                                                                                               | 15 |
| Figura 2-4 Electrólisis del agua en tratamiento electrocinético, con generación de zonas ácidas (ánodo) y alcalinas (cátodo). Imagen generada por ChatGPT. ....                                                                                                                                                                       | 16 |
| Figura 2-5 Dispositivos electrocinéticos recogidos en la patente[34].....                                                                                                                                                                                                                                                             | 17 |
| Figura 2-6 Esquema del dispositivo electrocinético recogido en la patente[35].....                                                                                                                                                                                                                                                    | 17 |
| Figura 2-7 Inyector de combustible, GE Aerospace. Imagen extraída de es.obtmatalwork.com ....                                                                                                                                                                                                                                         | 18 |
| Figura 2-8 Fusión en lecho de polvo. Imagen generada por ChatGPT. ....                                                                                                                                                                                                                                                                | 20 |
| Figura 2-9 Chorro de material (polyjet). Imagen generada por ChatGPT. ....                                                                                                                                                                                                                                                            | 21 |
| Figura 2-10 Modelado por deposición fundida. Imagen generada por ChatGPT. ....                                                                                                                                                                                                                                                        | 22 |
| Figura 3-1 Esquema del proceso de diseño y fabricación por impresión 3D.....                                                                                                                                                                                                                                                          | 24 |
| Figura 3-2 Imagen de los modelos de impresoras empleados en este TFG .....                                                                                                                                                                                                                                                            | 24 |
| Figura 3-3 Imágenes del proceso de tratamiento de la pieza con el software Bambu studio.....                                                                                                                                                                                                                                          | 24 |
| Figura 3-4 Fotografías tomadas durante el proceso de impresión del prototipo I que aparece en la imagen de la derecha.....                                                                                                                                                                                                            | 27 |
| Figura 3-5 Imagen de las piezas fabricadas para el prototipo II. Se muestra además, a la derecha, la temperatura necesaria para la impresión con este material.....                                                                                                                                                                   | 27 |
| Figura 4-1 Vista en explosionado del prototipo I.....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 29 |
| Figura 4-2 Fotografía de la parte inferior del armazón (imagen de la izquierda) y de la parte superior (imagen de la derecha) .....                                                                                                                                                                                                   | 30 |
| Figura 4-3 Tapa de empuje. Parte superior (imagen de la izquierda), parte inferior (imagen de la derecha).....                                                                                                                                                                                                                        | 31 |
| Figura 4-4 Tapón roscado encajado y su roscado diseñado .....                                                                                                                                                                                                                                                                         | 32 |
| Figura 4-5 Imagen frontal del diseño del perfil de rosca DIN 13 (izquierda) e inclinada superior (derecha).....                                                                                                                                                                                                                       | 32 |
| Figura 4-6 Cubierta .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 32 |
| Figura 4-7 Ensamble de todos los elementos que conforman el prototipo I .....                                                                                                                                                                                                                                                         | 33 |
| Figura 4-8 Imagen que muestra la papeta que se fue añadiendo al prototipo I que está anclado al fondo de la imagen en el muro.....                                                                                                                                                                                                    | 33 |
| Figura 4-9 Fotografías del dispositivo con 6 kg (izquierda) 9,3 kg (en el medio) y con la tapa puesta (derecha).....                                                                                                                                                                                                                  | 34 |
| Figura 4-10 Imagen tomada 10 días después de la prueba de carga, con el contenido lleno con 9,3kg de arcilla. Se aprecia la perdida de volumen de la arcilla que ya no está en contacto con el muro y se compara con una línea recta en su parte inferior para ver el nulo desplazamiento aparente de la superficie del armazón. .... | 34 |

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-11 Pestaña de creación de datos para la configuración de un nuevo material en Autodesk Inventor .....                                                                     | 35 |
| Figura 4-12 Análisis de elementos finitos, esfuerzos y deformaciones para 9,3 kg (parte superior) y 11,16 kg (inferior) .....                                                      | 36 |
| Figura 4-13 Vista en explosionado del prototipo II .....                                                                                                                           | 37 |
| Figura 4-14 Vistas en isométrico de las dos piezas que conforman el armazón .....                                                                                                  | 38 |
| Figura 4-15 Armazón del prototipo II .....                                                                                                                                         | 38 |
| Figura 4-16 Tapa empujadora del prototipo II .....                                                                                                                                 | 39 |
| Figura 4-17 Tapón roscado .....                                                                                                                                                    | 39 |
| Figura 4-18 Tapa superior o cubierta .....                                                                                                                                         | 40 |
| Figura 4-19 Carcasa para batería .....                                                                                                                                             | 40 |
| Figura 4-20 Carcasa del modulador y tapa .....                                                                                                                                     | 41 |
| Figura 4-21 Vista general del prototipo II .....                                                                                                                                   | 41 |
| Figura 4-22 imperfecciones de la impresión detectadas en varias partes del armazón .....                                                                                           | 42 |
| Figura 4-23 Circuito del Aruino Nano a la izquierda y del regulador de voltaje a la derecha .....                                                                                  | 44 |
| Figura 4-24 De izquierda a derecha, conectores del regulador de voltaje , interruptor y batería. ...                                                                               | 45 |
| Figura 4-25 Prototipo II con la parte electrónica integrada .....                                                                                                                  | 45 |
| Figura 4-26 Análisis de elementos finitos, esfuerzos y deformaciones para 9,3 kg (parte superior) y 11,16 kg (inferior) .....                                                      | 47 |
| Figura 4-27 Vista explosionado prototipo IIIa correspondiente al compartimento catódico .....                                                                                      | 48 |
| Figura 4-28 Vista explosionado prototipo IIIb correspondiente al compartimento anódico .....                                                                                       | 48 |
| Figura 4-29 Fotografía del acoplamiento de la tapa en el prototipo II y vista de perfil del diseño de la tapa, en la que se aprecia el error cometido en una de las esquinas ..... | 49 |
| Figura 4-30 Dimensiones recomendadas para la cavidad del regulador de voltaje, extraído del Manual del DC Buck-boost power supply model XY-SK60/SK120 .....                        | 50 |
| Figura 4-31 Vista isométrica de la carcasa del modulador de tensión .....                                                                                                          | 50 |
| Figura 4-32 Vista de las piezas que conforman el compartimento de la batería .....                                                                                                 | 51 |
| Figura 4-33 Vista de las piezas que conforman el armazón .....                                                                                                                     | 51 |
| Figura 4-34 Nueva tapa para el uso de los armazones inferiores como electrolizadores .....                                                                                         | 52 |
| Figura 4-35 Diseño de la carcasa de nanoarduino y de la tapa .....                                                                                                                 | 52 |
| Figura 4-36 Diseño de la carcasa de la batería de 9V .....                                                                                                                         | 53 |
| Figura 4-37 Disposición de los prototipos IIIa y IIIb sobre un muro. A la izquierda modo directo y a la derecha modo indirecto .....                                               | 53 |
| Figura 4-38 Montaje de electrolizadores formados con la parte inferior de los armazones .....                                                                                      | 54 |
| Figura 4-39 Vista en explosionado del electrolizador con la parte inferior del armazón .....                                                                                       | 54 |
| Figura 4-40 Vista de explosionado del dispositivo IVb, específico para superficies curvas .....                                                                                    | 55 |
| Figura 4-41 Vista explosionada del prototipo reducido .....                                                                                                                        | 55 |
| Figura 4-42 Vista isométrica de la tapa superior .....                                                                                                                             | 56 |

|                                                                            |    |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4-43 Vista isométrica de la parte inferior del armazón.....         | 56 |
| Figura 4-44 Vista del dispositivo IV con todos sus elementos montados..... | 57 |
| Figura 4-45 Disposición de los prototipos IVa y IVb sobre una columna..... | 57 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabla 3-1 Principales propiedades de los materiales seleccionados para la impresión..... | 25 |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|

# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Introducción y motivación

La ingeniería de materiales y la conservación del patrimonio han experimentado una evolución significativa en sus metodologías de intervención gracias a la transferencia de conocimientos desde la geotecnia y la ingeniería química. En este escenario, la electrocinética se define como una técnica basada en la aplicación de un campo eléctrico de corriente continua (DC) de baja intensidad sobre materiales porosos húmedos con el objetivo principal de inducir el movimiento de especies iónicas, fluidos o partículas para modificar las propiedades del material o extraer agentes degradantes.

Tal como establecen estudios previos [1,2], el éxito de esta tecnología radica en su capacidad para actuar en el interior de la red porosa de materiales como el hormigón, el ladrillo o el suelo, superando las limitaciones de los métodos tradicionales basados en la difusión o la capilaridad, que resultan ineficaces a profundidades considerables o en matrices de baja permeabilidad.

El transporte de materia bajo la influencia de un campo eléctrico no es un proceso unitario, sino el resultado de la coexistencia de tres fenómenos físico-químicos principales [1,3]:

1. Electromigración: Se define como el movimiento de iones disueltos en la fase líquida del poro hacia el electrodo de carga opuesta (los aniones hacia el ánodo y los cationes hacia el cátodo) [4,5]. Es el mecanismo con mayor tasa de transporte y, por tanto, el eje central en los procesos de desalinización y descontaminación.
2. Electroósmosis: Consiste en el movimiento del fluido (agua) a través de los poros. Este fenómeno ocurre debido a la formación de una doble capa eléctrica en la interfaz sólido-líquido. En la mayoría de los materiales de construcción, el flujo electroosmótico se dirige hacia el cátodo, lo que permite el secado de estructuras o el transporte de especies neutras [6,7].
3. Electroforesis: Es el movimiento de partículas cargadas o coloides dentro del líquido. Aunque en medios porosos consolidados su relevancia es menor debido a la restricción física de los poros, cobra importancia en estrategias de consolidación donde se introducen nanopartículas para mejorar la resistencia mecánica del material [8].

La versatilidad de la electrocinética permite clasificar sus aplicaciones en dos grandes bloques dentro del ámbito de la construcción y la rehabilitación:

- Extracción de agentes agresivos: La aplicación más extendida es la extracción de cloruros en estructuras de hormigón armado para detener la corrosión de las armaduras [9]. Del mismo modo, en el patrimonio histórico, se utiliza para la eliminación de sales solubles (cloruros, nitratos,

sulfatos) en rocas ornamentales [3], evitando procesos de cristalización que provocan la disgregación del material.

- Modificación y estabilización de la matriz: La electrocinética permite la realcalinización del hormigón carbonatado (restituyendo el pH básico protector del acero) [10] y la consolidación mediante la introducción de precursores químicos que precipitan en el interior de los poros, sellando grietas y mejorando la cohesión estructural [11].

A pesar de las ventajas de la electrocinética, su aplicación a escala real presenta como principal desafío el montaje de dispositivos capaces de adaptarse a las superficies a tratar y capaz de albergar todos los materiales necesarios para asegurar que aspectos negativos de la técnica, como es la generación de valores de pH extremos en las proximidades de los electrodos, lleguen a afectar al material pétreo a tratar. El coste de fabricación de los dispositivos existentes a día de hoy, tales como los utilizados en [3,12], es muy alto, lo que encarece la aplicación de esta técnica. El presente trabajo fin de grado trata de mejorar el diseño de los dispositivos existentes y llevar a cabo su construcción mediante una técnica económica, versátil y fácil de usar como es la fabricación aditiva FDM.

## 1.2 Objetivos

El objetivo principal de este TFG es llevar a cabo el diseño y posterior construcción de un electrolizador funcional y de bajo coste mediante fabricación aditiva.

Para lograr este objetivo se establecen los siguientes objetivos secundarios:

- Diseño y construcción de prototipo de gran tamaño para análisis de carga. En este sentido se trata de analizar la capacidad de soportar esfuerzos de un dispositivo fabricado mediante fabricación aditiva. Este mecanismo de fabricación ocasiona que el comportamiento del dispositivo sea anisótropo y que el dispositivo presente menos resistencia a esfuerzos que sean perpendiculares a la disposición de las capas inyectadas por la impresora.
- Diseño y construcción de dispositivo con las medidas que tendrá realmente para su posterior aplicación en obra. El dispositivo impreso debe albergar todos los componentes electrónicos que posteriormente se le acoplarán al dispositivo, por lo que es necesario diseñar estos compartimentos.
- Optimización del diseño definitivo de los dispositivos anódicos y catódicos que deben trabajar por pares para:
  - Aplicación sobre superficies lisas.
  - Aplicación sobre superficies curvas.

Además de los anteriores, se establece como un objetivo adicional al que originalmente se marcaba en este TFG, la configuración de la parte electrónica, tanto de alimentación y regulación del voltaje, como de sensorización.

## 1.3 Estructura del trabajo

Con el fin de obtener una visión clara de los temas que se van a tratar y facilitar así la comprensión de este trabajo, se muestra la estructura del mismo.

- Introducción y objetivos: en este apartado se pretende sintetizar los motivos que han llevado a la realización de este trabajo, así como los objetivos que se pretenden alcanzar.
- Estado del arte: este apartado explica el principio de funcionamiento que rige las técnicas electrocinéticas de extracción iónica, como la desalación, y de inyección iónica, como la consolidación. Además, explica el fundamento de la fabricación aditiva por FDM (Modelado por Deposición Fundida) y sus ventajas frente a otros procesos de fabricación.
- Desarrollo: en este apartado se exponen las especificaciones que deben cumplir los electrolizadores y que tipo de materiales se van a emplear para fabricarlos

- Resultados obtenidos: en este apartado, se muestran imágenes y planos de los prototipos diseñados, así como los resultados relativos al ensayo de carga en situación real
- Conclusiones y líneas futuras: finalmente, en este apartado se pretende recopilar y condensar toda la información obtenida en el apartado anterior. Asimismo, se establecen las posibles líneas futuras que se deben abarcar para terminar con el proceso de fabricación como sería la realización de los componentes electrónicos.

## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Definición de la Electrocínética

La electrocínética es la rama de la física que estudia los fenómenos producidos por cargas eléctricas en movimiento, a través de medios conductores, ya sean líquidos o sólidos, enfocándose principalmente en la interacción entre campos eléctricos y el movimiento de fluidos o partículas en la doble capa eléctrica.

La electrocínética se ha erigido en la última década como una de las técnicas de mayor proyección y eficacia en la rehabilitación y restauración de infraestructuras. Lo que tradicionalmente se comprendía como un fenómeno confinado a la geotecnia para la estabilización de suelos, ha mutado en una tecnología de precisión capaz de interactuar con la microestructura de materiales de naturaleza pétreo empleados en construcción, tales como: roca ornamental, ladrillo, morteros y hormigón, que constituyen el grueso de los materiales empleados en infraestructuras tanto históricas como modernas.

Esto se debe a que permite, a diferencia de los métodos tradicionales, forzar la movilización de especies iónicas presentes, no solo a nivel superficial, sino que también a niveles profundos, mediante la aplicación de un campo eléctrico interpuesto entre dos electrodos.

En la mayor parte de las técnicas de movilización iónica, ya sea para la extracción de sales como para procesos de consolidación, el transporte iónico implicado en la movilización de los compuestos se basa en mecanismos difusivos, debido a la existencia de gradientes de concentración [13,14], o advectivos, debido a la movilización de los compuestos en la dirección de movimiento de un fluido ocasionado principalmente por procesos capilares [14,15]. Ambos procesos presentan como principales limitaciones, la velocidad de movilización y la profundidad sobre la cual influyen dentro del material.

A diferencia de estos mecanismos, la aplicación de un campo eléctrico fuerza la movilización de los iones hacia los electrodos de polaridad opuesta y a su vez ocasiona el movimiento del fluido, generalmente hacia la zona del cátodo ya que la mayor parte de los materiales de construcción presentan un potencial zeta negativo [16,17]. Desde el punto de vista físico, el transporte iónico en estos sistemas puede describirse mediante la ecuación de Nernst-Planck (ecuación 1), en la que intervienen simultáneamente la difusión, la migración eléctrica o electromigración y la advección [18].

$$J_i(x) = -D_i \frac{\delta C_i(x)}{\delta x} - \frac{|z_i|F}{RT} D_i C_i \frac{\delta \phi(x)}{\delta x} + C_i \gamma(x) \quad (\text{ecuación 1})$$

Siendo  $J_i(x)$  el flujo de las especies  $i$  (expresado en  $\text{mol s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ) a la distancia  $x$  desde una superficie normal a la dirección del flujo,  $D_i$  el coeficiente de difusión de la especie  $i$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ),  $\delta C_i / \delta x$  el gradiente de concentración a la distancia  $x$ ,  $\delta \phi(x) / \delta x$  el gradiente de potencial,  $z_i$  la carga de la especie  $i$  en  $\text{eq mol}^{-1}$ ,  $C_i$  la concentración de la especie  $i$  en  $\text{mol m}^{-3}$ ,  $\gamma(x)$  la velocidad a la cual se mueve un elemento

en la dirección  $x$  ( $\text{m s}^{-1}$ ),  $F$  la constante de Faraday ( $\text{C eq}^{-1}$ ),  $R$  la constante de los gases ideales ( $\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) y  $T$  la temperatura en  $\text{K}$ .

Un estudio publicado por Paz-García [19] demostró que en presencia de un campo eléctrico el principal mecanismo de transporte es la electromigración, quedando demostrado que el coeficiente de difusión de las especies cargadas es un orden de magnitud inferior a la movilidad iónica de las mismas especies bajo la influencia de un campo eléctrico y llegando a estimar que para un ion monovalente y a  $298^\circ\text{K}$ , la movilidad iónica es aproximadamente 40 veces más alta por voltio aplicado que el coeficiente de difusión del mismo anión.

A su vez, el propio transporte de masas que se lleva a cabo en el transporte electrocinético, puede dividirse principalmente en tres mecanismos de transporte [1]:

-**Electromigración:** la electromigración es el movimiento de iones provocado por la aplicación de un campo eléctrico en un material poroso saturado con un electrolito. Para que este fenómeno tenga lugar, es necesario que las sales presentes estén previamente disueltas produciéndose su disociación en sus iones respectivos; por ejemplo, el cloruro de sodio se disocia en iones sodio ( $\text{Na}^+$ ) y cloruro ( $\text{Cl}^-$ ). Cuando se aplica una corriente eléctrica, los iones positivos migran hacia el cátodo, mientras que los iones negativos se desplazan hacia el ánodo, acumulándose en las proximidades de estos electrodos. Este mecanismo constituye el proceso más relevante dentro de la desalación electrocinética, ya que es el responsable directo del transporte de especies iónicas a través de la red de poros del material. Gracias a este desplazamiento forzado, los iones disueltos son movilizados desde el interior del material hacia las proximidades de los electrodos, pudiendo ser retenidos en el interior de papetas cuando estas se interponen entre los electrodos y el material poroso [4,20].

-**Electroósmosis:** la electroósmosis puede definirse como el fenómeno mediante el cual se produce el movimiento de agua a través de la red de poros cuando se aplica un campo eléctrico. En la mayoría materiales de construcción, este flujo hídrico tiene lugar preferentemente desde el ánodo hacia el cátodo y está influenciado por factores como la estructura porosa, la composición del material y las interacciones electroquímicas que se desarrollan en su interior [16,17]. Este comportamiento es fruto de la existencia de una doble capa eléctrica<sup>1</sup> en las superficies internas de los poros, ya que como dichas superficies suelen presentar carga negativa, se genera una acumulación de cationes en las proximidades de las paredes [7]. Al aplicar una corriente continua, estos cationes migran hacia el cátodo y, al encontrarse hidratados, arrastran consigo moléculas de agua. Como consecuencia, se produce un desplazamiento conjunto del fluido intersticial. Fenómeno que constituye propiamente la electroósmosis.

Desde un punto de vista práctico, la electroósmosis desempeña un papel relevante en la redistribución de la humedad dentro del material. Este flujo induce una acumulación de agua en la zona catódica y un secado progresivo en la zona anódica, generando gradientes de humedad que pueden influir directamente en la eficacia del tratamiento electrocinético [21]. En particular, la pérdida excesiva de humedad en determinadas zonas puede incrementar la resistencia del sistema y reducir la movilidad iónica, afectando negativamente al proceso de desalación.

Es importante destacar que la electroósmosis, actúa de forma simultánea a otros mecanismos de transporte, especialmente la electromigración. Mientras que esta última es responsable del desplazamiento de los iones y, por lo tanto, de la extracción directa de las sales, la electroósmosis constituye un mecanismo complementario inevitable que condiciona el movimiento del agua. La intensidad de este fenómeno depende en gran medida de las propiedades del material, tales como la porosidad, la tortuosidad de los poros, el contenido de humedad, la composición mineralógica, la carga

---

<sup>1</sup> La doble capa eléctrica es la región formada en la interfaz sólido-líquido donde la superficie del material adquiere carga, atrayendo iones de signo opuesto. Este fenómeno genera un campo eléctrico local que condiciona el movimiento de agua e iones.

superficial y la presencia de sales solubles [6,16]. Estos factores determinan la magnitud del flujo electroosmótico y su influencia en el comportamiento global del sistema electrocinético.

**-Electroforesis:** es el movimiento de partículas cargadas suspendidas en un fluido bajo la acción de un campo eléctrico. A diferencia de la electromigración, la electroforesis afecta a entidades de mayor tamaño, como coloides<sup>2</sup>, o pequeñas partículas sólidas presentes en el fluido intersticial. Cuando se aplica un campo eléctrico, estas partículas experimentan una fuerza que provoca su desplazamiento hacia el electrodo de signo opuesto a su carga. Dentro del habitual contexto de los materiales porosos de construcción tales como los ladrillos, morteros o piedras naturales, la electroforesis puede tener lugar siempre que existan partículas finas en suspensión dentro del agua contenida en los poros. No obstante, su relevancia práctica en procesos de desalación electrocinética es generalmente limitada. Esto se debe a que, en la mayoría de los casos, el transporte dominante está controlado por la electromigración de los iones disueltos y, en menor medida, por el flujo de agua inducido por electroósmosis, mecanismos que resultan más eficientes para la extracción de sales.

A pesar de su menor protagonismo, la electroforesis puede contribuir de forma complementaria al transporte de materia, especialmente en sistemas en donde exista una cantidad significativa de partículas coloidales cargadas. Asimismo, su presencia pone de manifiesto la complejidad de los fenómenos electrocinéticos, en los que pueden coexistir distintos mecanismos de transporte actuando simultáneamente. Por ello, aunque su impacto en la desalación suele ser secundario, su consideración resulta relevante para una comprensión global del comportamiento de los sistemas electrocinéticos aplicados a materiales de construcción.

## **2.2 Principales usos y mecanismo de funcionamiento en ingeniería civil**

La electrocinética se consolida como una herramienta versátil y en constante evolución dentro del sector de la construcción y la rehabilitación. Numerosos estudios han puesto de manifiesto la eficacia de la electrocinética para combatir los principales agentes de alteración que afectan a todas las estructuras, tales como el agua y la acción de las sales solubles. La electrocinética ha demostrado ser una técnica eficaz frente a la eliminación de sales solubles [2,4,20–22] y frente al control de la humedad [6,16,17,23], tanto en condiciones de laboratorio como en aplicaciones reales. Paralelamente, las investigaciones más recientes han ampliado su campo de aplicación hacia estrategias de consolidación del material mediante la introducción y precipitación de compuestos en el interior de la red porosa para incrementar las propiedades físico-mecánicas u otorgar nuevas propiedades tales como propiedades biocidas [24–27].

La diferencia principal entre ambos mecanismos de funcionamiento radica en que en la desalación se busca que las especies se extraigan del material, mientras que en la electroprecipitación, se alimenta el sistema de precursores<sup>3</sup> y se fuerza su entrada en los poros para provocar sobresaturación local y formación de un precipitado insoluble.

### **2.2.1 Desalación electrocinética**

La degradación de los materiales de construcción por la acción de las sales solubles representa uno de los desafíos más complejos y persistentes en la conservación del patrimonio arquitectónico y la obra civil [28]. La presencia de estas sustancias en el interior del sistema poroso de materiales como la piedra, el ladrillo o el mortero no es un fenómeno meramente superficial; se trata de un proceso dinámico de transporte de humedad y cristalización que compromete la integridad estructural desde el interior. Cuando las soluciones salinas se evaporan, el crecimiento de los cristales genera presiones internas que superan con creces la resistencia a la tracción de la red porosa, provocando patologías visibles como descamaciones, arenización y, en última instancia, la pérdida irreversible de material [28].

---

<sup>2</sup> Un coloide es un sistema en el que partículas muy pequeñas (entre 1 y 1000 nm) están dispersas en un medio continuo. Estas partículas no sedimentan fácilmente y pueden desplazarse bajo la acción de campos eléctricos.

<sup>3</sup> Los precursores son sustancias químicas disueltas que pueden reaccionar para formar un sólido

Dada la naturaleza acumulativa de este problema, la intervención no puede limitarse a una limpieza superficial o a la aplicación de tratamientos que únicamente consigan extraer las sales que se encuentran en los niveles más superficiales del muro. Para garantizar la durabilidad de la infraestructura y detener el proceso de degradación, es imperativo recurrir a técnicas como la electrocinética que permitan extraer tanto las sales superficiales como las profundas.

En los procesos de desalación (Figura 2-1), el transporte de la corriente eléctrica en el interior del material le corresponde a los iones, los cuales se ven forzados a migrar hacia el electrodo de polaridad opuesta. Para garantizar que las sales son extraídas, es necesario colocar el electrodo a una cierta distancia del muro. Es por ello que se usan materiales adsorbentes, tales como las papetas, que permitan: 1) servir de medios de almacenamiento de las sales extraídas; 2) mantener un buen contacto eléctrico entre el electrodo y el muro, esto se consigue gracias a que las papetas son materiales que se amoldan a cualquier superficie; 3) mantener el grado de humedad suficiente para que el proceso no se pare.

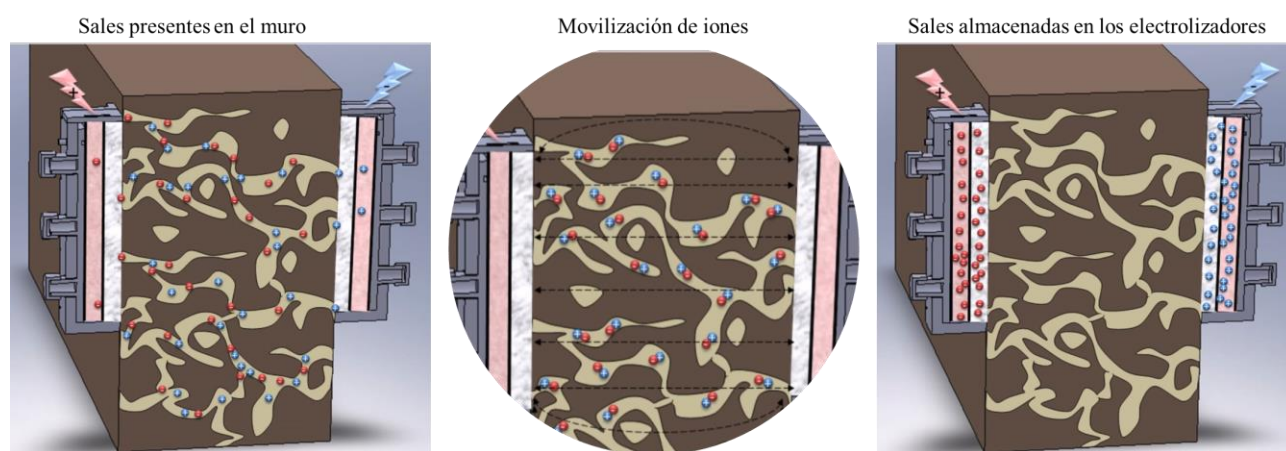


**Figura 2-1 Esquema del proceso de desalación electrocinética**

Para garantizar que la corriente impuesta se emplea principalmente en el transporte iónico es necesario emplear electrodos inertes en el interior de los dispositivos, tales como electrodos de titanio recubiertos con óxidos metálicos mixtos (Ti-MMO) o electrodos de grafito.

### 2.2.2 Consolidación electrocinética

Los tratamientos de consolidación en materiales pétreos son fundamentales para restaurar la cohesión interna y la resistencia mecánica de un bien que ha perdido su integridad estructural. Los consolidantes actúan como un "pegamento" técnico que busca devolver el nexo de unión entre las partículas desprendidas y el núcleo sano del material. El objetivo principal que persiguen es detener el avance de procesos de degradación como la arenización o las desplazaciones, asegurando que el soporte sea lo suficientemente estable para recibir futuras intervenciones, como limpiezas o reintegraciones.

La limitación que presentan los tratamientos de consolidación tradicionales es que apenas penetran en el material, por lo que únicamente consiguen devolver esa integridad a nivel superficial, especialmente si el material a tratar presenta una cierta humedad.

La electrocinética trata de solventar estos problemas mediante un procedimiento en dos fases durante el cual se inyectan iones para forzar la precipitación de compuestos de baja solubilidad en el interior del material y así recuperar las propiedades perdidas [29].

Este proceso de consolidación permite reducir enormemente la porosidad del material lo que dificulta la entrada de nuevos agentes de alteración, permitiendo por tanto incrementar la durabilidad de la infraestructura.

Durante la primera fase del proceso de consolidación los iones presentes en las papetas que se encuentran dentro de los dispositivos son forzados a migrar hacia el interior del material (Figura 2-2). Una vez en el interior, estos iones se van encontrando en espacio reducidos con los iones de polaridad opuesta y van generando precipitados una vez se supera la concentración de saturación. A lo largo de esta primera fase se produce un incremento en la resistencia que ejerce el material al paso de la corriente, debido al bloqueo de algunos poros. En ese instante se invierte la polaridad, se cambian de posición las papetas y se aplica la segunda fase. Durante esta segunda fase los iones son forzados a penetrar en el material a través de zonas que previamente estaban enriquecidas con el ion de polaridad opuesta. Esto ocasiona que en un breve periodo de tiempo nuevos precipitados se vuelvan a formar.

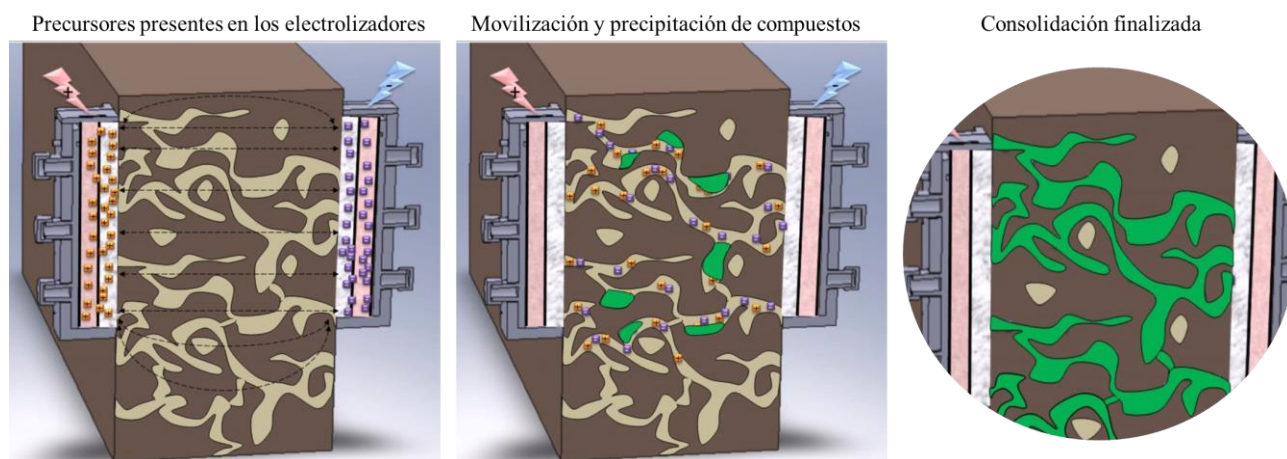


Figura 2-2 Esquema del proceso de consolidación electrocinética

Más allá de mejorar la cohesión, la misma lógica para precipitar dentro de los poros se puede aplicar para aportar una función específica, como podría ser otorgarle al material una capacidad frente al biodeterioro mediante la formación en sus poros de boratos de diferente solubilidad [25].

## 2.3 Ventajas y limitaciones de esta técnica frente a los tratamientos convencionales

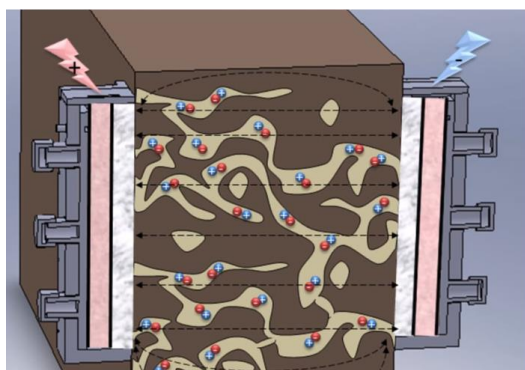
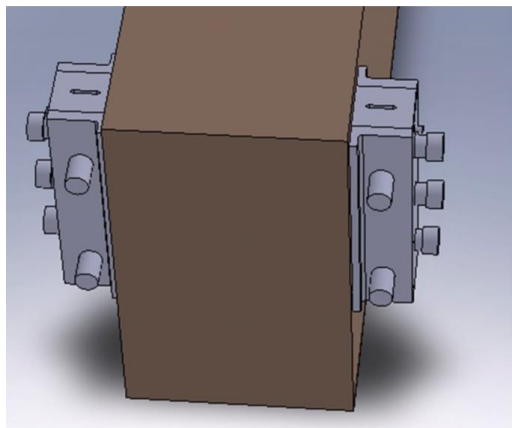
### 2.3.1 Ventajas de la electrocinética

El uso de técnicas electrocinéticas, tanto para la extracción de iones como para la inyección de estos, presenta una serie de ventajas frente a los tratamientos tradicionales tales como:

- Su eficacia se ve favorecida por la presencia de humedad. Esta situación se aproxima a la que realmente hay en obra y que es contraproducente para la penetrabilidad de tratamientos de consolidación.
- Permite reducir el contenido iónico en porcentajes cercanos al 100% [20,30], algo difícil de alcanzar con las técnicas tradicionales.
- Permite tratar zonas altamente alteradas sin necesidad de apoyarse en ellas, es decir, tratarlas desde zonas anexas que muestren una mayor cohesión estructural [2].
- El campo eléctrico permite tratar toda la sección de material que se vea afectada por la corriente eléctrica impuesta. Este hecho incrementa la penetrabilidad alcanzada por los tratamientos de desalación y de consolidación tradicionales.  
En función de la disposición de los electrodos, es decir, si se sitúan uno enfrente al otro (modo directo de aplicación) [22], o si se sitúan los dos sobre la misma superficie (modo indirecto) [3], la penetrabilidad variará (Figura 2-3).
- La consolidación electrocinética permite precipitar compuestos inorgánicos de baja solubilidad que sean compatibles con el material pétreo. Además permite otorgar nuevas propiedades al material, tales como propiedades biocidas[25], o incrementar sustancialmente sus propiedades físico-mecánicas al conseguirse mayores porcentajes de materia seca [11].

- Es posible llevar a cabo de manera simultánea la extracción de sales y la consolidación del material afectado, algo que permite abaratar tratamientos y garantizar que se está dañando en menor medida el material [31].

Modo directo de funcionamiento



Modo indirecto de funcionamiento

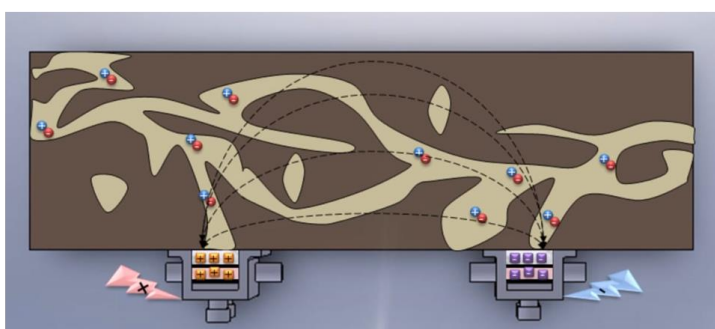
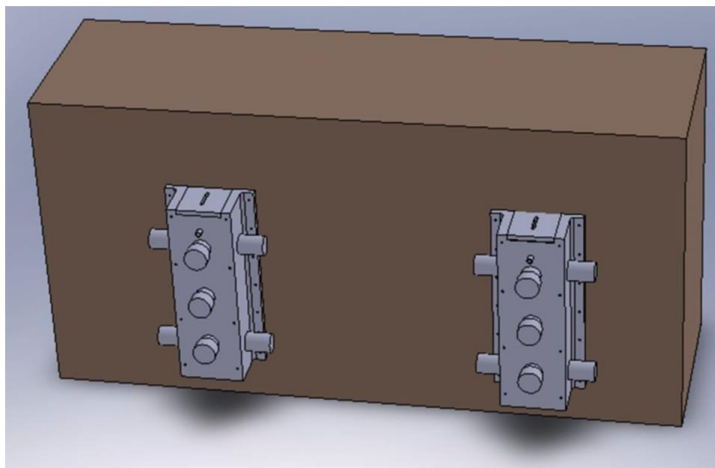


**Figura 2-3 Modos de funcionamiento de las técnicas electrocinéticas en función de la disposición de los electrodos**

### 2.3.2 Limitaciones de la electrocinética

A pesar de que las técnicas electrocinéticas han demostrado una elevada eficacia en la extracción de sales de materiales porosos, su aplicación presenta una serie de limitaciones que deben ser consideradas, especialmente en intervenciones sobre patrimonio arquitectónico. Estos inconvenientes están asociados tanto a fenómenos físico-químicos derivados de la aplicación del campo eléctrico como a aspectos operativos del propio proceso [1].

Uno de los mayores retos a los que se enfrenta la electrocinética por la propia naturaleza del proceso es la electrólisis del agua, que tiene lugar en los electrodos durante la aplicación de la corriente eléctrica. Este fenómeno da lugar a reacciones de oxidación en el ánodo y de reducción en el cátodo, generando protones  $H^+$  e iones hidroxilo  $OH^-$ , respectivamente (Figura 2-4). Como consecuencia, se produce la formación de zonas altamente ácidas en las proximidades del ánodo y altamente alcalinas en el entorno del cátodo.

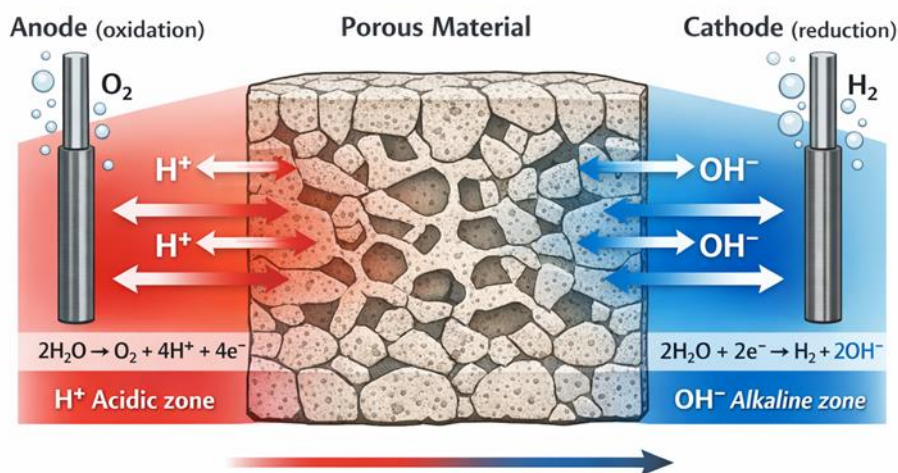
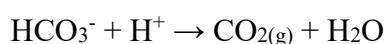
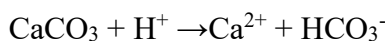


**Figura 2-4** Electrólisis del agua en tratamiento electrocinético, con generación de zonas ácidas (ánodo) y alcalinas (cátodo). Imagen generada por ChatGPT

Estas variaciones extremas de pH pueden provocar importantes alteraciones en los materiales tratados, tales como la disolución de fases minerales, cambios en la composición química o degradación de la matriz del material. En el caso de materiales pétreos o cerámicos, estas consideraciones pueden afectar negativamente a su estabilidad y durabilidad. Asimismo, el transporte preferente de los iones  $H^+$  y  $OH^-$ , debido a su elevada movilidad, puede interferir en el proceso de desalación, reduciendo la eficiencia del transporte de los iones de interés. Por este motivo, es habitual la implementación de sistemas tampón o materiales intermedios que permitan controlar estos efectos y evitar que dichas especies penetren en el material.

Estudios previos ha demostrado que es posible impedir la entrada de iones  $H^+$  en el material mediante el uso de papetas de carbonato de calcio en el ánodo, entre el electrodo y el material a tratar y del uso de electrolitos tamponantes como citrato de sodio y ácido cítrico[2,18]. La elección del carbonato de calcio se debe a que a valores de pH inferiores a 5 se produce la descomposición del carbonato de calcio en sus iones respectivos [30,32].



Además de la posible alteración química en la composición de los minerales que componen la roca debido a los valores de pH alcanzados durante el tratamiento, existen otros factores que pueden ocasionar cambios estéticos y/o cambios microestructurales de los materiales tratados. Entre estos daños cabe destacar:

- Daños estéticos ocasionados principalmente por cambios de color en el material tratado debido a la oxidación, hidrólisis y/o solubilización de alguno de sus minerales [33], o por el incremento de temperatura que se puede producir en el material tratado debido a la circulación de la corriente a medida que se incrementa la duración del tratamiento. Estas alteraciones estéticas suponen una limitación importante en intervenciones sobre patrimonio cultural, donde la conservación del aspecto original es un requisito fundamental
- Daños microestructurales ocasionados por las tensiones mecánicas internas que induce la circulación de una determinada densidad de corriente a través de los poros de las rocas. La aplicación de un campo eléctrico a través de materiales porosos puede inducir tensiones internas en la red de poros, lo que puede dar lugar a la formación de microfisuras o microfracturas, especialmente en materiales que contienen minerales con comportamiento

piezoeléctrico<sup>4</sup>, como el cuarzo. Es por ello que se suelen aplicar intensidades de corriente bajas en el orden de mA.

## 2.4 Electrolizadores existentes

Los electrolizadores existentes para la aplicación en obra, tanto de técnicas de desalación como de consolidación, presentan el inconveniente del elevado coste de fabricación. Este coste implica que el tratamiento posterior a aplicar se va a encarecer. Además, presentan el inconveniente debido al diseño de los mismos que únicamente se pueden aplicar sobre superficies lisas tales como fachadas (Figura 2-5. Y Figura 2-6).



Figura 2-5 Dispositivos electrocinéticos recogidos en la patente[34]

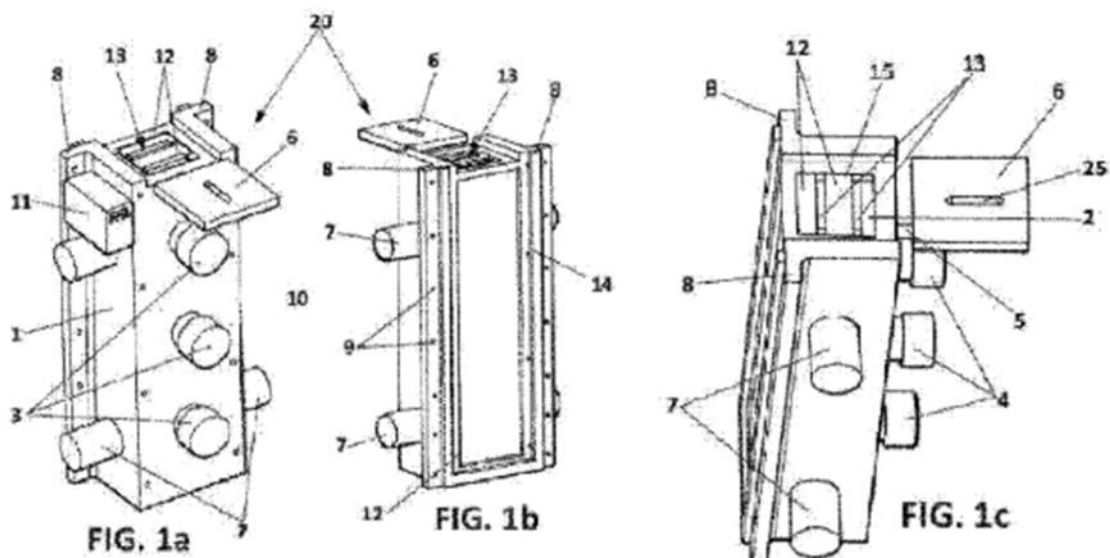


Figura 2-6 Esquema del dispositivo electrocinético recogido en la patente[35]

<sup>4</sup> El comportamiento piezoeléctrico es la capacidad de ciertos materiales de generar cargas eléctricas al ser sometidos a esfuerzos mecánicos, lo que puede inducir tensiones internas en materiales porosos y contribuir a procesos de deterioro cuando se aplican campos eléctricos.

## 2.5 Fabricación aditiva

### 2.5.1 Introducción

La fabricación aditiva, comúnmente conocida por su aplicación en el campo de la impresión 3D, engloba un conjunto de tecnologías de producción que permiten la obtención de objetos tridimensionales mediante la adición sucesiva de material capa a capa a partir de un modelo digital previamente diseñado. Este enfoque constructivo supone un cambio de paradigma respecto a los métodos tradicionales de fabricación sustractiva, en los que el material es eliminado a partir de un bloque inicial hasta alcanzar la geometría deseada. Frente a ello, la fabricación aditiva optimiza el uso de recursos, reduce significativamente los costes asociados a la fabricación y elimina la necesidad de moldes, lo que se traduce en una disminución de costes y una mayor flexibilidad productiva.

En los últimos años, esta tecnología ha experimentado un notable desarrollo, consolidándose como una herramienta clave dentro del marco de la más moderna Industria 4.0. Su capacidad para generar geometrías complejas, difícilmente alcanzables mediante técnicas convencionales, junto con la posibilidad de personalización masiva de productos adaptados a necesidades específicas, ha favorecido su incorporación en múltiples sectores industriales. Actualmente, ámbitos como el aeroespacial, automotriz, biomédico o energético emplean la fabricación aditiva tanto para la producción de prototipos funcionales como para la fabricación directa de piezas finales, especialmente en componentes de elevada complejidad geométrica o en series de producción corta.

Un ejemplo representativo de su impacto industrial lo constituyen los inyectores de combustible desarrollados por GE Aerospace para motores como el LEAP o el GE9X (Figura 2-7), donde la aplicación de técnicas de fabricación aditiva ha permitido reducir el número de componentes de 855 a tan solo 12, mejorando el rendimiento del sistema y disminuyendo el consumo de combustible en aeronaves comerciales. Este tipo de avances pone de manifiesto la madurez alcanzada por la tecnología, que ha pasado de ser una herramienta orientada al prototipado rápido a convertirse en un recurso estratégico en entornos industriales avanzados.



**Figura 2-7** Inyector de combustible, GE Aerospace. Imagen extraída de [es.obtmatalwork.com](http://es.obtmatalwork.com)

Paralelamente, la fabricación aditiva está adquiriendo una relevancia creciente en el ámbito de los materiales de construcción y la conservación del patrimonio. Su aplicación permite el desarrollo de nuevos sistemas constructivos basados en morteros, hormigones o materiales compuestos, optimizando propiedades como la resistencia mecánica, la porosidad o la durabilidad. Estas características resultan especialmente relevantes en intervenciones de restauración, donde la compatibilidad material y la

precisión geométrica son factores determinantes. Además, esta tecnología facilita la integración de procesos innovadores, como la incorporación de agentes funcionales o el diseño de estructuras internas controladas. En este contexto, su posible combinación con técnicas electrocinéticas abre nuevas líneas de investigación orientadas a la mejora de tratamientos de desalación, consolidación y protección de materiales porosos, aspectos de especial interés en el presente trabajo.

Dentro del contexto de la electrocinética, la fabricación aditiva ha comenzado a incorporarse de forma incipiente, principalmente en entornos experimentales y de investigación. Uno de los ejemplos más relevantes se encuentra en el campo de la microfluídica. En este sentido, un caso claro es el trabajo de Barbosa et al. (2023) [36], quienes estudiaron de forma directa el flujo electroosmótico en microcanales impresos en 3D mediante FDM, demostrando que este tipo de canales puede emplearse para analizar fenómenos electrocinéticos reales con geometrías fabricadas aditivamente. En la misma línea, Wu et al. (2021) [37] desarrollaron estructuras capilares impresas en 3D capaces de funcionar como bombas electroosmóticas, mostrando que la fabricación aditiva no solo sirve para fabricar el soporte físico del dispositivo, sino también para producir componentes funcionales donde el transporte del fluido está gobernado por mecanismos electrocinéticos.

Otro ejemplo relevante es el de Beauchamp et al. (2019) [38], quienes fabricaron dispositivos microfluídicos impresos en 3D para electroforesis en microchip, comprobando que podían utilizarse para separación electrocinética con prestaciones comparables, aunque ligeramente inferiores, a las obtenidas con otros polímeros convencionales.

En definitiva, la fabricación aditiva se posiciona como una herramienta emergente con un elevado potencial en el ámbito de la ingeniería de materiales y de la experimentación electrocinética, pudiéndose afirmar que ya se ha empleado de forma real en sistemas en los cuales intervienen fenómenos electrocinéticos. Sin embargo, su aplicación directa a tratamientos electrocinéticos para la construcción o conservación de patrimonio sigue siendo, por el momento, una línea todavía por emerger.

### 2.5.2 Clasificación de técnicas

La norma ISO/ASTM 52900 [39], clasifica oficialmente la fabricación aditiva en 7 grandes familias:

1. Extrusión de material: el material previamente fundido es expulsado de manera continua a través de una boquilla. Se emplea con materiales termoplásticos (PLA, ABS, PETG, nylon...) y recibe comúnmente el nombre de Fused Deposition Modeling (FDM).
2. Fotopolimerización en cuba: a través de la solidificación de una resina líquida al reaccionar con haces de luz selectivos. Es una tecnología de fabricación aditiva muy precisa, y expandida sobre todo como SLA (Stereolithography) en el sector dental y biomédico además de en la producción de microcomponentes.
3. Fusión en lecho de polvo (Figura 2-8): un láser o haz de electrones, fusiona capa por capa el polvo expuesto en un lecho. Permite la producción de piezas que requieren una gran resistencia, empleados sobre todo en la industria aeroespacial y automoción, ya que algunas técnicas como SLM o DMLS permite la fabricación aditiva empleando distintos metales

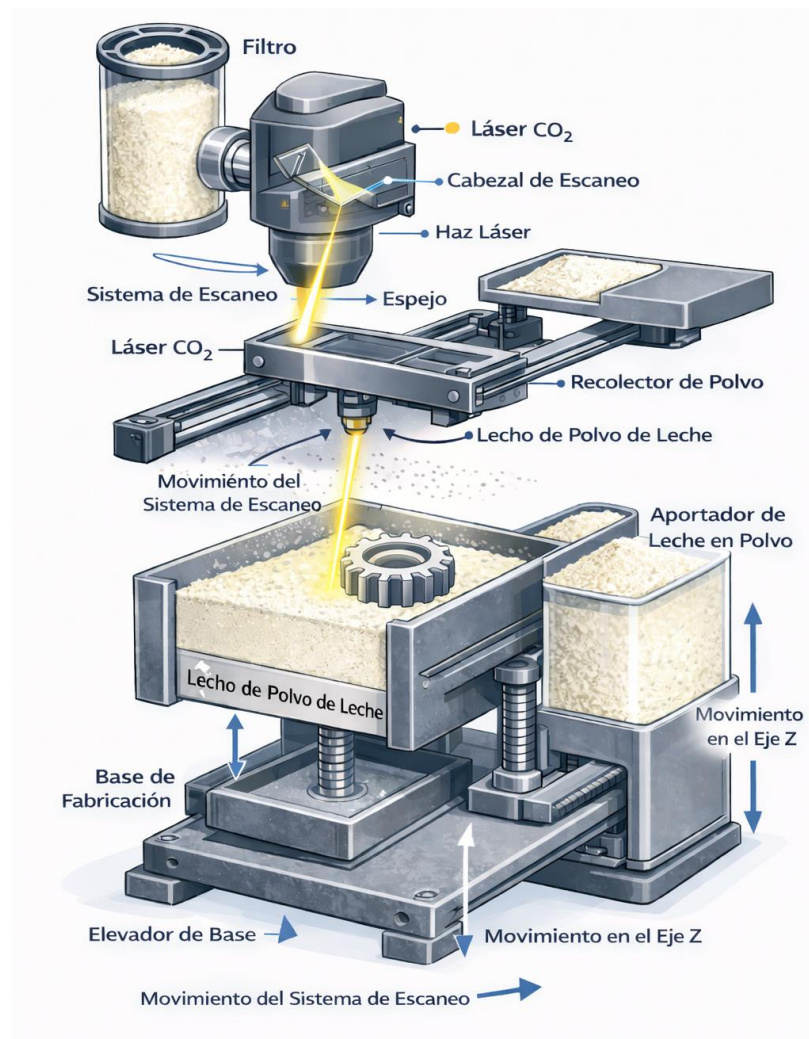


Figura 2-8 Fusión en lecho de polvo. Imagen generada por ChatGPT

4. Inyección de aglutinante: esta tecnología de fabricación aditiva está basada en la deposición selectiva de un aglutinante líquido sobre un lecho de polvo, que une únicamente las partículas en las zonas que se hayan definido previamente como la geometría de la pieza. El resultado es un objeto que presenta una baja resistencia mecánica (pieza “verde”). Por eso, posteriormente se procesa mediante un sinterizado térmico y/o infiltración, para alcanzar las propiedades mecánicas deseadas.
5. Deposición de energía dirigida: el material es depositado de manera continua sobre la pieza en construcción y fundido mediante un láser o arco eléctrico. Cobra gran sentido en la reparación de piezas.
6. Chorro de material (Figura 2-9): como el PolyJet, el cual deposita y solidifica gotas de resina fotopoliméricas produciendo piezas policromadas que requieran un gran realismo.

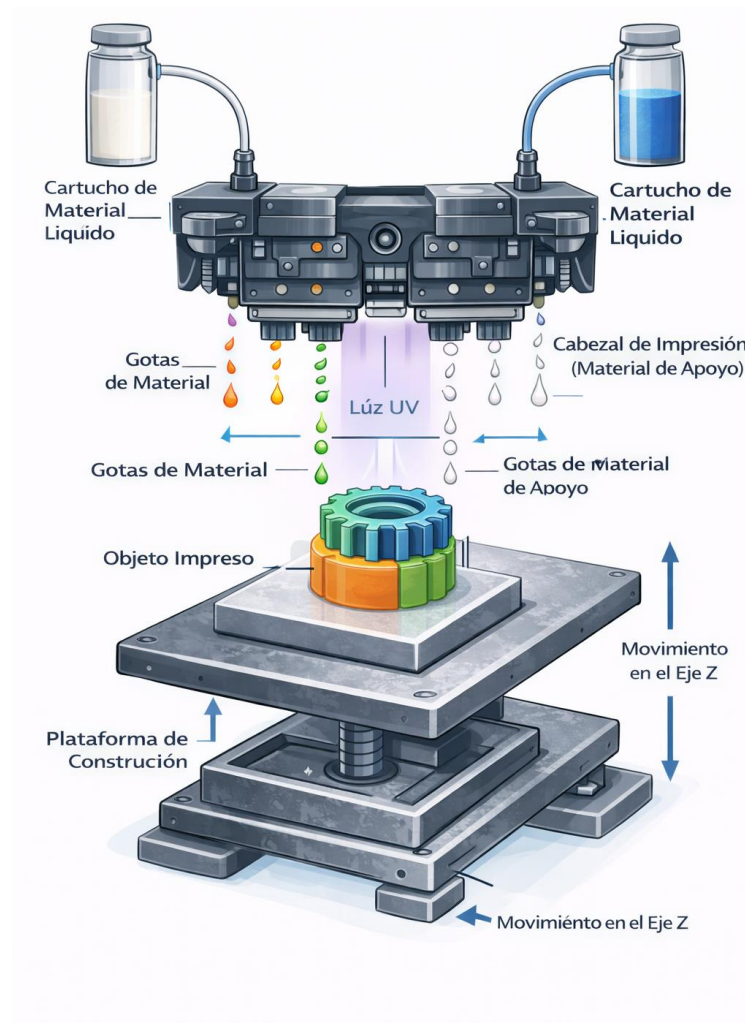


Figura 2-9 Chorreo de material (polyjet). Imagen generada por ChatGPT

7. Laminación de hojas: mediante superposición de capas sólidas y su unión, que posteriormente se cortan según la geometría de cada capa. A diferencia de otras tecnologías aditivas, la laminación no funde el material, lo que reduce las tensiones residuales y deformaciones, sino que la unión entre capas se realiza mediante adhesivos, calor, presión o ultrasonidos.

### 2.5.3 FDM: ventajas e inconvenientes.

El modelado por deposición fundida, conocido por sus siglas en inglés FDM (Fused Deposition Modeling), es una de las tecnologías de fabricación aditiva más extendidas y utilizadas en la actualidad. Su funcionamiento se basa en la extrusión de un material termoplástico, normalmente en forma de filamento, que es calentado hasta alcanzar un estado “semifundido” y depositado capa a capa sobre una plataforma de fabricación. A partir de un modelo digital tridimensional previamente diseñado, el sistema genera la pieza mediante la superposición sucesiva de material hasta completar la geometría deseada. (Figura 2-10)

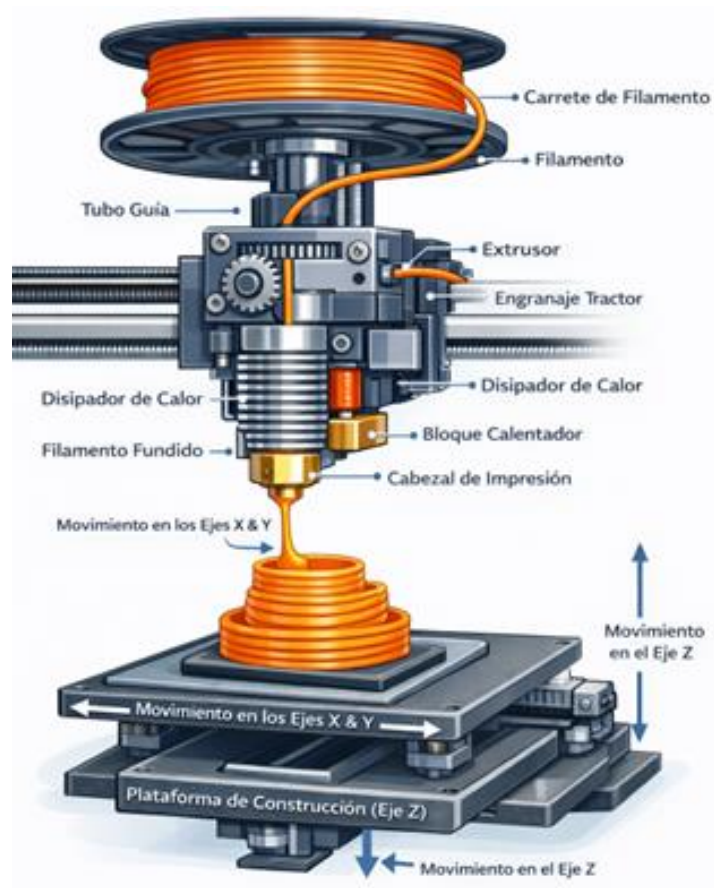


**Figura 2-10 Modelado por deposición fundida. Imagen generada por ChatGPT**

La función principal de esta tecnología es la fabricación de objetos tridimensionales de manera rápida, controlada y con un coste relativamente bajo, lo que la convierte en una técnica especialmente útil para la obtención de prototipos, modelos conceptuales, piezas personalizadas e incluso componentes funcionales en determinados contextos. Dentro del ámbito de la fabricación aditiva, el FDM destaca por su accesibilidad, su facilidad de uso y su amplia implantación tanto en entornos industriales como académicos y de investigación.

Entre sus principales ventajas se encuentra, en primer lugar, su bajo coste de implantación y operación en comparación con otras tecnologías de impresión 3D. Tanto las impresoras como los materiales empleados suelen ser más asequibles que en otros procesos aditivos. Asimismo, presenta una gran versatilidad de materiales, ya que puede trabajar con distintos polímeros termoplásticos, como PLA, ABS, PETG o TPU, entre otros. Otra ventaja importante es la simplicidad del proceso, que permite una preparación relativamente sencilla de los modelos y un manejo accesible incluso para usuarios no especializados. Además, posibilita la fabricación de geometrías complejas y piezas personalizadas sin necesidad de utillajes específicos.

No obstante, el FDM también presenta una serie de inconvenientes que limitan su aplicación en determinados casos. Uno de los más relevantes es la menor calidad superficial de las piezas obtenidas, debido a la presencia visible de capas, lo que puede requerir tratamientos posteriores de acabado. También suele ofrecer una precisión dimensional inferior a la de otras tecnologías de fabricación aditiva, especialmente en piezas de pequeño tamaño o con detalles finos. A ello se suma el desequilibrio mecánico de las piezas, ya que la unión entre capas suele ser más débil que la resistencia dentro de cada capa, lo que afecta negativamente al comportamiento estructural del material. Por lo tanto, debido a su economía de uso y a las exigencias propias del modelo que se trata de desarrollar como colofón de este proyecto, el FDM constituye la tecnología de fabricación aditiva de mayor interés para el objeivo que se persigue en este caso.

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Diseño físico del sistema

#### 3.1.1 *Inventor como herramienta base de diseño*

Para el desarrollo del diseño físico del sistema propuesto, se ha empleado el software Autodesk Inventor, una herramienta de diseño asistido por ordenador (CAD) ampliamente utilizada en el ámbito de la ingeniería mecánica y el desarrollo de prototipos. El uso de este software ha permitido modelar de forma precisa todos los componentes que integran el sistema electrocinético, incluyendo tanto las piezas estructurales como los elementos funcionales imprescindibles para la implementación del soporte electrónico. A través de un entorno de “modelado tridimensional paramétrico” (que es como Autodesk define de forma directa su propia herramienta), ha sido posible definir con exactitud las geometrías, dimensiones y relaciones entre las distintas partes del conjunto, facilitando así una visión global del sistema antes de su posible fabricación.

Una de las principales razones para la elección de Autodesk Inventor frente a otras herramientas CAD radica en su capacidad para trabajar con ensamblajes complejos. Esto ha resultado especialmente útil en el presente proyecto, donde es necesario integrar múltiples elementos (compartimentos, soportes, sistemas de acople y carcasas...) garantizando su correcta disposición espacial y compatibilidad geométrica. Además, el software permite simular el montaje del sistema, detectar posibles interferencias entre piezas y realizar modificaciones de forma ágil mediante el uso de parámetros, lo que optimiza el proceso de diseño.

Por otro lado, Autodesk Inventor ofrece herramientas específicas para la generación de planos técnicos, lo que facilita la documentación del diseño y su futura fabricación. Asimismo, la posibilidad de exportar de manera sencilla los modelos a distintos formatos compatibles con tecnologías de fabricación aditiva, como el formato STL empleado en este trabajo, supone una ventaja adicional en el desarrollo de prototipos y modelos físicos (Figura 3-1).

En conjunto, el empleo de esta herramienta ha permitido llevar a cabo un diseño detallado, coherente y fácilmente reproducible del sistema, reduciendo errores en fases posteriores del desarrollo, lo que se ha traducido en la reducción de costes derivados de la fabricación de componentes no compatibles dentro de las características esperadas del sistema, mejorando la eficiencia del proceso de desarrollo.

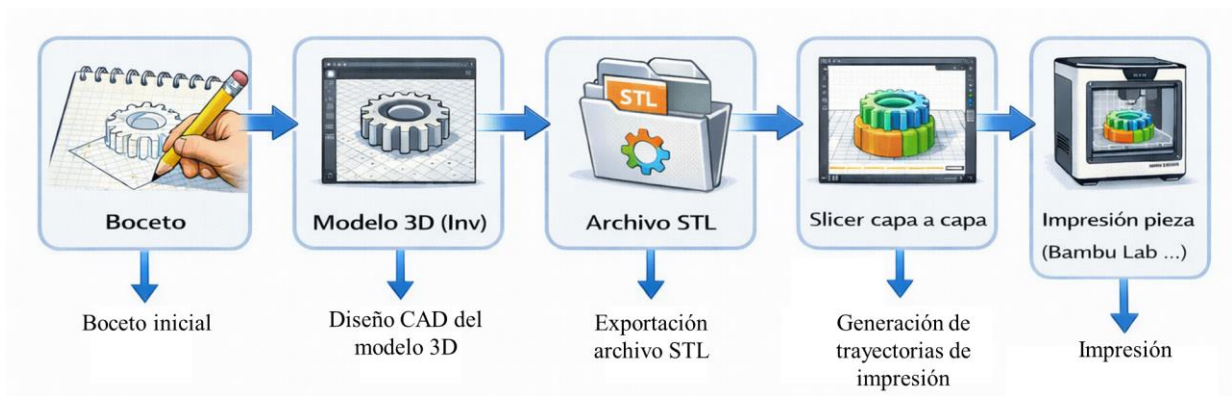


Figura 3-1 Esquema del proceso de diseño y fabricación por impresión 3D

### 3.2 Construcción mediante FDM

Para la construcción de parte de los prototipos que posteriormente se comentarán se emplearon las impresoras Bambu Lab presentes en el laboratorio de investigación del diseño del CUD-ENM, que se corresponden con los modelos Bambu Lab P1P y el Bambu Lab X1 Carbon (Figura 3-2).



Figura 3-2 Imagen de los modelos de impresoras empleados en este TFG

Las piezas diseñadas e importadas en STL se cargaron en el software Bambu Studio para su posterior impresión (Figura 3-3).

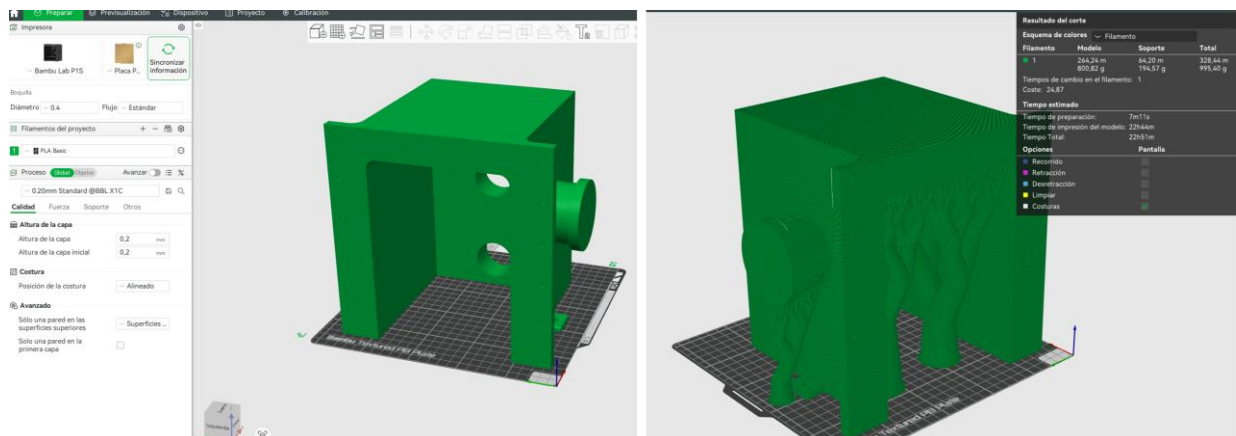


Figura 3-3 Imágenes del proceso de tratamiento de la pieza con el software Bambu studio

Para la impresión de los prototipos se seleccionaron como materiales de impresión el PLA (Ácido Poliláctico) por ser uno de los materiales más utilizados en la fabricación aditiva y el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) debido a su mejor comportamiento frente a condiciones ambientales externas y de durabilidad. Las ventajas e inconvenientes de los dos materiales seleccionados para la impresión de los prototipos se recogen en la Tabla 3-1.

La elección del material resulta clave en el comportamiento posterior del electrolizador. Debido a las condiciones de funcionamiento del equipo, caracterizadas por la presencia de humedad, al albergar en su interior papetas húmedas, exposición a valores extremos de pH en las inmediaciones de los electrodos; esfuerzos mecánicos de empuje; posibles variaciones térmicas ambientales; y otros requerimientos mecánicos asociados a la carga del material del interior de los elementos acoplados, se considera que a priori los prototipos finales deben estar contruidos en ABS, aunque este tipo de hilo presenta una mayor dificultad para la impresión que el PLA. Sin embargo, debido a la facilidad de impresión y alta precisión dimensional se empleará el PLA en el diseño del primer dispositivo para analizar cómo se acoplan las partes principales del electrolizador y para hacer ensayos de carga en condiciones reales (este aspecto se comenta en detalle más adelante). No se contempla en ningún caso su posible uso para dispositivos reales debido a la baja resistencia térmica, al comportamiento frágil frente a impactos y a la sensibilidad a la humedad y a la radiación ultravioleta que presenta este material.

| FACTOR                                      | PLA (Ácido Poliláctico)                                                                      | ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estierno)                     |
|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Facilidad de impresión</b>               | Muy fácil (ideal para principiantes)                                                         | Más difícil (requiere cierta experiencia)                  |
| <b>Warping<sup>5</sup></b>                  | Muy bajo                                                                                     | Alto (requiere cama caliente y cerramiento)                |
| <b>Precisión dimensional</b>                | Alta (baja contracción y escaso <i>warping</i> )                                             | Media (mayor contracción térmica y escaso <i>warping</i> ) |
| <b>Adhesión a la cama</b>                   | Buena                                                                                        | Más complicada                                             |
| <b>Resistencia mecánica</b>                 | Moderada (más frágil)                                                                        | Alta (más resistente a impactos)                           |
| <b>Rigidez</b>                              | Alta (material rígido)                                                                       | Media (más flexible que PLA)                               |
| <b>Resistencia térmica</b>                  | Baja (>60°C se deforma con el calor)                                                         | Alta (a partir de 90-100°C se deforma con el calor)        |
| <b>Durabilidad</b>                          | Menor (se degrada con el tiempo)                                                             | Mayor                                                      |
| <b>Resistencia a impactos</b>               | Baja (quebradizo)                                                                            | Alta (tenaz y resistente)                                  |
| <b>Acabado superficial</b>                  | Muy bueno                                                                                    | Bueno                                                      |
| <b>Emisión de gases</b>                     | Bajo                                                                                         | Alta (emite vapores tóxicos)                               |
| <b>Biodegradabilidad</b>                    | Sí                                                                                           | No                                                         |
| <b>Resistencia química</b>                  | Baja (puede degradarse con agua caliente, soluciones ácidas o básicas o algunos disolventes) | Mayor resistencia química                                  |
| <b>Resistencia al impacto meteorológico</b> | Baja (sensible a radiación UV, humedad, lluvia y variaciones térmicas)                       | Alta                                                       |

Tabla 3-1 Principales propiedades de los materiales seleccionados para la impresión

<sup>5</sup> En fabricación aditiva, el *warping* hacer referencia a la deformación y despegue de las esquinas de la pieza de la cama, causado por la contracción térmica del material al enfriarse.

### 3.3 Prototipos

#### 3.3.1 Especificaciones

Durante el desarrollo del proyecto, se aplicó un proceso iterativo de diseño, en el cual se desarrolló un prototipo inicial, de mayores dimensiones de las normales, y mediante sucesivas modificaciones y mejoras, se refinó el diseño hasta alcanzar la solución más adecuada conforme a los objetivos propuestos.

Los diseños planteados se basaron en el diseño recogido en la patente [35], Figura 2-6, y debe cumplir las siguientes especificaciones:

- Ser capaz de soportar cargas (en torno a 4 kg de peso). Este es el peso estimado del material que suele albergar en su interior.
- Debe permitir ajustar el contacto papeta-muro para que en todo momento no exista ningún tipo de problema en la circulación de la corriente eléctrica.
- Debe permitir el acceso a su interior, para llevar a cabo la carga de material o la toma de muestras de papeta, una vez el dispositivo esté anclado.
- Debe resistir a condiciones ambientales variables, ya que su uso se plantea tanto en interiores como en exteriores de edificios.
- Debe permitir que se le acople un sistema de humectación automático que permita mantener la papeta con un grado de humedad óptimo para la circulación de corriente.
- Debe disponer de alojamientos para albergar los componentes electrónicos

#### 3.3.2 Tipos de prototipos diseñados

##### 3.3.2.1 Prototipo I

El primer prototipo se diseñó en base a dos premisas fundamentales: 1) analizar el acoplamiento de los elementos fundamentales que compondrán el electrolizador, tales como el armazón exterior, la tapa empujadora, la tapa superior y los tapones; 2) realizar un ensayo de carga real a fin de analizar cómo influye la anisotropía asociada a este método de fabricación (esto se debe a que la deposición de las capas genera planos de debilidad preferentes) y el factor de relleno empleado durante la impresión; 3) realizar un análisis de esfuerzos mediante el software Autodesk Inventor, con el objetivo de evaluar el comportamiento del prototipo frente a las cargas aplicadas, así como identificar posibles zonas críticas susceptibles de fallo estructural. Se emplearon como cargas, la determinada durante el ensayo de carga real y un incremento del 20%, tomado con respecto a este valor, como factor de seguridad adicional.

Este prototipo se diseñó con dimensiones superiores a las que tendría realmente el dispositivo que se fabricará para su uso en obra, es decir, el sistema se sobredimensionara en cuanto a capacidad interior pero manteniendo los espesores de las paredes previstos para el prototipo final (0,5 cm). De este modo, el sistema inicial se sometería a una primera prueba de carga mucho más exigente debido a su mayor capacidad, lo cual introducía implícitamente un primer coeficiente de seguridad en el diseño.

Este dispositivo se imprimió en PLA (Figura 3-4), pese a no ser el material óptimo, con un factor de relleno en todas las piezas de un 15%.

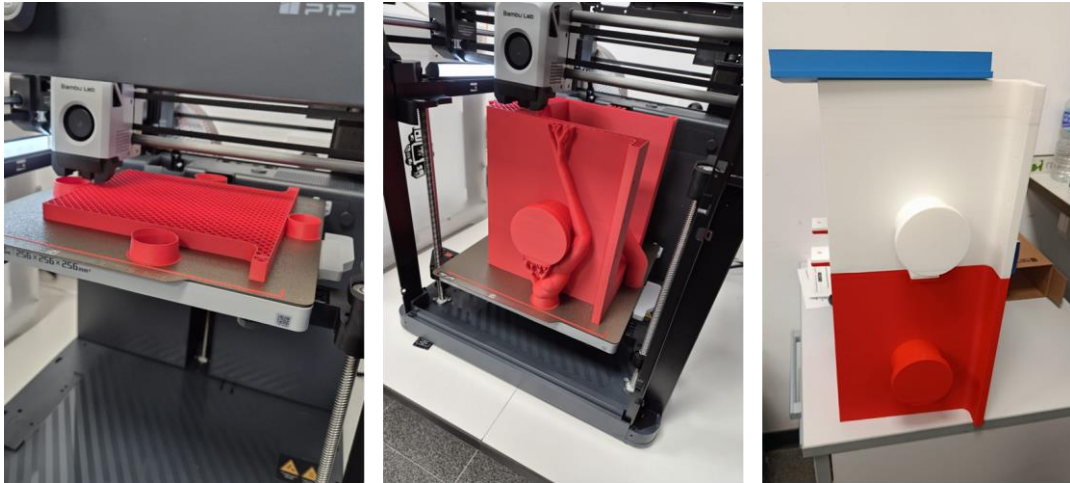


Figura 3-4 Fotografías tomadas durante el proceso de impresión del prototipo I que aparece en la imagen de la derecha

### 3.3.2.2 Prototipo II

En base al resultado obtenido con el prototipo I, se procedió con el diseño del prototipo II llevando a cabo: 1) optimización de las dimensiones con objeto de ajustarlas a las dimensiones reales del dispositivo; 2) diseño de los elementos acoplantes que albergarán la parte electrónica del dispositivo. En esta fase, se diseñó un dispositivo que albergue el solo todos los elementos electrónicos, aunque en realidad estos elementos se distribuirán entre los dos dispositivos que formarán el juego de dispositivos ánodo-cátodo.

Este prototipo se fabricó con ABS (Figura 3-5), con el objeto de analizar el resultado de impresión de las piezas en este tipo de material, utilizando un factor de relleno del 25%.

Para este prototipo también se realizó un análisis de esfuerzos mediante el software Autodesk Inventor empleando como cargas las mismas que para el prototipo I.

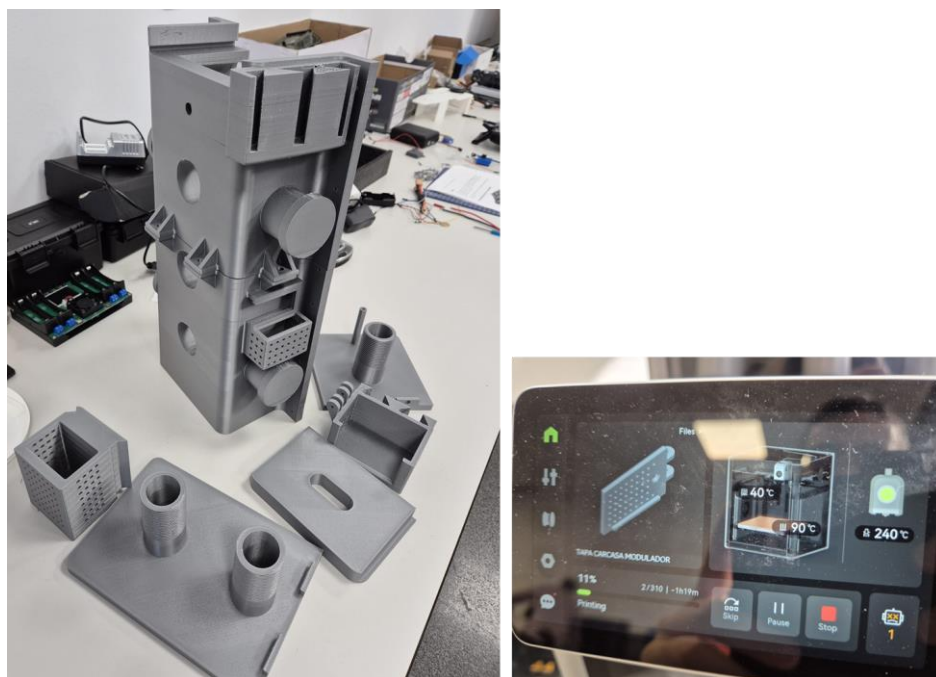


Figura 3-5 Imagen de las piezas fabricadas para el prototipo II. Se muestra además, a la derecha, la temperatura necesaria para la impresión con este material

### 3.3.2.3 *Prototipos IIIa IIIb*

El diseño de los prototipos IIIa y IIIb se corresponde con el diseño definitivo de los prototipos que se emplearán en obra. Estos dispositivos como funcionarán por pares, es decir, uno actuará como ánodo y otro como cátodo, podrán albergar cada uno una parte distinta de la electrónica. Mientras el dispositivo IIIa puede albergar la parte de alimentación, albergando la batería y el regulador de tensión, el dispositivo IIIb puede albergar la placa de Arduino para la comunicación del sistema a distancia

Los prototipos IIIa y IIIb representan el diseño final que se implementará directamente en obra, caracterizándose por un funcionamiento modular y colaborativo. Al operar en parejas, es decir al actuar uno como compartimento anódico y el otro como compartimento catódico, el diseño permite realizar una distribución inteligente de sus componentes electrónicos. De esta manera, el dispositivo IIIa puede albergar los elementos relativos a la gestión energética, integrando la batería y el regulador de tensión, mientras que el dispositivo IIIb puede albergar los elementos de procesamiento de datos y conectividad mediante la placa Arduino. Esta división de funciones permitirá optimizar el espacio a lo largo de los armazones exteriores.

### 3.3.2.4 *Prototipo IVa-IVb*

Estos prototipos son similares a los prototipos *IIIa* y *IIIb* pero adaptando su diseño para que pueda ser aplicado sobre una superficie curva como puede ser el caso de una columna.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Prototipo I

#### 4.1.1 Vista en explosionado

El primer prototipo, tal y como se aprecia en la Figura 4-1, lo conforman 4 piezas fundamentalmente: un armazón, una tapa de empuje, los tapones roscados y una cubierta.

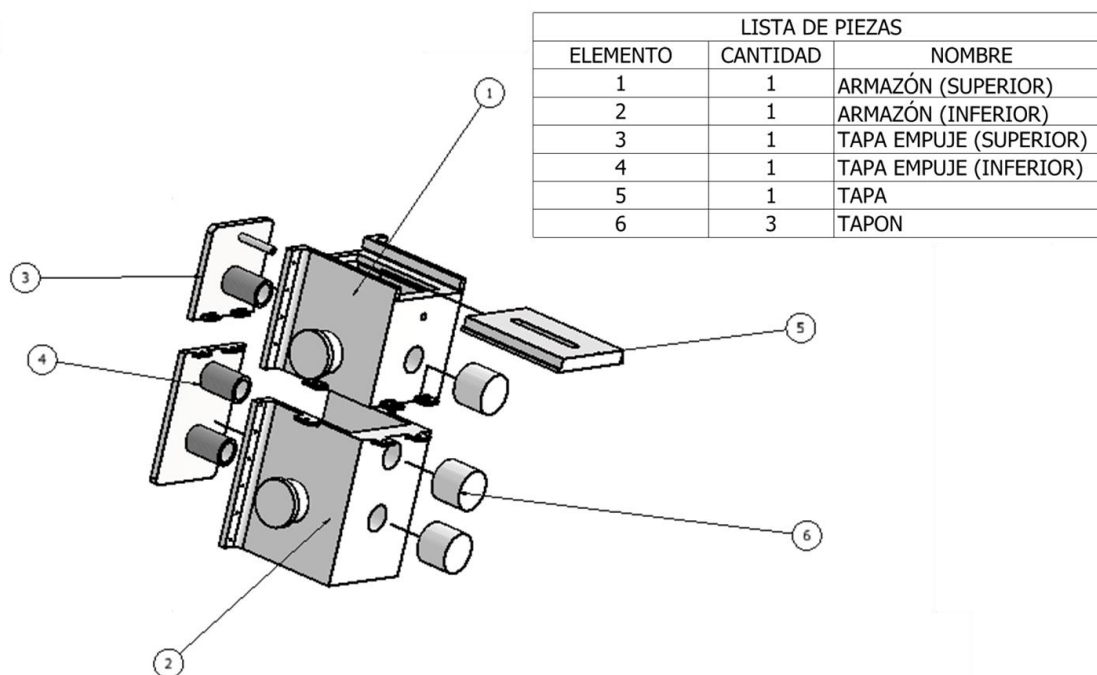


**Figura 4-1 Vista en explosionado del prototipo I**

Con este diseño, las dimensionales totales del prototipo I, es decir, sus dimensiones exteriores son: 39 cm de altura, 22 cm de anchura y 18 cm de profundidad.

#### 4.1.2 Análisis de las piezas impresas y su acoplamiento

**El armazón** (Figura 4-2) constituye el elemento estructural principal del diseño, sobre el cual se integran el resto de los componentes. En consecuencia, debe ser capaz de soportar la carga máxima prevista y disponer de un sistema adecuado de anclaje a superficies. Para su configuración geométrica,

se optó por un sólido hexaédrico, debido a su simplicidad y facilidad de fabricación mediante técnicas de fabricación aditiva.

El armazón cuenta con diferentes soluciones de fijación en función de las restricciones normativas asociadas a la intervención sobre el soporte. Por un lado, dispone de un sistema invasivo basado en perforaciones que, mediante clavos o tornillos, permite la fijación directa del dispositivo al paramento. Este sistema se materializa mediante una serie de orificios distribuidos en los laterales del armazón, proporcionando flexibilidad en la elección de los puntos de anclaje (1). Por otro lado, dispone de un sistema no invasivo que garantiza el contacto con la superficie sin provocar daños en la estructura. Para ello, se incorporó una solución estructural compuesta por cuatro brazos (2) sobre los que se pueden acoplar anclajes externos que ejerzan la suficiente presión para mantener el prototipo en contacto con el material a tratar.

Esta parte del dispositivo dispone además de tres orificios destinados a permitir la integración del sistema de empuje asociado a la placa empujadora (3). Adicionalmente, dispone de un cuarto orificio (4) específico para la implementación de un sistema de riego, cuya función es garantizar el mantenimiento de la humedad de la papeta durante el proceso de tratamiento.

Como elemento final del diseño, se incorporó un sistema de guiado mediante rieles que permite el deslizamiento de una tapa corrediza en su parte superior (5). Este mecanismo facilita el acceso al material contenido en el interior del dispositivo sin necesidad de desmontar el conjunto ni separarlo de la superficie de trabajo.

Previo realización de la impresión, se comprobó que las dimensiones del armazón excedían la capacidad de fabricación de una impresora comercial estándar. Por este motivo, se optó por dividir la pieza en dos módulos independientes. La parte inferior, de mayor tamaño, se diseñó para albergar dos de los orificios y concentrar la mayor parte del volumen del armazón, de modo que pudiera asumir la mayor parte de la carga estructural. Por su parte, la parte superior, de menor dimensión, incorporaría un único orificio y completaría la geometría del conjunto. Ambos módulos se diseñaron para su ensamblaje mediante cuatro pestañas provistas de orificios pasantes (6), permitiendo su unión mediante tornillería estándar, concretamente tornillos y tuercas de métrica M6.

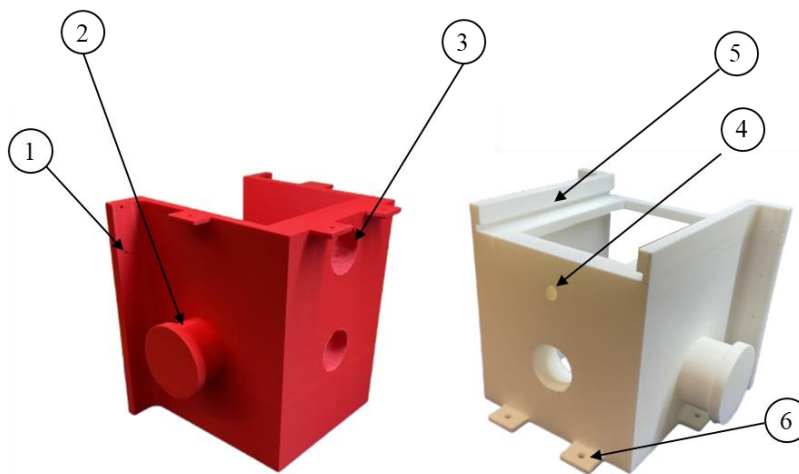


**Figura 4-2** Fotografía de la parte inferior del armazón (imagen de la izquierda) y de la parte superior (imagen de la derecha)

Con el fin de garantizar un buen contacto eléctrico entre la papeta, que se introducirá en el armazón, y el muro sobre el que se coloque el dispositivo, es fundamental que exista una pieza que permita ir ejerciendo presión a medida que avanza el ensayo. Esto se debe a que las papetas con el paso del tiempo se van secando y van reduciendo su volumen, lo que conlleva una pérdida de contacto con el muro.

Para poder ajustar esta presión, se diseñó una **tapa de empuje** (Figura 4-3) cuya función es permitir la regulación manual de la presión ejercida sobre la papeta mediante un sistema de roscado que posibilita ajustar el grado de presión al que se somete a la papeta.

Para ello la tapa empujadora cuenta con tres cilindros roscados (1) que albergarán en su interior un muelle de compresión. Sobre estos cilindros irán roscados unos **tapones** (Figura 4-4), que a medida que avanzan van comprimiendo el muelle y van ocasionando un avance en la tapa de empuje. Debido a esto la tapa transmite la presión ejercida por el muelle y la distribuye de manera homogénea a la papeta, la cual debido a su viscosidad se ira amoldando a la superficie del muro. Este sistema permitirá mantener en todo momento un contacto eléctrico idóneo.

Por otro lado, la placa se diseñó con una cavidad pasante (2) destinada a conectar el interior del armazón con un sistema de riego automático que permita mantener el grado de humedad de las papetas en el valor que consideremos óptimo.

De manera análoga al armazón, la tapa empujadora fue dividida en dos partes con el fin de adaptarse a las limitaciones dimensionales de una impresora comercial estándar. Se decidió disponer las solapas de unión (3) entre las dos partes que conforman la tapa empujadora, en la cara opuesta a la superficie de contacto con el compuesto electrolítico. De este modo, se evita la exposición directa de la tornillería — de naturaleza ferrosa al medio reactivo, minimizando así posibles procesos de corrosión o reacciones indeseadas durante el tratamiento del material.

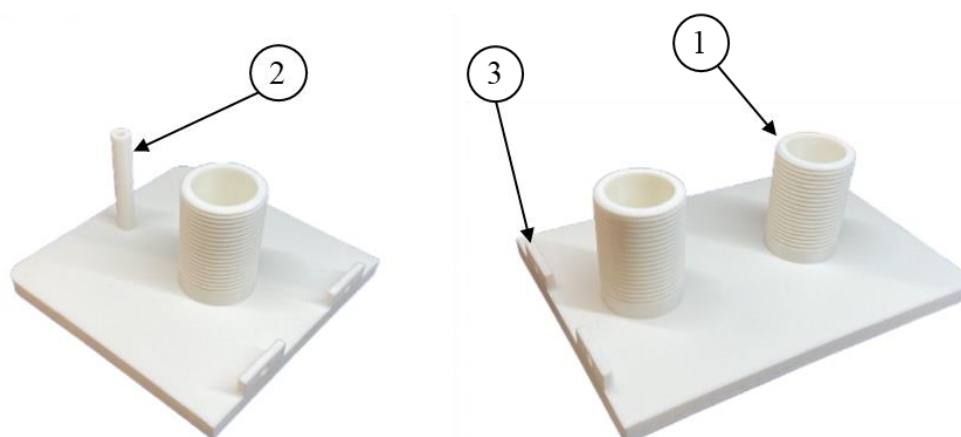


**Figura 4-3 Tapa de empuje. Parte superior (imagen de la izquierda), parte inferior (imagen de la derecha)**

Uno de los principales retos de este primer diseño fue el desarrollo de la propia rosca, tanto la del tapón como la diseñada en la tapa de empuje. Para ello, se optó por emplear una rosca métrica conforme a la norma ISO DIN 13, al tratarse del estándar más extendido en aplicaciones de fijación mecánica. Este tipo de rosca se caracteriza por presentar un perfil en “V” con un ángulo de 60°, y su geometría se definió siguiendo las especificaciones recogidas en dicha normativa, lo que permitió obtener el diseño final de la rosca conforme a este estándar.

- Diámetro nominal 40 mm
- Paso estándar:  $p = 4$  mm
- La altura del triángulo fundamental vendría definida por:

$$H = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot P = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 4 = 3,46 \text{ mm}$$

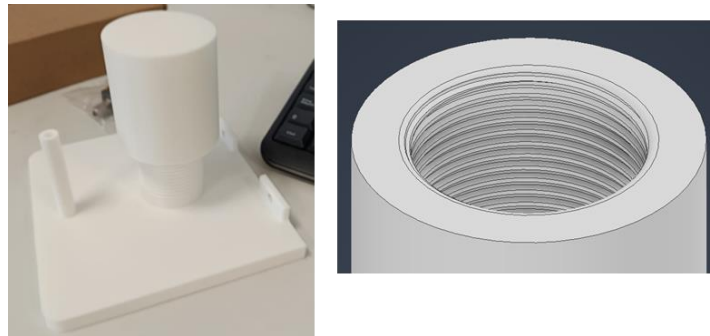


Figura 4-4 Tapón roscado encajado y su roscado diseñado

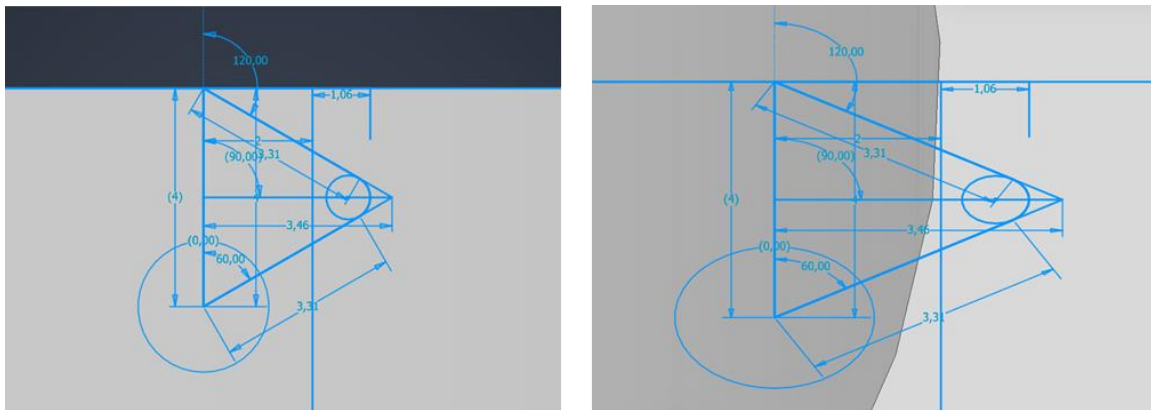


Figura 4-5 Imagen frontal del diseño del perfil de rosca DIN 13 (izquierda) e inclinada superior (derecha)

Una vez definido el perfil, se empleó la herramienta coil para generar la geometría de la rosca y determinar su profundidad. Esta se estableció con un valor equivalente al de la rosca presente en la tapa empujadora, manteniendo en todo momento el paso correspondiente al estándar seleccionado.

Finalmente, el prototipo I cuenta con una **cubierta superior** (Figura 4-6) que permitirá acceder al interior del dispositivo, cuando se requiera, sin necesidad de desmontar el dispositivo de la superficie de trabajo. Por ello, se optó por una solución basada en una tapa corredera, que facilitase una apertura sencilla y controlada.

Además, esta cubierta se diseñó incorporando una cavidad específica destinada al paso del cableado, permitiendo así la alimentación eléctrica de los electrodos desde el exterior sin comprometer la funcionalidad ni la estanqueidad del conjunto.

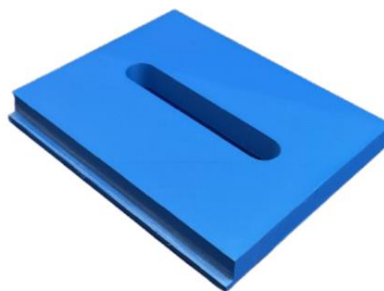


Figura 4-6 Cubierta

En la Figura 4-7 se muestran fotografías del prototipo I una vez ensamblado con todos sus elementos montados.

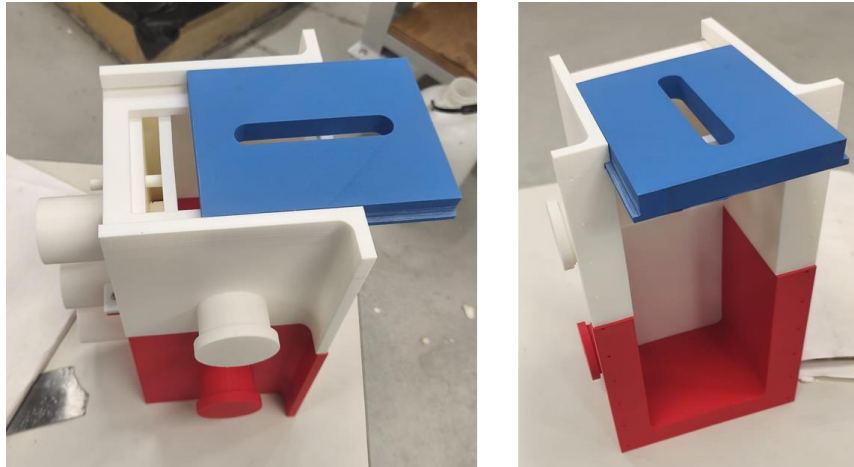


**Figura 4-7 Ensamble de todos los elementos que conforman el prototipo I**

Al acoplar los distintos elementos, se apreció que las piezas no deslizaban correctamente una sobre otra, por lo que éste fue un parámetro a corregir en el diseño de los prototipos posteriores. Se decidió por tanto aumentar la tolerancia en los elementos de acople, estableciendo un juego de 0,1 cm entre componentes como tapas y cavidades, con el fin de garantizar su correcto ensamblaje. Esta modificación fue necesaria debido a las limitaciones de precisión de la impresora, que impedían el ajuste adecuado de algunas piezas en su configuración inicial.

#### *4.1.3 Ensayo carga real*

Tal y como se mencionó en la metodología, se llevó a cabo un ensayo de carga directamente sobre el Prototipo I, evaluando su comportamiento estructural bajo condiciones reales de funcionamiento (Figura 4-8).



**Figura 4-8 Imagen que muestra la papeta que se fue añadiendo al prototipo I que está anclado al fondo de la imagen en el muro**

Para la realización del ensayo, el prototipo fue fijado a una pared del laboratorio construida en calcarenita, empleando tornillos y tacos adecuados, con el fin de garantizar una correcta sujeción y evitar desplazamientos durante la aplicación de la carga. Una vez instalado, se procedió a la aplicación

progresiva de la carga mediante el relleno del armazón con una mezcla previamente preparada de agua y caolín, simulando de este modo las condiciones de servicio del dispositivo. La carga se introdujo de forma incremental en intervalos de aproximadamente 2 kg, con el objetivo de observar el comportamiento del sistema en cada fase.

En una primera etapa, la parte inferior del armazón fue rellena hasta alcanzar una masa de 6 kg. Posteriormente, se continuó el proceso de llenado hasta completar la capacidad total del prototipo. Dado que una carga de 10 kg superaba el volumen disponible del armazón, el llenado final se detuvo en 9,3 kg (Figura 4-9), correspondiente al volumen máximo admisible por la estructura, estimado en  $7140 \text{ cm}^3$ . Una vez alcanzada dicha carga, el prototipo se mantuvo en estas condiciones durante un periodo de 10 días, con el fin de evaluar posibles deformaciones diferidas o fallos estructurales a lo largo del tiempo (Figura 4-10).



**Figura 4-9** Fotografías del dispositivo con 6 kg (izquierda) 9,3 kg (en el medio) y con la tapa puesta (derecha)

Tras este periodo, se observó que la estructura permanecía íntegra, sin presentar roturas ni fallos estructurales visibles, ni siquiera un desplazamiento en la parte inferior manifestada en forma de abombamiento.



**Figura 4-10** Imagen tomada 10 días después de la prueba de carga, con el contenido lleno con 9,3kg de arcilla. Se aprecia la pérdida de volumen de la arcilla que ya no está en contacto con el muro y se compara con una línea recta en su parte inferior para ver el nulo desplazamiento aparente de la superficie del armazón

#### 4.1.4 Análisis de esfuerzos

Para la realización del análisis mediante simulación, y dado que el material PLA no se encontraba previamente definido en el programa, fue necesario proceder a su configuración manual. En este proceso, se asignó al material una densidad de 1,25 g/cm<sup>3</sup>, valor obtenido a partir de la media del rango típico en el que puede variar la densidad del PLA, comprendido entre 1,21 y 1,30 g/cm<sup>3</sup>.

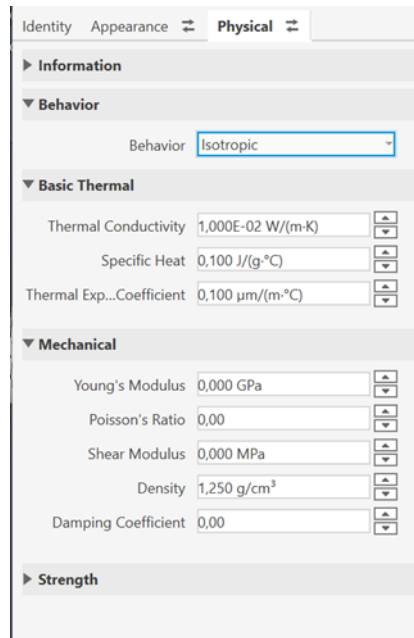


**Figura 4-11** Pestaña de creación de datos para la configuración de un nuevo material en Autodesk Inventor

De este modo, se obtuvo una aproximación representativa del comportamiento real del material, lo que permitió realizar un análisis más fiable de la respuesta mecánica del prototipo frente a las cargas aplicadas.

Sobre la superficie de 210 cm<sup>2</sup>, correspondiente a la cara inferior del armazón, se aplicó una carga con el objetivo de analizar el comportamiento estructural del conjunto. Para ello, se procedió al cálculo de la presión ejercida a partir de la relación entre fuerza y superficie.

En primer lugar, para una masa de 9,3 kg (la máxima aceptada en función de su volumen) se determinó una fuerza equivalente mediante la expresión:

$$F = m \cdot g = 9,3 \cdot 9,81 = 91,233 \text{ N}$$

Posteriormente, considerando la superficie de aplicación:

$$A = 210 \text{ cm}^2 = 0,021 \text{ m}^2$$

Se obtuvo la presión ejercida:

$$\text{Presión} = \text{Fuerza} / \text{Superficie} = 91,233 / 0,021 = 4344,429 \text{ Pa}$$

A partir de este punto, se incrementó la carga hasta alcanzar los 11,16 kg, con el fin de someter al Prototipo a un coeficiente de seguridad de 1,2, evaluando su comportamiento bajo condiciones más exigentes. En este caso:

$$F = 11,16 \cdot 9,81 = 109,4796 \text{ N}$$

$$P = \frac{109,4976}{0,021} = 5213,314 \text{ Pa}$$

Para la carga inicial de 9,3 kg (Figura 4-12), el análisis mediante elementos finitos mostró que la presión máxima alcanzada fue de aproximadamente 0,03988 MPa, localizada en la zona colindante con la tapa inferior del armazón.

En cuanto a la deformación, se registró un desplazamiento máximo del orden de  $1,643 \times 10^{-4}$  cm, lo que indica una deformación prácticamente despreciable. Estos resultados ponen de manifiesto que, bajo esta carga, el comportamiento estructural del prototipo es adecuado, sin riesgo significativo de fallo.

Por otra parte, para el caso extremo de 11,16 kg (correspondientes a la carga máxima más un 20% de factor de seguridad), el análisis reveló una presión máxima de aproximadamente 0,04786 MPa, igualmente concentrada en la zona inferior del armazón. El desplazamiento máximo obtenido fue de  $1,971 \times 10^{-4}$  cm, valor que, aunque superior al caso anterior, sigue siendo muy reducido. Esto indica que, incluso bajo una carga considerablemente mayor, el sistema mantiene un comportamiento estructural estable.

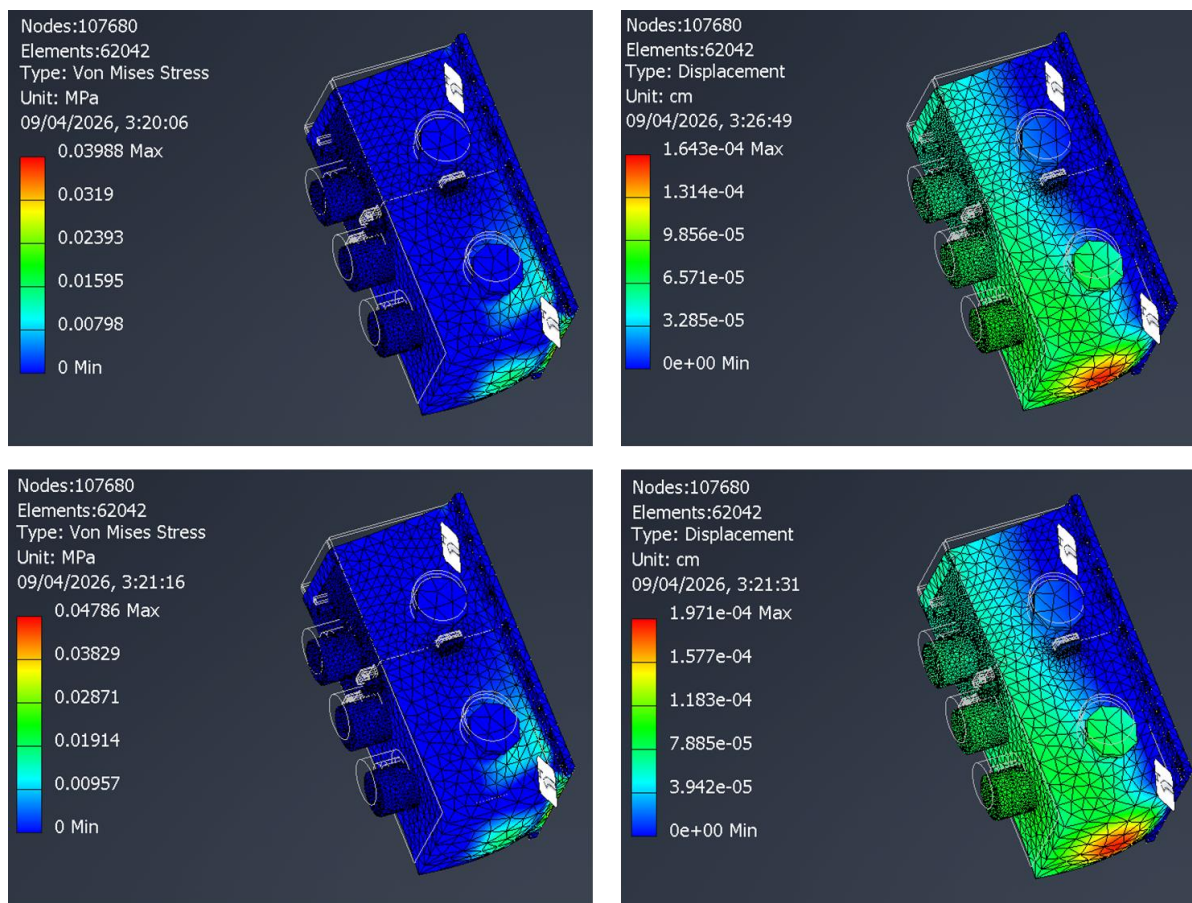


**Figura 4-12** Análisis de elementos finitos, esfuerzos y deformaciones para 9,3 kg (parte superior) y 11,16 kg (inferior)

Los resultados obtenidos evidencian que las tensiones generadas en ambos casos son muy reducidas, situándose varios órdenes de magnitud por debajo de valores típicos de resistencia en materiales poliméricos como el PLA. Esto sugiere que el diseño es adecuado desde el punto de vista estructural para las condiciones de carga consideradas.

Asimismo, los desplazamientos obtenidos son prácticamente despreciables, lo que indica una elevada rigidez del conjunto. Por tanto, se puede concluir que, para las cargas analizadas, el prototipo presenta un comportamiento mecánico satisfactorio, sin que se produzcan deformaciones significativas ni riesgo de fallo estructural incluso bajo la acción de un factor de seguridad del 20% que incremente los esfuerzos a soportar.

## 4.2 Prototipo II

### 4.2.1 Vista en explosionado

El segundo prototipo, tal y como se aprecia en la Figura 4-13, lo conforman las 4 piezas que formaban el prototipo I (armazón, tapa de empuje, tapones roscados y cubierta) junto con las piezas necesarias para albergar los componentes electrónicos. Para el acople de estas nuevas piezas, se realizaron modificaciones en el armazón.

| LISTA DE PIEZAS |          |                            |
|-----------------|----------|----------------------------|
| ELEMENTO        | CANTIDAD | NOMBRE                     |
| 1               | 1        | ARMAZÓN (SUPERIOR)         |
| 2               | 1        | ARMAZÓN (INFERIOR)         |
| 3               | 1        | CARCASA BATERÍA            |
| 4               | 1        | TAPA EMPUJADORA (INFERIOR) |
| 5               | 1        | Tapa batería               |
| 6               | 1        | TAPA EMPUJADORA (SUPERIOR) |
| 7               | 1        | TAPA SUPERIOR              |
| 8               | 4        | TAPON                      |
| 9               | 1        | CARCASA MODULADOR          |
| 10              | 1        | PASADORES                  |

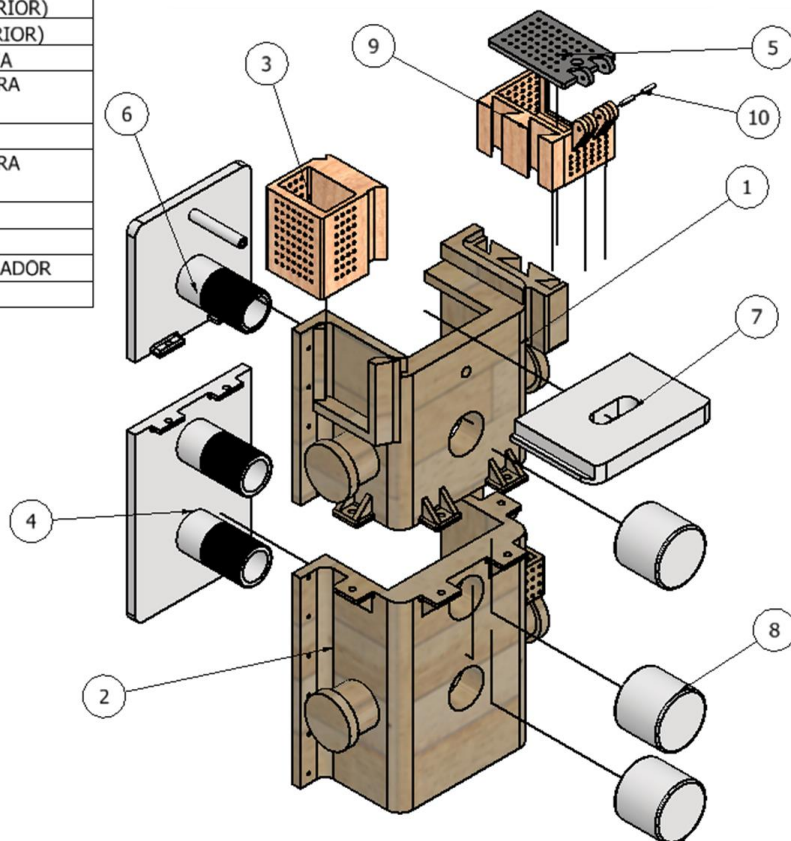


Figura 4-13 Vista en explosionado del prototipo II

Con este diseño, las dimensionales totales del prototipo II, es decir, sus dimensiones exteriores son: 39 cm de altura, 22 cm de anchura y 9 cm de profundidad.

### 4.2.2 Análisis de las piezas impresas y su acoplamiento

A partir del diseño realizado en el prototipo I, se procedió a diseñar un prototipo nuevo con dimensiones más cercanas a la aplicación final del electrolizador. Además, se llevó a cabo la modificación del diseño de las piezas teniendo en consideración las tolerancias necesarias en la zona de contacto de piezas para la posterior impresión y montaje. A continuación, se mencionan las modificaciones más relevantes.

**Modificación del armazón** (Figura 4-14). En primer lugar, se aumentó el diámetro de los agujeros pasantes en 0,1 cm mejorando el ajuste (1), y se redujo la anchura del conjunto a la mitad de su tamaño. Asimismo, en las uniones entre las dos partes del armazón se incorporaron nervios en las solapas (2), con el fin de incrementar su rigidez y reducir la concentración de tensiones, disminuyendo así el riesgo de deformaciones y roturas.

Además, se redondearon todas las aristas y se incorporaron dos sistemas de acople tipo cola de milano destinados a fijar las carcasas de la batería (3) y del regulador de voltaje (4). Estos acoples presentan geometrías diferenciadas para evitar errores de montaje por parte del usuario (principio poka-yoke). Además, se redujo el diámetro de los brazos del armazón hasta 4,5 cm (5), al considerarse que el espesor previo era excesivo y suponía un consumo innecesario de material de impresión.

Por su parte, en la parte inferior del armazón se mantuvo la simetría respecto al diseño superior, incorporando unos raíles para el alojamiento de la placa NanoArduino (6), así como un compartimento inferior destinado a albergar una batería comercial de 9 V (7). Dicho compartimento contaría con numerosas cavidades para permitir la refrigeración de la batería.

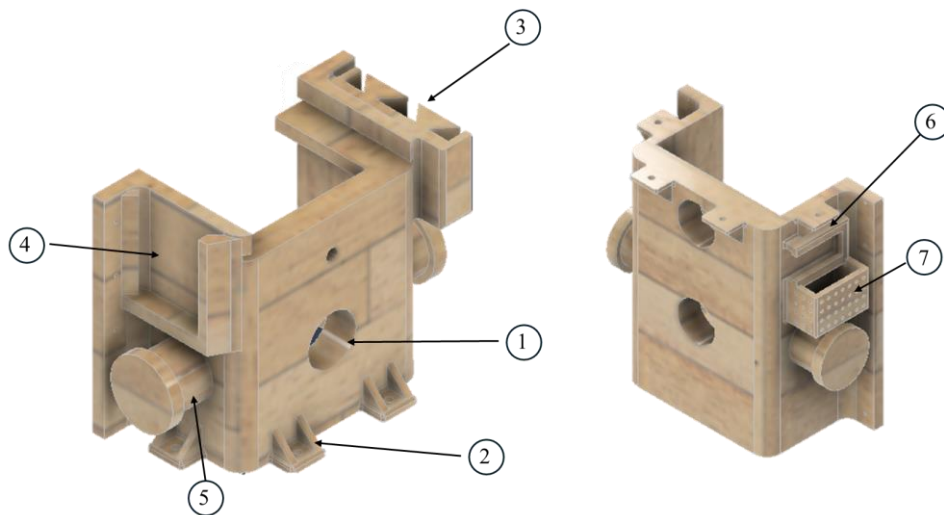


Figura 4-14 Vistas en isométrico de las dos piezas que conforman el armazón

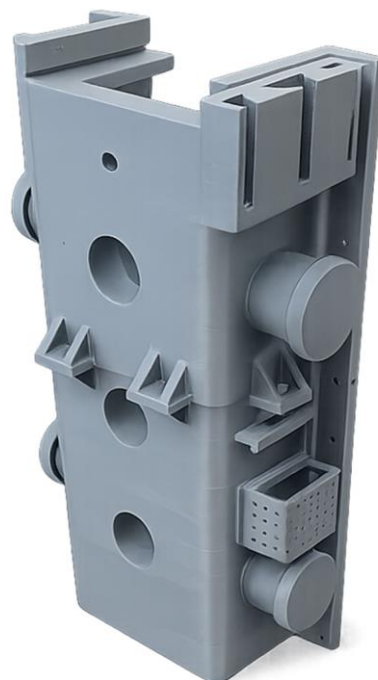


Figura 4-15 Armazón del prototipo II

Para la **tapa empujadora** (Figura 4-16), se incrementó la longitud de los tubos roscados hasta 7,5 cm, ya que en el prototipo I se evidenció que, al igualar su longitud a la de los tapones, no se disponía

del margen necesario para cubrir todo el rango de empuje requerido. Con esta modificación, se consigue que, en condiciones de máxima presión, los tapones roscados lleguen a sobrepasar la mitad del armazón. Asimismo, se añadió un margen de 0,5 cm en los bordes para facilitar su correcto encaje dentro del conjunto.

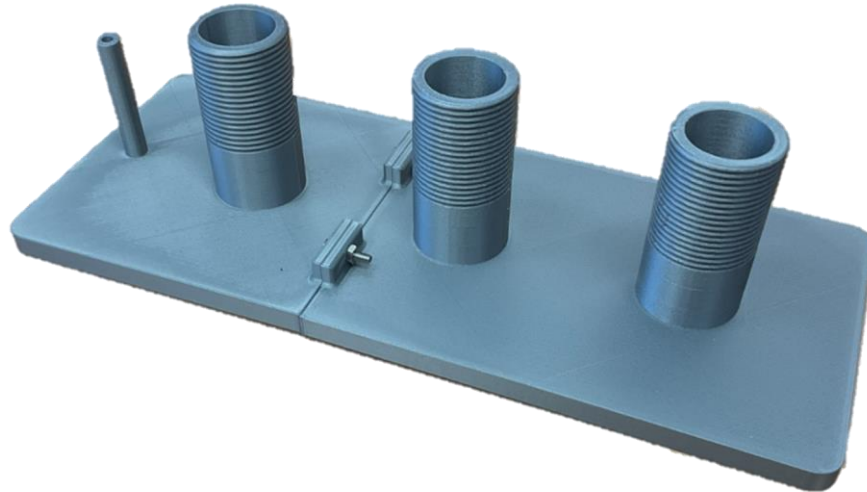


**Figura 4-16 Tapa empujadora del prototipo II**

El **tapón roscado** (Figura 4-17) se mantuvo prácticamente sin cambios respecto al del Prototipo I, únicamente se ha reducido la longitud y se ha realizado un redondeo en los bordes de entrada a la cavidad con el fin de facilitar su acoplamiento.



**Figura 4-17 Tapón roscado**

Las únicas modificaciones realizadas en la **cubierta** (Figura 4-18) estuvieron relacionadas con sus dimensiones, ya que, al reducirse a la mitad el armazón, fue necesario adaptar la cubierta en la misma proporción. Asimismo, se incrementó en 0,1 cm el margen de juego, dado que en el modelo anterior únicamente se conseguía un encaje a presión en los rieles del armazón. Con este ajuste se buscó mejorar la fluidez en su inserción.

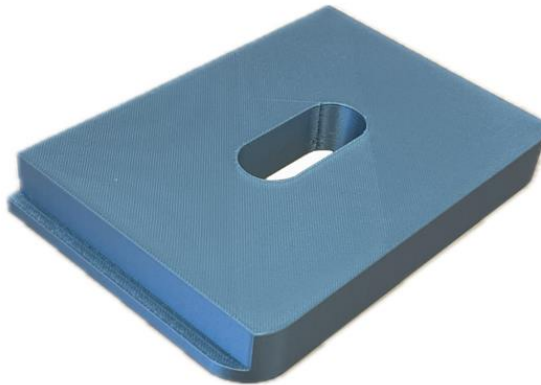


**Figura 4-18 Tapa superior o cubierta**

Para el acoplamiento de los componentes electrónicos se diseñaron los siguientes componentes:

**Carcasa para la batería** (Figura 4-19). Para su diseño, se optó por una geometría que se acoplase de manera prácticamente perfecta a una batería tipo de 3000mAh, incorporando además la correspondiente forma de encaje en el sistema de cola de milano. Asimismo, dado que se trata de un elemento sensible y por razones de seguridad<sup>6</sup>, se diseñaron múltiples cavidades en la carcasa con el objetivo de favorecer la ventilación y permitir la correcta disipación de calor



**Figura 4-19 Carcasa para batería**

**Carcasa del modulador** (Figura 4-20). Esta se diseñó de forma que permitiera la fácil inserción y extracción del dispositivo, manteniendo al mismo tiempo unas condiciones adecuadas de protección debido a su sensibilidad. Para ello, se optó por un acceso superior mediante un sistema de bisagra, con una tapa acoplada y unida mediante dos ejes, que facilitase la manipulación del modulador en cualquier momento sin comprometer su fijación. De este modo, se buscó también evaluar la compatibilidad del sistema de tapa con bisagra con las características del proyecto y los medios disponibles para su fabricación, ya que esta solución evita la pérdida de la tapa —como podría ocurrir en un sistema corredero— al permanecer unida de forma permanente al dispositivo.

---

<sup>6</sup> Durante su funcionamiento, las baterías pueden liberar gases, como el hidrógeno, y generar calor. Por lo tanto, mantener baterías en funcionamiento en un entorno cerrado puede generar una acumulación de gases aumentando el riesgo de explosión o incendio, además de que la falta de ventilación favorece el sobrecalentamiento.

Asimismo, se incorporó una cavidad frontal que permitiese la visualización completa de la pantalla. Las dimensiones de la carcasa se definieron con precisión a partir de mediciones previas del dispositivo, con el objetivo de evitar holguras que pudieran dificultar su uso o provocar desplazamientos indeseados durante la interacción del usuario.

Al igual que en el caso de la batería, se dispusieron múltiples perforaciones para favorecer la ventilación y la disipación térmica, integrándose además el sistema de acople mediante cola de milano correspondiente.

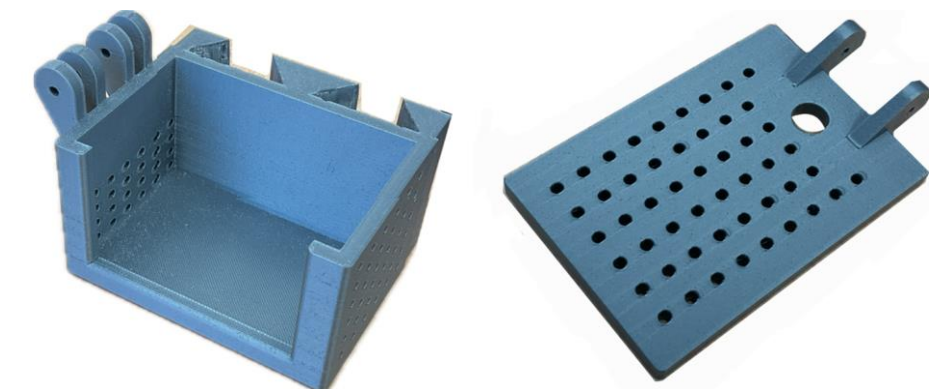


**Figura 4-20 Carcasa del modulador y tapa**

Siguiendo el diseño de la carcasa del modulador, se incorporaron múltiples orificios de pequeño tamaño con el fin de favorecer la ventilación, así como una abertura de mayor dimensión destinada a la salida del cableado. Asimismo, se añadió un resalte perimetral para completar el marco protector de la carcasa y mejorar la protección del dispositivo



**Figura 4-21 Vista general del prototipo II**

A diferencia de la impresión del Prototipo I en PLA que se realizó de forma satisfactoria, sin presentar defectos apreciables durante el proceso de fabricación ni en el resultado final, la fabricación del Prototipo II en ABS presentó ciertas dificultades, detectándose la aparición de dos grietas en la zona del armazón (Figura 4-22). Este defecto se atribuye principalmente a: 1) la velocidad de impresión del

equipo, la cual convendría reducir teniendo en cuenta la altura de las piezas del armazón y las vibraciones que se pueden generar durante el movimiento del filamento; 2) la adherencia de las primeras capas a la placa magnética empleada durante la impresión. Esto se podría mejorar empleando una placa con menor adherencia como puede ser una placa con superficie lisa; 3) la elevada contracción térmica característica de este material. Durante el proceso de enfriamiento, el ABS experimenta variaciones volumétricas más acusadas que el PLA, lo que puede generar tensiones internas en la pieza, especialmente en geometrías con cambios de sección o zonas de mayor rigidez estructural. Como consecuencia, estas tensiones pueden liberarse en forma de fisuras, incluso cuando la impresión se ha llevado a cabo de manera aparentemente correcta.

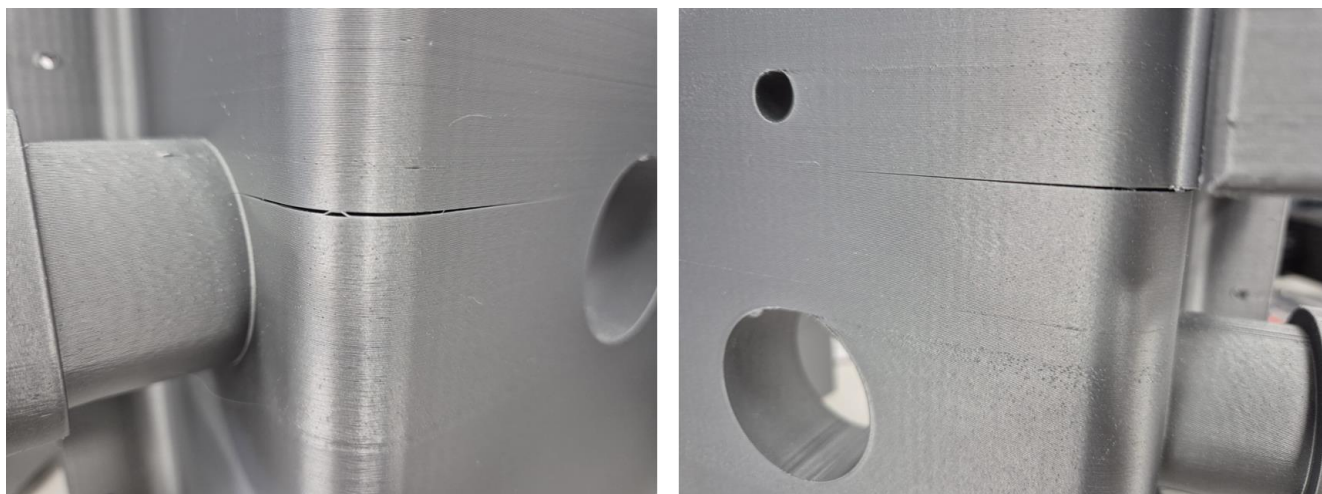


Figura 4-22 imperfecciones de la impresión detectadas en varias partes del armazón

En definitiva, este comportamiento pone de manifiesto la mayor dificultad existente a la hora de imprimir con ABS, siendo necesario aplicar un mayor control en las condiciones de fabricación, tales como regular la temperatura de extrusión y de la placa, impresión de una balsa antes de llevar a cabo las primeras capas de impresión, regular la velocidad de impresión, etc.

#### 4.2.3 Parte electrónica. Material y conexiones

Enfocado a proporcionar un sistema de control de datos y de capacidades del sistema, se procedió a llevar a cabo un diseño del componente puramente eléctrico que albergaría las cavidades que se habían diseñado para los distintos componentes durante el proceso del diseño de las piezas.

El sistema de control del dispositivo se basa en el uso de un microcontrolador **Arduino Nano ESP32** (Figura 4-23, 1), que actúa como unidad central de monitorización y gestión del prototipo. Este dispositivo integra el chip ESP32, basado en una arquitectura de 32 bits capaz de alcanzar frecuencias de hasta 240 MHz, lo que le proporciona una alta capacidad de procesamiento. Además, dispone de memoria ampliada y conectividad inalámbrica integrada mediante WiFi y Bluetooth, permitiendo posibles aplicaciones futuras como la transmisión de datos o el control remoto del sistema. A nivel de hardware, cuenta con múltiples pines digitales y analógicos, incluyendo convertidores ADC de buena resolución, así como interfaces de comunicación como UART, I2C y SPI, facilitando la conexión con sensores y otros dispositivos electrónicos.

En el contexto de este trabajo, el Arduino Nano ESP32 se emplea para la adquisición y gestión de la humedad permitiendo supervisar en tiempo real el funcionamiento del proceso electrocinético. Su tamaño reducido y bajo consumo energético favorecen su integración en el prototipo, mientras que su alimentación independiente mediante una batería propia garantiza una tensión estable y evita posibles

interferencias procedentes del circuito de potencia encargado de alimentar los electrodos, asegurando así un funcionamiento fiable del sistema de control.

El sistema de monitorización incorpora un **sensor capacitivo de humedad** (2), concretamente el modelo Capacitive Soil Moisture Sensor v2.0.0, diseñado para la medición del contenido de humedad en materiales porosos. Este sensor opera en un rango de tensión de entre 3,3 y 5,5 V, siendo totalmente compatible con microcontroladores como el Arduino Nano ESP32. Su principio de funcionamiento se basa en la variación de la capacitancia en función del contenido de agua del medio, lo que permite obtener una señal analógica proporcional al nivel de humedad. A diferencia de los sensores resistivos, este modelo presenta una mayor durabilidad, ya que no basa su funcionamiento en el paso de corriente a través del material, sino en la variación de la capacitancia en función del contenido de humedad, lo que reduce significativamente los problemas de corrosión, a la vez que no ve alterada sus medidas por el campo eléctrico generado entre los electrodos.

En el contexto del presente trabajo, este sensor se emplea para monitorizar el estado de humedad del material tratado durante el proceso electrocinético, proporcionando datos en tiempo real que permiten evaluar la evolución del sistema. Su bajo consumo energético, su facilidad de integración y su resistencia a condiciones húmedas lo convierten en una solución adecuada para este tipo de aplicaciones. La señal analógica generada es procesada por el microcontrolador, permitiendo un seguimiento continuo del comportamiento del sistema sin interferir en el circuito de potencia encargado de alimentar los electrodos.

El sistema de visualización del dispositivo se basa en el uso de una **pantalla OLED** (3) de 0,96 pulgadas con controlador SSD1306, conectada al microcontrolador mediante protocolo de comunicación I2C, un sistema de comunicación digital que permite transmitir datos utilizando únicamente dos cables (datos y reloj). Este tipo de pantalla presenta una resolución típica de 128x64 píxeles, permitiendo representar información de forma clara y legible en un formato compacto. Funciona con tensiones de entre 3,3 y 5 V, siendo totalmente compatible con el Arduino Nano ESP32, y destaca por su bajo consumo energético en comparación con otras tecnologías de visualización.

En el contexto del presente trabajo, esta pantalla se emplea para mostrar en tiempo real los datos obtenidos por el sistema, como los valores de humedad u otros parámetros de interés durante el proceso electrocinético. Su integración permite una monitorización directa del estado del sistema sin necesidad de equipos externos, facilitando el seguimiento del ensayo. Además, el uso del protocolo I2C reduce el número de conexiones necesarias, simplificando el montaje y mejorando la fiabilidad del conjunto.

La alimentación del sistema de control se realiza mediante una batería tipo **petaca de 9 V** (4), una solución sencilla y ampliamente utilizada en proyectos electrónicos por su facilidad de integración y portabilidad. Este tipo de batería proporciona una tensión adecuada para el funcionamiento del Arduino Nano ESP32 a través de sus sistemas de regulación interna, garantizando una alimentación estable para el microcontrolador y los sensores asociados. Su uso independiente respecto a la batería que alimenta los electrodos permite aislar el sistema de control de posibles interferencias eléctricas, asegurando así un funcionamiento fiable del conjunto.

La alimentación del sistema electrocinético se realiza mediante una **batería recargable** (5) de ion-litio modelo XZ08, diseñada para proporcionar una fuente de energía portátil y estable. Esta batería presenta una tensión nominal de 24 V y una capacidad de 3000 mAh (72 Wh), lo que permite suministrar la energía necesaria durante el funcionamiento del sistema. Su rango de salida se sitúa entre 22 V y 25 V, con una capacidad de entrega de corriente de entre 5 y 8 A, valores adecuados para la generación del campo eléctrico requerido entre el ánodo y el cátodo. Asimismo, dispone de una entrada de carga de 25,2 V, acorde con su configuración interna de celdas de ion-litio.

En el contexto del presente trabajo, esta batería se emplea exclusivamente para alimentar los electrodos, constituyendo la fuente principal de energía del proceso electrocinético. La tensión suministrada es posteriormente regulada mediante un convertidor DC-DC (LM2596), lo que permite

ajustar de forma precisa el voltaje aplicado al sistema y, por tanto, controlar la intensidad del campo eléctrico generado en el material. Esta configuración independiente respecto al sistema de control garantiza un funcionamiento estable y evita interferencias, permitiendo optimizar tanto la eficiencia del proceso como la seguridad del conjunto.

El **regulador de voltaje** (6) modelo XY-SK60/SK120 está basado en el módulo LM2596S DC-DC Step-Down Adjustable Power Supply Module, un convertidor reductor de tensión (tipo buck) muy utilizado por su buen rendimiento y facilidad de uso. Este módulo permite trabajar con una tensión de entrada de entre 4 y 40 V en corriente continua, ofreciendo una salida regulable entre 1,25 y 35 V mediante un potenciómetro, lo que permite ajustar fácilmente la tensión según lo que necesite cada componente del sistema. Además, puede suministrar hasta 3 A de corriente máxima (siendo recomendable trabajar alrededor de 2 A para evitar sobrecalentamientos), con una eficiencia cercana al 90%, lo que significa que apenas pierde energía en forma de calor. A nivel de funcionamiento, el regulador trabaja a una frecuencia de conmutación de unos 150 kHz, lo que permite que el módulo sea compacto y no necesite componentes muy grandes. También incluye protecciones frente a sobrecorriente, sobretensión y cortocircuitos, lo que aumenta la seguridad y fiabilidad del sistema durante su uso. A diferencia de los reguladores lineales, este tipo de módulo es mucho más eficiente, especialmente cuando hay bastante diferencia entre la tensión de entrada y la de salida.

Por otro lado, el regulador permite ajustar de forma precisa la tensión aplicada a los electrodos (ánodo y cátodo), consiguiendo así controlar directamente la intensidad del campo eléctrico generado en el interior del material. Esto resulta fundamental, ya que permite adaptar el proceso electrocinético a las necesidades del ensayo, favoreciendo la movilización de las sales sin aplicar valores excesivos que puedan provocar efectos indeseados, como cambios de pH o posibles daños en el material tratado.

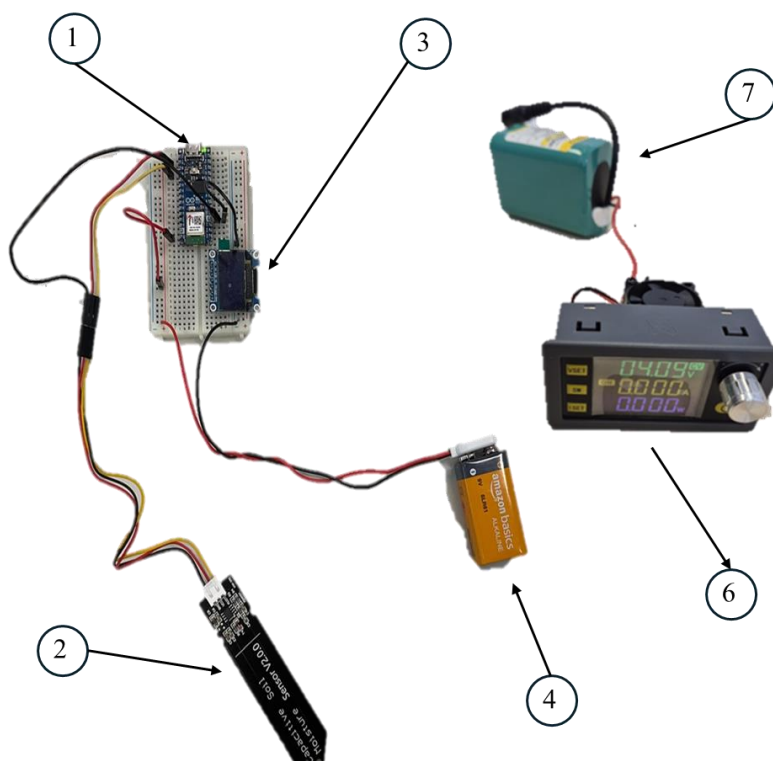


**Figura 4-23** Circuito del Arduino Nano a la izquierda y del regulador de voltaje a la derecha

En relación con el montaje del sistema, se incorporó un interruptor (Figura 4-24) en el circuito asociado al regulador de voltaje, con el objetivo de permitir la activación y desactivación manual del sistema electrocinético de forma sencilla y segura. Este elemento resulta especialmente útil durante la

fase experimental, ya que facilita el control directo del funcionamiento del electrolizador sobre la superficie tratada, evitando la necesidad de desconectar físicamente la alimentación.

En primer lugar, se procedió a la preparación del cableado, realizando la soldadura de los conductores al interruptor para garantizar una conexión eléctrica firme y duradera. Posteriormente, se incorporaron fundas termorretráctiles en las uniones, con el fin de aislar eléctricamente los contactos y protegerlos frente a posibles cortocircuitos o desconexiones accidentales. Para la identificación de los conductores, se empleó cableado de color azul para el polo positivo y blanco para el negativo, facilitando así el montaje y futuras intervenciones sobre el sistema.

Una vez preparado el interruptor, el cableado se introdujo a través del orificio dispuesto en la carcasa del dispositivo, permitiendo su integración dentro del conjunto. A continuación, se realizaron las conexiones correspondientes a los terminales de entrada y salida del regulador de voltaje, asegurando la correcta polaridad en todo momento. Finalmente, el circuito se completó mediante la conexión a la batería principal a través de conectores rápidos, lo que permite una conexión y desconexión ágil del sistema. Tras el montaje, se verificó el correcto funcionamiento del conjunto, comprobando que el regulador de voltaje se activaba correctamente al accionar el interruptor.

En lo referente al sistema de control, el microcontrolador Arduino Nano ESP32 fue previamente programado para la adquisición y visualización de los datos de humedad, siguiendo el código detallado en el anexo III. Esta programación permite el funcionamiento autónomo del sistema de monitorización, independiente del circuito de potencia encargado de alimentar los electrodos.

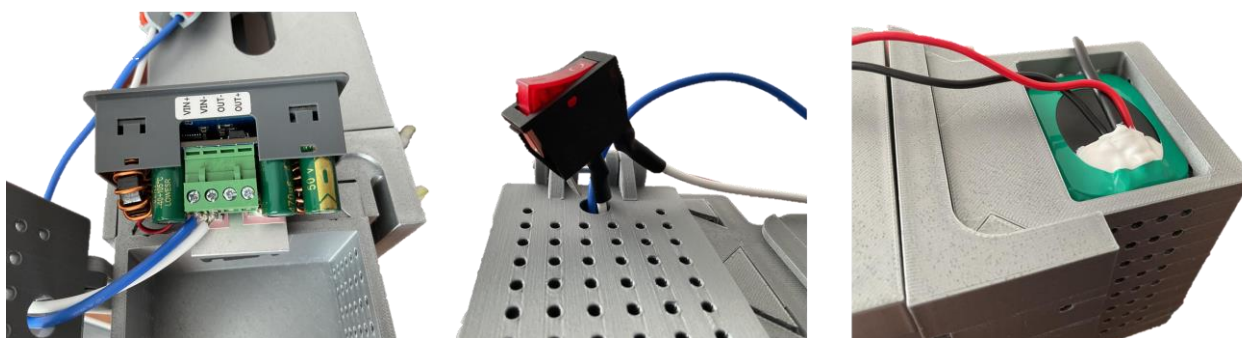


Figura 4-24 De izquierda a derecha, conectores del regulador de voltaje , interruptor y batería

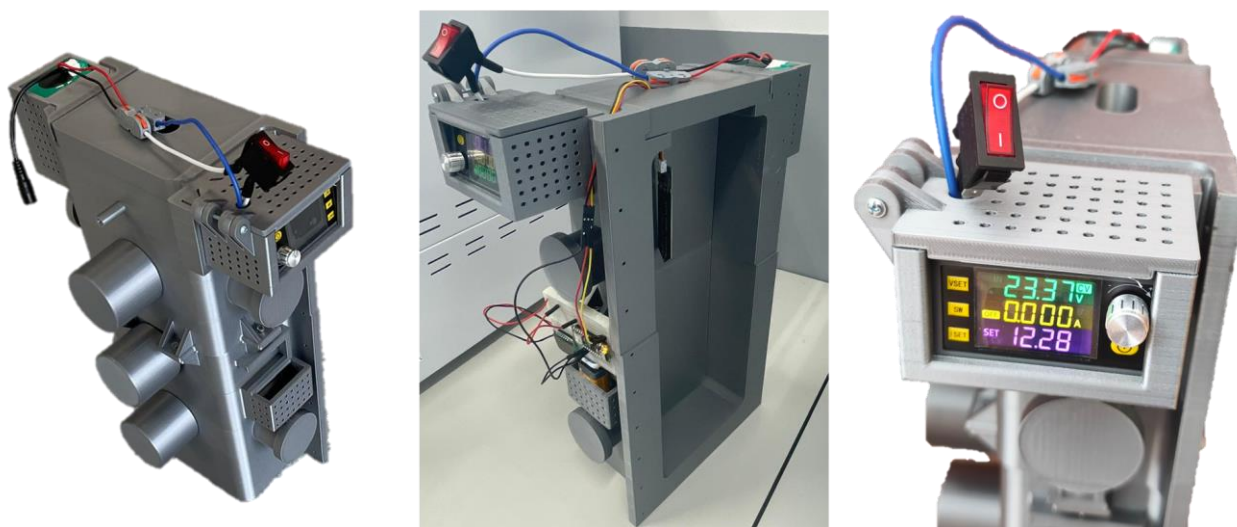


Figura 4-25 Prototipo II con la parte electrónica integrada

#### 4.2.4 Análisis de esfuerzos

Recurriendo nuevamente al análisis mediante elementos finitos, se evaluó en detalle la respuesta del prototipo frente a las cargas máximas aplicadas, con el objetivo de validar su comportamiento estructural en condiciones exigentes. Para ello, se consideró una carga inicial de 9,3 kg, correspondiente a las condiciones de diseño de referencia, así como una segunda carga de 11,16 kg, obtenida al incrementar la anterior en un 20%, con el fin de simular escenarios más desfavorables y comprobar el margen de seguridad del sistema. Además, dado que el nuevo diseño presenta aproximadamente la mitad de capacidad volumétrica que el Prototipo I, su carga máxima teórica se reduce a 4,65 kg, lo que implica que las cargas aplicadas en el análisis suponen una situación claramente sobredimensionada respecto a su uso real. Por este motivo, se introducen factores de seguridad adicionales que permiten evaluar el comportamiento del sistema bajo condiciones aún más exigentes. En concreto, se han aplicado factores de seguridad de 1,5 y 1,2, que combinados dan lugar a un factor de seguridad total de 1,8 ( $1,2 \cdot 1,5 = 1,8$ ) reforzando así la validez del análisis y la robustez del diseño frente a posibles sobrecargas.

En este caso, la superficie se ve reducida en un 50%, alcanzando un valor de 105 cm<sup>2</sup>. En primer lugar, se procede a realizar el ensayo virtual aplicando una carga de 9,3 kg.

$$F = m \cdot g = 9,3 \cdot 9,81 = 91,233 N$$
$$Prseión = \frac{F}{S} = \frac{91,233}{0,0105} = 8688,8571 Pa$$

Dicha carga genera una presión que recae sobre el compartimento inferior del armazón, el cual experimenta una tensión máxima de Von Mises localizada en la zona central y en áreas colindantes a la pared de la cubierta inferior, alcanzando un valor de 0,0259 MPa (0,003756 ksi). Asimismo, se registra un desplazamiento máximo en la zona central de la cubierta inferior de  $4,05 \times 10^{-5}$  cm ( $1,594 \times 10^{-5}$  in) (Figura 4-26).

Para el caso de la carga incrementada de 11,16 kg, se procede al recálculo de los valores obtenidos.

$$F = m \cdot g = 11,16 \cdot 9,81 = 109,4796 N$$
$$Prseión = \frac{F}{S} = \frac{109,4796}{0,0105} = 10426,6286 Pa$$

De nuevo, dicha carga genera una presión que recae sobre el compartimento inferior del armazón, alcanzándose una tensión máxima de Von Mises en el mismo punto de 0,0311 MPa (0,004508 ksi), así como un desplazamiento máximo en la zona central de la cubierta inferior de  $4,86 \times 10^{-5}$  cm ( $1,913 \times 10^{-5}$  in) (FIGURA 4-26). Como puede observarse, los valores obtenidos continúan siendo insignificantes.

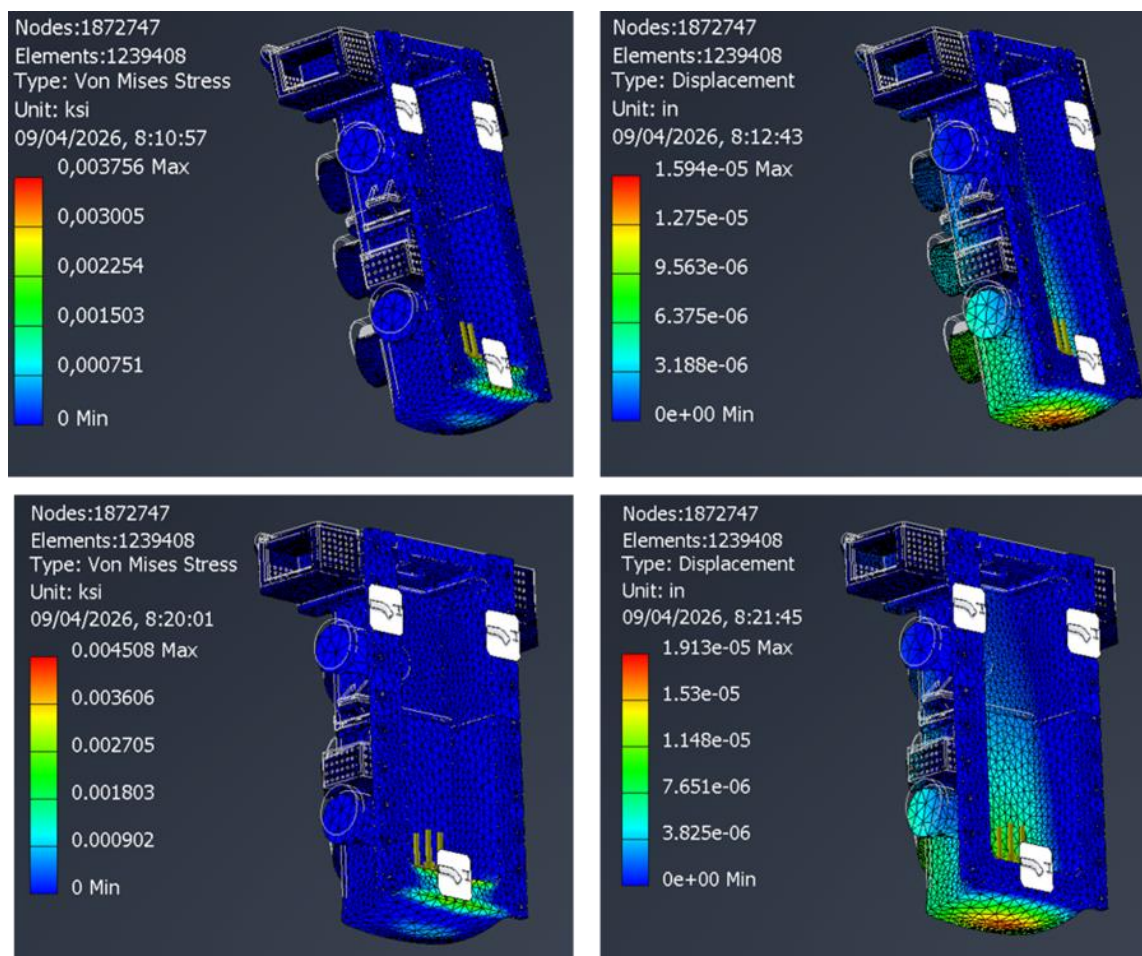


Figura 4-26 Análisis de elementos finitos, esfuerzos y deformaciones para 9,3 kg (parte superior) y 11,16 kg (inferior)

### 4.3 Prototipo IIIa y IIb

#### 4.3.1 Vista en explosionado

A partir de los resultados obtenidos con el prototipo II se han diseñados los prototipos definitivos para usar en superficies lisas prototipos IIIa (Figura 4-27) y IIIb (Figura 4-28), llevando a cabo ligeras modificaciones que se comentarán a lo largo de este punto.

| LISTA DE PIEZAS |          |                                  |
|-----------------|----------|----------------------------------|
| ELEMENTO        | CANTIDAD | NOMBRE                           |
| 1               | 1        | ARMAZÓN (SUPERIOR)               |
| 2               | 1        | ARMAZÓN (INFERIOR)               |
| 3               | 1        | CARCASA BATERÍA                  |
| 4               | 1        | TAPA EMPUJADORA (INFERIOR)       |
| 5               | 1        | TAPA EMPUJADORA (SUPERIOR)       |
| 6               | 1        | TAPA                             |
| 7               | 1        | TAPA CARCASA BATERÍA             |
| 8               | 3        | TAPON                            |
| 9               | 1        | TAPA CARCASA BATERÍA NANOARDUINO |
| 10              | 1        | TAPA CARCASA NANOARDUINO         |
| 11              | 1        | CARCASA BATERÍA NANOARDUINO      |
| 12              | 1        | CARCASA NANOARDUINO              |

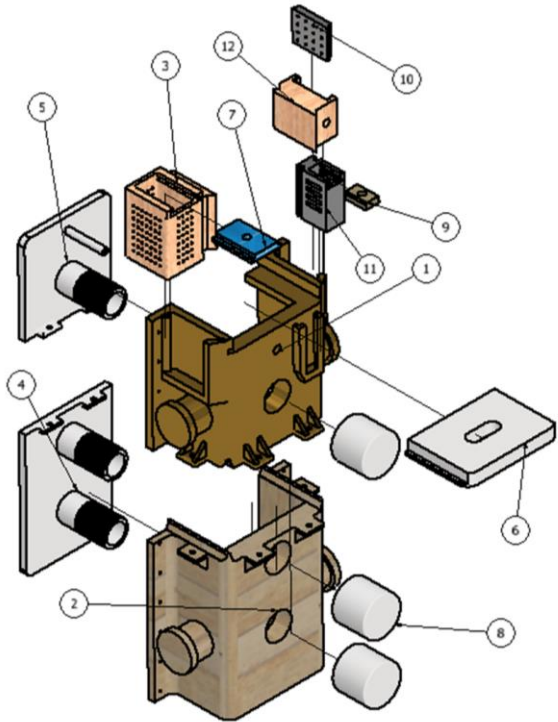


Figura 4-27 Vista explosionado prototipo IIIa correspondiente al compartimento catódico

| LISTA DE PIEZAS |          |                            |
|-----------------|----------|----------------------------|
| ELEMENTO        | CANTIDAD | NOMBRE                     |
| 1               | 1        | ARMAZÓN (SUPERIOR)         |
| 2               | 1        | ARMAZÓN (INFERIOR)         |
| 3               | 1        | CARCASA BATERÍA            |
| 4               | 1        | CARCASA MODULADOR          |
| 5               | 1        | TAPA EMPUJADORA (INFERIOR) |
| 6               | 1        | TAPA EMPUJADORA (SUPERIOR) |
| 7               | 1        | TAPA                       |
| 8               | 1        | TAPA BATERÍA               |
| 9               | 3        | TAPON                      |

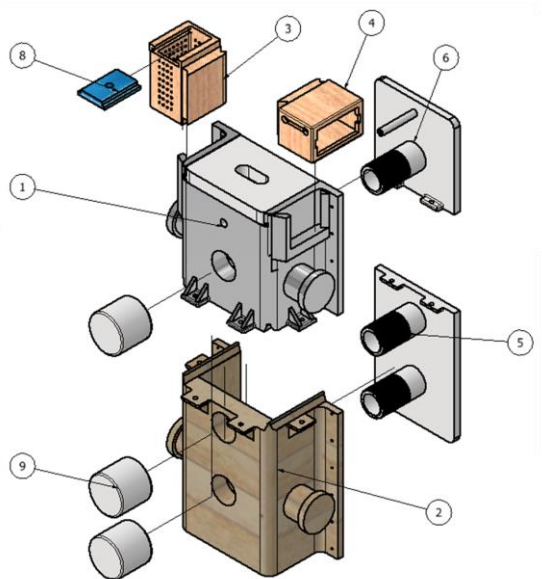


Figura 4-28 Vista explosionado prototipo IIIb correspondiente al compartimento anódico

### 4.3.2 Descripción de ánodo y cátodo

Siguiendo el proceso iterativo de mejora continua, una vez impreso el Prototipo II y tras un análisis detallado del nuevo modelo, se identificaron diversas limitaciones y se plantearon nuevas líneas de diseño sobre las que trabajar con el objetivo de perfeccionarlo. A continuación, se mencionan las más generales.

- **Corrección de la tapa superior.** Se observó que la tapa corredera superior no deslizaba de manera uniforme, presentando un comportamiento adecuado en un lado y deficiente en el otro (Figura 4-29). Tras revisar los planos de fabricación del Prototipo II, se comprobó que el coeficiente de reducción de 0,5 cm, destinado a mejorar el deslizamiento, se había aplicado únicamente en uno de los lados. Como consecuencia, el otro lado quedaba descompensado y ajustaba en exceso en su alojamiento, dificultando el deslizamiento fluido de la propia tapa. Por ello, se corrigió este parámetro y, dado que en el otro lado el deslizamiento era adecuado, se mantuvo dicha dimensión y se aplicó también en el lado en el que inicialmente se había omitido.

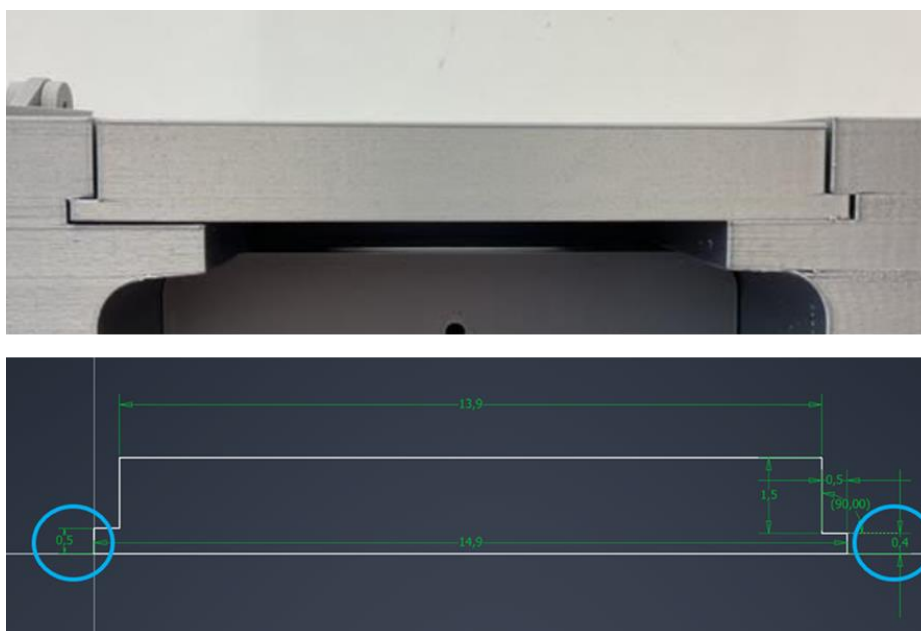


Figura 4-29 Fotografía del acoplamiento de la tapa en el prototipo II y vista de perfil del diseño de la tapa, en la que se aprecia el error cometido en una de las esquinas

- **Corrección de la carcasa del modulador de tensión** (Figura 4-30 y Figura 4-31).
  1. El diseño de cola de milano aplicado en el caso de la carcasa de la batería mostró un funcionamiento óptimo, permitiendo un acoplamiento sin dificultades. Sin embargo, en la carcasa del modulador de tensión apenas se conseguía su inserción sin aplicar una presión excesiva, quedando finalmente encastrado. Este comportamiento se atribuyó a las tolerancias de la impresora, ya que la geometría de la cola de milano en la carcasa del modulador era más compleja que en la de la batería, lo que repercutía negativamente en la calidad de impresión. Por este motivo, se optó por replicar el diseño de la cola de milano utilizado en la carcasa de la batería y aplicarlo también en la carcasa del modulador (1).
  2. Se redujeron las cavidades destinadas a la ventilación, dado que se trata de un dispositivo sensible cuya exposición al medio debía minimizarse. En su lugar, se diseñó una única ranura que cumple una doble función: actúa como respiradero y como salida para el cableado (2). Al situarse lateralmente, se reduce la probabilidad de entrada de agua en

comparación con una apertura superior. Además, esta ranura incorpora una zona ensanchada que facilita la introducción y extracción de los conectores de los cables.

3. Por otra parte, tras analizar el modulador y su manual técnico, se identificaron especificaciones relativas a las dimensiones del alojamiento, ya que este incorpora pletinas diseñadas para su fijación a presión. Siguiendo dichas indicaciones, se procedió al rediseño del hueco para garantizar un ajuste adecuado (3), eliminando además la tapa superior y el sistema de bisagra, el cual incrementaba notablemente dificultades adicionales en el proceso de impresión, al implicar una geometría más elaborada y un incremento significativo del tiempo de fabricación.

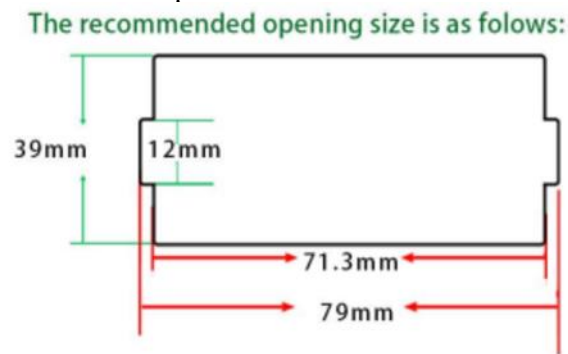


Figura 4-30 Dimensiones recomendadas para la cavidad del regulador de voltaje, extraído del Manual del DC Buck-boost power supply model XY-SK60/SK120



Figura 4-31 Vista isométrica de la carcasa del modulador de tensión

- **Corrección en la carcasa de la batería (Figura 4-32).** Analizando el diseño previo correspondiente al Prototipo II, se consideró que en exteriores la exposición a la lluvia podría provocar la entrada de agua en el sistema, generando un cortocircuito, sobrecalentamiento y posibles fallos de funcionamiento, incluso daños permanentes en los componentes. Por ello, se estimó conveniente diseñar una tapa que cubriese la superficie previamente expuesta, optando por una solución corredera que incorporase una pequeña cavidad para permitir la salida del cableado de la batería (1). Asimismo, se incorporó un orificio en la parte inferior (2), ya que en el prototipo anterior se observó que la extracción de la batería únicamente podía realizarse tirando de los cables, lo que suponía un riesgo de daño en la instalación. Con esta modificación, la batería puede extraerse de forma segura empujándola desde la base.

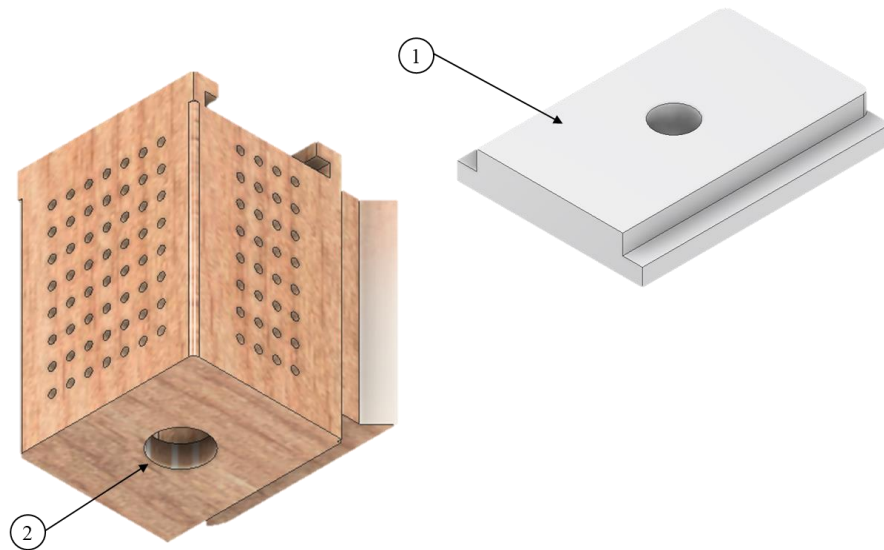


Figura 4-32 Vista de las piezas que conforman el compartimento de la batería

- **Modificaciones en el armazón** (Figura 4-33).

1. Se optó por dividir los componentes eléctricos de los electrolizadores en dos módulos independientes: uno destinado a albergar el modulador de voltaje (prototipo IIIb) y otro el nanoArduino (prototipo IIIa), configurando así de forma definitiva dos estructuras diferenciadas correspondientes al ánodo y al cátodo.
2. Para mejorar el acople entre las dos partes del armazón se diseñó un riel adicional que mejorase el alineamiento entre las dos piezas (1).

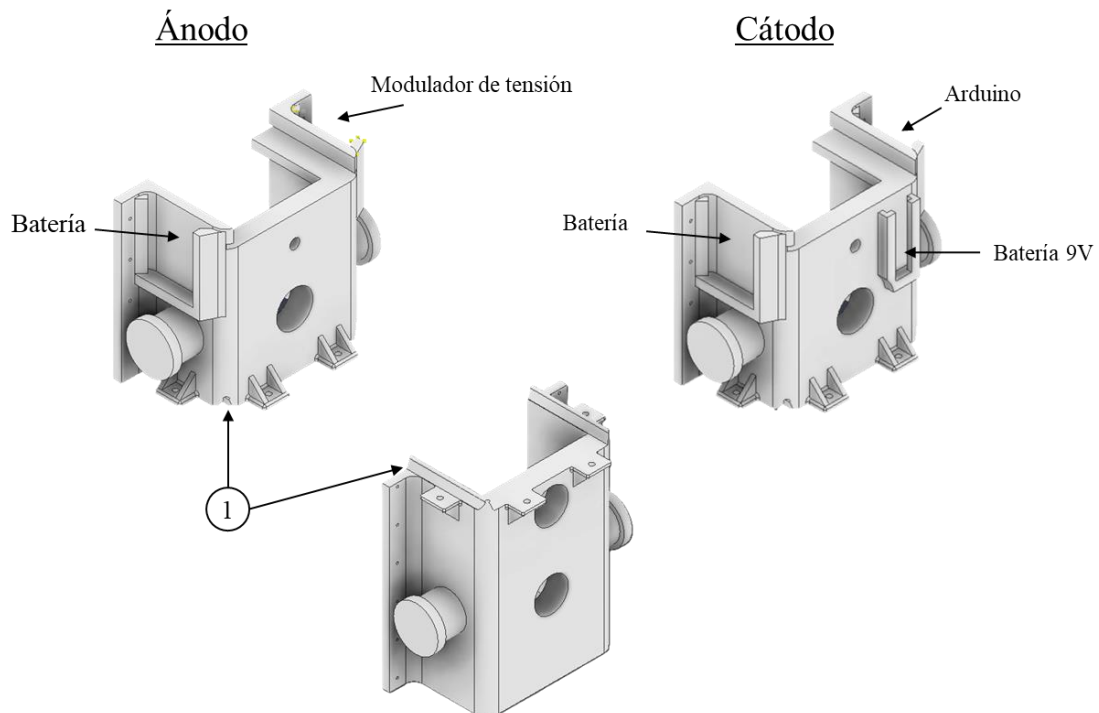


Figura 4-33 Vista de las piezas que conforman el armazón

- **Diseño de una nueva Tapa** (Figura 4-34). Se tomó la decisión de diseñar una tapa adicional destinada a cubrir únicamente la parte inferior del armazón, con el objetivo de favorecer el

modularidad del conjunto. Así, podría usarse el electrolizador únicamente con medio armazón en caso de que se quisiera aplicar en espacios reducidos.

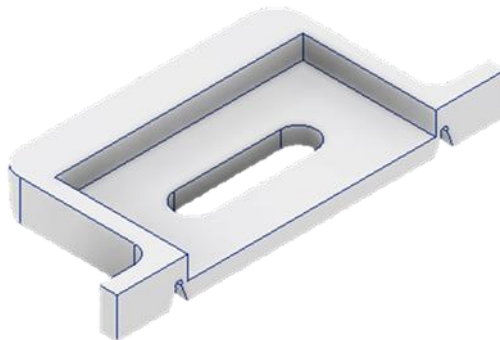


**Figura 4-34 Nueva tapa para el uso de los armazones inferiores como electrolizadores**

- **Carcasa Nano Arduino** (Figura 4-35). A raíz del diseño del Prototipo II, que incorporaba unos raíles para la inserción de la placa de Nano Arduino, se detectaron diversos problemas relacionados con su compatibilidad con el cableado, ya que no se disponía del espacio suficiente para realizar la soldadura de los cables a la placa. Asimismo, esta quedaba excesivamente expuesta al exterior, por lo que se hizo necesario diseñar una estructura que protegiese la sensibilidad de la placa (1).

En primer lugar, la carcasa debía cubrir completamente la placa Nano Arduino, incorporando pequeñas cavidades en la tapa que permitieran su ventilación (2), así como aperturas destinadas a la salida del cableado (3). Asimismo, debía facilitar un acceso sencillo por parte del usuario, por lo que se diseñó una nueva tapa corredera para esta carcasa. Esta se ubicó en uno de los laterales, de modo que, en caso de exposición a la lluvia, se minimizase la entrada de agua teniendo en cuenta la elevada sensibilidad de los circuitos electrónicos.

Para su acople al módulo, se siguió el modelo de cola de milano empleado hasta el momento.

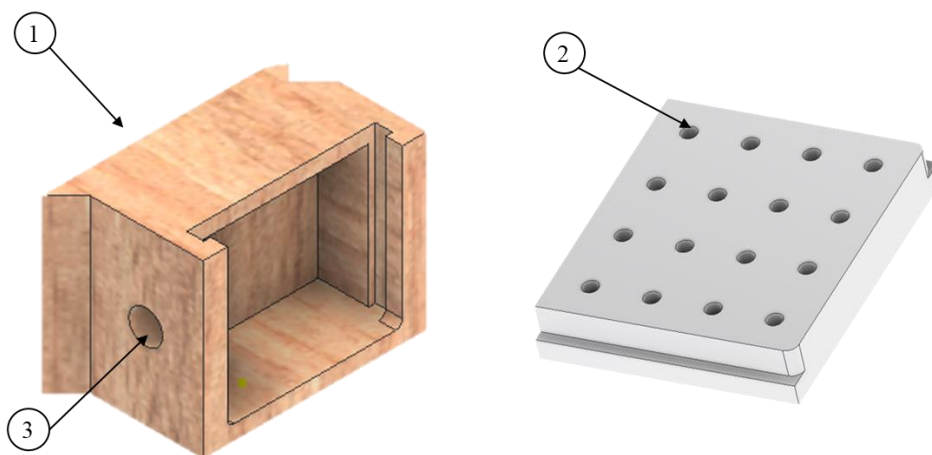


**Figura 4-35 Diseño de la carcasa de nanoarduino y de la tapa**

- **Carcasa batería 9V** (Figura 4-36). Al modificarse la carcasa del Nano Arduino, fue necesario adaptar también la correspondiente a la batería. Para ello, se diseñó un sistema de unión mediante cola de milano con geometría en T, incorporando varias aperturas destinadas a la ventilación. Asimismo, se añadió una tapa específica que permite su sellado frente a agentes externos, especialmente en condiciones de lluvia.

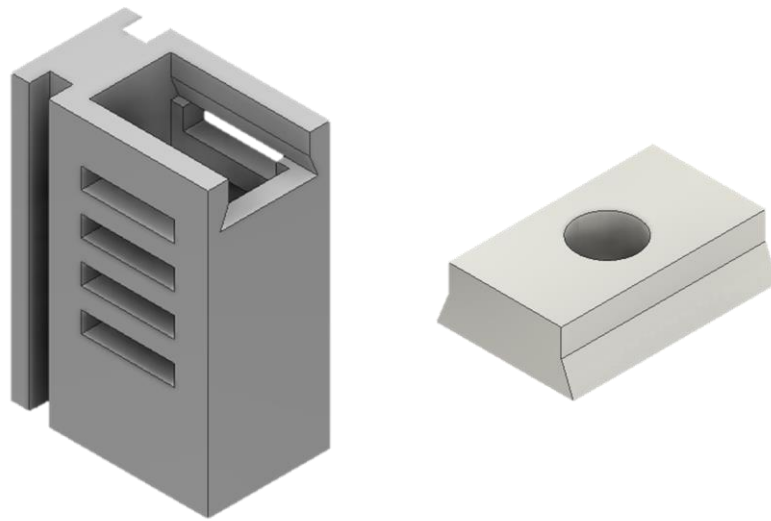


Figura 4-36 Diseño de la caracasa de la batería de 9V

#### 4.3.3 Montaje en obra

La Figura 4-37 muestra las dos posibilidades de montaje de los dispositivos, tanto en modo directo, es decir uno enfrente al otro, como en modo indirecto (dispositivos colocados sobre la misma parte del muro).

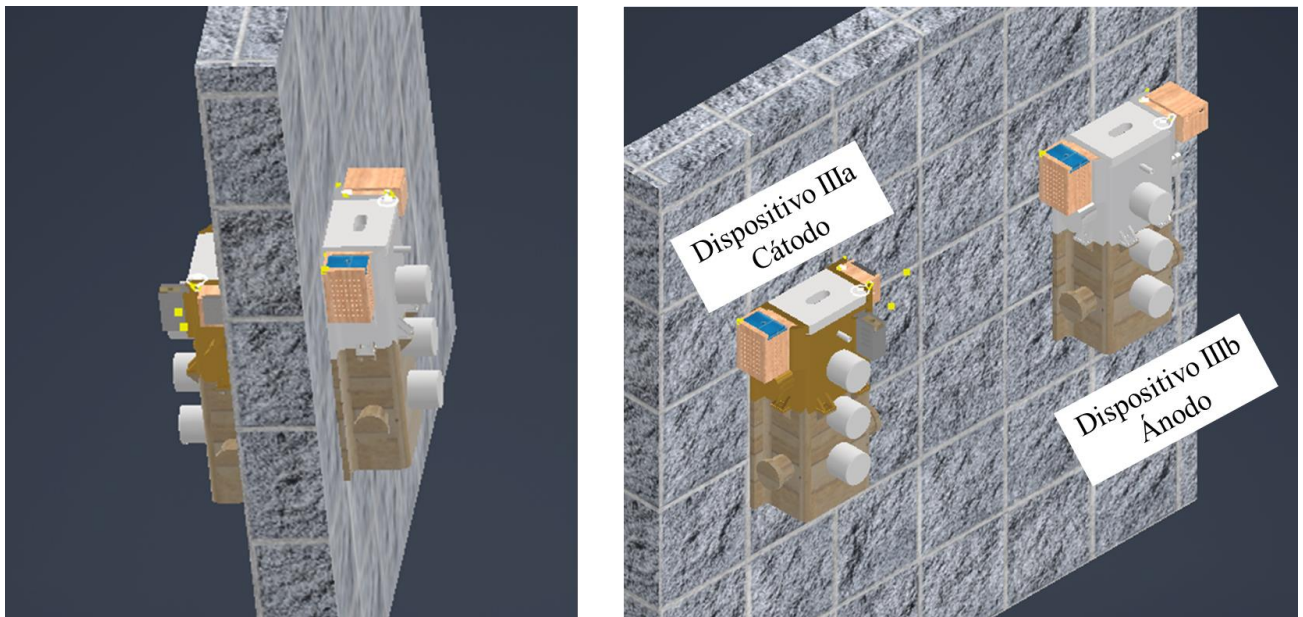


Figura 4-37 Disposición de los prototipos IIIa y IIIb sobre un muro. A la izquierda modo directo y a la derecha modo indirecto

La fabricación modular de estos dispositivos permite además emplear solo la parte de debajo del armazón como electrolizador independiente en caso de que las dimensiones del objeto a tratar sean más reducidas (Figura 4-38 y Figura 4-39). Esta ventaja que le otorga la fabricación aditiva al sistema es un factor positivo frente a la construcción tradicional de dispositivo mediante mecanizado.

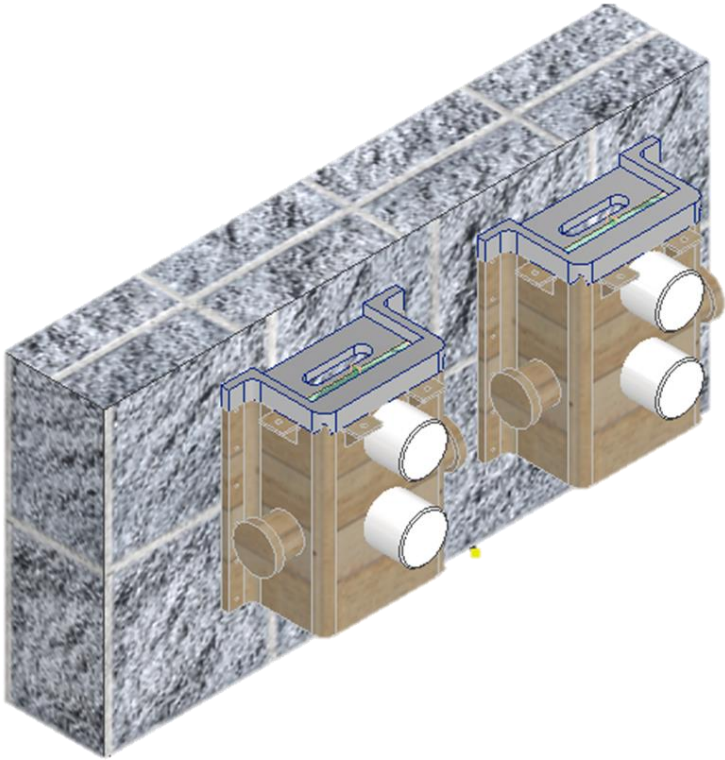


Figura 4-38 Montaje de electrolizadores formados con la parte inferior de los armazones

| LISTA DE PIEZAS |          |                    |
|-----------------|----------|--------------------|
| ELEMENTO        | CANTIDAD | NOMBRE             |
| 1               | 1        | ARMAZÓN (INFERIOR) |
| 2               | 1        | TAPA MODULAR       |
| 3               | 2        | TAPON              |
| 4               | 1        | TAPA EMPUJADORA    |

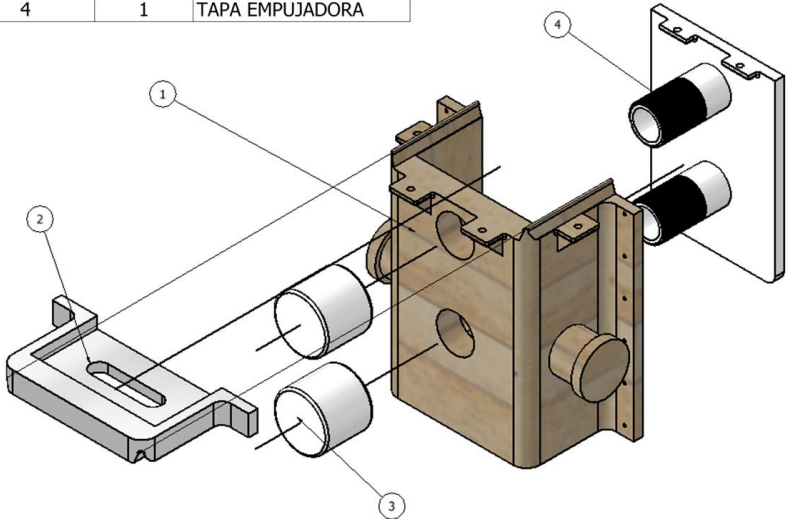


Figura 4-39 Vista en explosionado del electrolizador con la parte inferior del armazón

## 4.4 Prototipo IVa y IVb

### 4.4.1 Vista en explosionado

Para la aplicación de los electrolizadores sobre superficies curvas únicamente es necesario realizar una modificación de las superficies de contacto, tanto de armazón como de la tapa superior. Esto permite realizar la aplicación de los electrolizadores en modo completo (se visualiza uno de los dispositivos IVb Figura 4-40) y acortado (Figura 4-41).

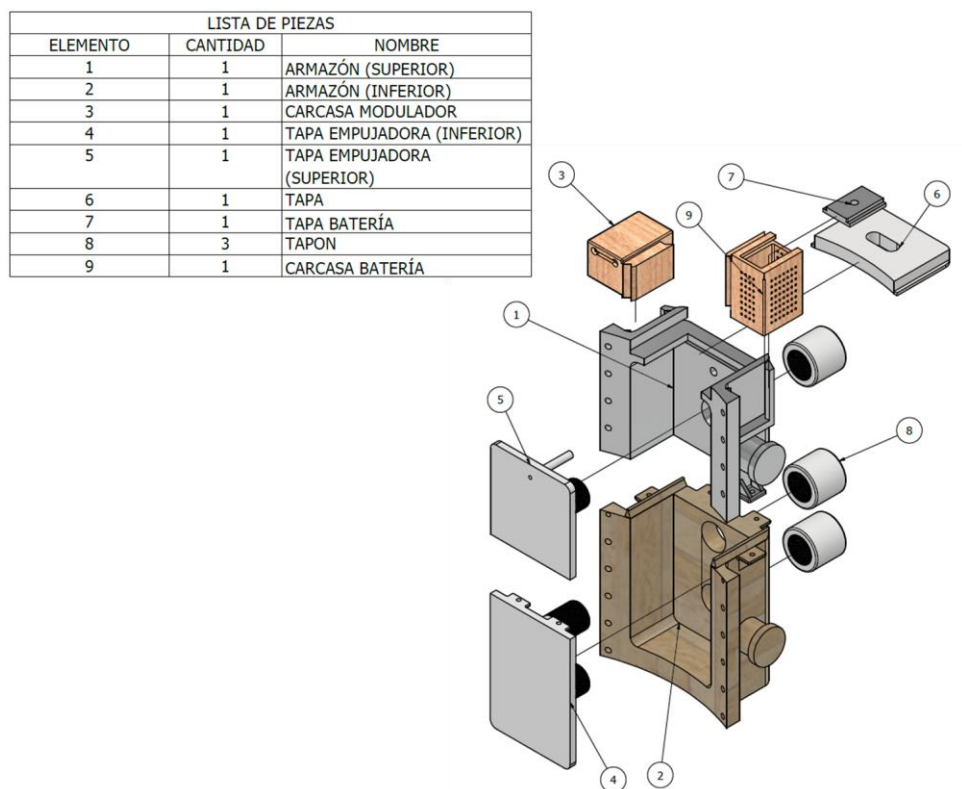


**Figura 4-40 Vista de explosionado del dispositivo IVb, específico para superficies curvas**

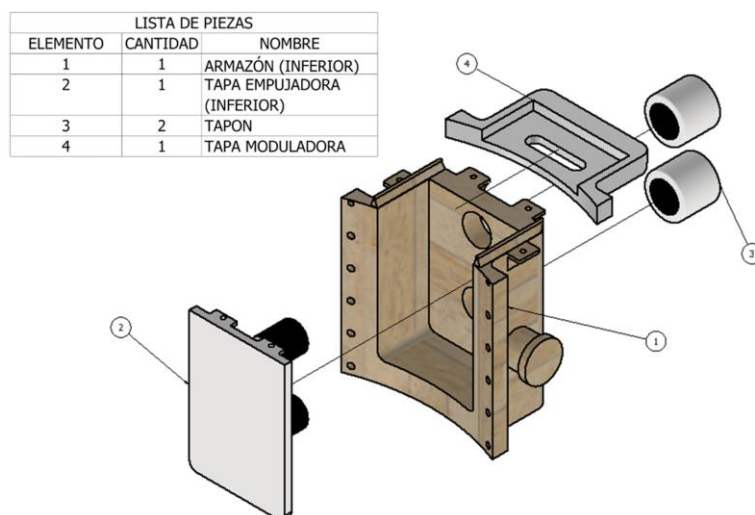


**Figura 4-41 Vista explosionada del prototipo reducido**

#### 4.4.2 Descripción de la modificación de superficie de contacto

La modificación de la superficie de contacto en el Prototipo III constituye una evolución directa respecto a los diseños anteriores, en los que la base del dispositivo presentaba una geometría completamente plana. En esta nueva configuración, se introduce una curvatura específica que permite la adaptación del sistema a superficies cilíndricas, como columnas. Para el caso de estudio, dicha curvatura ha sido definida para un elemento de 60 cm de diámetro, lo que garantiza un contacto continuo y homogéneo entre el dispositivo y la superficie. Este aspecto resulta clave en los procesos electrocinéticos, ya que la correcta transmisión del campo eléctrico y la continuidad del contacto influyen directamente en la eficiencia del transporte iónico en el material poroso.

Esta modificación se concibe como un ajuste localizado dentro del diseño, permitiendo alterar la geometría de la superficie de contacto sin necesidad de rediseñar el conjunto del dispositivo. De este modo, el sistema adquiere un carácter adaptable, pudiendo ajustarse a diferentes tipologías de soporte, tanto planos como curvos, en función de las necesidades de la intervención. Esta capacidad de adaptación resulta especialmente relevante en aplicaciones reales, donde la diversidad geométrica de los elementos constructivos, como columnas o pilares (para este caso), requiere soluciones flexibles que aseguren un correcto acoplamiento y funcionamiento del sistema.

En concreto, las piezas que se han modificado son la tapa superior (Figura 4-42) y las superficies de contacto de los armazones (Figura 4-43).

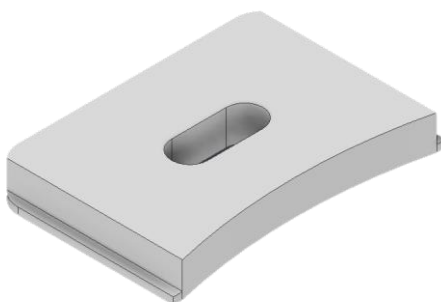


**Figura 4-42 Vista isométrica de la tapa superior**



**Figura 4-43 Vista isométrica de la parte inferior del armazón**

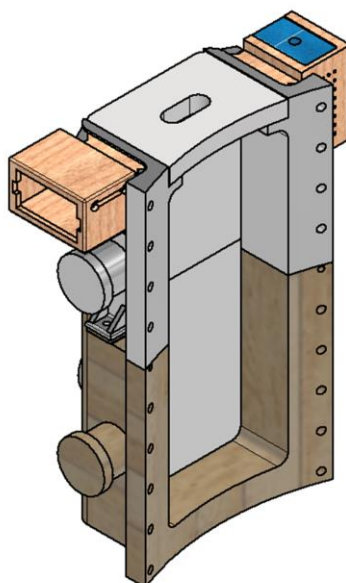


**Figura 4-44 Vista del dispositivo IV con todos sus elementos montados**

#### *4.4.3 Montaje en obra*

La Figura 4-45 muestra cómo se realizaría el montaje de los dispositivos sobre una superficie curva mediante sujeción por tornillos.

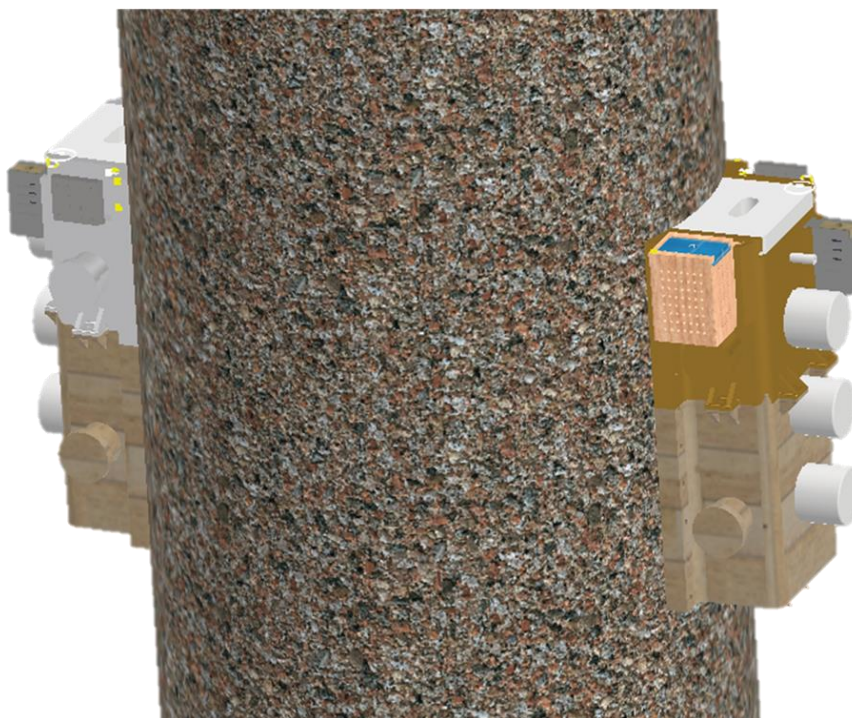


**Figura 4-45 Disposición de los prototipos IVa y IVb sobre una columna**

## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 5.1 Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Grado ha tenido como objetivo principal el diseño y la construcción de un electrolizador funcional y de bajo coste mediante el uso de tecnologías de fabricación aditiva. Para ello, se ha desarrollado un proceso completo que abarca desde la fase conceptual inicial, pasando por el modelado 3D de los distintos componentes, hasta la fabricación y validación de varios prototipos.

Como principal conclusión, los resultados obtenidos ponen de manifiesto la viabilidad del uso de la fabricación aditiva para el prototipado y desarrollo de electrolizadores funcionales. Este enfoque contribuye a acercar este tipo de tecnologías a aplicaciones reales, facilitando su accesibilidad y reduciendo los costes asociados a su implementación.

Además, se extraen las siguientes conclusiones:

- El prototipo I, el cual se sobredimensionó para incrementar su capacidad interna y se imprimió con el menor relleno posible (15%), ha soportado cargas superiores a las esperadas en el diseño definitivo. A pesar de estas condiciones desfavorables en su construcción, no se han observado deformaciones ni fallos estructurales. En consecuencia, se puede afirmar con solidez que el diseño es plenamente viable.
- El prototipo I fabricado en PLA ha sido capaz de mantener su integridad estructural sin presentar deformaciones, a pesar de albergar humedad en su interior durante un periodo superior a 10 días. Por tanto, se concluye que, independientemente de que la versión final sea fabricada en PLA o en ABS (de mayor resistencia que el primero), el diseño es capaz de soportar dichas condiciones sin comprometer su funcionalidad.
- La fabricación aditiva permite adaptar de manera sencilla y eficiente el dispositivo a la geometría específica de la superficie a tratar, facilitando la personalización del diseño y mejorando su integración en distintas aplicaciones.
- La utilización de tecnologías de fabricación aditiva ha permitido reducir significativamente los costes asociados al desarrollo del proyecto, al eliminar la necesidad de procesos de fabricación tradicionales más costosos y permitir la producción directa de prototipos sin necesidad de utillaje específico.
- La integración de sistemas electrónicos, como la parte de generación y modulación de corriente, en los propios dispositivos permitirá aplicar estas técnicas sin la necesidad de tener que utilizar fuentes de alimentación externas.
- La integración de sistemas de sensorización y monitorización a distancia, gracias a la placa de Nanoarduino, permitirá realizar un control minucioso del proceso.

## 5.2 Líneas Futuras

Con el fin de mejorar el rendimiento, precisión y grado de automatización del sistema desarrollado, se plantean a continuación una serie de líneas futuras de trabajo orientadas a su optimización y adaptación a aplicaciones reales.

**Automatización del aporte de electrolito:** se propone la implementación de un sistema de control automático empleando la placa Arduino Nano que, a partir de los valores proporcionados por el sensor de humedad, permita optimizar el funcionamiento del dispositivo. De este modo, cuando se detecten niveles de humedad por debajo de un umbral establecido, el sistema podría activar automáticamente el aporte de electrolito desde un depósito externo al electrolizador, (a través de la cavidad ya configurada en forma de tubo en la parte superior) garantizando así unas condiciones de operación adecuadas sin intervención manual.

**Sistema de monitorización remota y alertas:** Se propone la implementación de un sistema de comunicación inalámbrica que permita la transmisión de los datos recogidos por el sensor de humedad mediante tecnologías como Wi-Fi o Bluetooth. Estos datos podrían ser visualizados en una aplicación accesible para el usuario, desde la cual se monitorice en tiempo real el estado de los electrolizadores. De este modo, ante cualquier desviación de los valores esperados, el sistema podría generar alertas automáticas, facilitando la detección temprana de posibles fallos en el proceso electrocinético.

**Automatización del control del proceso electrocinético:** como línea futura, se propone la implementación de un sistema de control automático que permita regular de forma dinámica la tensión aplicada a los electrodos en función de las condiciones del sistema. Mediante el uso del Arduino Nano ESP32 y la información proporcionada por sensores como el de humedad, sería posible ajustar en tiempo real el voltaje suministrado, optimizando así la eficiencia del proceso de desalación. Este sistema permitiría adaptar el funcionamiento a distintas condiciones del material, evitando la aplicación de valores excesivos de energía y mejorando tanto la seguridad como el rendimiento global del dispositivo.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] L.M. Ottosen, I. V Christensen, I. Rorig-Dalgård, P.E. Jensen, H.K. Hansen, Utilization of electromigration in civil and environmental engineering--processes, transport rates and matrix changes., *J. Environ. Sci. Health. A. Tox. Hazard. Subst. Environ. Eng.* 43 (2008) 795–809. <https://doi.org/10.1080/10934520801973949>.
- [2] J. Feijoo, O. Matyščák, L.M. Ottosen, T. Rivas, X.R. Nóvoa, Electrokinetic desalination of protruded areas of stone avoiding the direct contact with electrodes, *Mater. Struct.* 50 (2016) 82. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0946-x>.
- [3] J. Feijoo, L.M. Ottosen, O. Matyscak, R. Fort, Electrokinetic desalination of a farmhouse applying a proton pump approach. First in situ experience, *Constr. Build. Mater.* 243 (2020) 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118308>.
- [4] J. Feijoo, X.R. Nóvoa, T. Rivas, M.J. Mosquera, J. Taboada, C. Montojo, F. Carrera, Granite desalination using electromigration. Influence of type of granite and saline contaminant, *J. Cult. Herit.* 14 (2013) 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2012.09.004>.
- [5] L.M. Ottosen, I. Rorig-Dalgård, Electrokinetic removal of  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  from bricks to avoid salt-induced decay, *Electrochim. Acta.* 52 (2007) 3454–3463. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2006.03.118>.
- [6] L. Bertolini, L. Coppola, M. Gastaldi, E. Redaelli, Electroosmotic transport in porous construction materials and dehumidification of masonry, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 254–263. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.013>.
- [7] E. Franzoni, Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge, *Constr. Build. Mater.* 54 (2014) 123–136. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2013.12.054>.
- [8] S. Glendinning, C.J.F.P. Jones, J. Lamont-Black, *The Use of Electrokinetic Geosynthetics to Improve Soft Soils*, Elsevier Ltd., 2015. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100191-2.00013-7>.
- [9] K. Kupwade-patil, H.E. Cardenas, K. Gordon, L.S. Lee, Corrosion Mitigation in Reinforced Concrete Beams via Nanoparticle Treatment, *ACI Mater. J.* 109 (2012). <https://doi.org/10.14359/51684159>.
- [10] P.F.G. Banfill, Re-alkalisation of carbonated concrete — Effect on concrete properties, *Constr. Build. Mater.* 11 (1997) 255–258. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(97\)00045-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0950-0618(97)00045-7).
- [11] J. Feijoo, R. Fort, L.S. Gomez-Villalba, M.E. Rabanal, L.M. Ottosen, Electroprecipitation of Magnesium and Calcium Compounds for Weathering Protection of Ornamental Rocks, *Cryst.*

Growth Des. 20 (2020) 2337–2355. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b01497>.

- [12] J. Feijoo, M.A. de Buergo, R. Fort, N. Aly, Experimental Study of Different Electrokinetic Configurations for Desalination of a Brick Wall, in: G.M. El-Qady, C. Margottini (Eds.), *Sustain. Conserv. UNESCO Other Herit. Sites Through Proactive Geosci.*, Springer International Publishing, Cham, 2023: pp. 89–104. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-13810-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-13810-2_6).
- [13] J. Unruh, A Revised Endpoint for Ceramics Desalination at the Archaeological Site of Gordion, Turkey, *Stud. Conserv.* (2007). <https://doi.org/10.2307/1506839>.
- [14] I. de Rosario, J. Feijoo, Alteración de las rocas y otros materiales de construcción en los monumentos. *Técnicas de conservación.*, Monogr. Da Univ. Vigo. Tecnoloxía (2016) 294.
- [15] L. Pel, A. Sawdy, V. Voronina, Physical principles and efficiency of salt extraction by poulticing, *J. Cult. Herit.* 11 (2010) 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2009.03.007>.
- [16] N. Eslami, L.M. Ottosen, J.F. Conde, E. Franzoni, J.M. Paz-Garcia, Experimental study of electroosmosis and (Cl-) diffusion in fired-clay bricks, *Constr. Build. Mater.* 447 (2024) 138176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138176>.
- [17] N. Eslami, J. Feijoo, J.M. Paz-Garcia, E. Franzoni, L.M. Ottosen, Electroosmotic permeability in kaolinite and CaCO<sub>3</sub> poultice mixtures, *J. Cult. Herit.* 68 (2024) 130–135. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2024.05.015>.
- [18] J. Feijoo, L.M. Ottosen, J.S. Pozo-Antonio, Influence of the properties of granite and sandstone in the desalination process by electrokinetic technique, *Electrochim. Acta.* 181 (2015) 280–287. <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2015.06.006>.
- [19] J.M. Paz-García, B. Johannesson, L.M. Ottosen, A.B. Ribeiro, J.M. Rodríguez-Maroto, Simulation-based analysis of the differences in the removal rate of chlorides, nitrates and sulfates by electrokinetic desalination treatments, *Electrochim. Acta.* 89 (2013) 436–444. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.11.087>.
- [20] J. Feijoo, L.M. Ottosen, J.S. Pozo-Antonio, Influence of the properties of granite and sandstone in the desalination process by electrokinetic technique, *Electrochim. Acta.* 181 (2015) 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2015.06.006>.
- [21] J. Feijoo, X.R. Nóvoa, T. Rivas, L.M. Ottosen, Enhancing the efficiency of electrochemical desalination of stones: a proton pump approach, *Mater. Struct. Constr.* 51 (2018). <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1224-x>.
- [22] J. Feijoo, T. Rivas, X.R. Nóvoa, I. de Rosario, J. Otero, In situ desalination of a granitic column by the electrokinetic method, *Int. J. Archit. Herit.* 12 (2018) 63–74. <https://doi.org/10.1080/15583058.2017.1370509>.
- [23] N. Eslami, J. Feijoo, J. Paz-García, E. Franzoni, L.M. Ottosen, Measuring electroosmotic permeability coefficient in single bricks, *J. Mater. Civ. Eng.* (2024).
- [24] J. Feijoo, R. Fort, L.S. Gomez-Villalba, M.E. Rabanal, L.M. Ottosen, Electroprecipitation of Magnesium and Calcium Compounds for Weathering Protection of Ornamental Rocks, *Cryst. Growth Des.* 20 (2020) 2337–2355. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b01497>.
- [25] J. Feijoo, L.S. Gomez-Villalba, A. de los Ríos, R. Fort, Electroprecipitation of inorganic borates, with different solubility, within monumental stones to avoid fungal colonization, *Constr. Build. Mater.* 368 (2023) 130435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130435>.
- [26] J. Feijoo, X.R. Nóvoa, T. Rivas, Electrokinetic treatment to increase bearing capacity and durability of a granite, *Mater. Struct.* 50:251 (2017) 1–15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1617/s11527-017-1123-6>.

- [27] J. Feijoo, L.M. Ottosen, X.R. Nóvoa, T. Rivas, I. de Rosario, An improved electrokinetic method to consolidate porous materials, *Mater. Struct. Constr.* 50 (2017). <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1063-1>.
- [28] A.E. Charola, Salts in the Deterioration of Porous Materials: An Overview, *J. Am. Inst. Conserv.* 39 (2000) 327–343. <https://doi.org/10.1179/019713600806113176>.
- [29] J. Feijoo, L.M. Ottosen, X.R. Nóvoa, T. Rivas, I. de Rosario, An improved electrokinetic method to consolidate porous materials, *Mater. Struct.* 50 (2017). <https://doi.org/10.1617/s11527-017-1063-1>.
- [30] J. Feijoo, X.R. Nóvoa, T. Rivas, M.J. Mosquera, J. Taboada, C. Montojo, F. Carrera, Granite desalination using electromigration. Influence of type of granite and saline contaminant, *J. Cult. Herit.* 14 (2013) 365–376. <https://doi.org/10.1016/J.CULHER.2012.09.004>.
- [31] J. Feijoo, L.S. Gomez-Villalba, R. Fort, M.E. Rabanal, Simultaneous desalination and consolidation treatment through the application of electrokinetic techniques, *Constr. Build. Mater.* 408 (2023) 133686. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133686>.
- [32] L.M. Ottosen, C.M.D. Ferreira, I. V. Christensen, Electrokinetic desalination of glazed ceramic tiles, in: *J. Appl. Electrochem.*, 2010: pp. 1161–1171. <https://doi.org/10.1007/s10800-010-0086-x>.
- [33] M. Auras, J.S.J.S. Albertsen, Poultrices and mortars for salt contaminated masonry and stone objects, *Salt Weather. Build. Stone Sculpt.* (2008) 1–32.
- [34] J. Feijoo, T. Rivas-Brea, X.R. Novoa, L.M. Ottosen, O. Matyščík, Procedimiento electrocinético y dispositivo para extracción de iones de una estructura porosa. WO2017103298A1, 2015.
- [35] J. Feijoo, R. Fort, Dispositivo para movilización de iones mediante campo eléctrico a través de estructuras porosas. WO2022074270A1, 2020.
- [36] F.H.B. Barbosa, R.F. Quero, K.N. Rocha, S.C. Costa, D.P. de Jesus, Electroosmotic flow in fused deposition modeling (FDM) 3D-printed microchannels, *Electrophoresis.* 44 (2023) 558–562. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/elps.202200211>.
- [37] L. Wu, S. Beirne, J.M. Cabot, B. Paull, G.G. Wallace, P.C. Innis, Fused filament fabrication 3D printed polylactic acid electroosmotic pumps, *Lab Chip.* 21 (2021) 3338–3351. <https://doi.org/10.1039/d1lc00452b>.
- [38] M.J. Beauchamp, A.V. Nielsen, H. Gong, G.P. Nordin, A.T. Woolley, 3D printed microfluidic devices for microchip electrophoresis of pre-term birth biomarkers, *Anal. Chem.* 91 (2019) 7418–7425. <https://doi.org/10.1021/acs.analchem.9b01395.3D>.
- [39] AENOR, UNE-EN ISO/ASTM 52900:2022. Fabricación aditiva. Principios generales. Fundamentos y vocabulario., (2022).

## ANEXO I: IMPLICACIONES ECONÓMICAS

El uso de electrolizadores desarrollados mediante fabricación aditiva presenta importantes implicaciones económicas tanto en la fase de producción del dispositivo como en su aplicación en el ámbito de la conservación del patrimonio. Esta tecnología permite no solo reducir los costes iniciales asociados a la adquisición de equipos, sino también optimizar los recursos necesarios durante las intervenciones, consolidándose como una alternativa económicamente eficiente frente a métodos tradicionales.

En primer lugar, desde el punto de vista de la fabricación del dispositivo, la utilización de técnicas de fabricación aditiva permite una reducción significativa de costes frente a la compra de electrolizadores comerciales. Mientras que los dispositivos industriales o de laboratorio presentan precios elevados debido a su fabricación estandarizada y su distribución comercial, la fabricación aditiva permite producir sistemas personalizados a partir de materiales de bajo coste, con un gasto limitado principalmente al material empleado y al tiempo de impresión. Esta capacidad de fabricación bajo demanda elimina la necesidad de adquirir equipos específicos para cada intervención, permitiendo adaptar el diseño del electrolizador a la geometría del elemento a tratar, lo que resulta especialmente relevante en el ámbito del patrimonio arquitectónico, donde las superficies suelen ser irregulares y únicas.

Además, la fabricación aditiva permite una rápida iteración en el diseño y una fácil reposición de componentes en caso de fallo, lo que reduce los costes de mantenimiento y prolonga la vida útil del sistema. Esta flexibilidad, unida al bajo coste de producción, supone una ventaja económica clara frente a los sistemas tradicionales, donde cualquier modificación o sustitución implica la adquisición de nuevos equipos o componentes específicos.

Por otro lado, desde la perspectiva de su aplicación, las técnicas electrocinéticas de desalación presentan ventajas económicas aún más relevantes frente a los métodos convencionales. Tal y como se recoge en estudios recientes, estas técnicas permiten alcanzar porcentajes de extracción de sales muy elevados, llegando incluso a valores cercanos al 100% en condiciones controladas. Esta elevada eficacia se traduce en una reducción significativa del número de intervenciones necesarias, en comparación con métodos tradicionales como la desalación mediante papetas, que requieren múltiples ciclos y presentan una eficacia limitada, especialmente en profundidad.

Asimismo, una de las principales ventajas de los tratamientos electrocinéticos es su capacidad para actuar no solo en superficie, sino también en el interior del material. Esto es especialmente relevante, ya que muchas de las patologías asociadas a la presencia de sales se originan en el interior de los poros, donde los métodos tradicionales presentan una eficacia muy reducida. En este sentido, la aplicación de un campo eléctrico permite movilizar las sales disueltas a través de los poros del material mediante fenómenos de electromigración y electroósmosis, acelerando considerablemente su extracción en comparación con procesos naturales de difusión. Esta mayor eficiencia implica una reducción directa de los costes asociados a la duración de la intervención y a la mano de obra necesaria.

Por otra parte, la aplicación de estas técnicas en casos reales ha demostrado no solo su eficacia en la extracción de sales, sino también su capacidad para mejorar ciertas propiedades del material, como la reducción de la porosidad o el incremento de la resistencia mecánica, sin provocar alteraciones estéticas significativas. Este hecho resulta clave desde el punto de vista económico, ya que evita la necesidad de intervenciones adicionales de consolidación o reparación, reduciendo así los costes globales del tratamiento.

Otro aspecto económico relevante es la reducción de intervenciones invasivas. En situaciones donde los métodos tradicionales no resultan eficaces, es habitual recurrir a la sustitución de elementos deteriorados, lo que implica un elevado coste económico y una pérdida irreversible del valor patrimonial.

El uso de técnicas electrocinéticas permite conservar el material original, evitando estos gastos y contribuyendo a la preservación del bien cultural.

Finalmente, cabe destacar que estas técnicas presentan también ventajas desde el punto de vista de la sostenibilidad económica. Al reducir el consumo de materiales auxiliares, minimizar residuos y disminuir el número de intervenciones necesarias, se optimizan los recursos disponibles. Además, la posibilidad de integrar estos sistemas con dispositivos electrónicos de bajo coste permite avanzar hacia soluciones automatizadas y monitorizadas, reduciendo los costes de supervisión y mejorando la eficiencia del proceso.

En conjunto, la combinación de fabricación aditiva y técnicas electrocinéticas constituye una solución económicamente ventajosa, al reducir tanto los costes de producción de los dispositivos como los costes asociados a su aplicación. Esta doble ventaja posiciona esta tecnología como una alternativa especialmente atractiva en el ámbito de la conservación del patrimonio, donde la optimización de recursos y la preservación del valor histórico son factores clave.

## ANEXO II: REFLEXIONES SOCIALES

El desarrollo del presente trabajo no solo presenta implicaciones técnicas y científicas, sino que también plantea una serie de reflexiones sociales de gran relevancia, especialmente en el ámbito de la conservación del patrimonio cultural y la sostenibilidad de las intervenciones en materiales constructivos. La aplicación de técnicas electrocinéticas para la desalación de materiales porosos supone un avance significativo frente a métodos tradicionales, tanto por su eficacia como por su impacto en la preservación de bienes de interés histórico.

En primer lugar, es importante destacar el valor social del patrimonio cultural como elemento identitario. Edificaciones históricas, monumentos y elementos constructivos no solo poseen un valor material, sino también simbólico, cultural y emocional para la sociedad. Sin embargo, estos bienes están sometidos a procesos de degradación continuos, siendo la acción de las sales solubles uno de los principales agentes de deterioro. Estas sales, al cristalizar en el interior de los poros, generan tensiones internas que pueden provocar fisuración, pérdida de material y degradación estética. En este contexto, la posibilidad de aplicar técnicas capaces de eliminar estas sales de forma eficaz y profunda adquiere una dimensión social directa, ya que contribuye a la conservación del patrimonio para generaciones futuras.

Desde una perspectiva más técnica, las técnicas electrocinéticas permiten una extracción de sales mucho más eficiente que los métodos tradicionales, como el uso de papetas o baños de inmersión, que presentan limitaciones en profundidad y tiempos de actuación. Esta mayor eficacia implica que las intervenciones pueden ser más rápidas y menos invasivas, reduciendo el tiempo durante el cual el bien patrimonial está sometido a intervención y, por tanto, minimizando riesgos asociados. Además, se ha demostrado que estas técnicas pueden alcanzar altos porcentajes de extracción de sales incluso en zonas profundas del material, lo que supone una mejora sustancial respecto a técnicas convencionales.

Otra reflexión relevante se centra en la accesibilidad y democratización de este tipo de tecnologías. Tradicionalmente, muchas de las técnicas avanzadas de conservación han estado limitadas a grandes proyectos o instituciones con elevados recursos económicos. Sin embargo, el desarrollo de dispositivos basados en fabricación aditiva, como los propuestos en este trabajo, permite reducir significativamente los costes de implementación. Esto abre la puerta a que intervenciones de este tipo puedan ser aplicadas en un mayor número de casos, incluyendo patrimonio de menor escala o con menor financiación, favoreciendo así una conservación más equitativa.

Asimismo, estas técnicas presentan ventajas desde el punto de vista medioambiental y de salud pública. Frente a otros métodos que pueden implicar el uso de productos químicos potencialmente nocivos, los procesos electrocinéticos se basan en principios físicos y químicos controlados, reduciendo la liberación de sustancias peligrosas al entorno. De hecho, algunos estudios señalan que este tipo de tratamientos pueden considerarse más respetuosos con el medio ambiente, al evitar emisiones de compuestos volátiles y favorecer procesos controlados dentro del propio material. Esta característica resulta especialmente relevante en el contexto actual, donde la sostenibilidad y la reducción del impacto ambiental son aspectos clave en cualquier intervención técnica.

Por otro lado, la aplicación de estas tecnologías también implica una mayor necesidad de formación especializada. El uso de sistemas electrocinéticos requiere conocimientos en áreas como electroquímica, materiales y conservación, lo que pone de manifiesto la importancia de la formación interdisciplinar en el ámbito de la ingeniería y la restauración. Esto puede generar nuevas oportunidades profesionales, pero también plantea el reto de adaptar la formación académica y técnica a estas nuevas demandas.

Finalmente, cabe señalar que, aunque estas técnicas presentan numerosas ventajas, su aplicación debe realizarse siempre bajo criterios de precaución y control. Tal y como se ha indicado en diversos estudios, pueden producirse efectos secundarios como cambios de pH o alteraciones en el material si no

se gestionan adecuadamente. Por ello, es fundamental que su implementación se realice tras un estudio previo detallado, garantizando en todo momento la compatibilidad con el material y la seguridad de la intervención.

En conclusión, el uso de técnicas electrocinéticas en la desalación de materiales porosos no solo representa un avance técnico, sino que también tiene importantes implicaciones sociales. Estas van desde la mejora en la conservación del patrimonio cultural, pasando por la reducción de costes y el aumento de la accesibilidad, hasta la promoción de prácticas más sostenibles y la generación de nuevas necesidades formativas. Todo ello refuerza la idea de que la ingeniería aplicada al patrimonio no es únicamente una disciplina técnica, sino también una herramienta al servicio de la sociedad.

## ANEXO III: CODIGO SENSOR HUMEDAD

A continuación, se muestra el código del sensor de humedad:

```
/*
 * Programa básico para la lectura de un Sensor de Humedad del suelo
 * Lee la señal del sensor en un PIN analógico y la lectura datos se manda al Serial Monitor
 */

// Definimos el PIN A0 analógico al cual se conecta la señal del sensor
const int SENSOR_PIN = A0;

void setup() {
  // Initialize serial communication at 9600 baud rate
  Serial.begin(9600);
  analogReadResolution(10); // Cambiamos la resolución del ADC from 12 to 10 bits

  // Título - Encabezado del serial monitor
  Serial.println("=====");
  Serial.println("Capacitive Soil Moisture Sensor Monitoring");
  Serial.println("=====");
  Serial.println("Raw Value (0-1023) | Voltage (0-3.3V) | Moisture %");
  Serial.println("-----");
}

void loop() {
  // Leemos la señal del sensor (0-1023)
  int rawValue = analogRead(SENSOR_PIN);

  // Convertimos los valores en bruto al voltaje (0-3.3V)
  float voltage = rawValue * (3.3 / 1023.0);

  /*
   * Convert raw sensor value to moisture percentage
   * Note: These calibration values are examples - adjust based on your specific sensor:
   * - Dry in air: ~620 (0% moisture)
   * - Wet in water: ~320 (100% moisture)
  */
}
```

```
* Actual values may vary - perform calibration for accurate readings
*/
int moisturePercent = map(rawValue, 620, 320, 0, 100);

// Constrain moisture percentage to valid range (0-100%)
moisturePercent = constrain(moisturePercent, 0, 100);

// Print all values to serial monitor in formatted columns
Serial.print("    ");
if (rawValue < 1000) Serial.print(" "); // Alignment spacing
Serial.print(rawValue);
Serial.print("    |    ");
Serial.print(voltage, 2); // Display voltage with 2 decimal places
Serial.print("V    |    ");
if (moisturePercent < 100) Serial.print(" "); // Alignment spacing
if (moisturePercent < 10) Serial.print(" "); // Additional spacing for single digits
Serial.print(moisturePercent);
Serial.println("%");

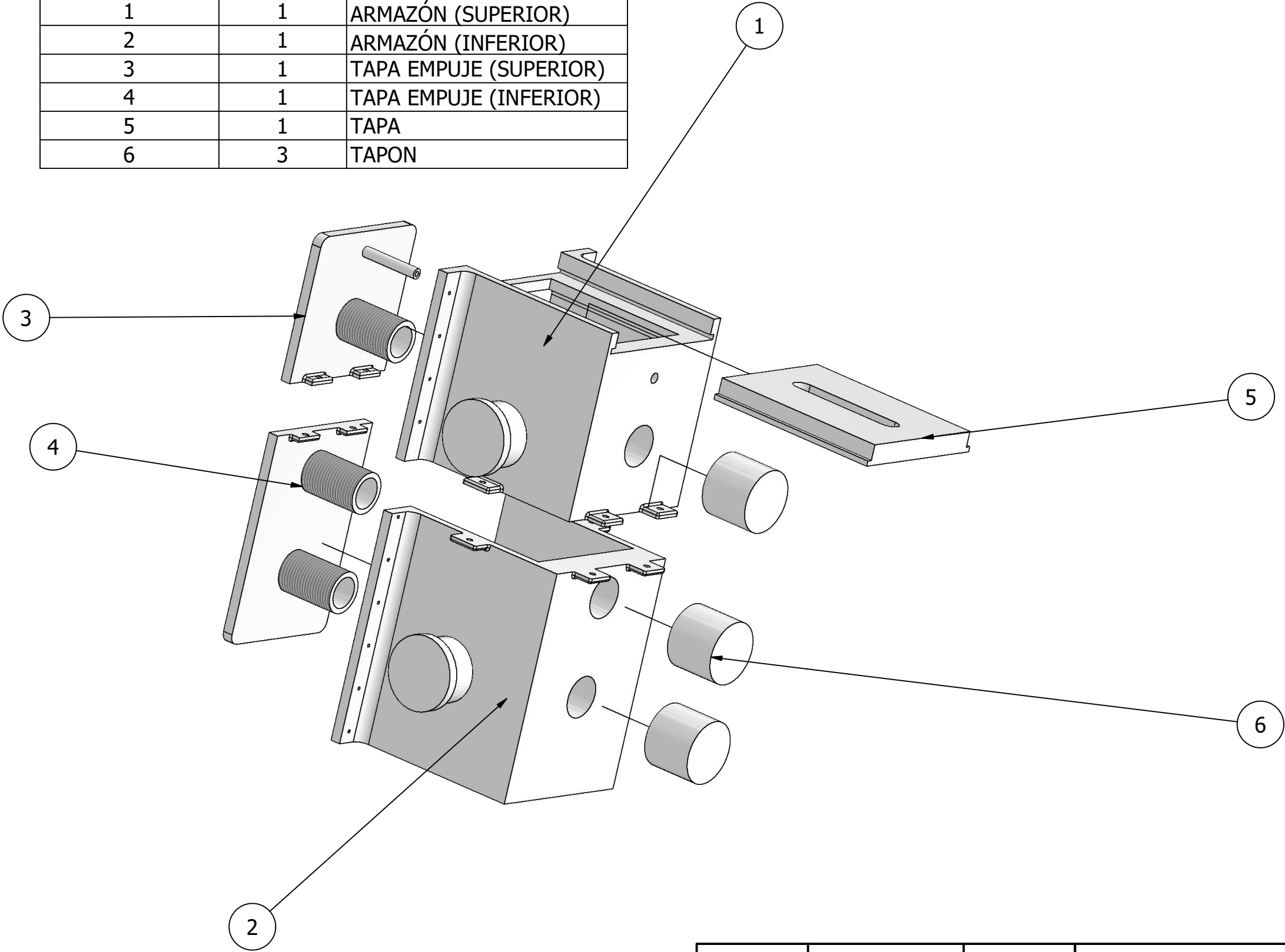
// Wait 2 seconds before next reading
delay(2000);
}
```

## **ANEXO IV: PLANOS DE LOS PROTOTIPOS**

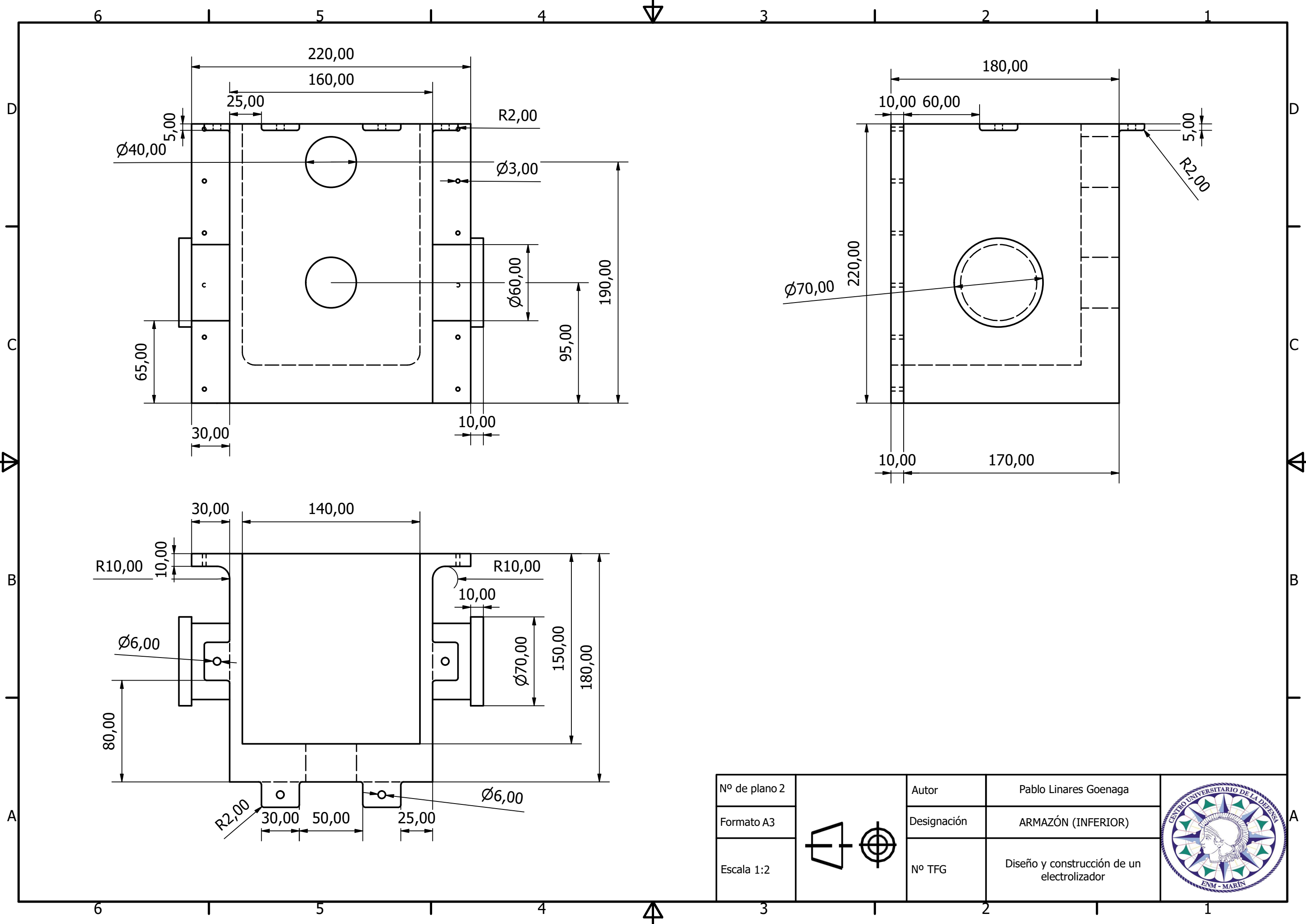
A continuación, se recogen los planos correspondientes a las piezas que conforman los prototipos recogidos en la presentes memoria de TFG. En concreto se muestran los siguientes:

- Prototipo I
- Prototipo II
- Prototipo IIIa
- Prototipo IIIb
- Prototipo reducido

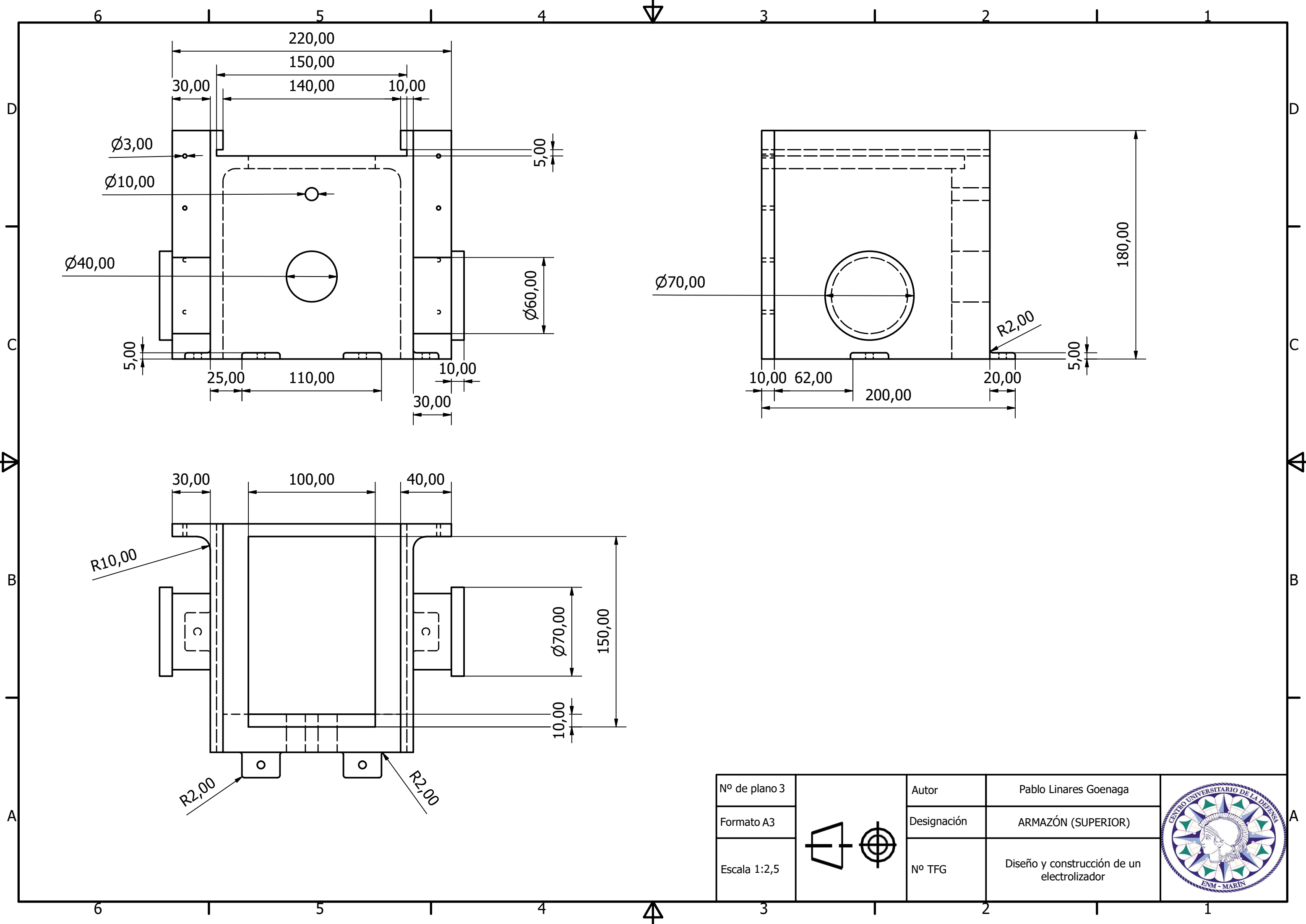
| LISTA DE PIEZAS |          |                        |
|-----------------|----------|------------------------|
| ELEMENTO        | CANTIDAD | NOMBRE                 |
| 1               | 1        | ARMAZÓN (SUPERIOR)     |
| 2               | 1        | ARMAZÓN (INFERIOR)     |
| 3               | 1        | TAPA EMPUJE (SUPERIOR) |
| 4               | 1        | TAPA EMPUJE (INFERIOR) |
| 5               | 1        | TAPA                   |
| 6               | 3        | TAPON                  |

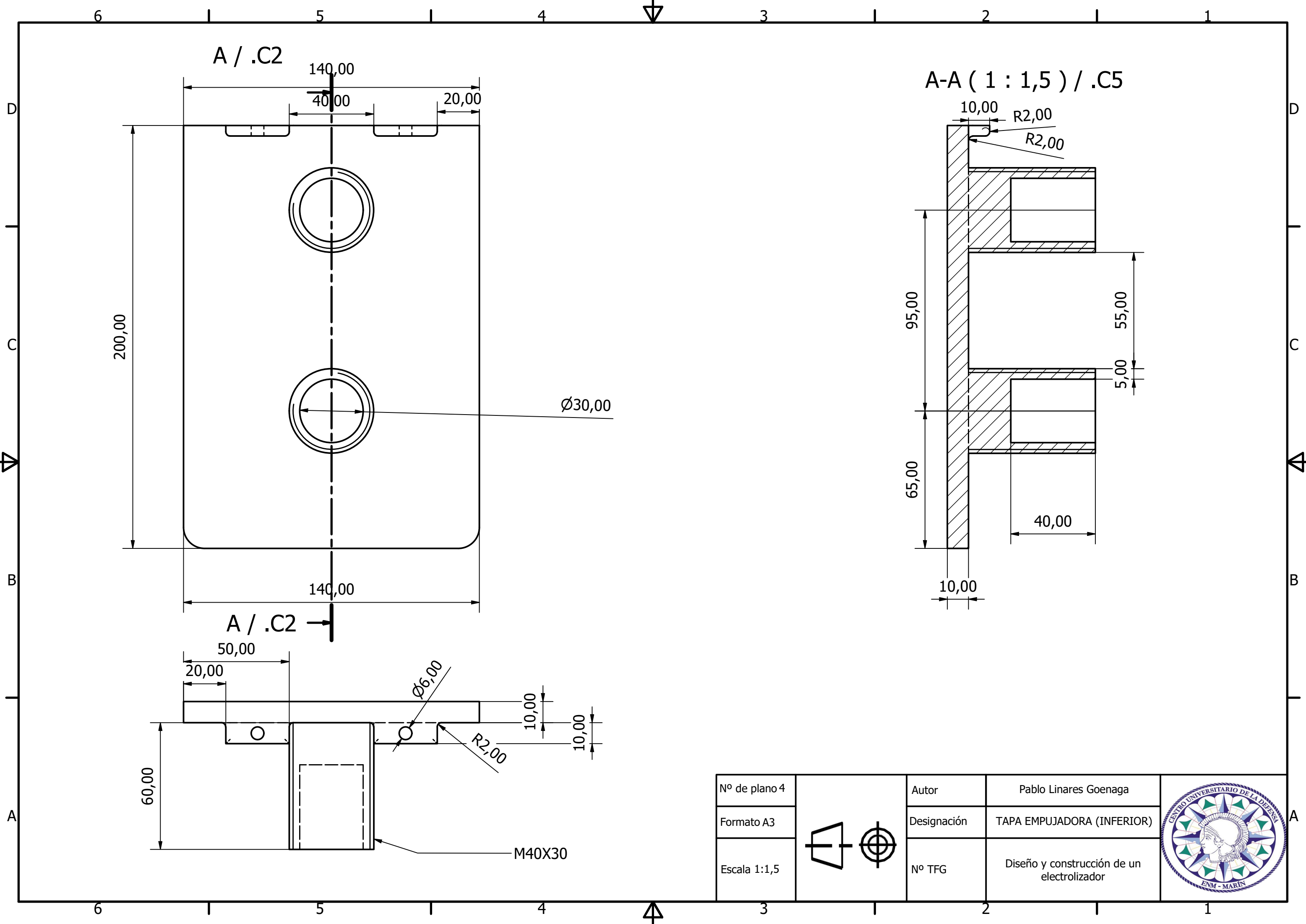


|               |  |             |                                            |  |
|---------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 1 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3    |  | Designación | Explosionado general PROTOTIPO I           |  |
| Escala 1:4    |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



|               |  |             |                                            |  |
|---------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 2 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3    |  | Designación | ARMAZÓN (INFERIOR)                         |  |
| Escala 1:2    |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |





A / .C2

140,00

40,00

20,00

200,00

Ø30,00

140,00

A / .C2

50,00

20,00

Ø6,00

R2,00

M40X30

60,00

A-A ( 1 : 1,5 ) / .C5

10,00

R2,00

R2,00

95,00

55,00

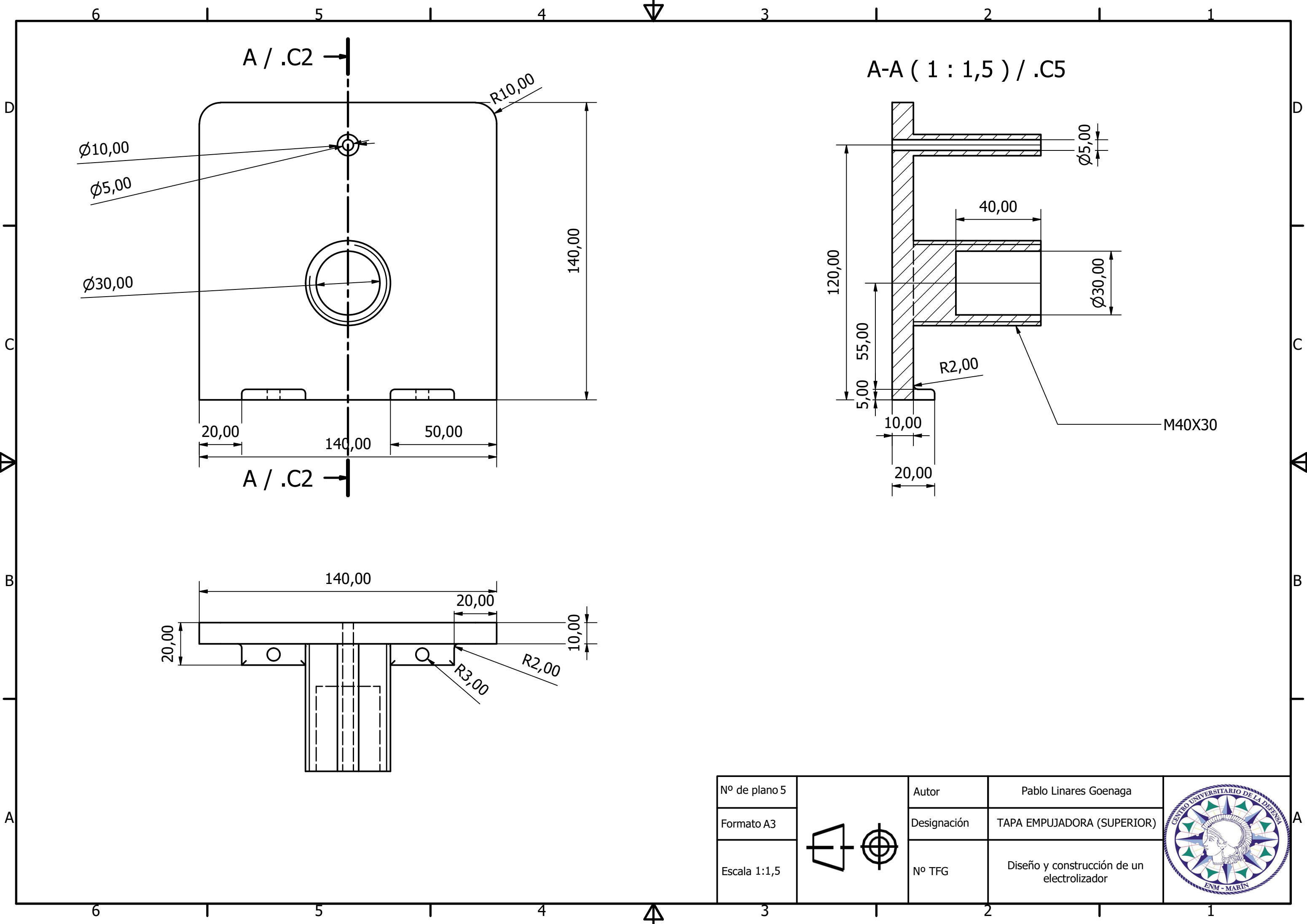
5,00

65,00

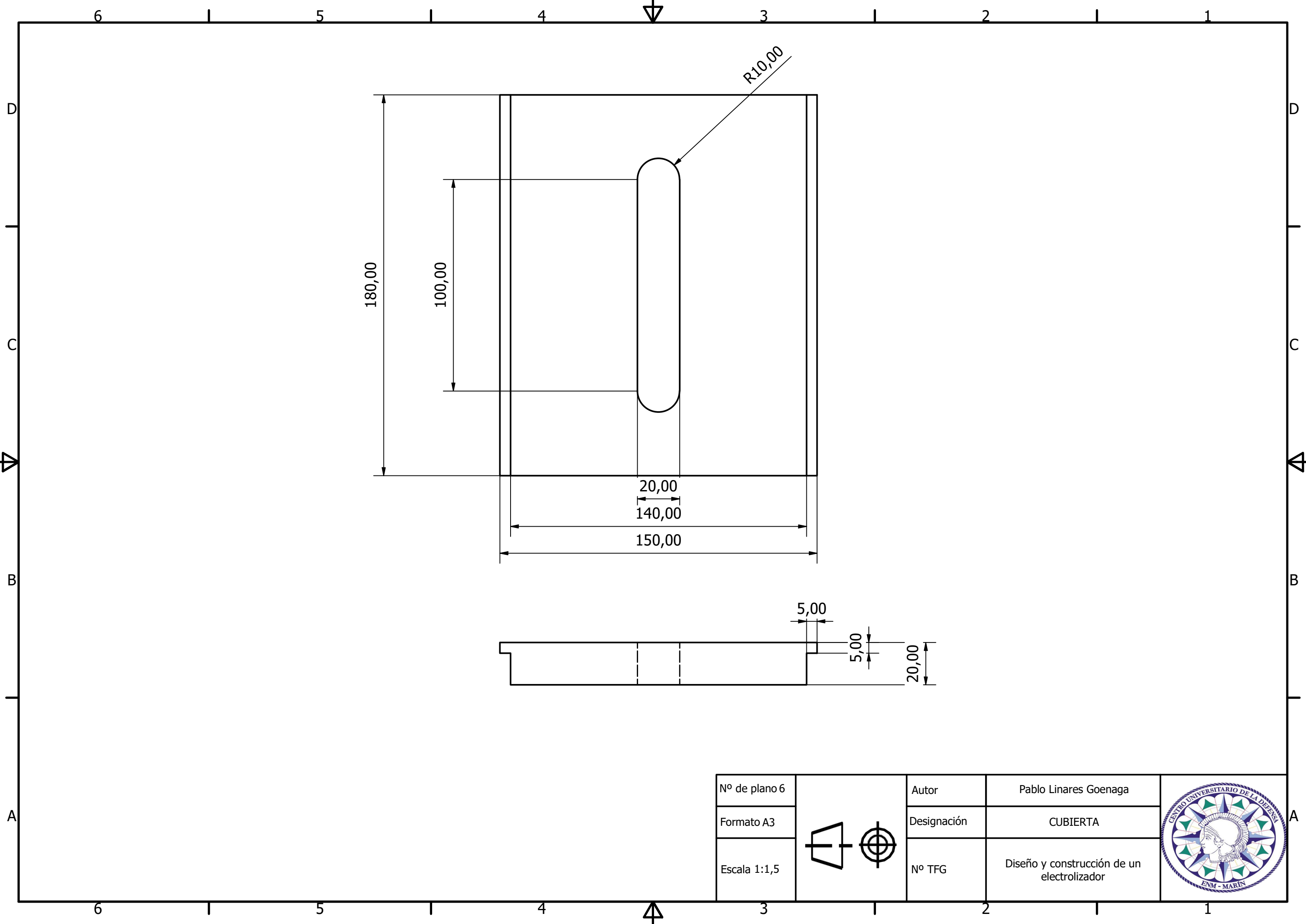
40,00

10,00

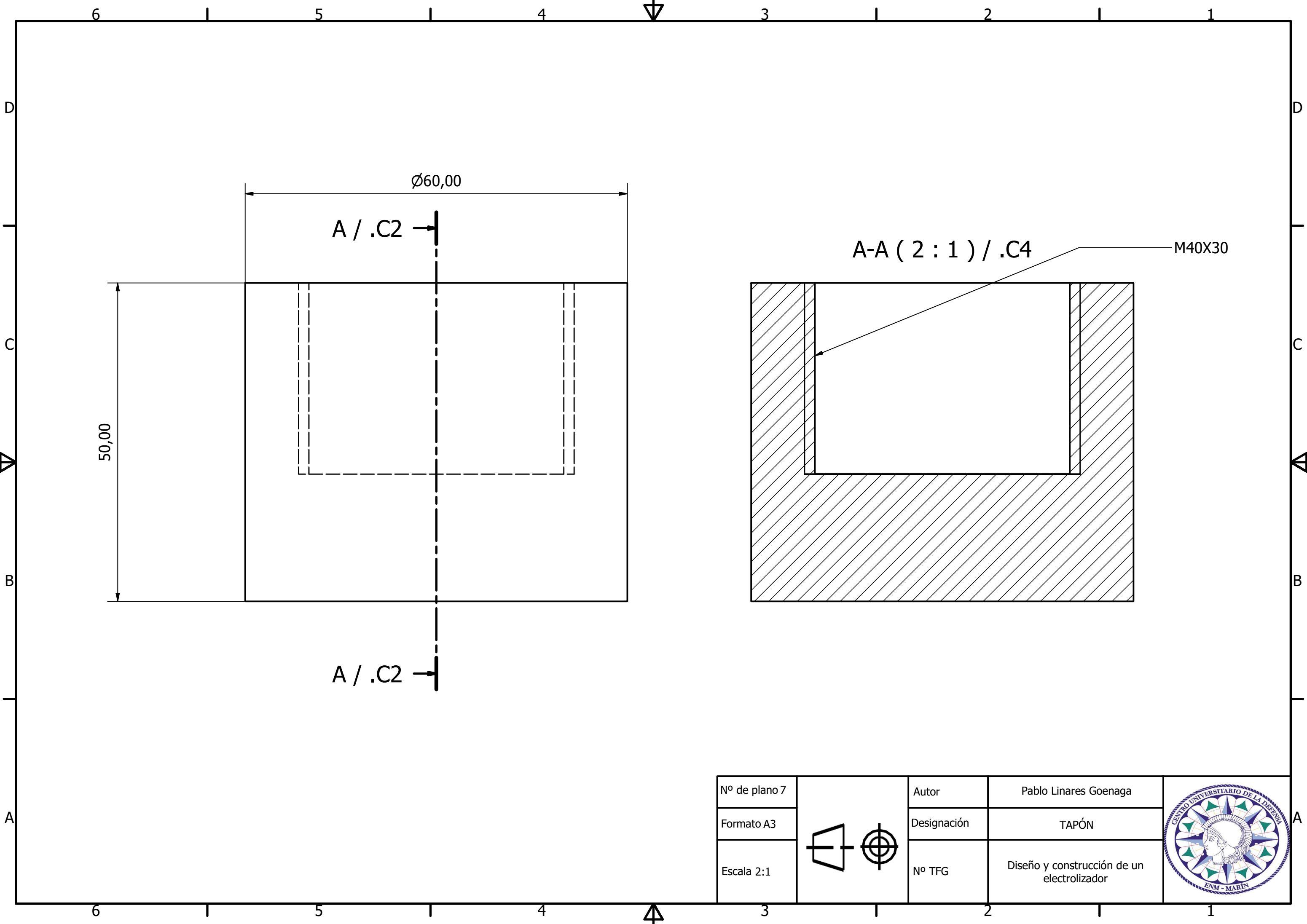
|               |  |             |                                            |  |
|---------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 4 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3    |  | Designación | TAPA EMPUJADORA (INFERIOR)                 |  |
| Escala 1:1,5  |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



|               |  |             |                                            |  |
|---------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 5 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3    |  | Designación | TAPA EMPUJADORA (SUPERIOR)                 |  |
| Escala 1:1,5  |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |

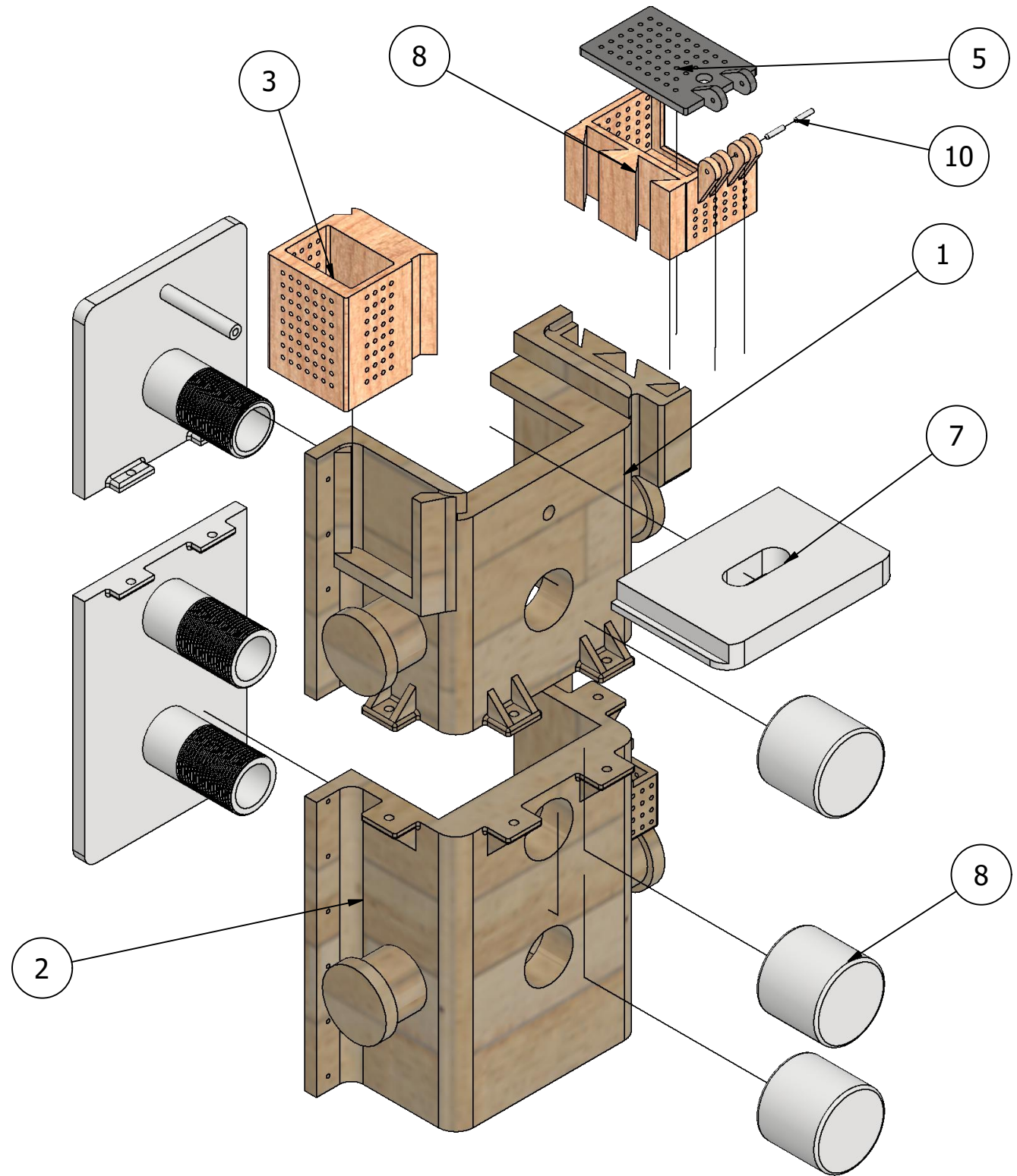


|               |  |             |                                            |  |
|---------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 6 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3    |  | Designación | CUBIERTA                                   |  |
| Escala 1:1,5  |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |

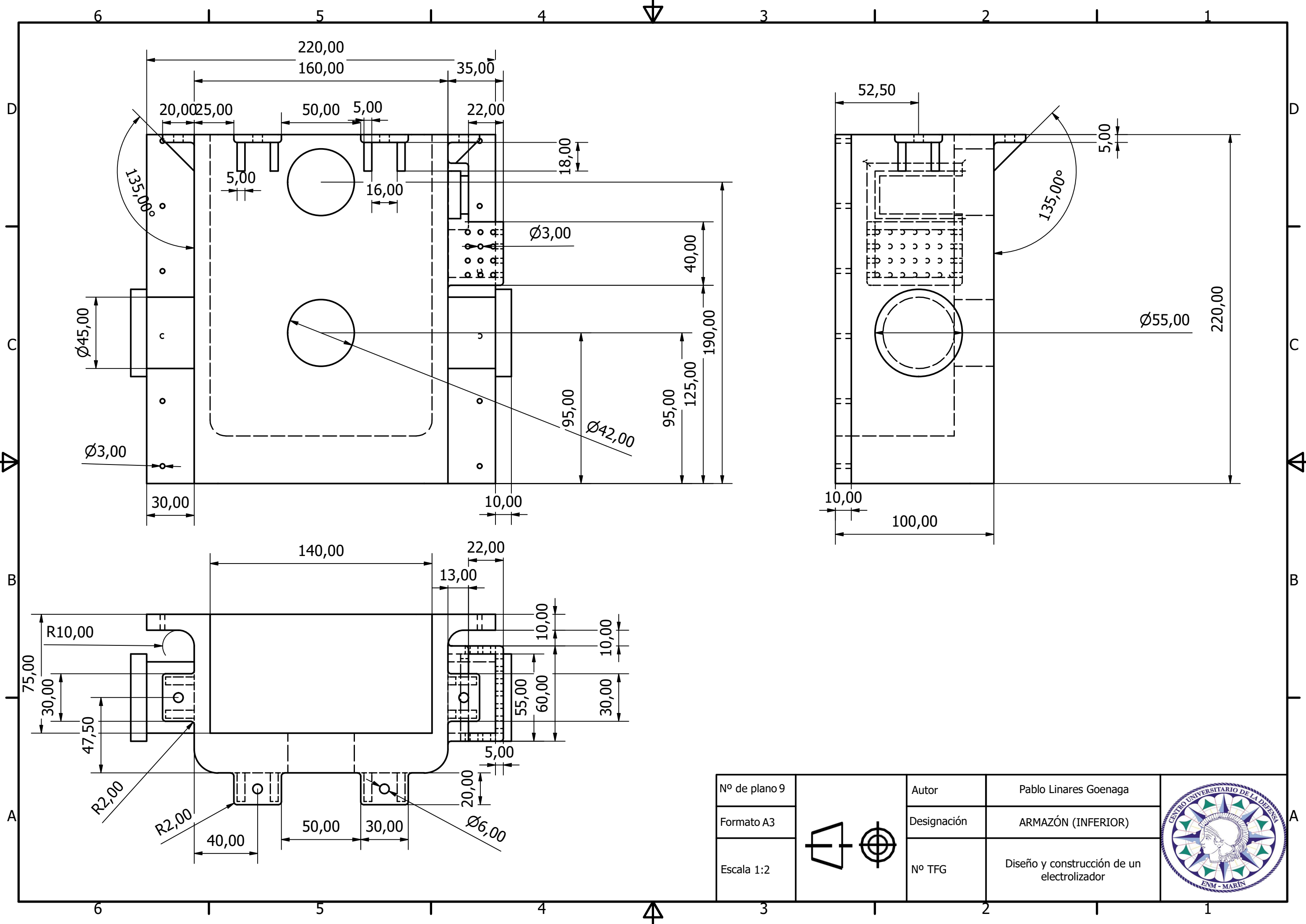


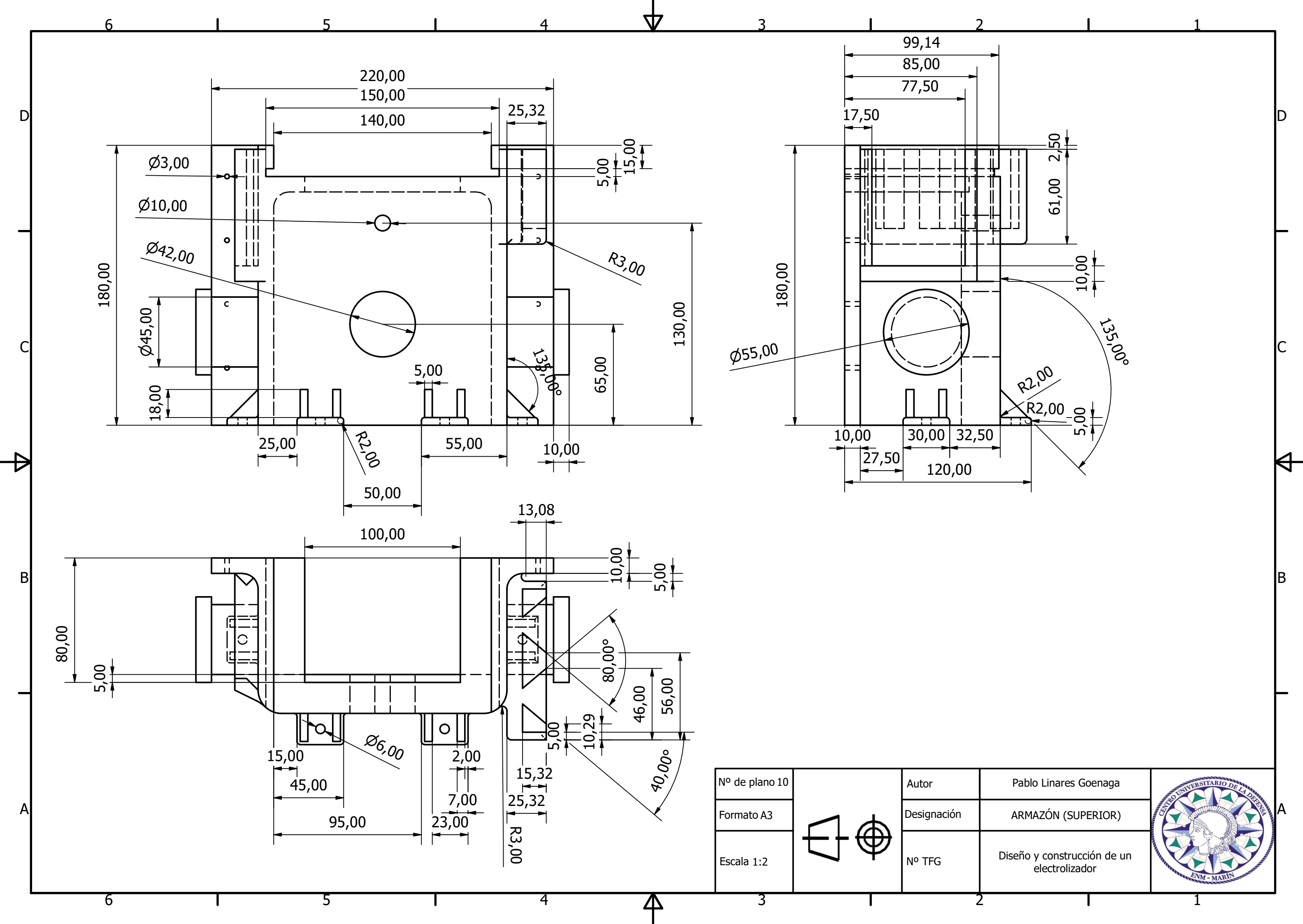
|               |  |             |                                               |  |
|---------------|--|-------------|-----------------------------------------------|--|
| Nº de plano 7 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                         |  |
| Formato A3    |  | Designación | TAPÓN                                         |  |
| Escala 2:1    |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un<br>electrolizador |  |

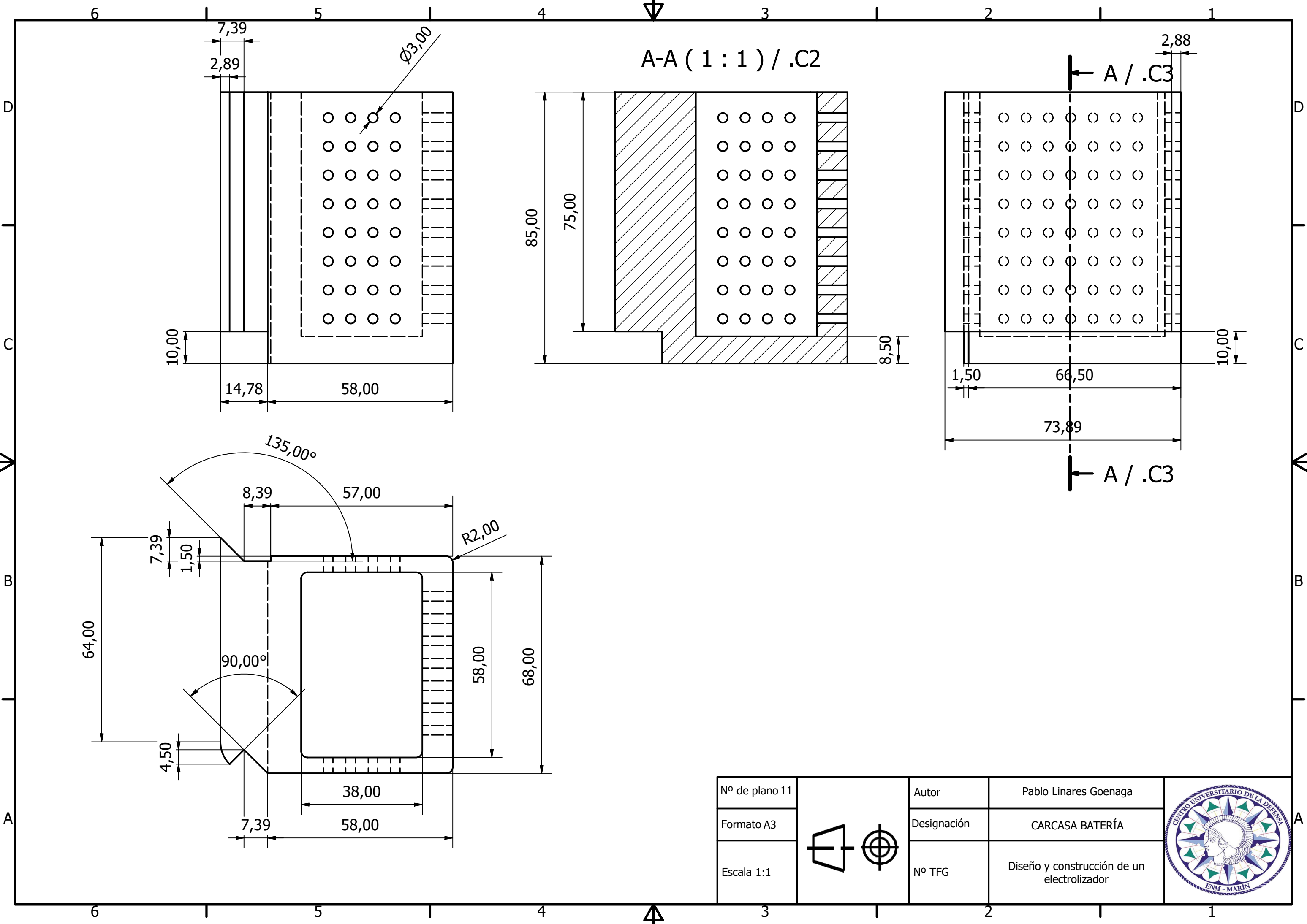
| LISTA DE PIEZAS |          |                            |
|-----------------|----------|----------------------------|
| ELEMENTO        | CANTIDAD | NOMBRE                     |
| 1               | 1        | ARMAZÓN (SUPERIOR)         |
| 2               | 1        | ARMAZÓN (INFERIOR)         |
| 3               | 1        | CARCASA BATERÍA            |
| 4               | 1        | TAPA EMPUJADORA (INFERIOR) |
| 5               | 1        | Tapa batería               |
| 6               | 1        | TAPA EMPUJADORA (SUPERIOR) |
| 7               | 1        | TAPA SUPERIOR              |
| 8               | 3        | TAPON                      |
| 9               | 1        | CARCASA MODULADOR          |
| 10              | 1        | PASADORES                  |

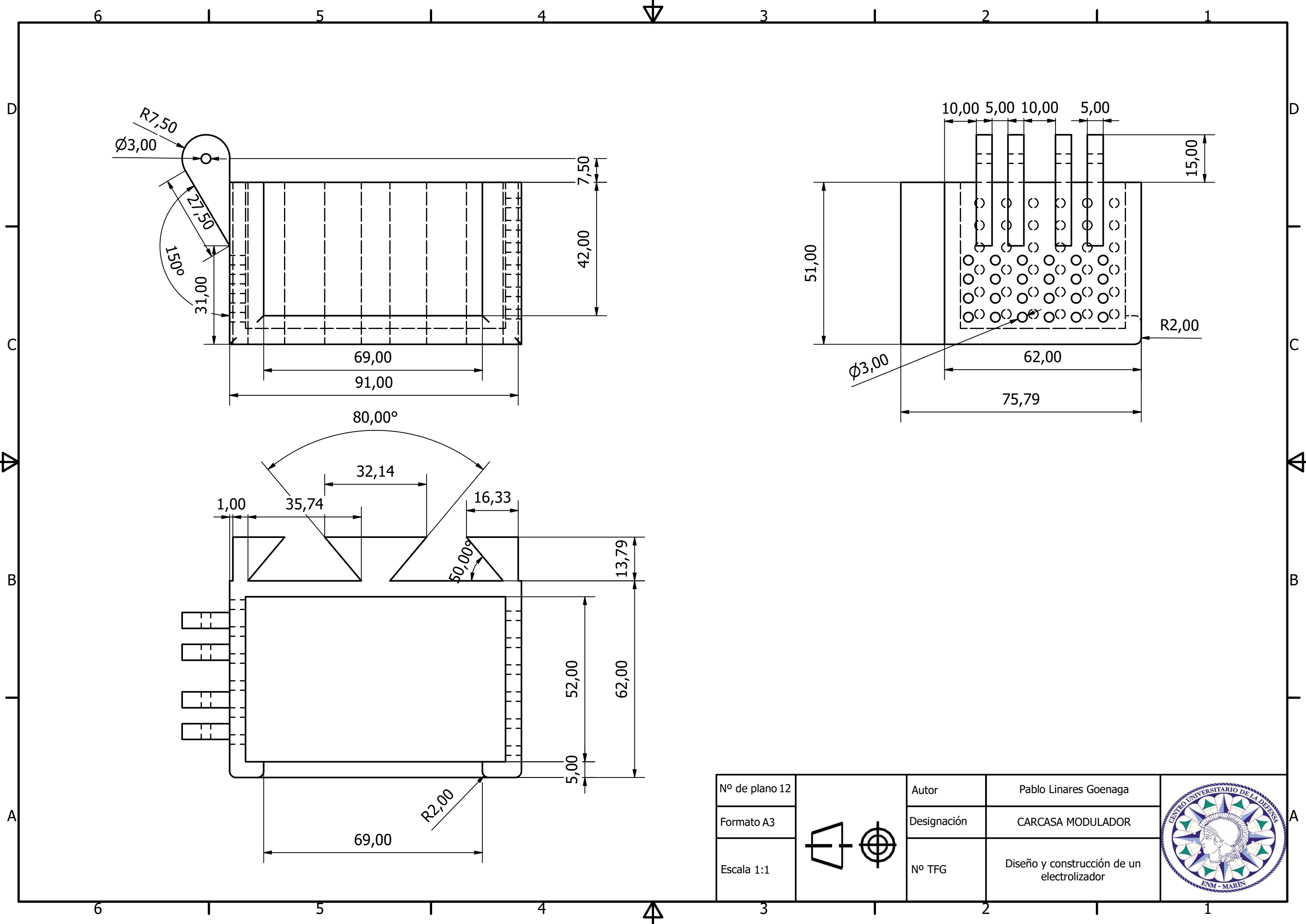


|               |  |             |                                            |  |
|---------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 8 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3    |  | Designación | Explosionado general PROTOTIPO II          |  |
| Escala 1:3,5  |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |

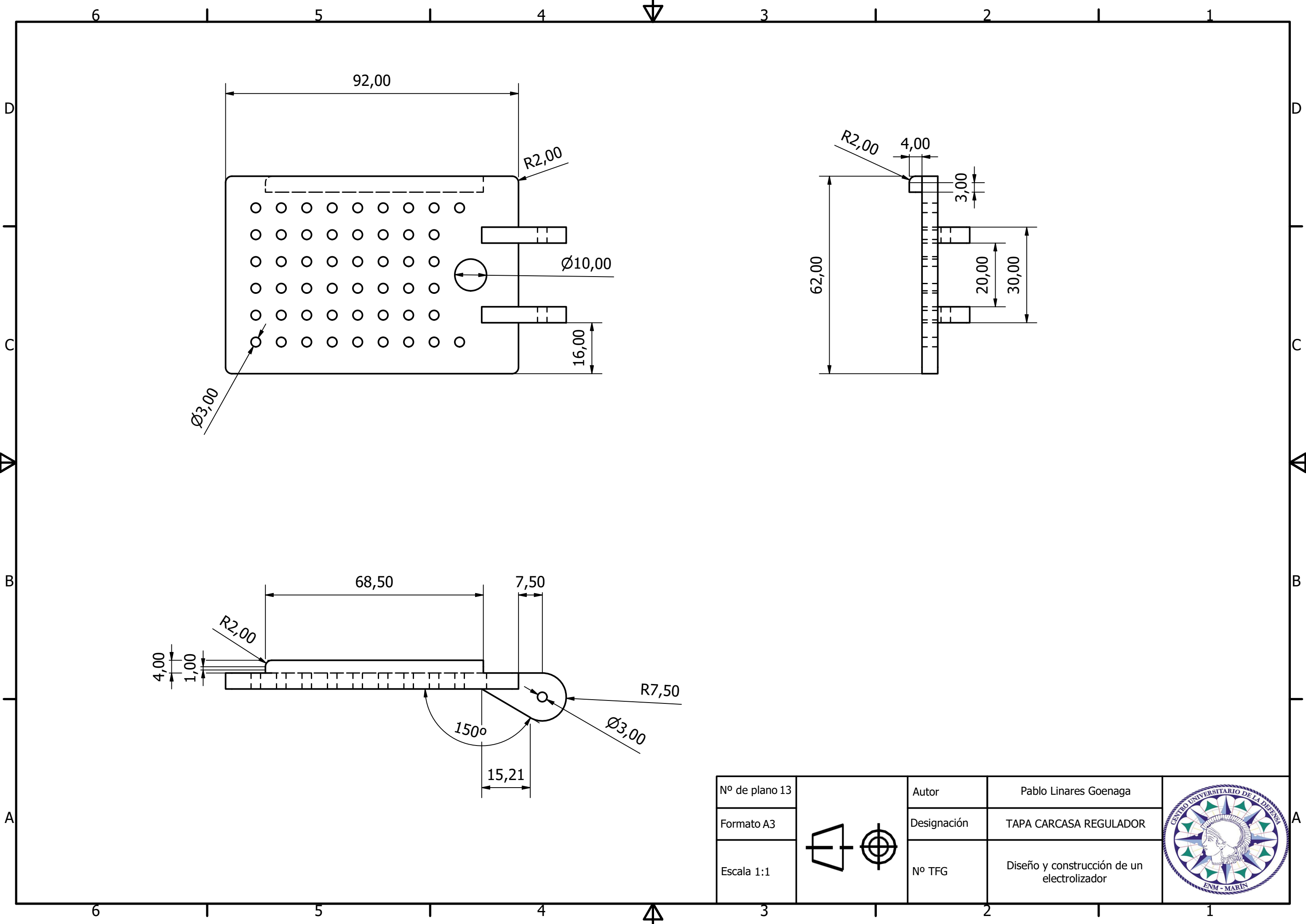


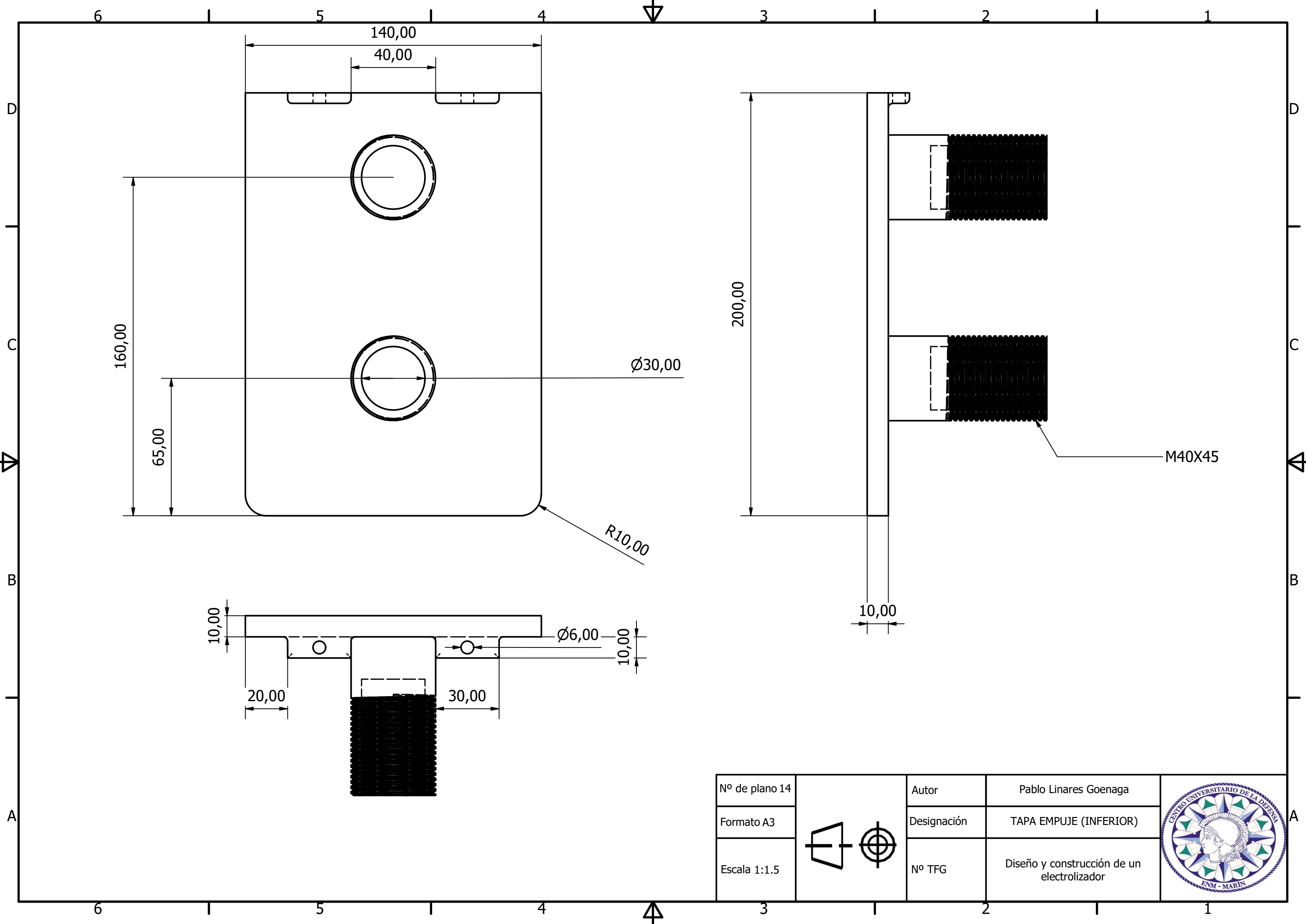




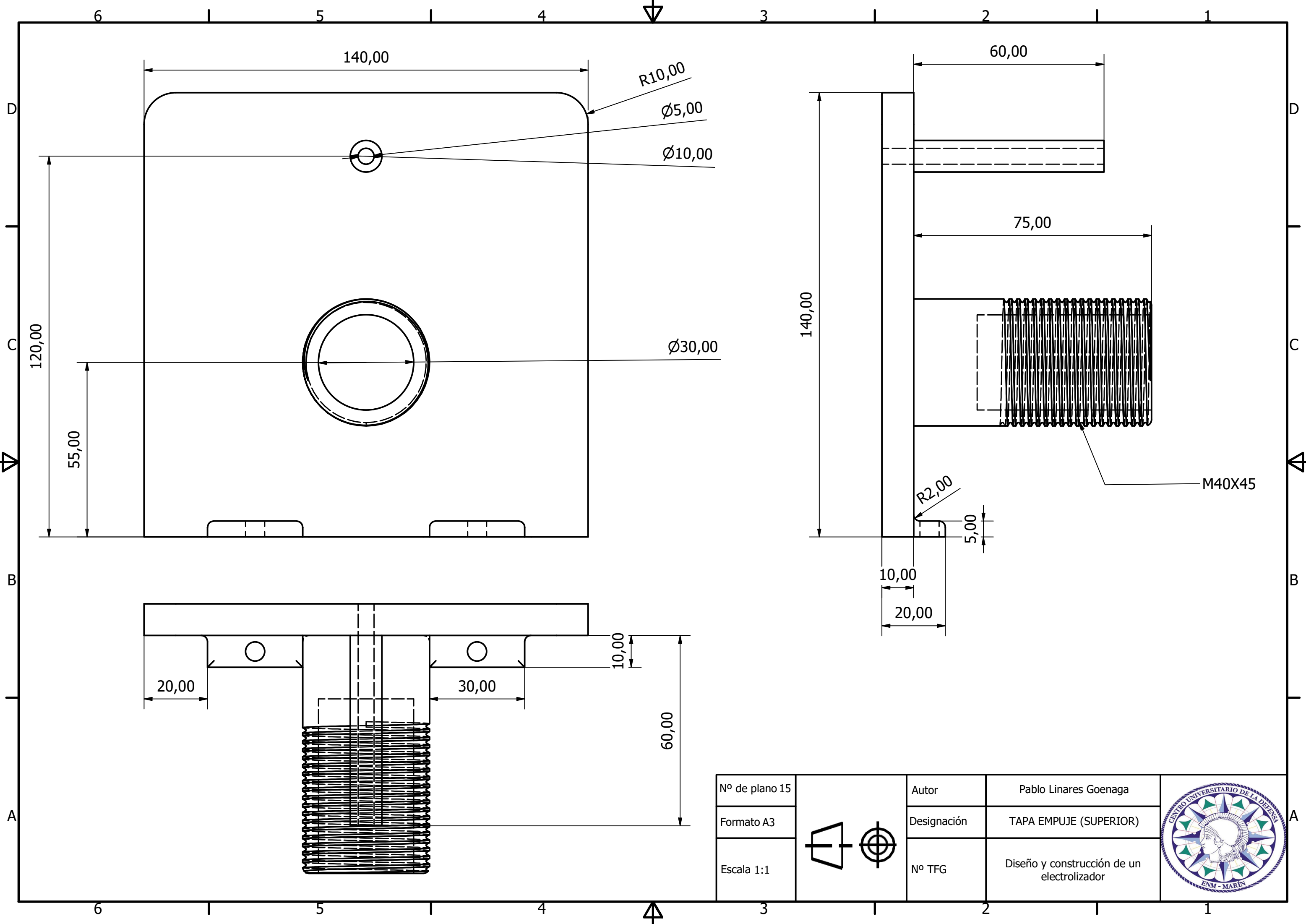


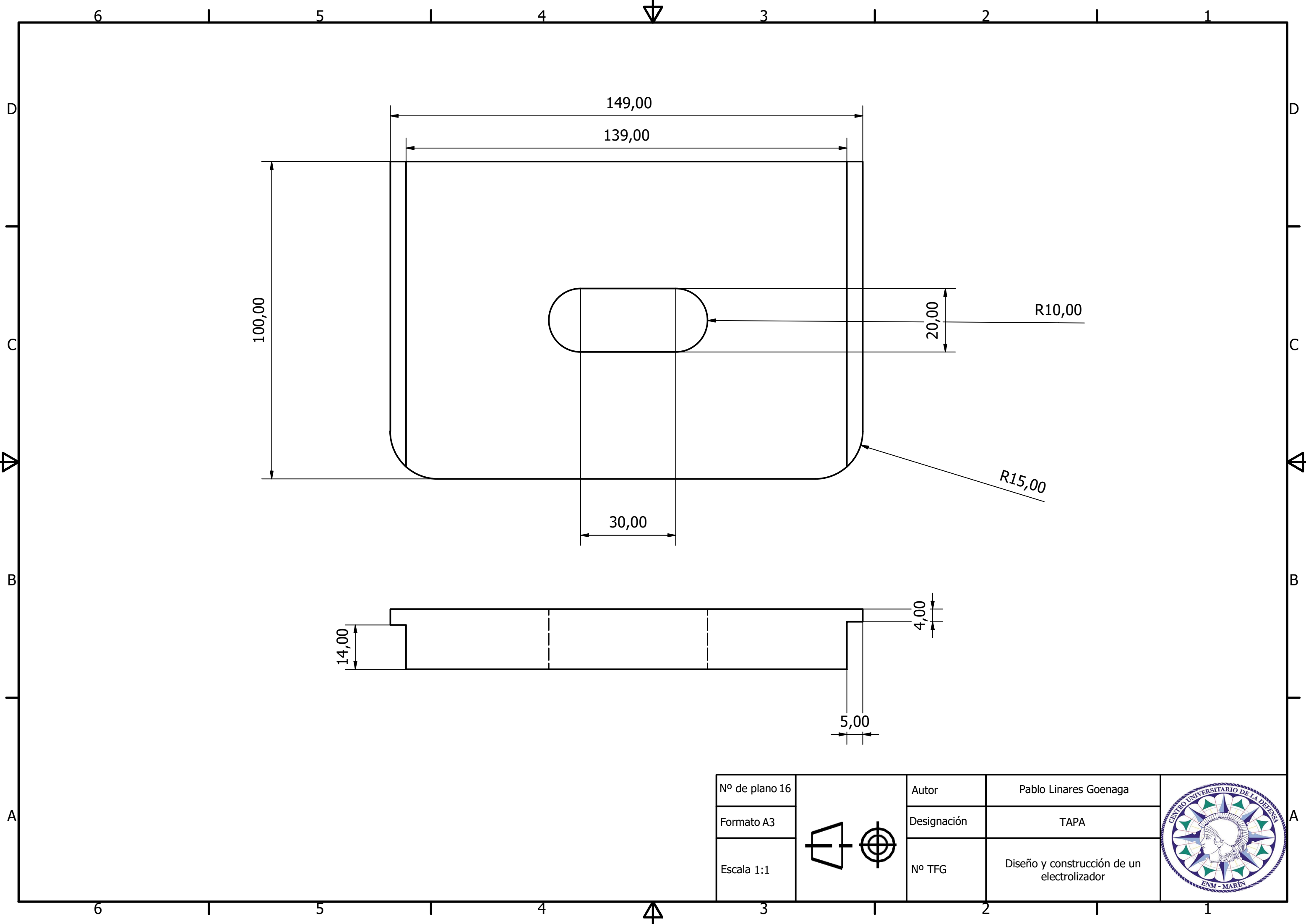
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 12 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | CARCASA MODULADOR                          |  |
| Escala 1:1     |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



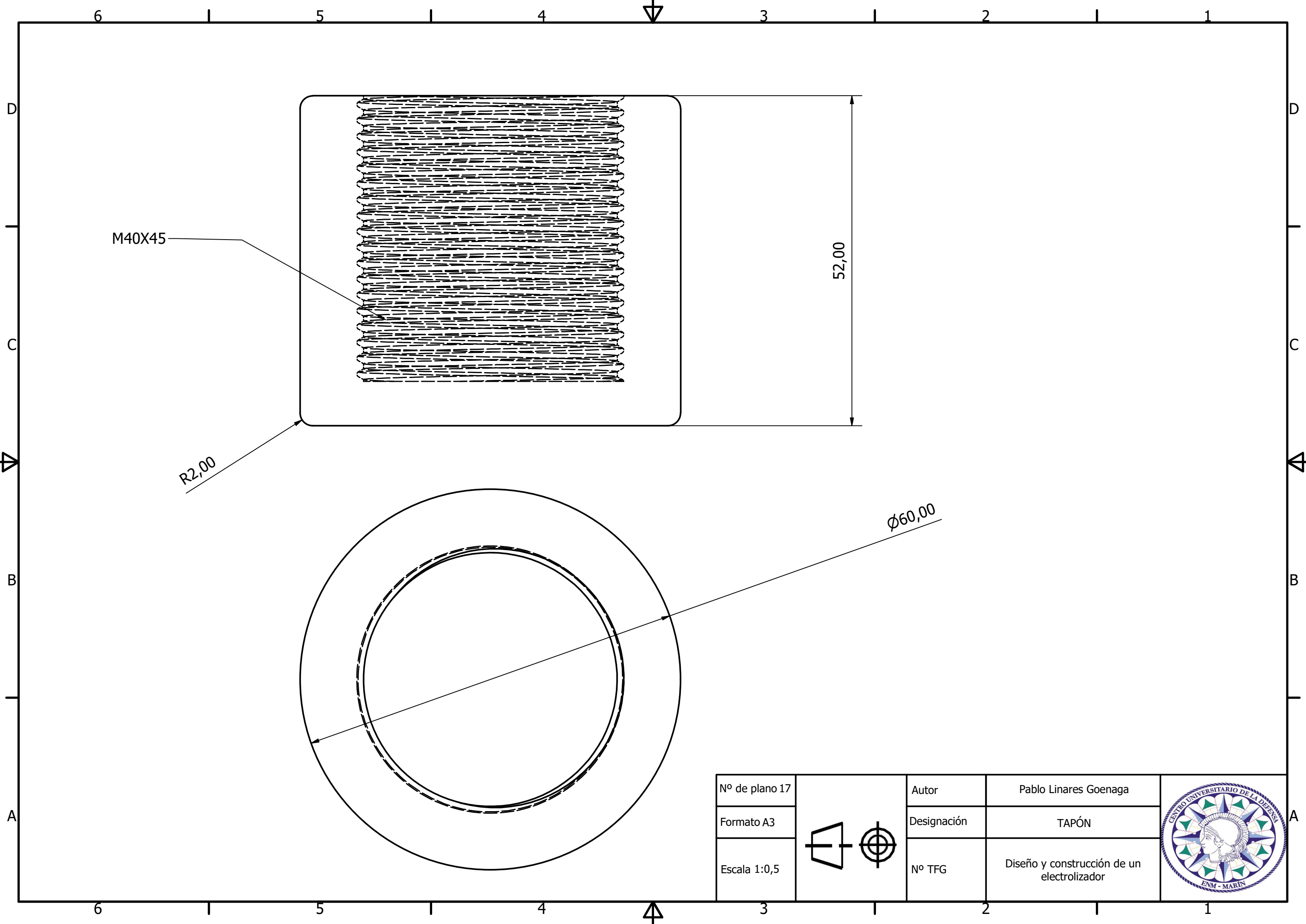


|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 14 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA EMPUJE (INFERIOR)                     |  |
| Escala 1:1.5   |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |

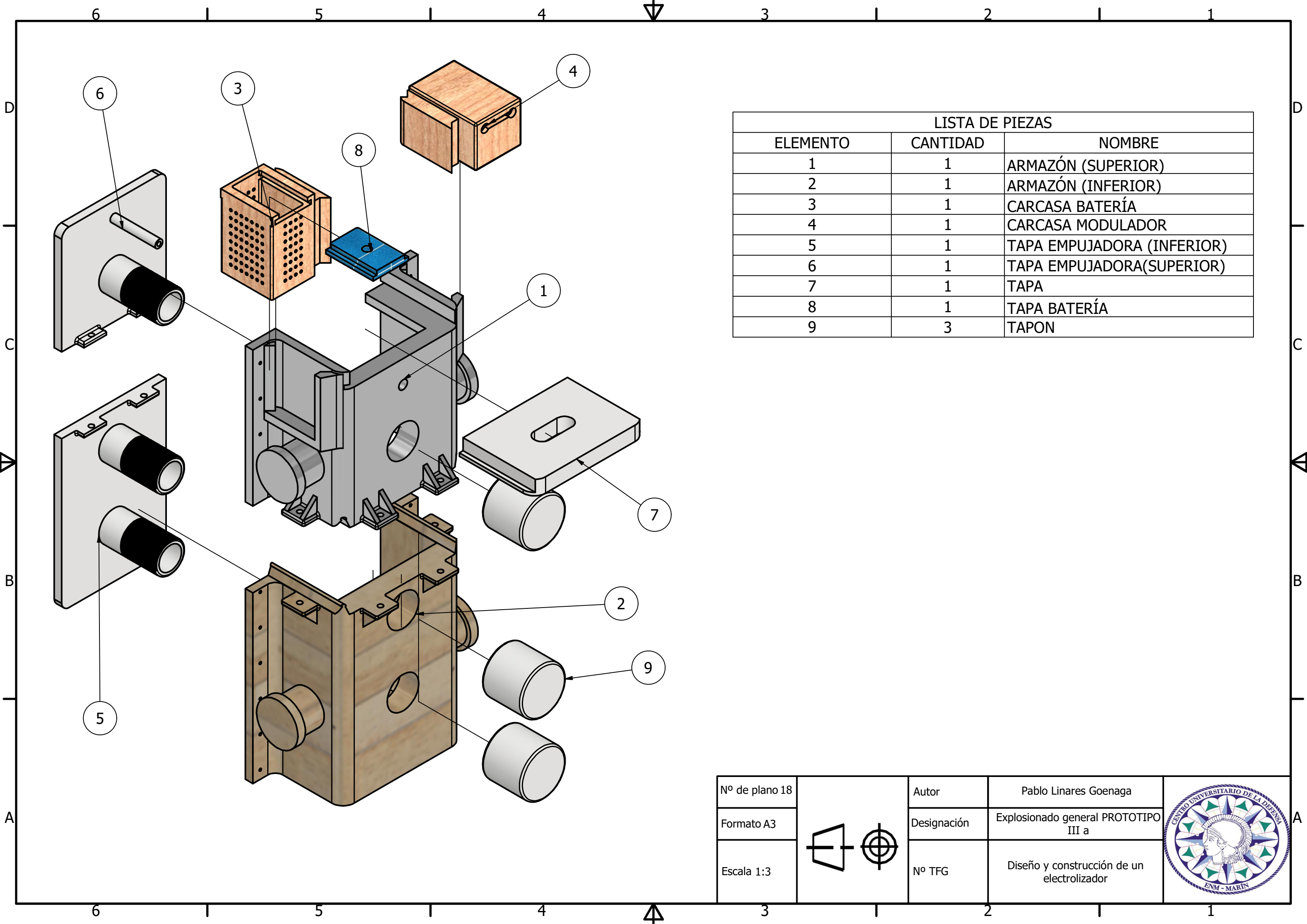




|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 16 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA                                       |  |
| Escala 1:1     |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |

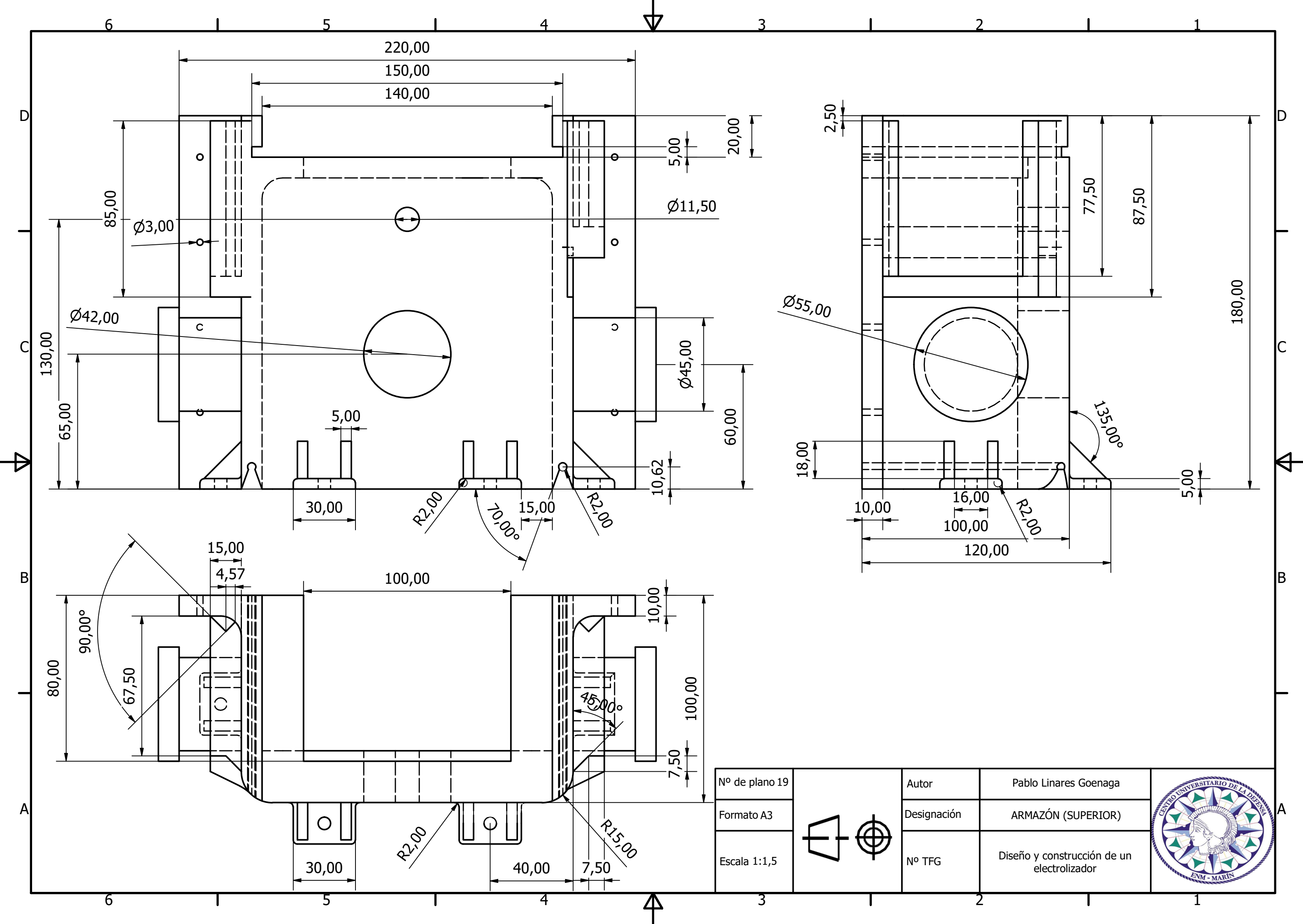


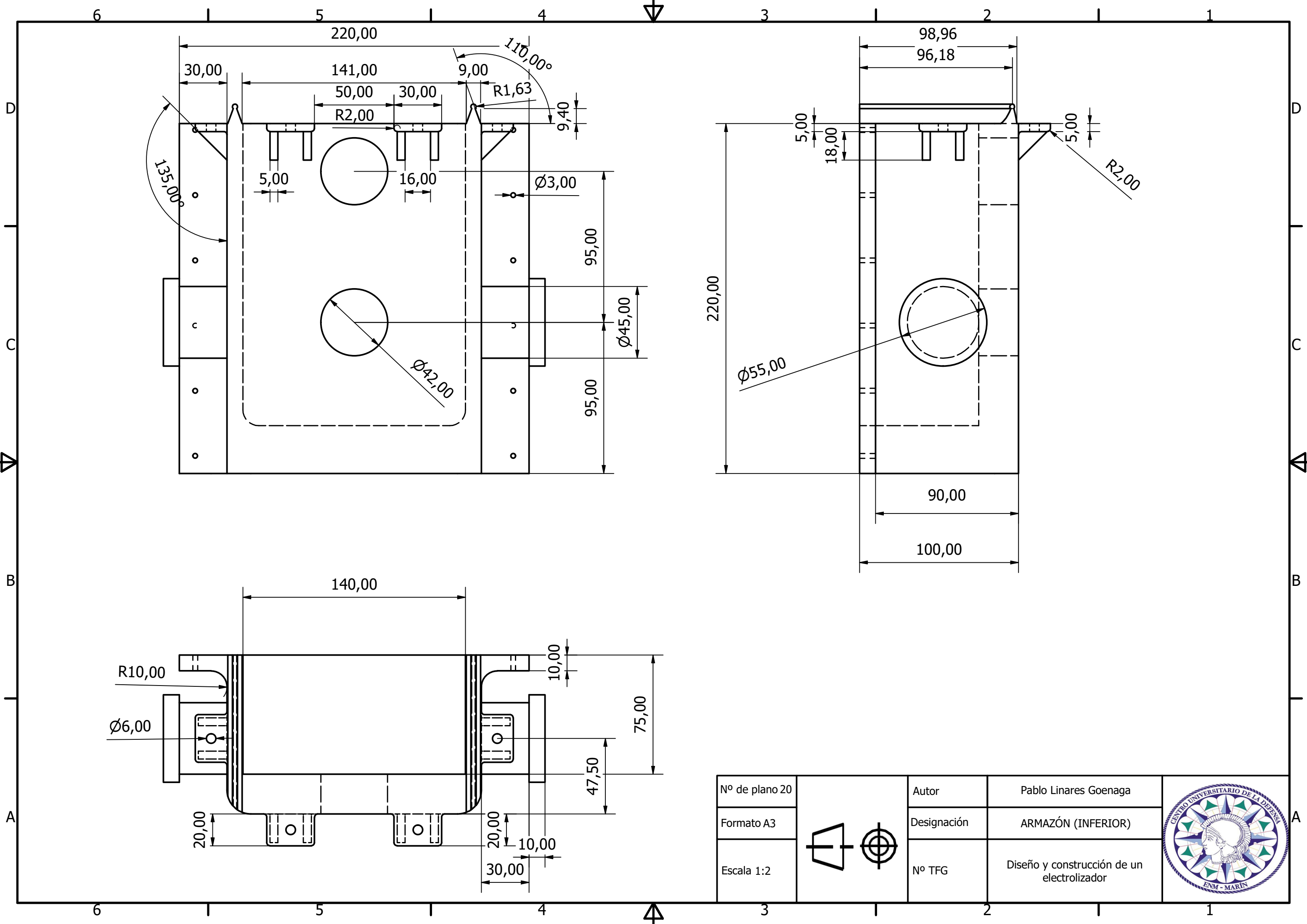
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 17 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPÓN                                      |  |
| Escala 1:0,5   |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |

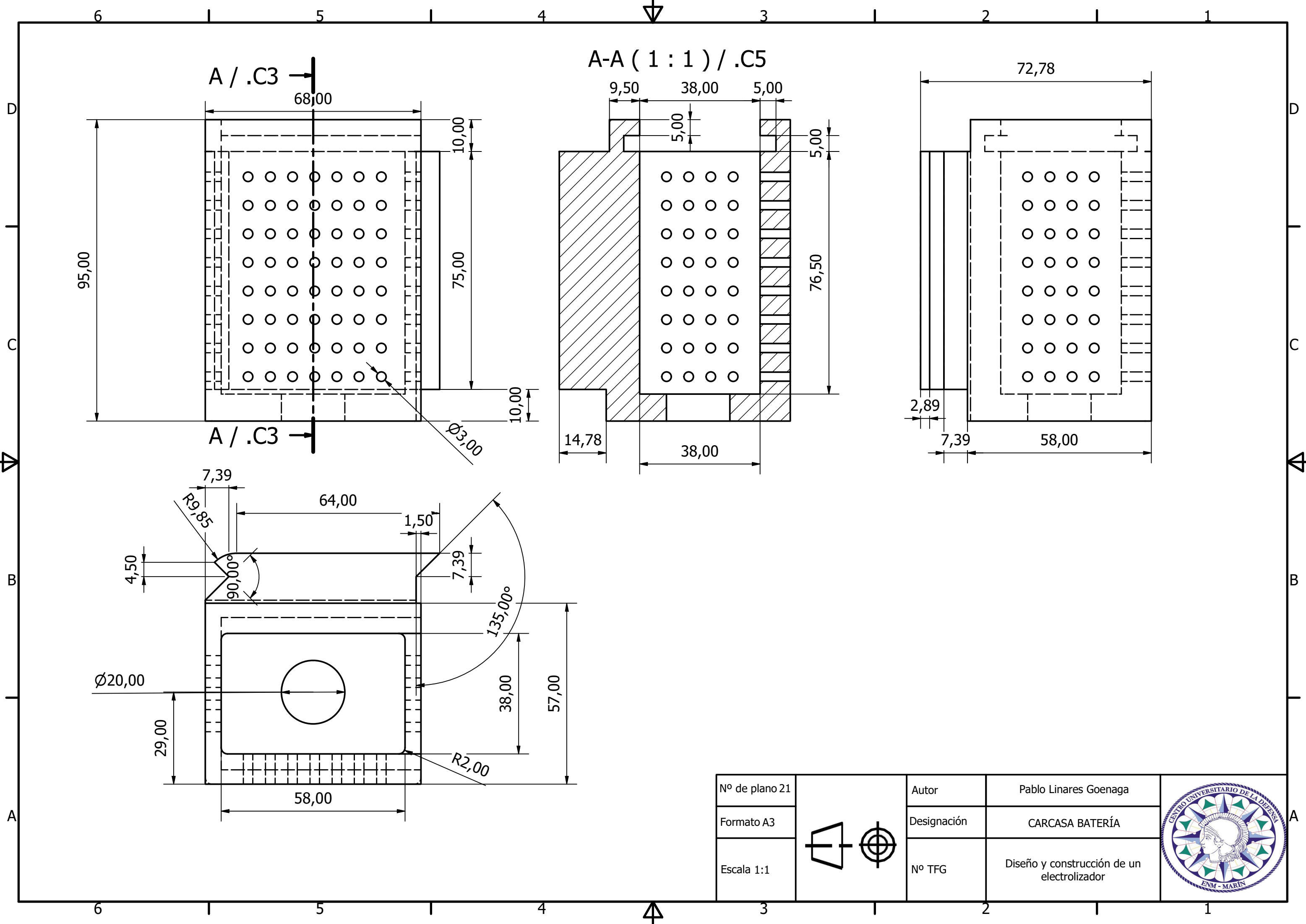


| LISTA DE PIEZAS |          |                            |
|-----------------|----------|----------------------------|
| ELEMENTO        | CANTIDAD | NOMBRE                     |
| 1               | 1        | ARMAZÓN (SUPERIOR)         |
| 2               | 1        | ARMAZÓN (INFERIOR)         |
| 3               | 1        | CARCASA BATERÍA            |
| 4               | 1        | CARCASA MODULADOR          |
| 5               | 1        | TAPA EMPUJADORA (INFERIOR) |
| 6               | 1        | TAPA EMPUJADORA(SUPERIOR)  |
| 7               | 1        | TAPA                       |
| 8               | 1        | TAPA BATERÍA               |
| 9               | 3        | TAPON                      |

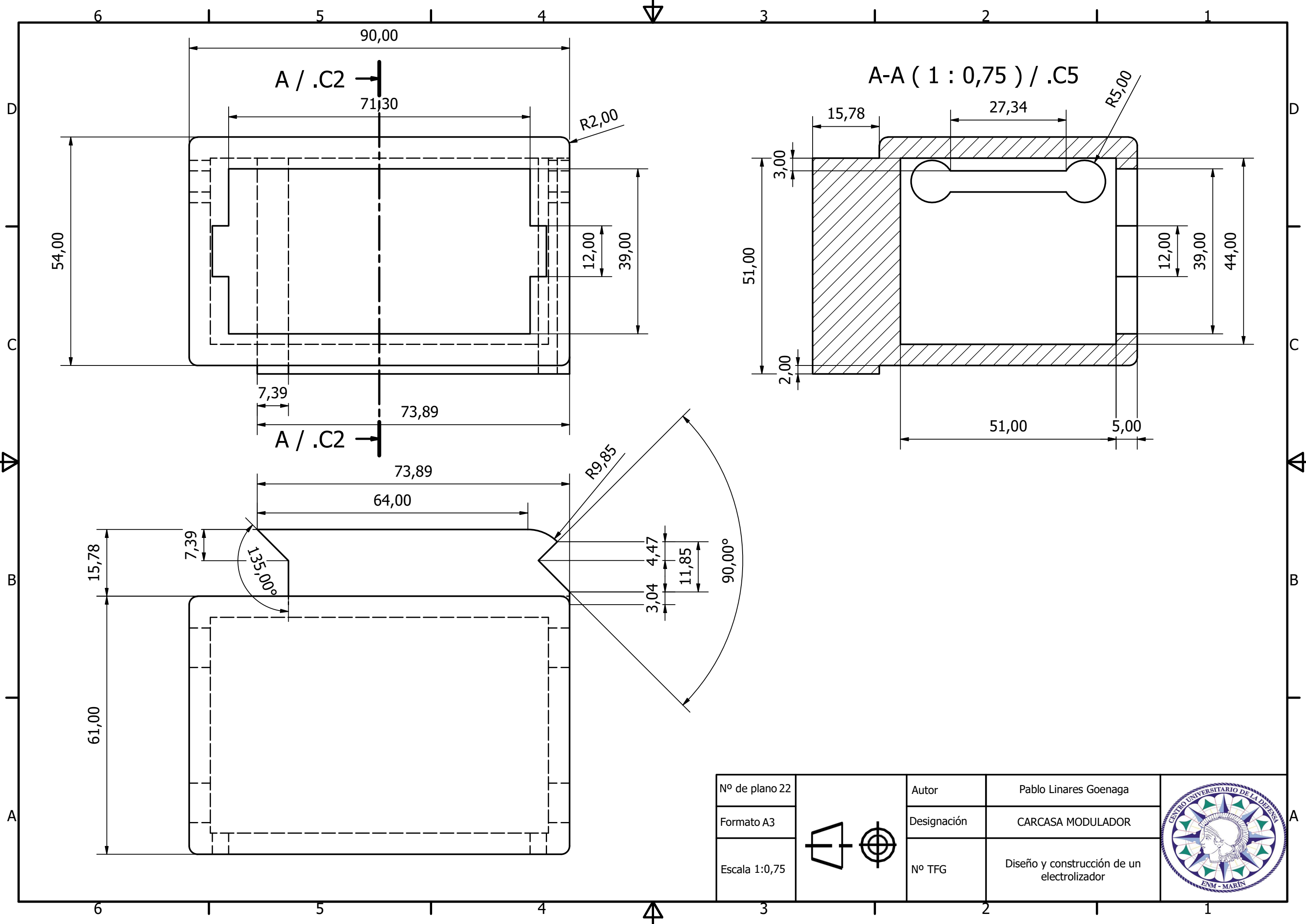
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 18 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | Explosionado general PROTOTIPO III a       |  |
| Escala 1:3     |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



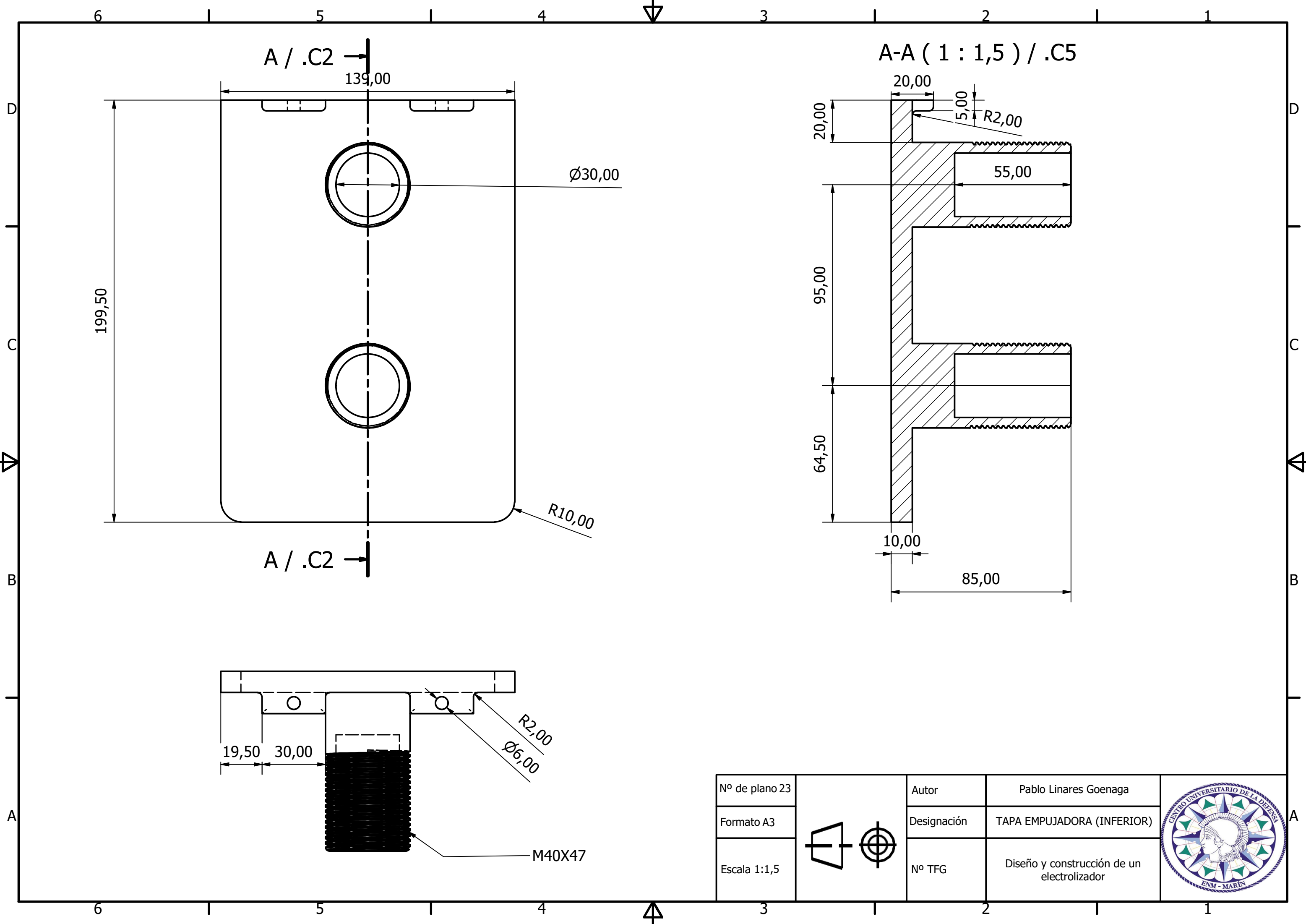




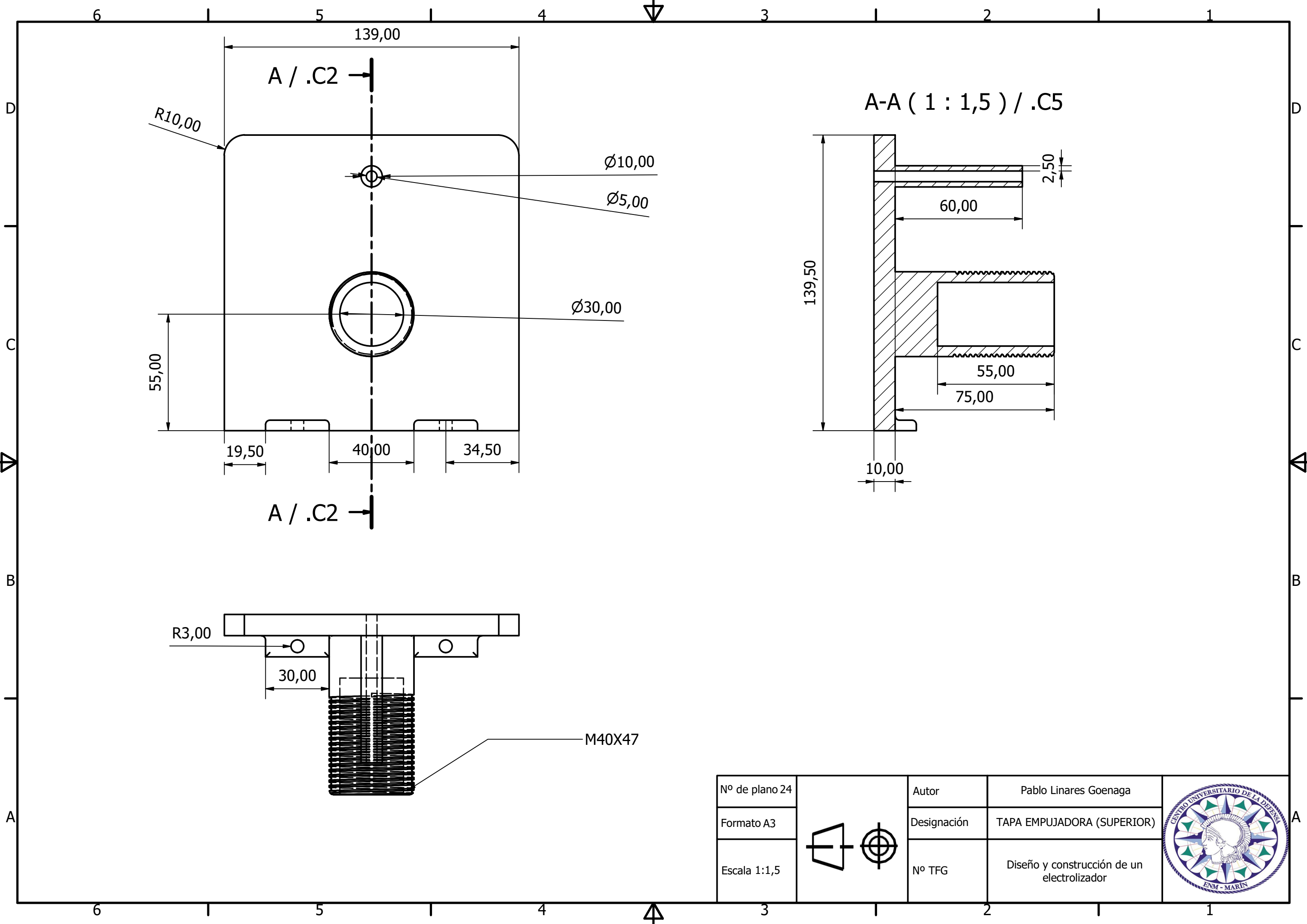
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 21 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | CARCASA BATERÍA                            |  |
| Escala 1:1     |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



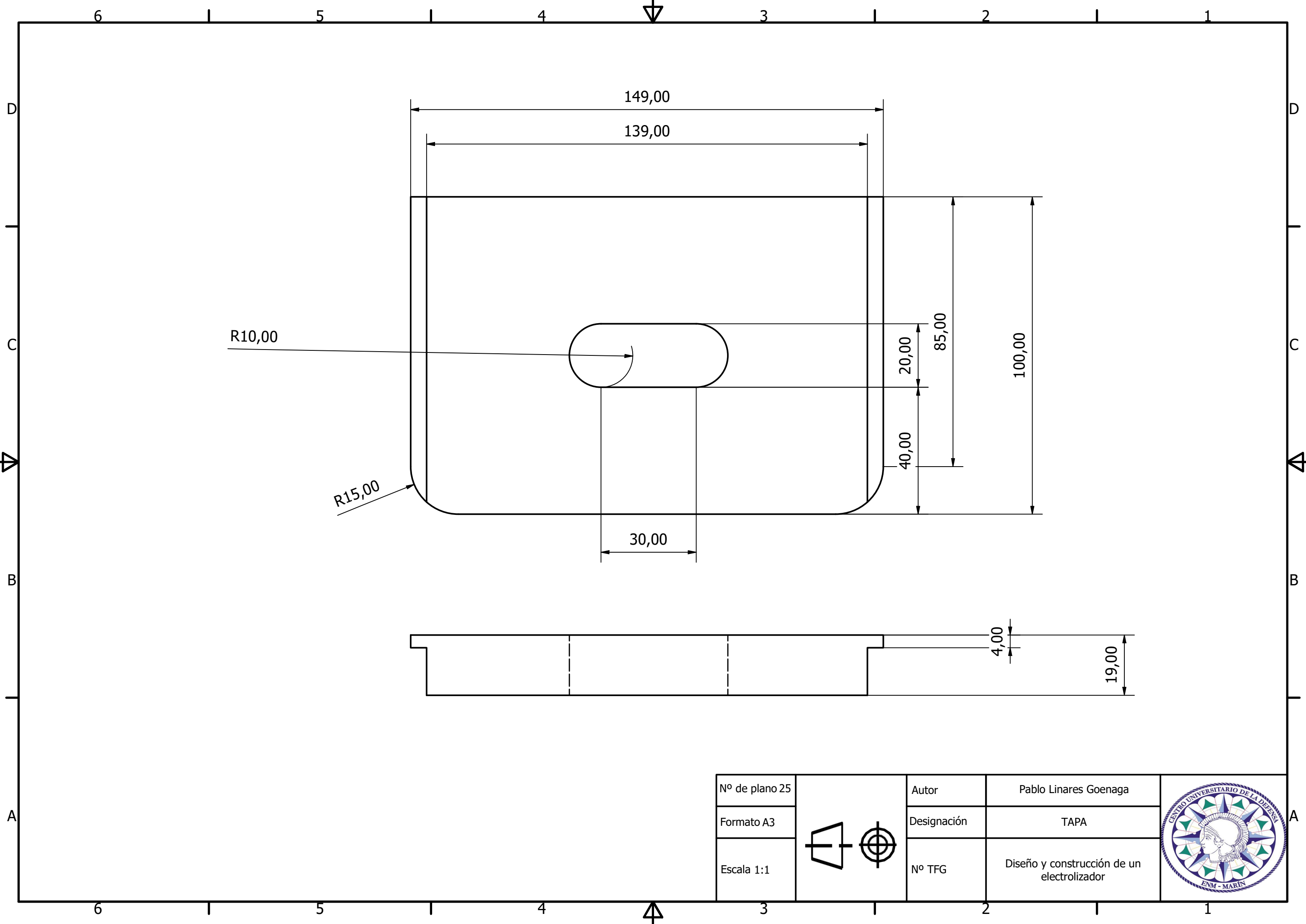
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 22 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | CARCASA MODULADOR                          |  |
| Escala 1:0,75  |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



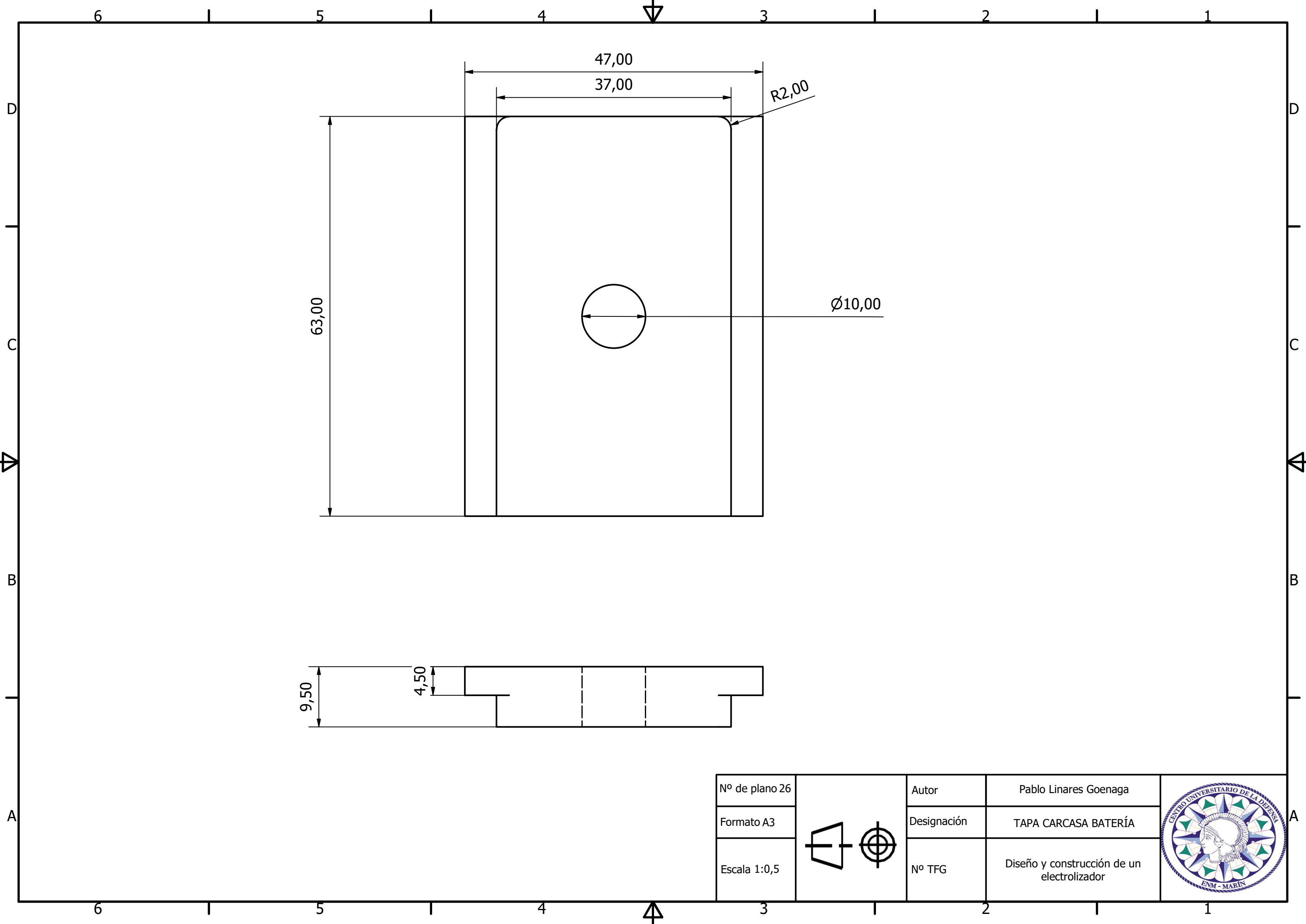
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 23 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA EMPUJADORA (INFERIOR)                 |  |
| Escala 1:1,5   |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



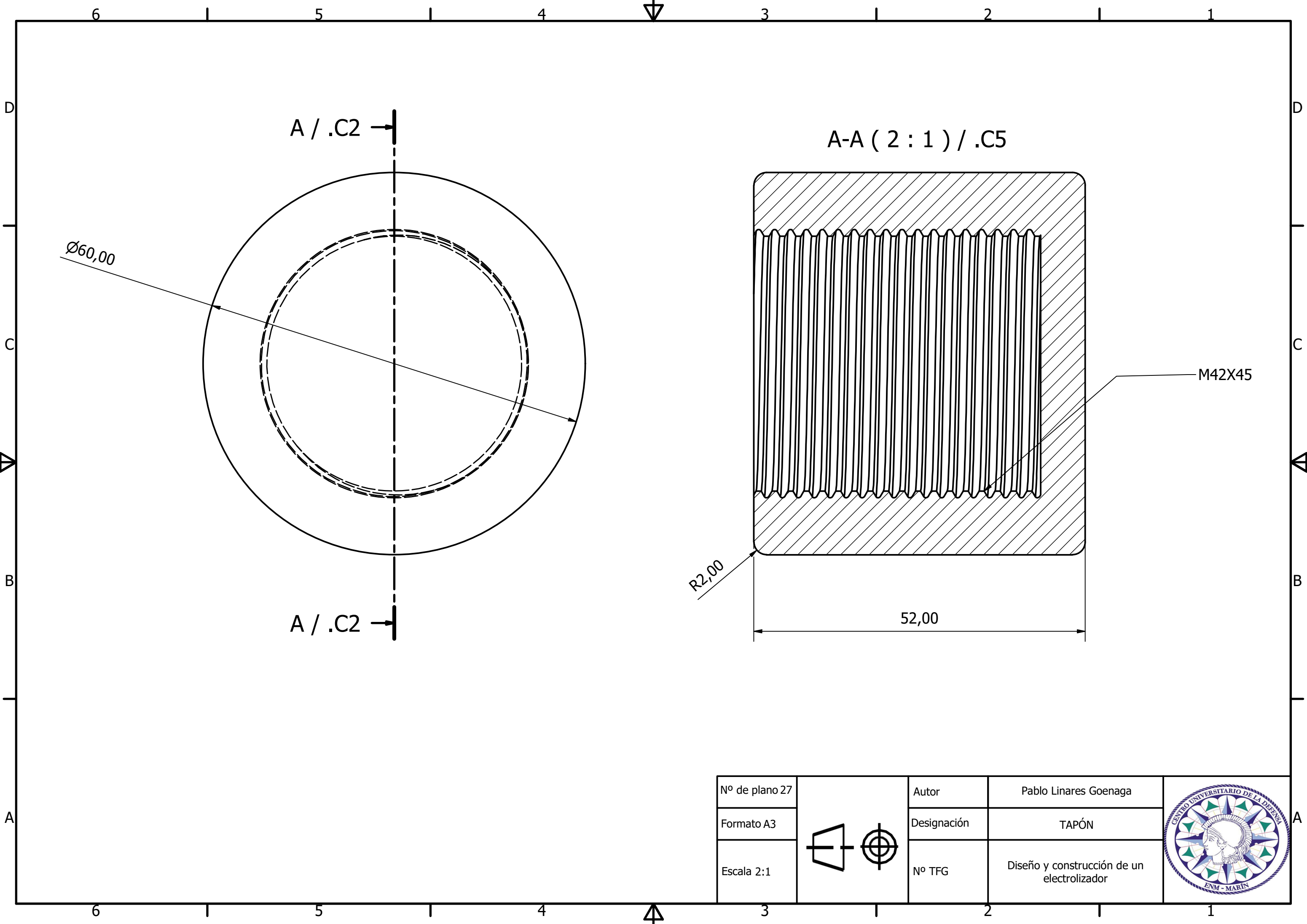
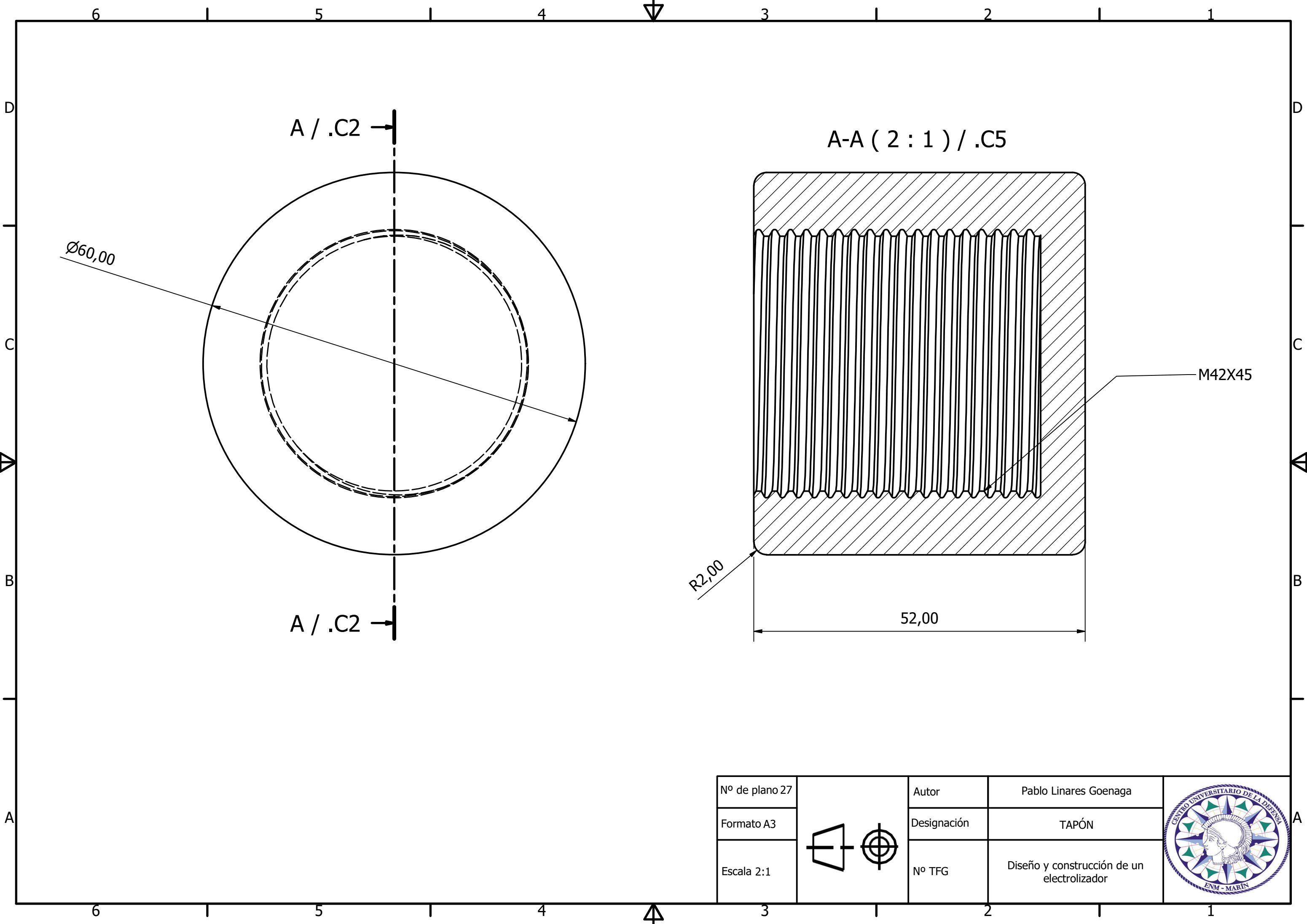
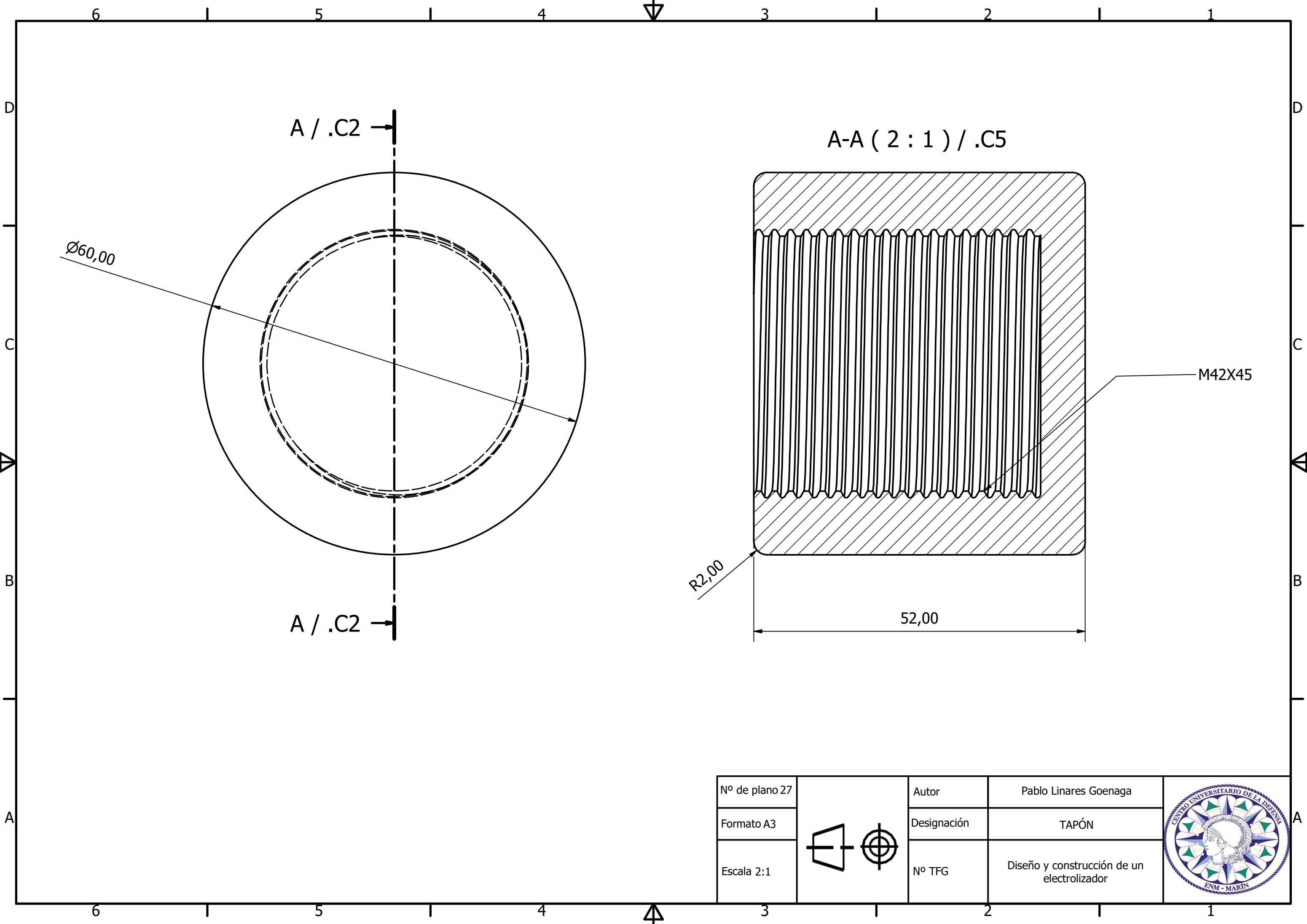
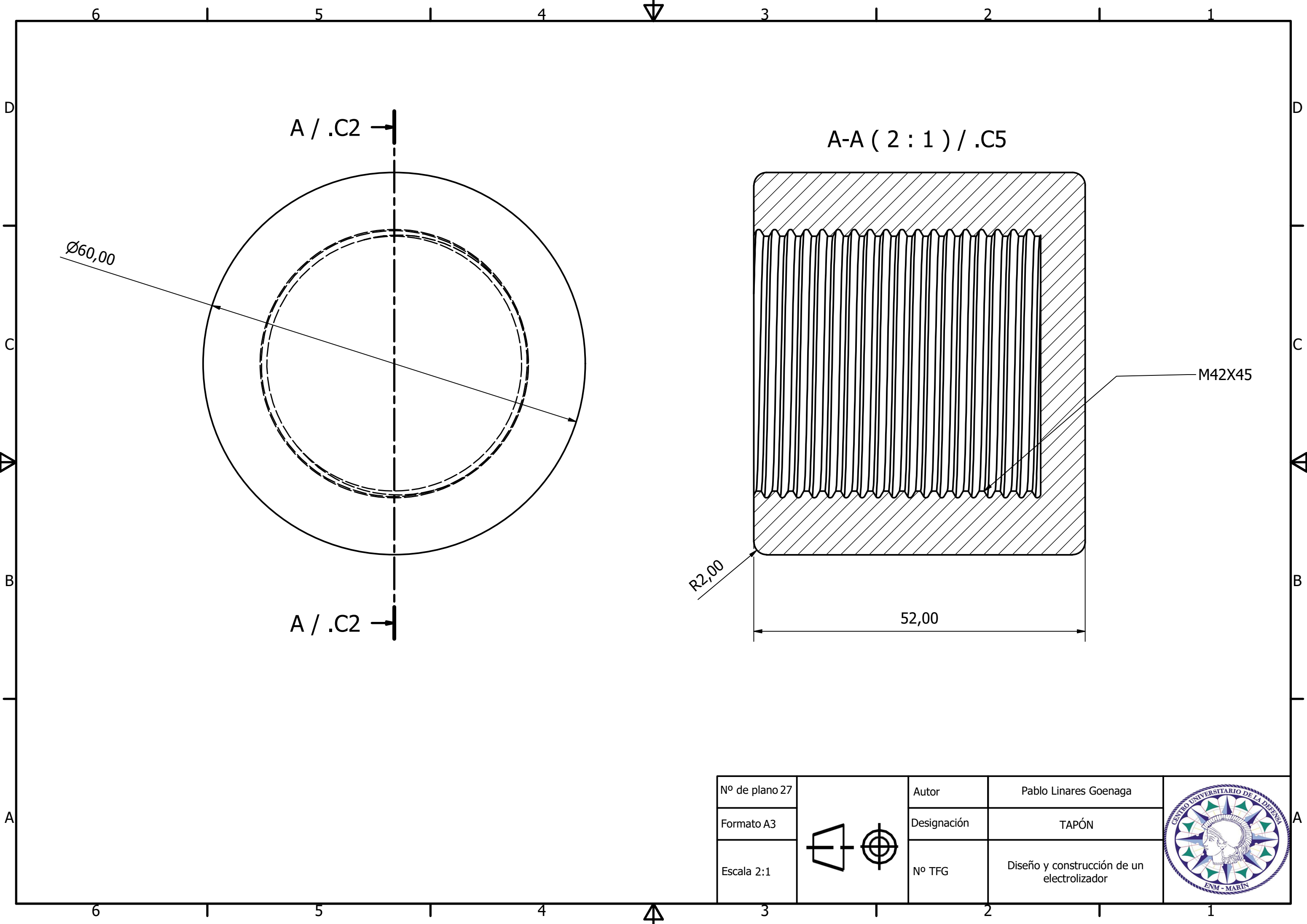
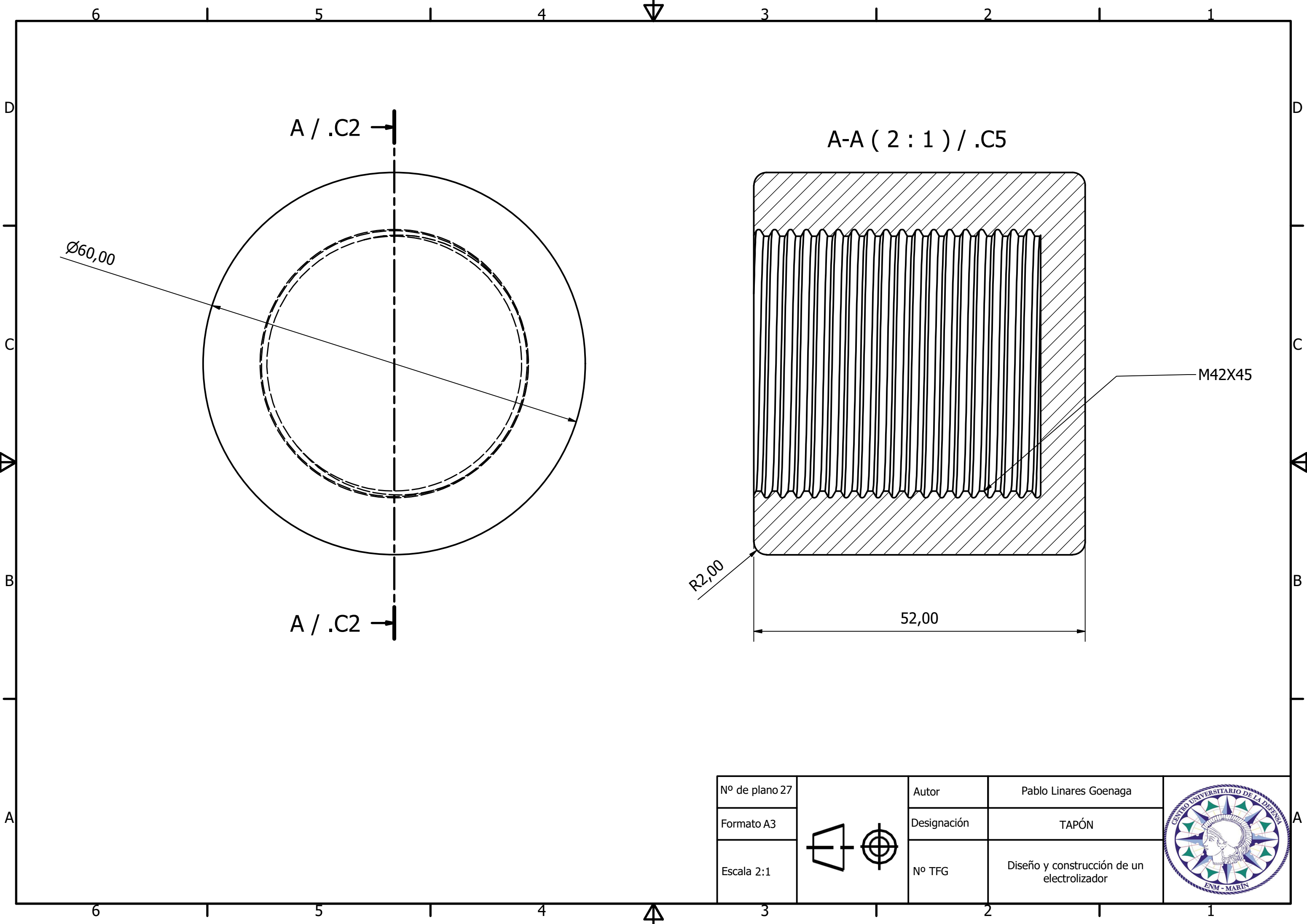
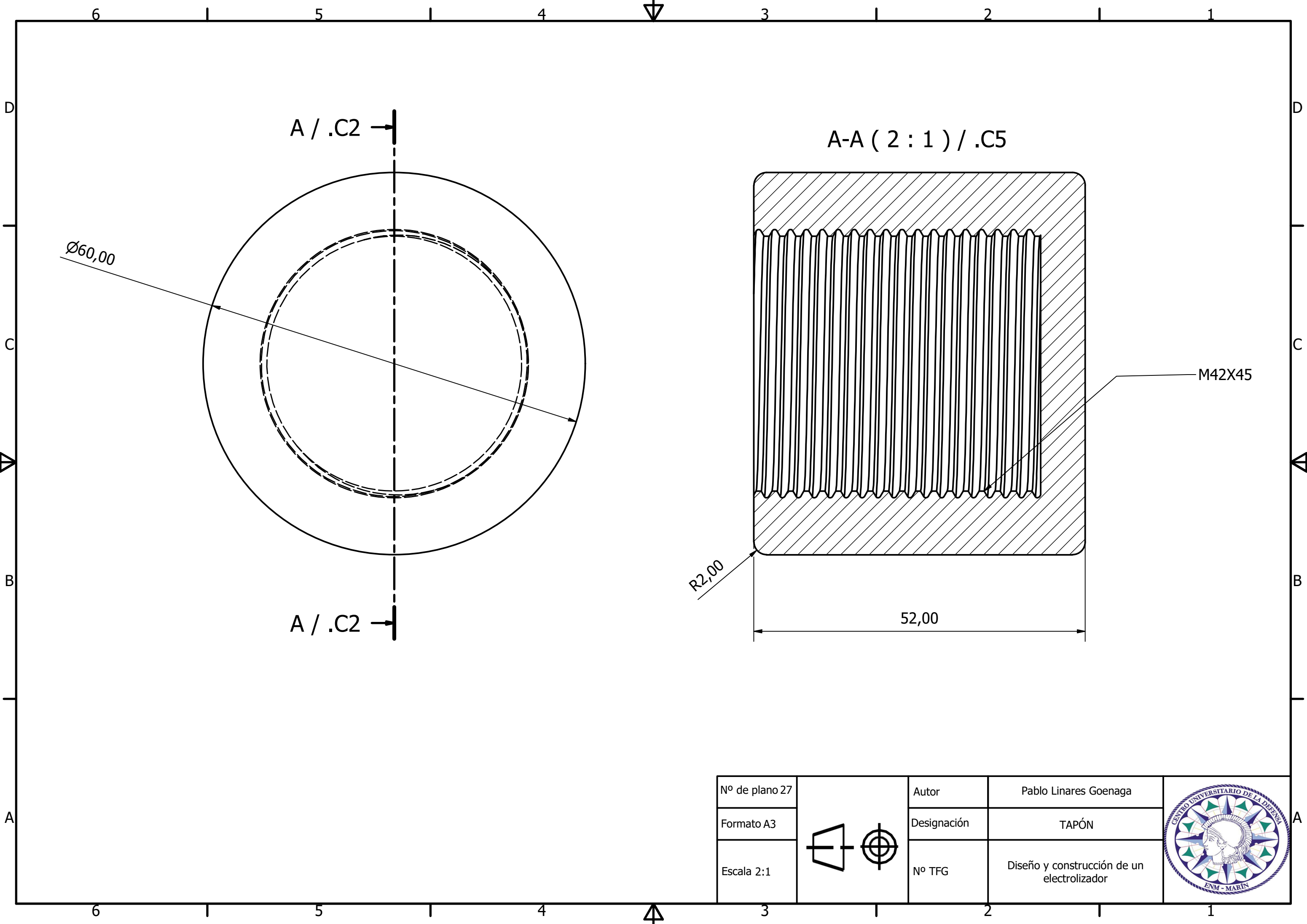
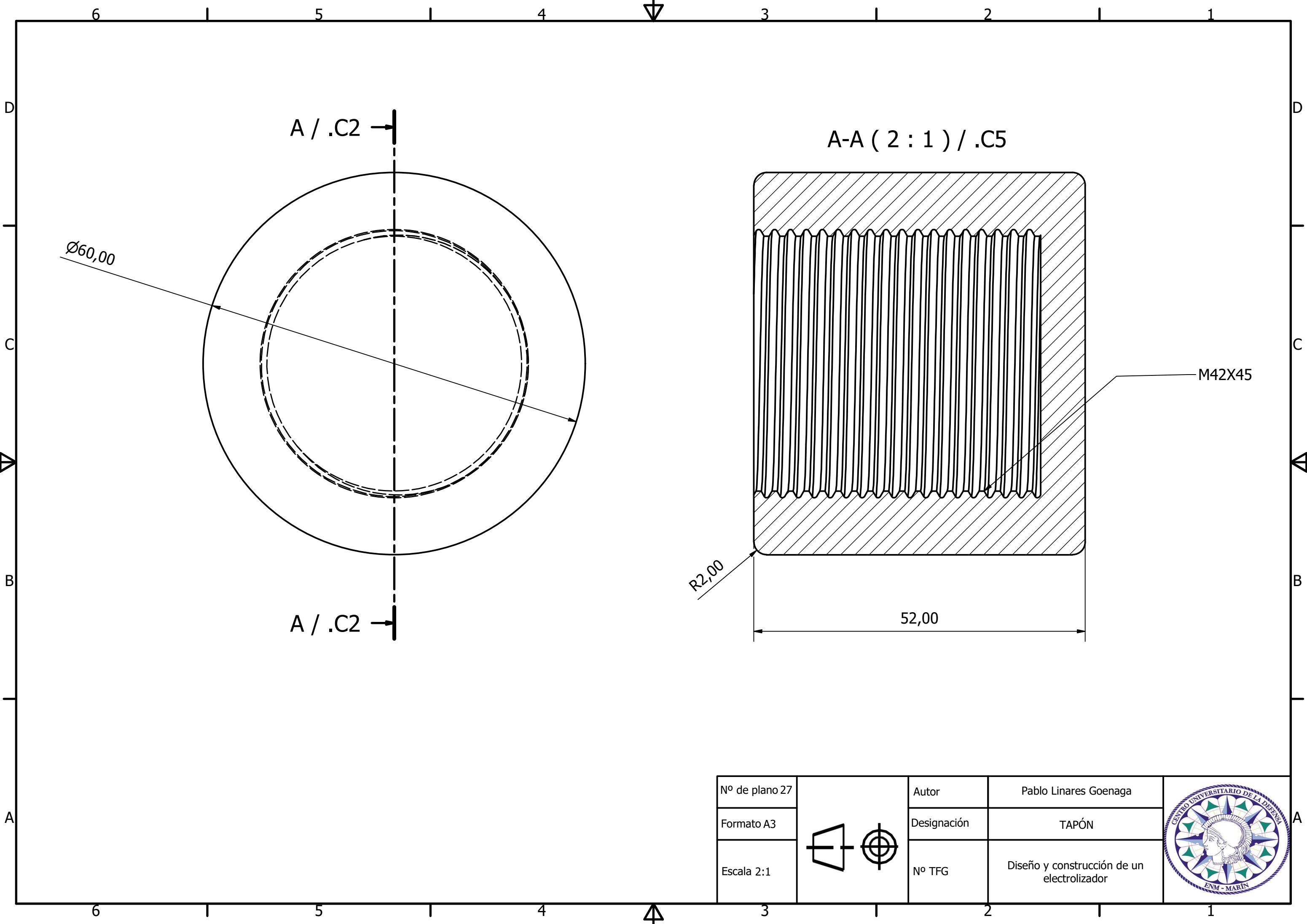
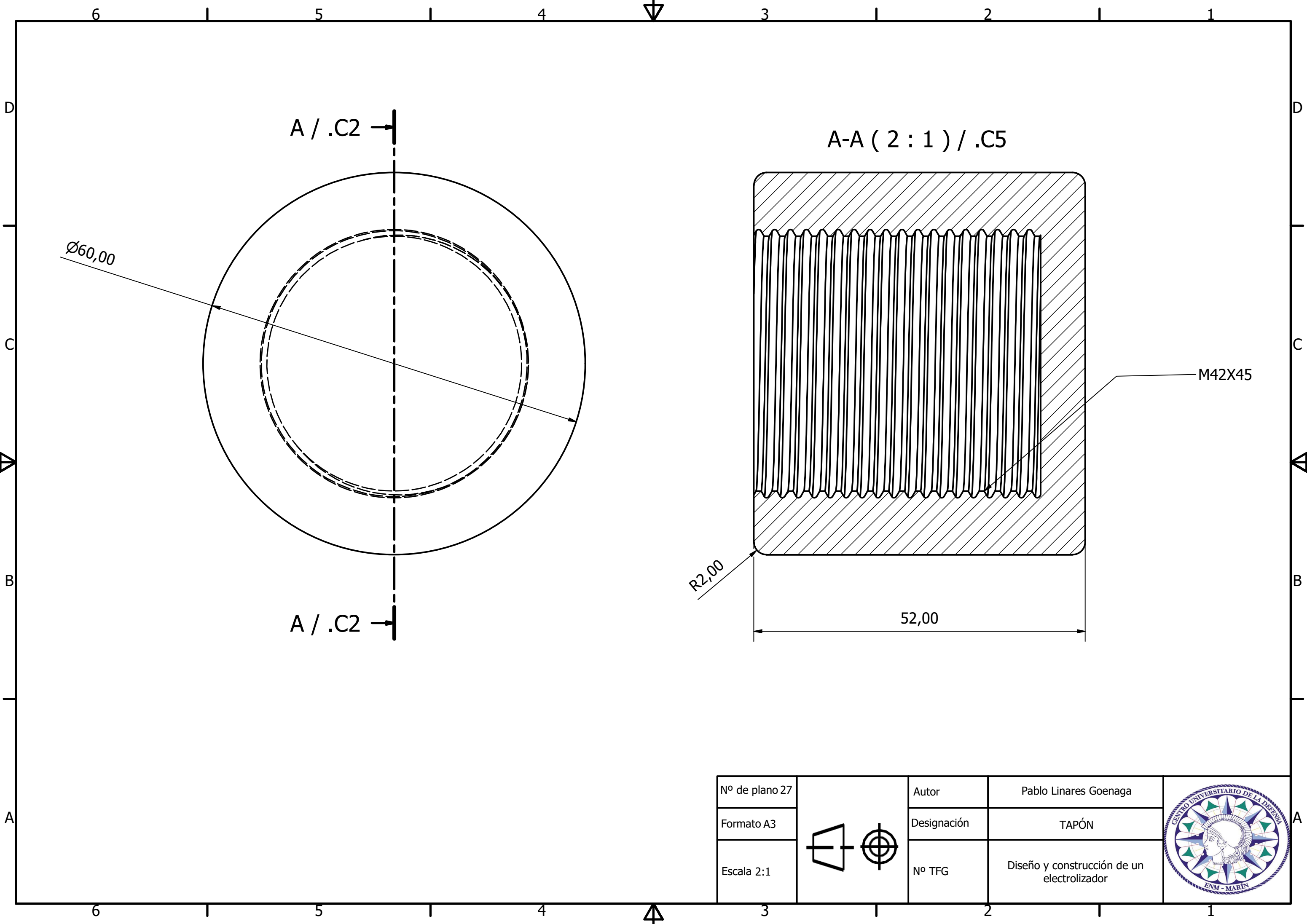
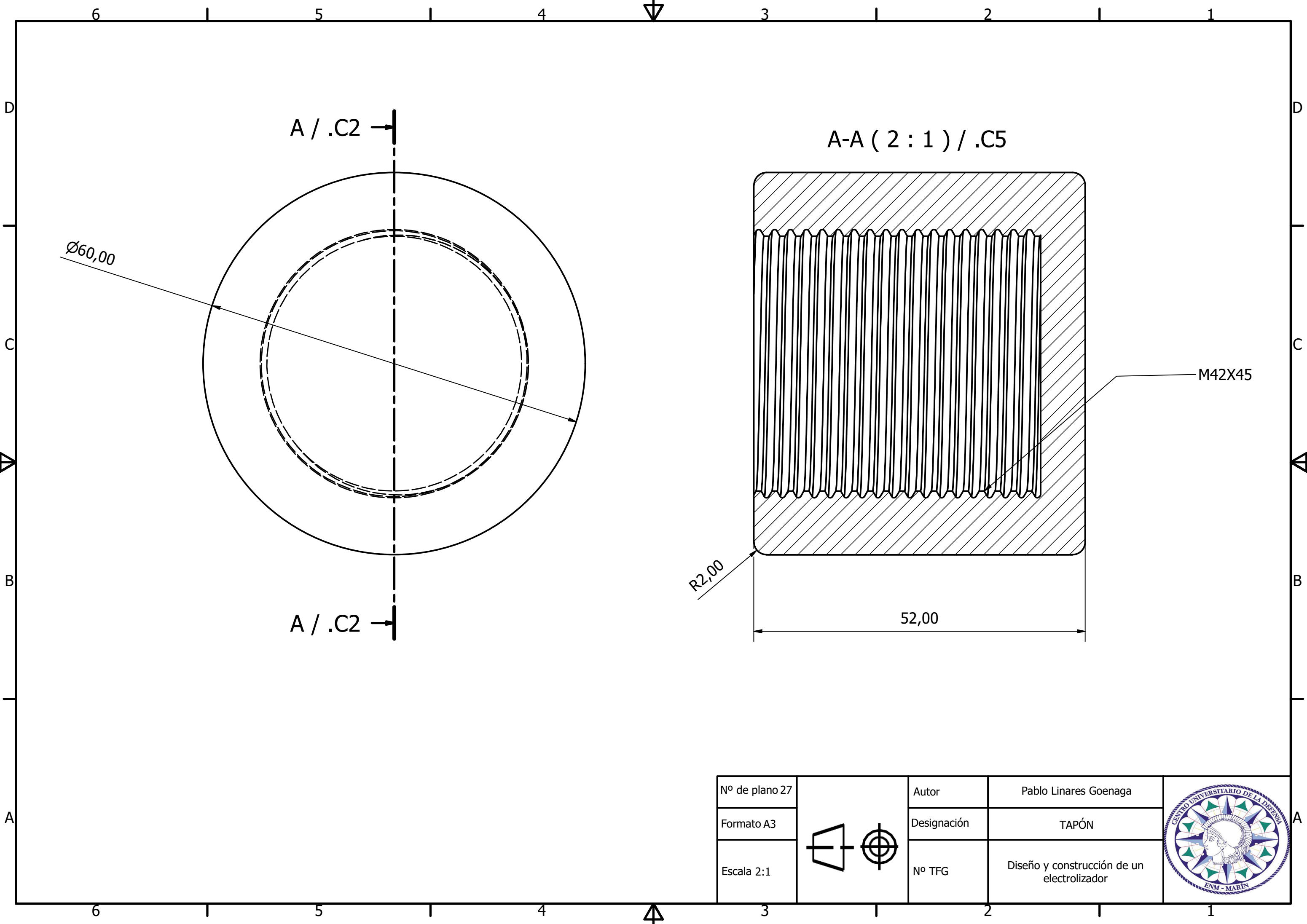
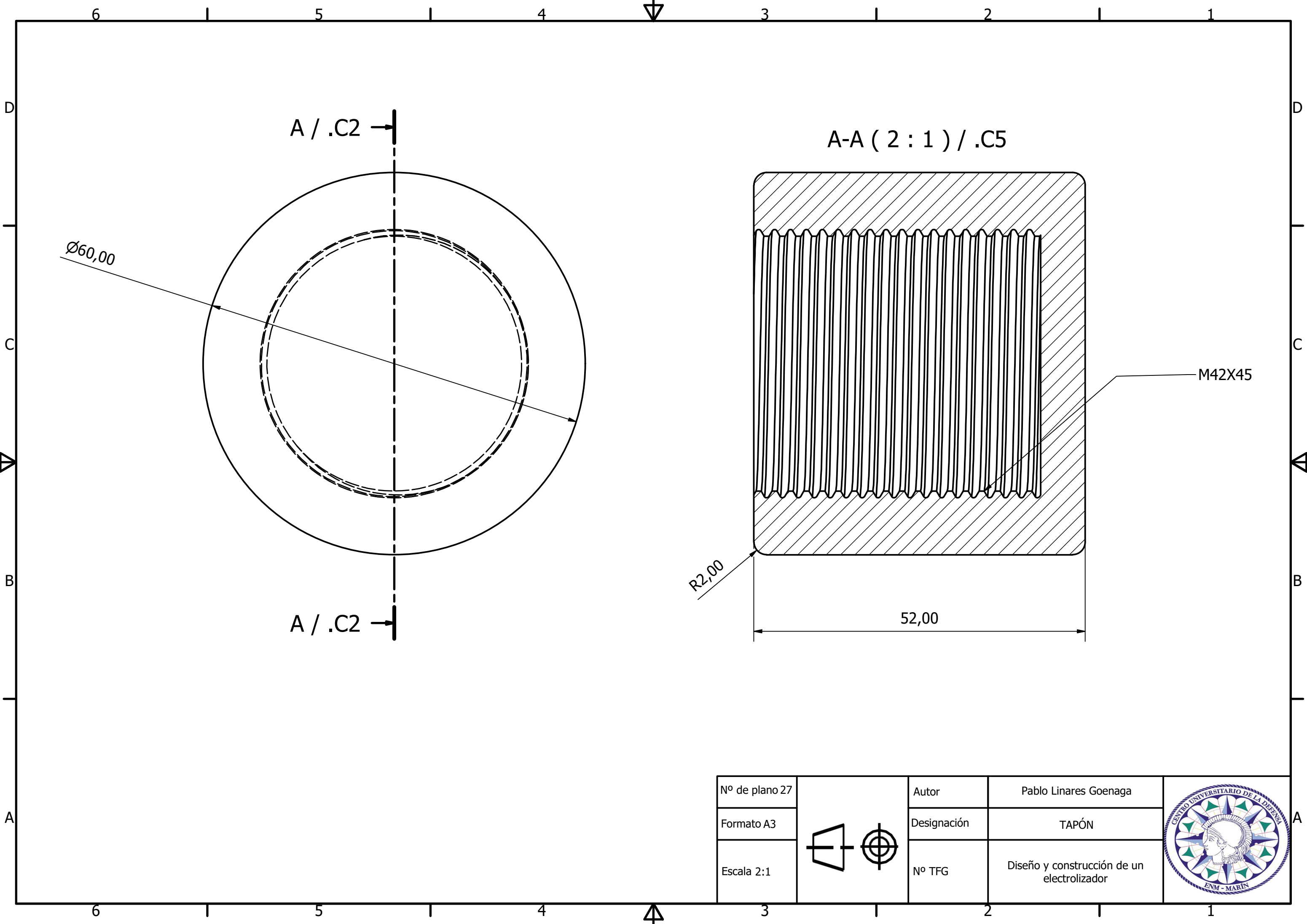
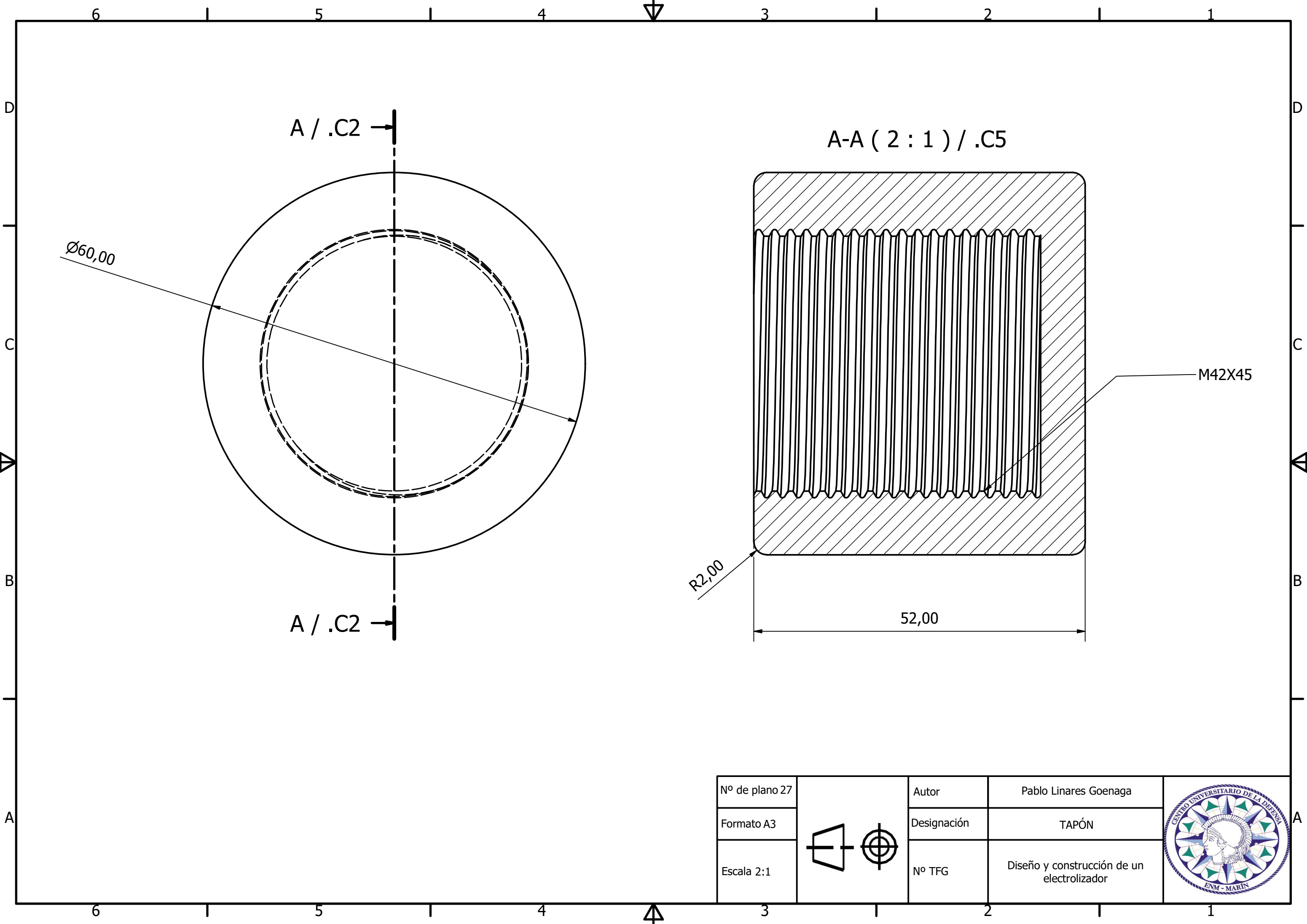
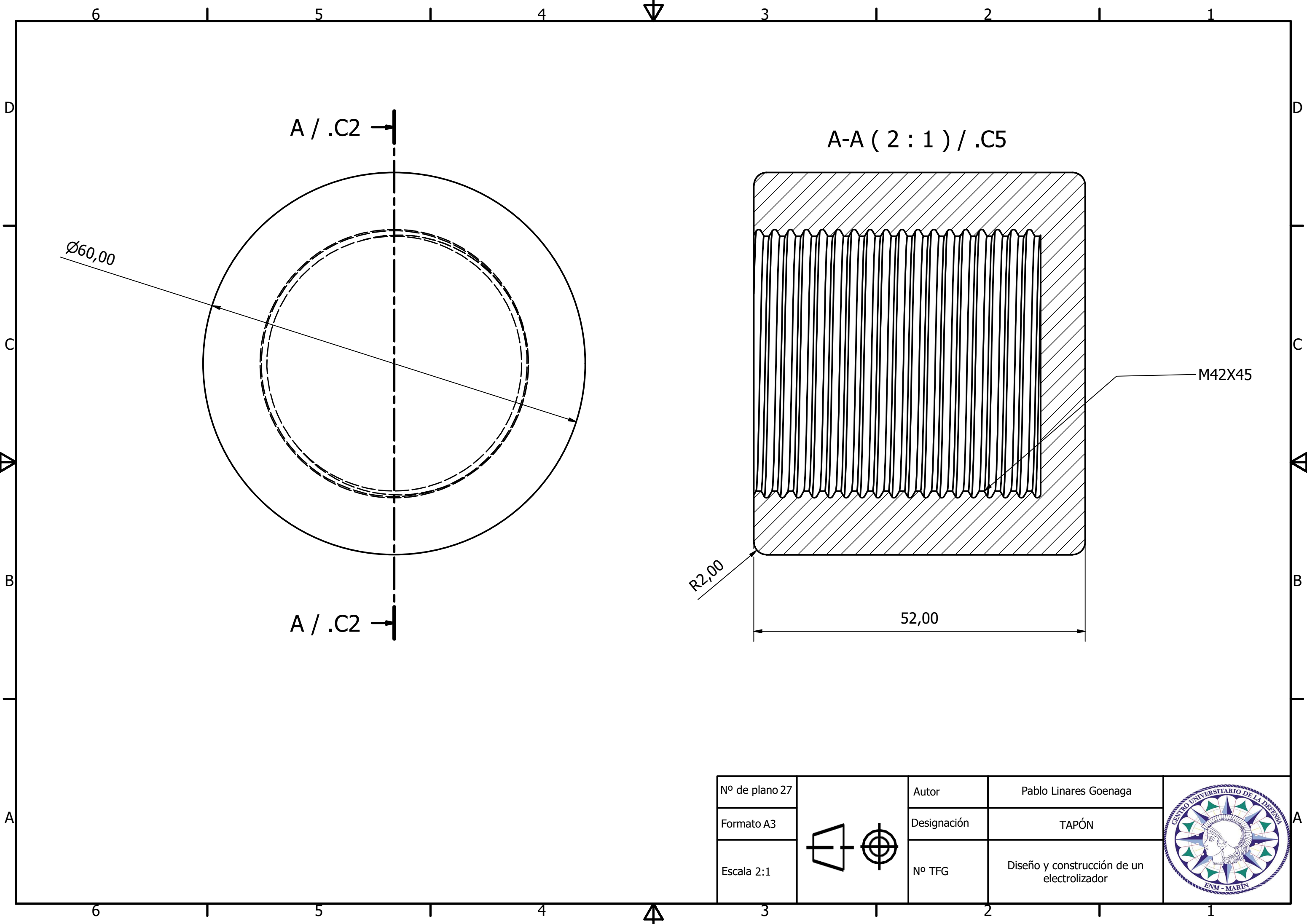
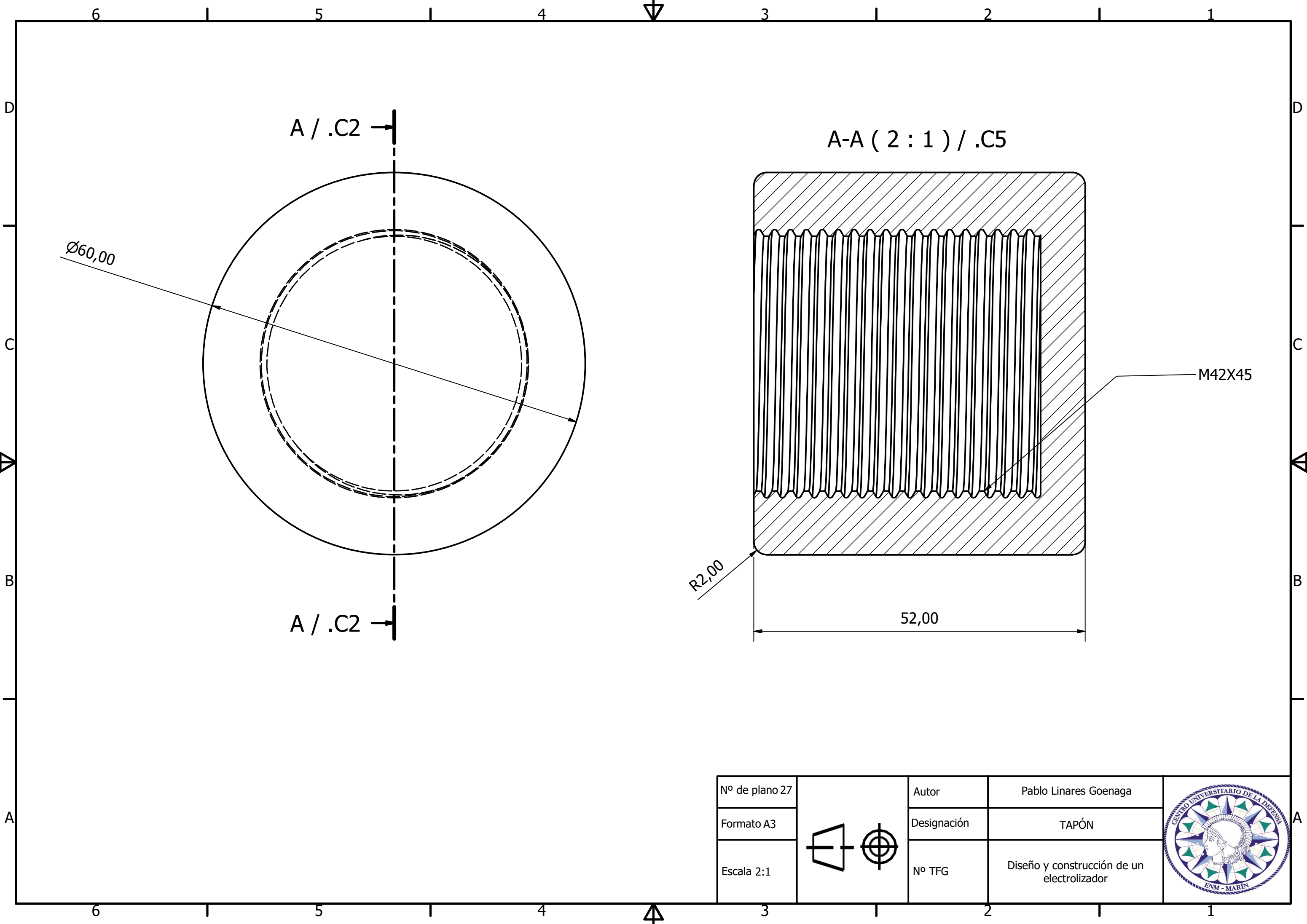
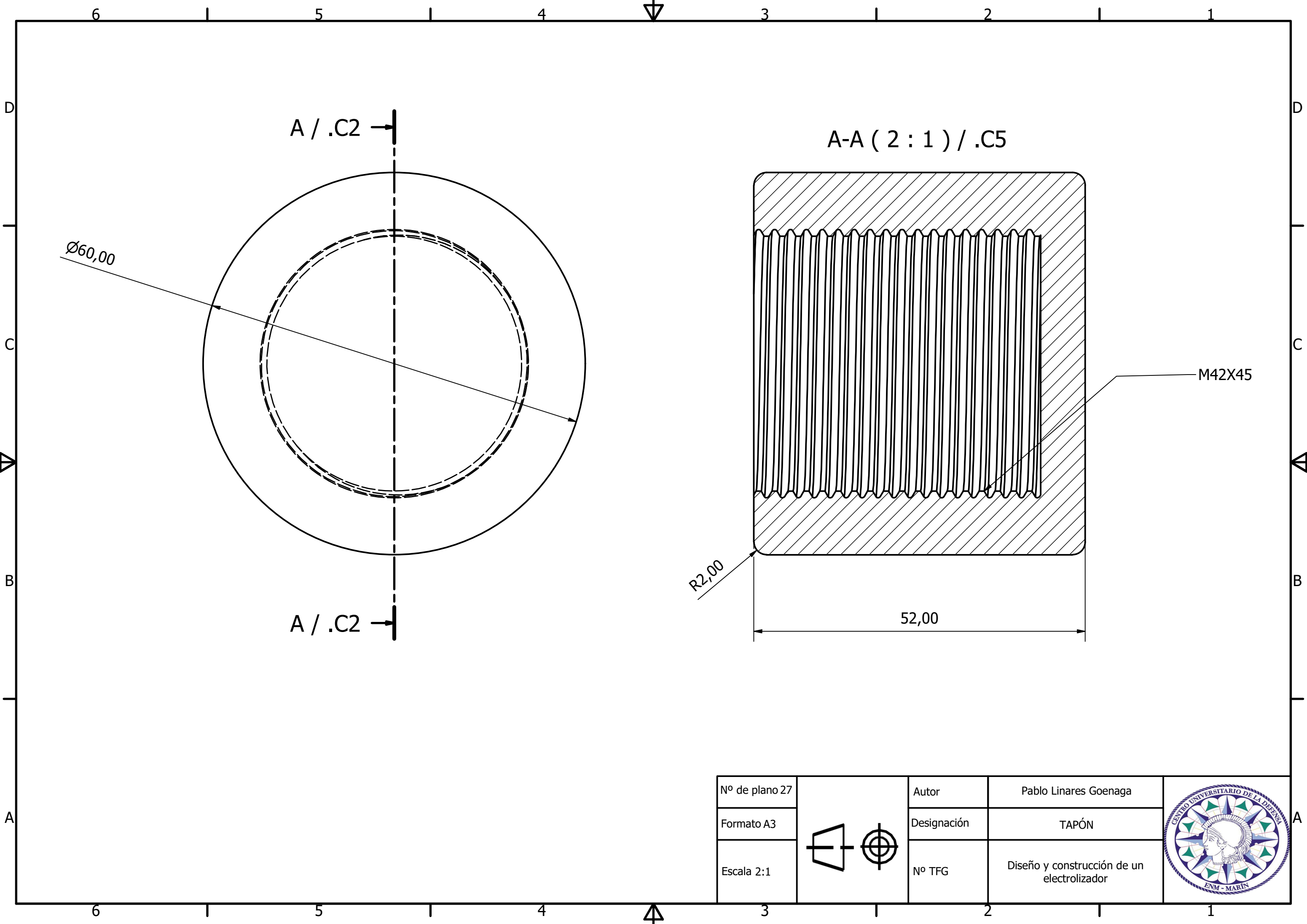
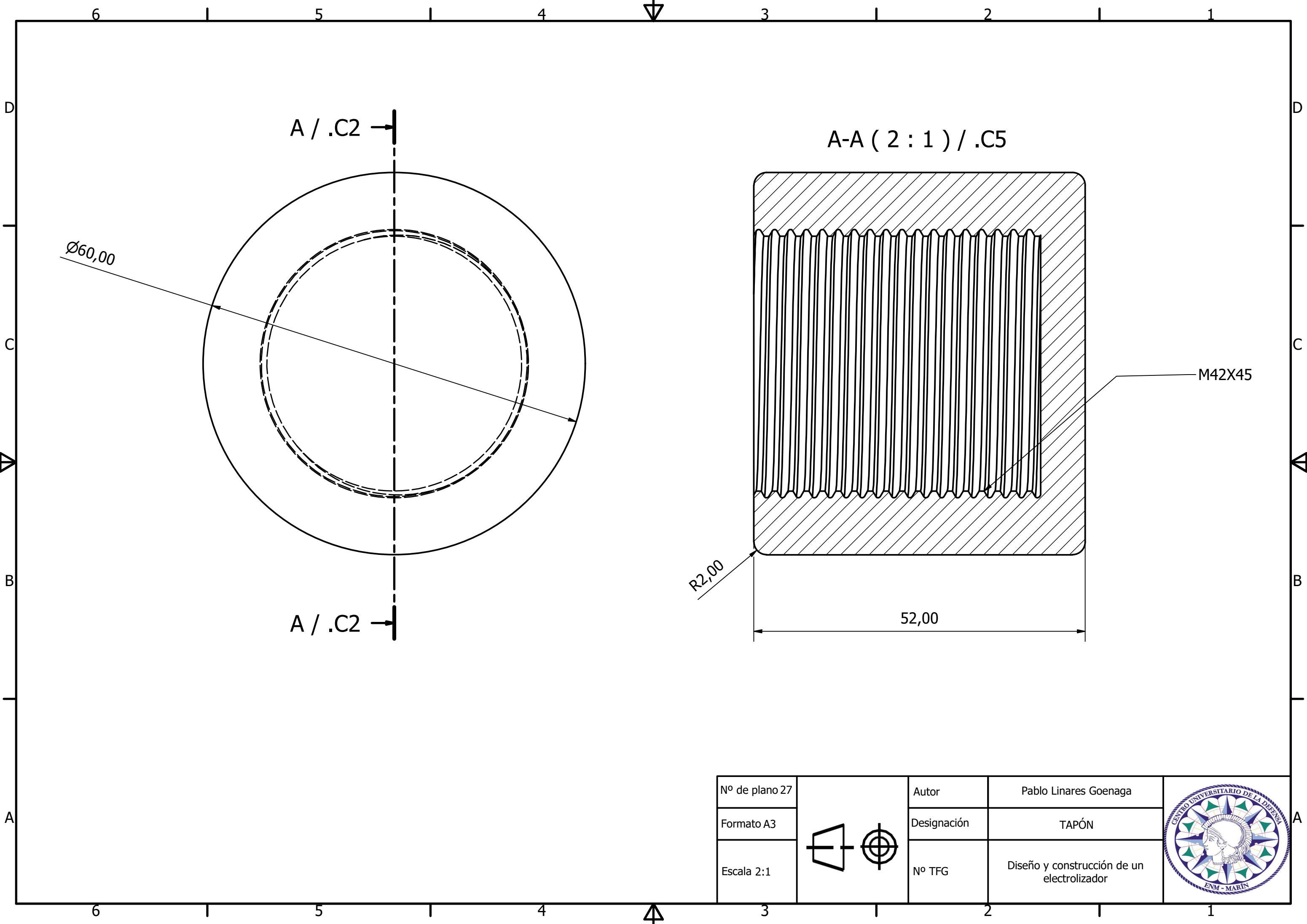
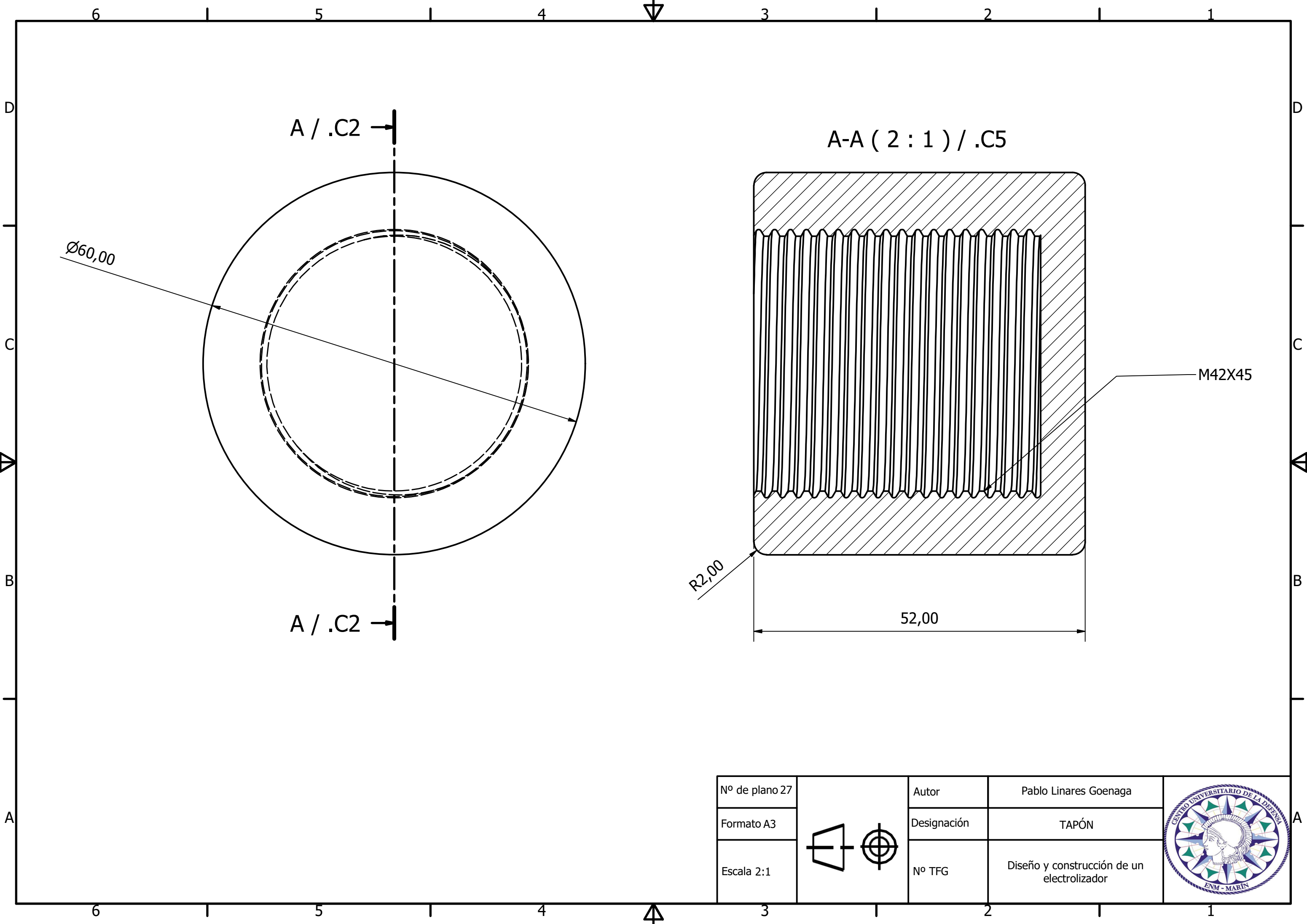
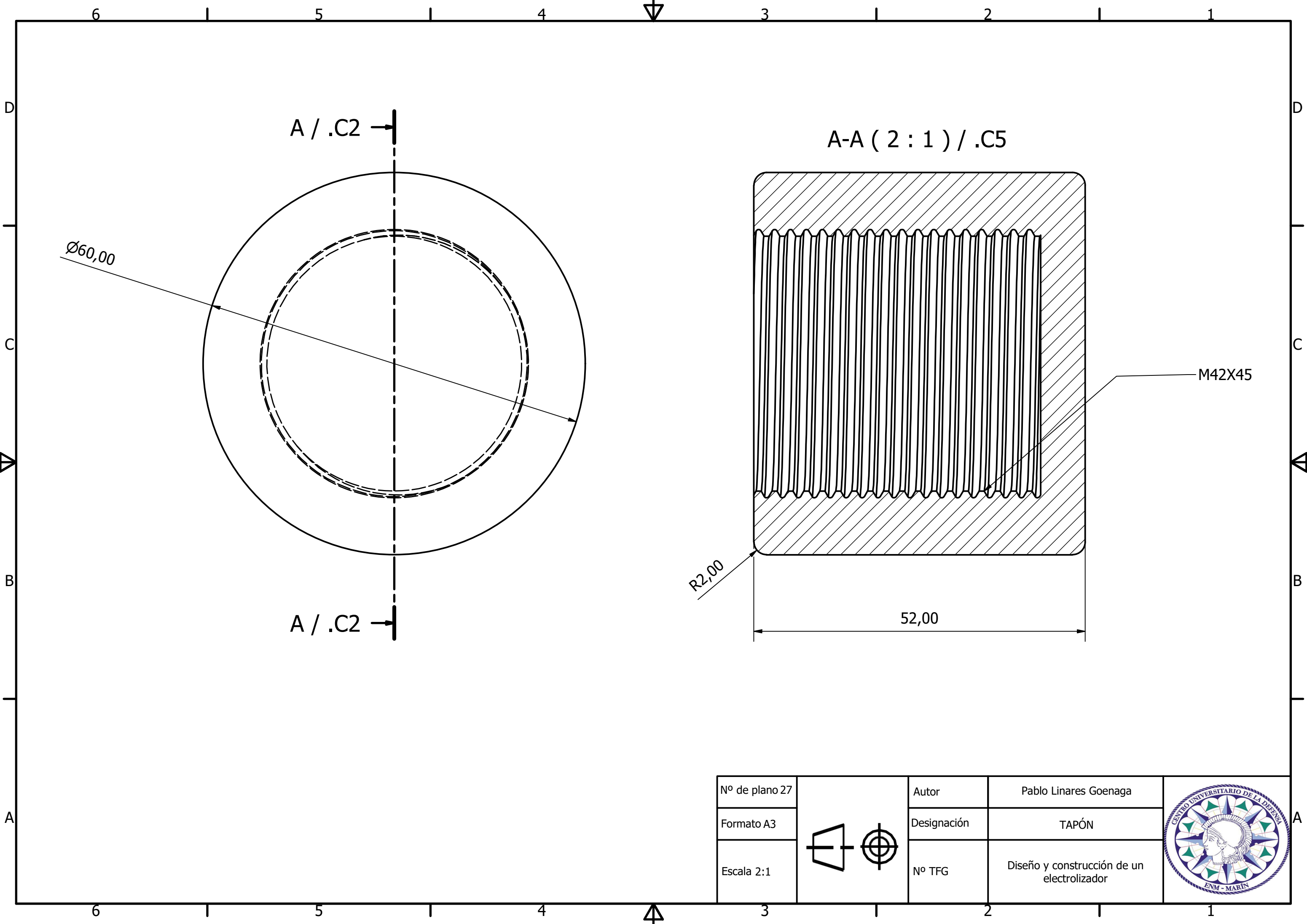
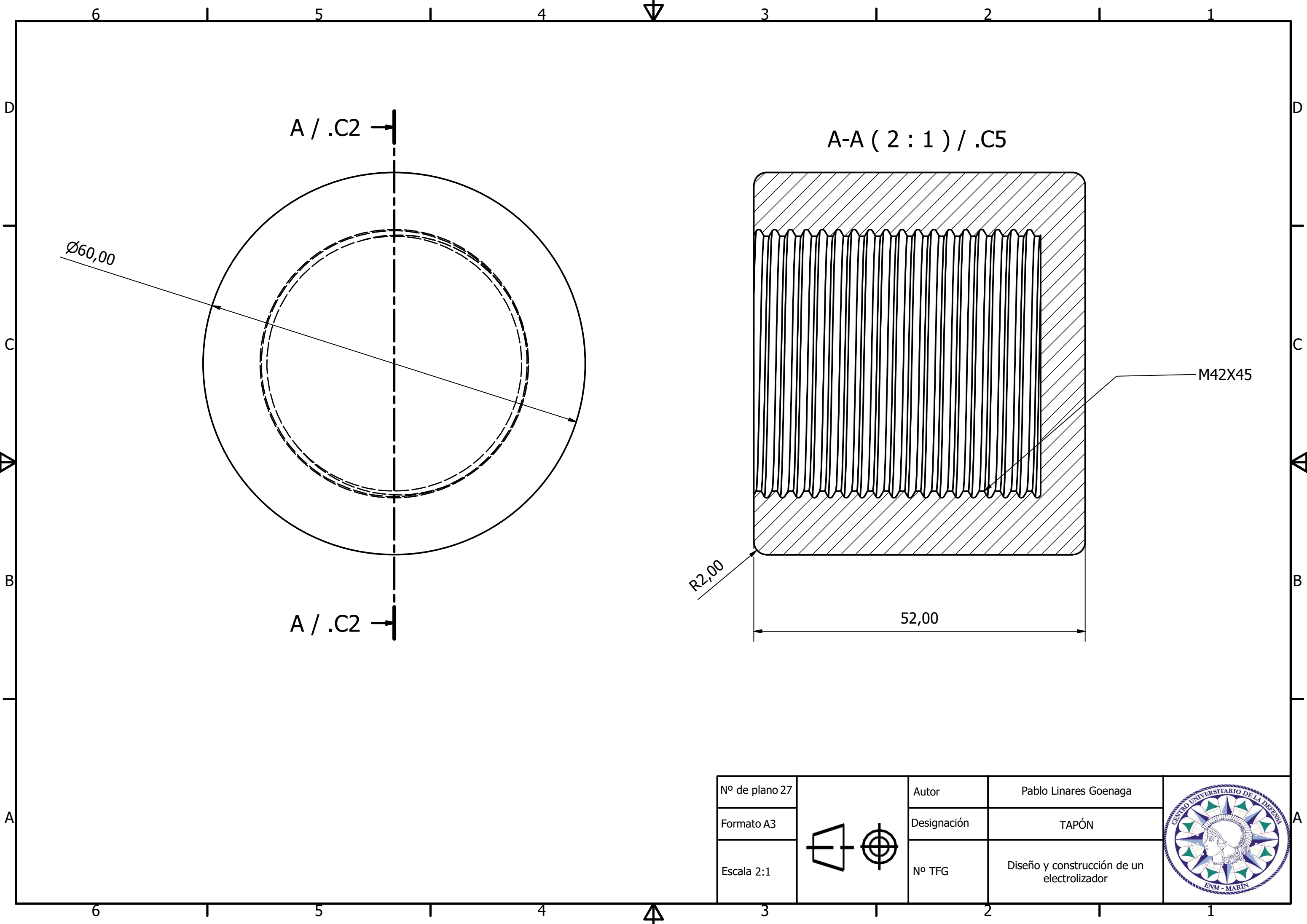
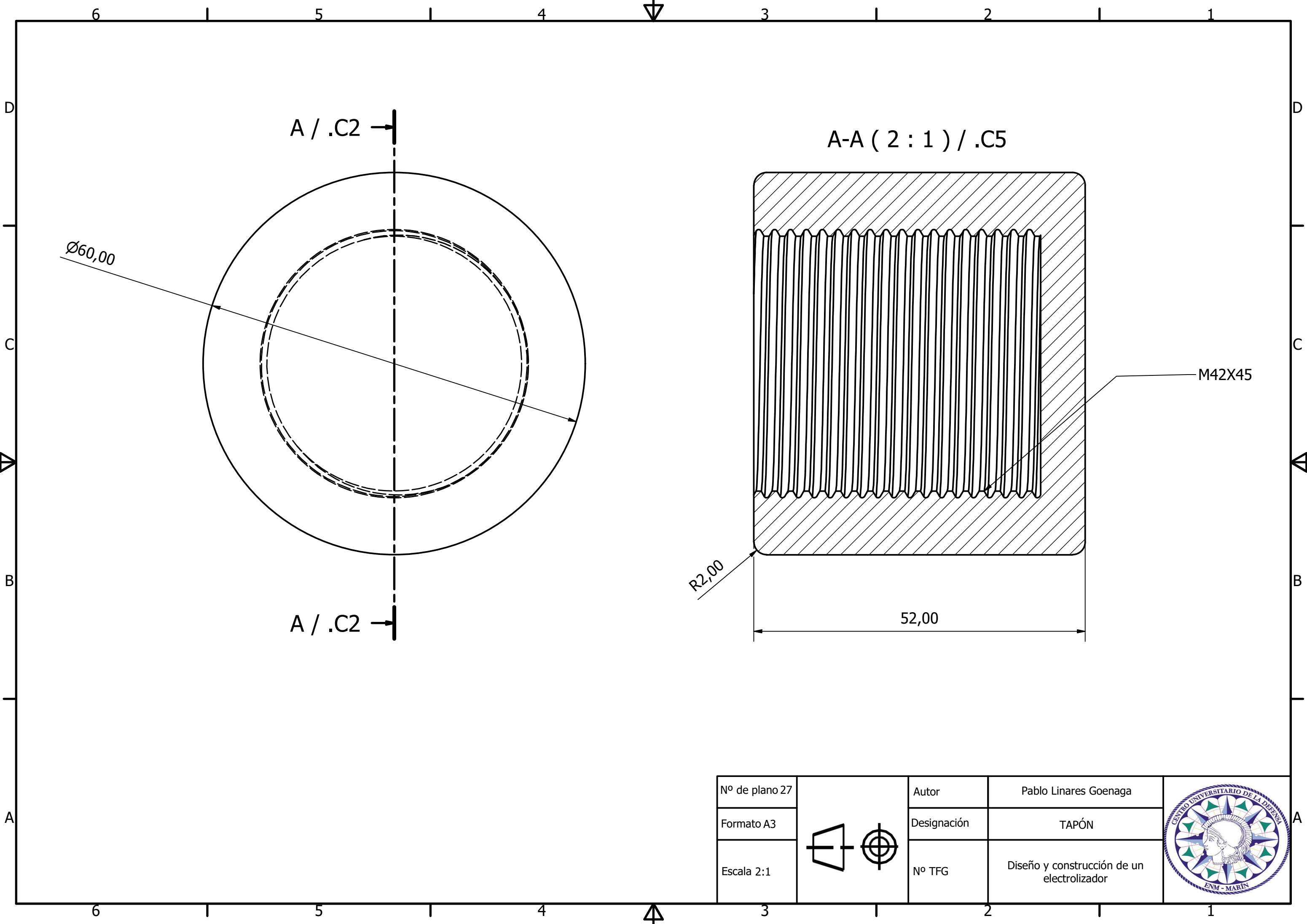
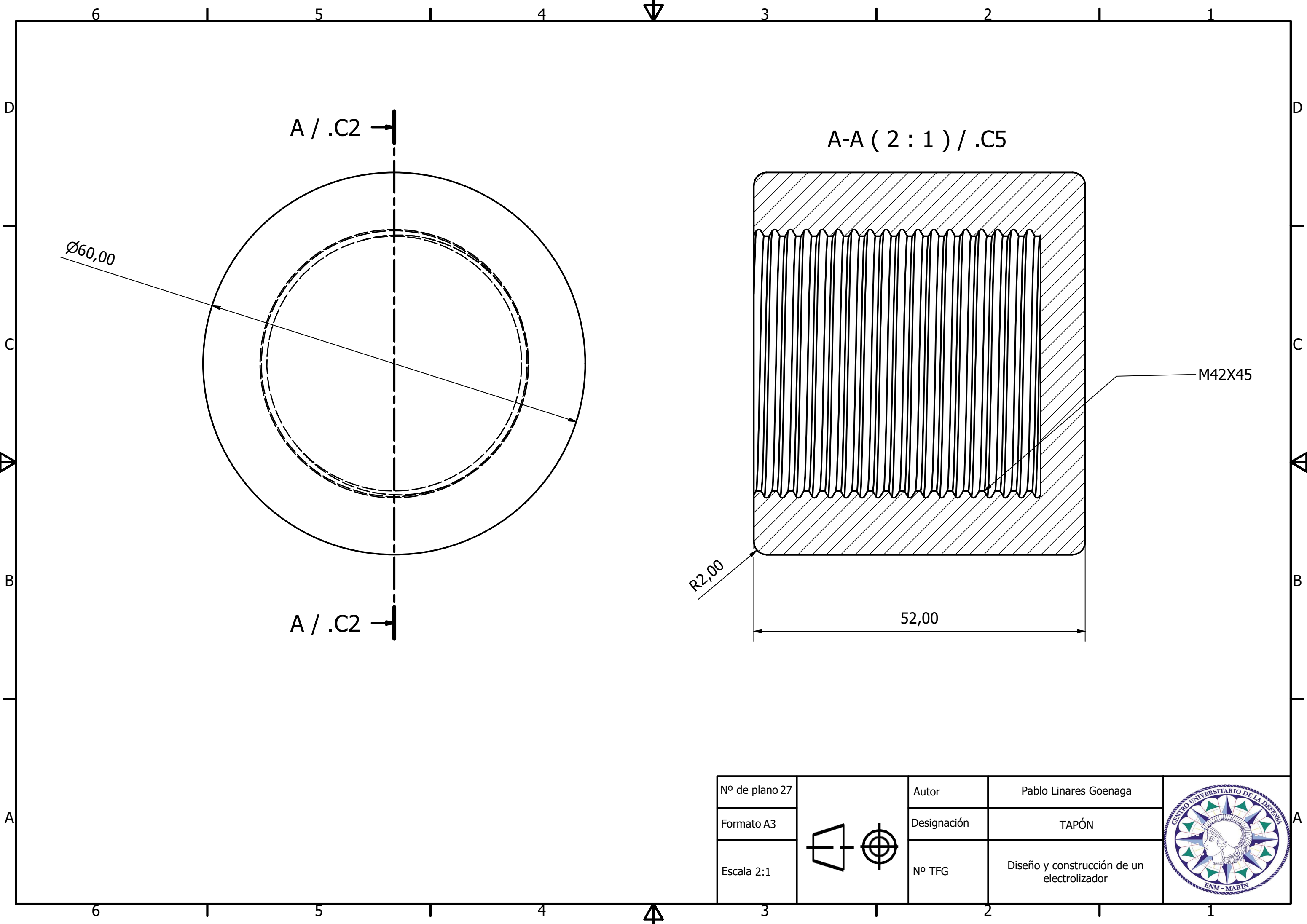
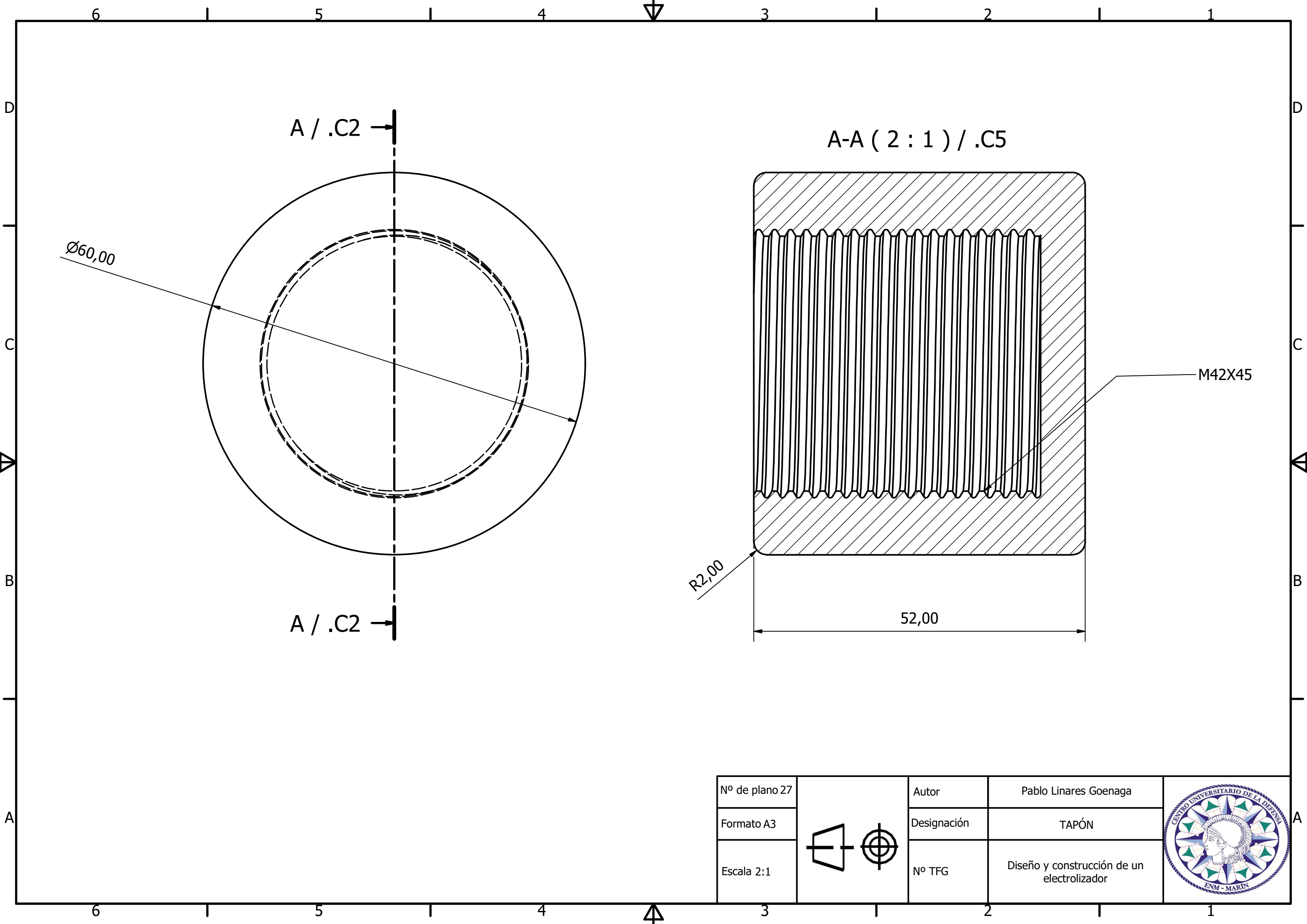
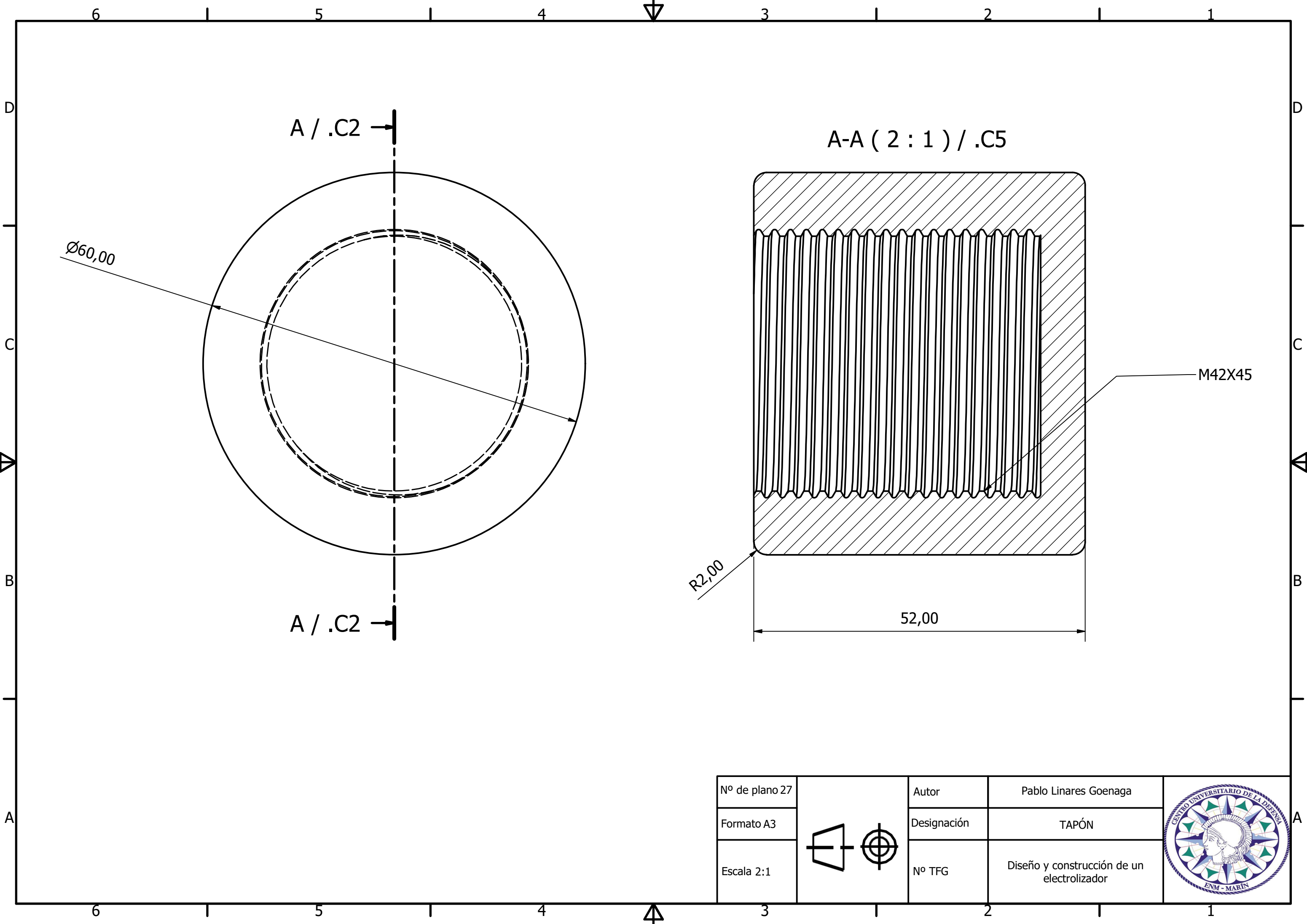
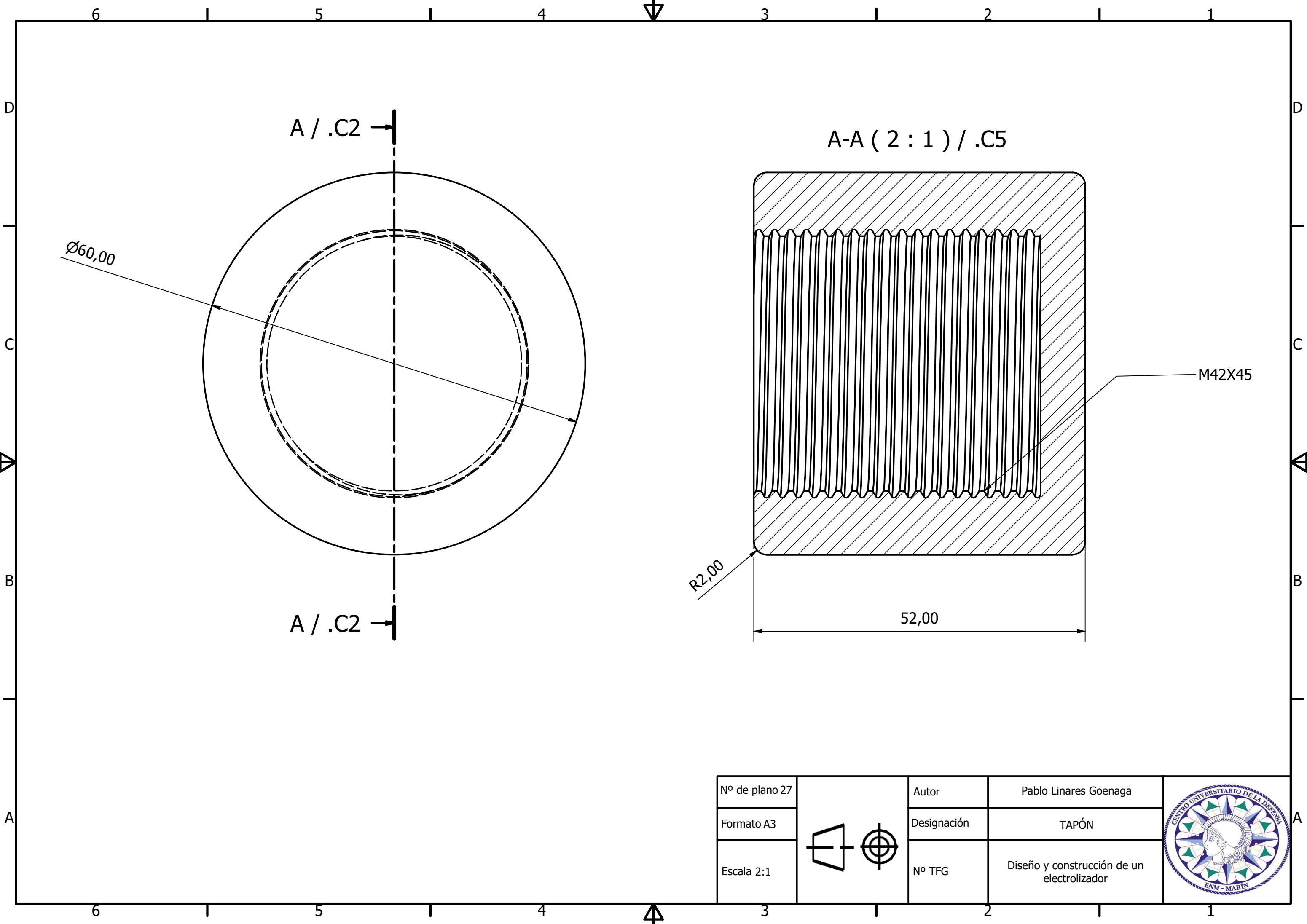
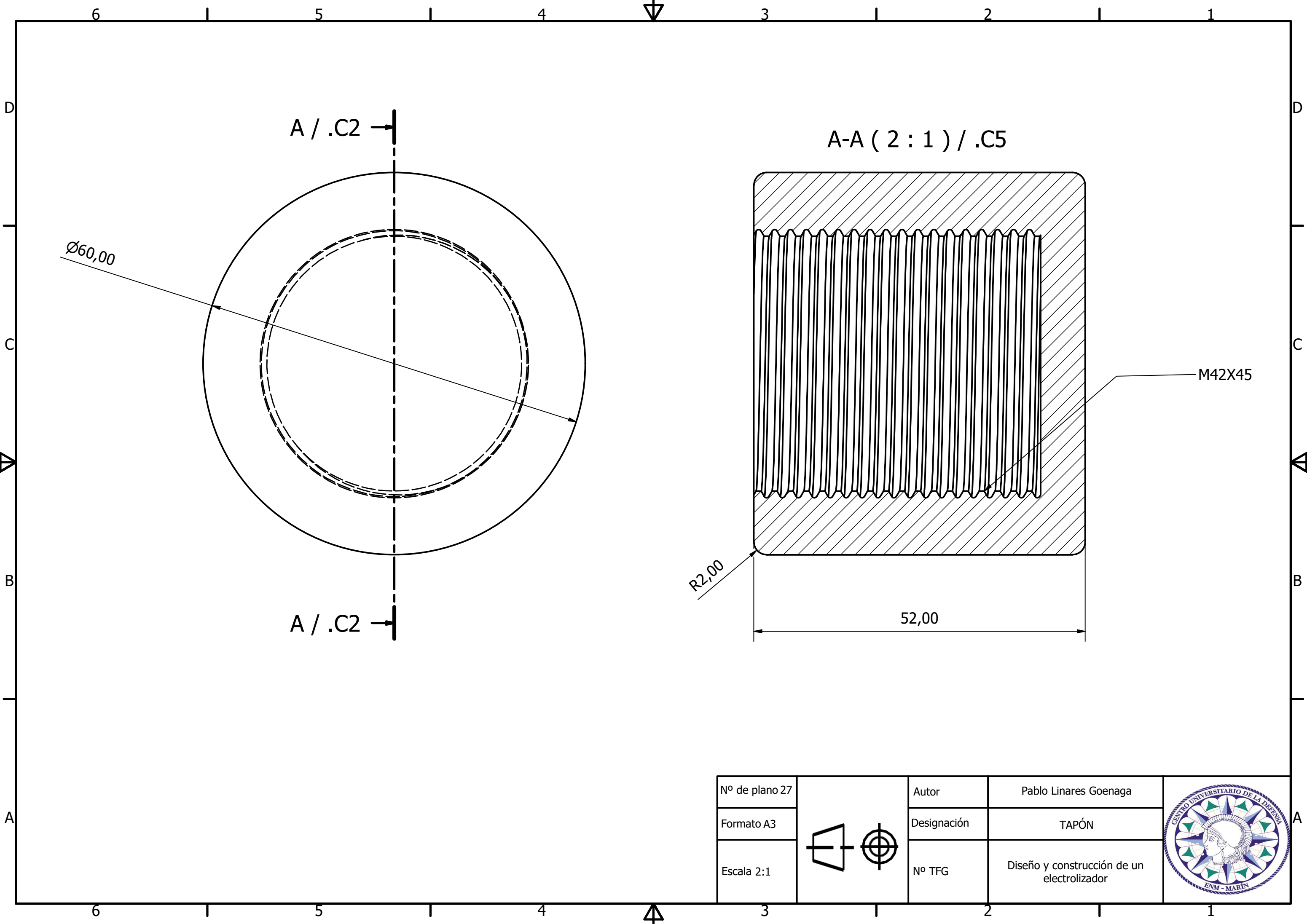
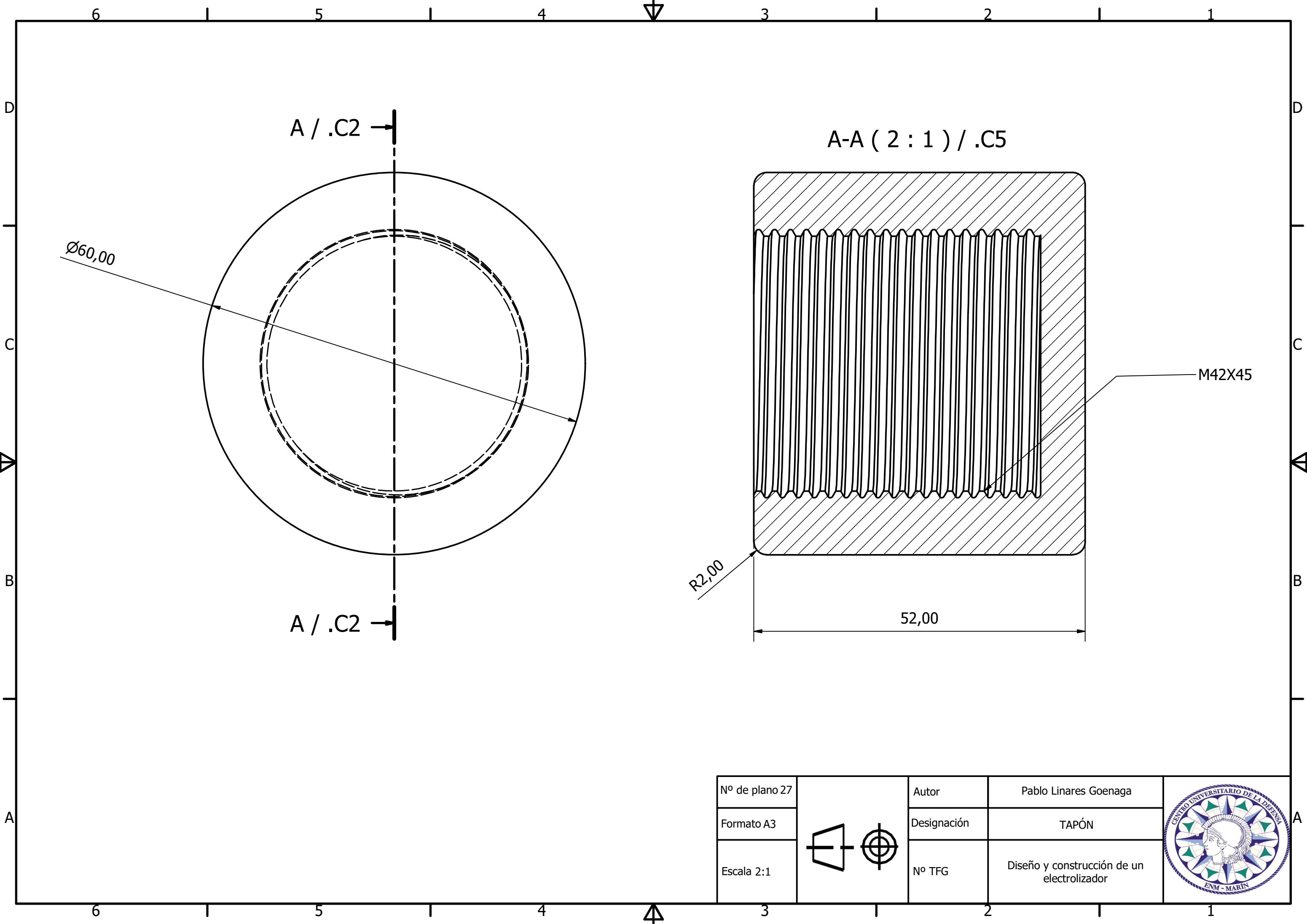
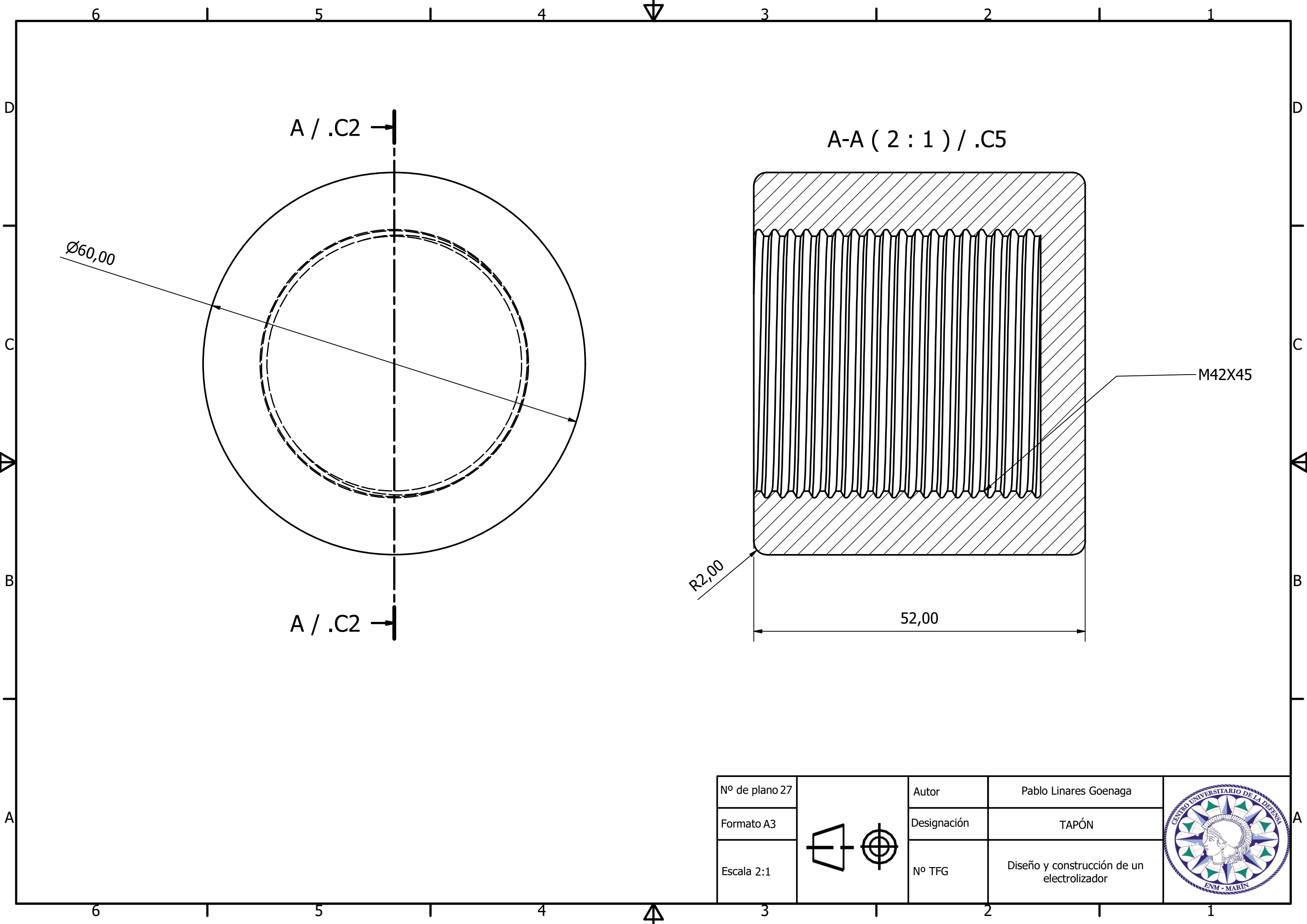
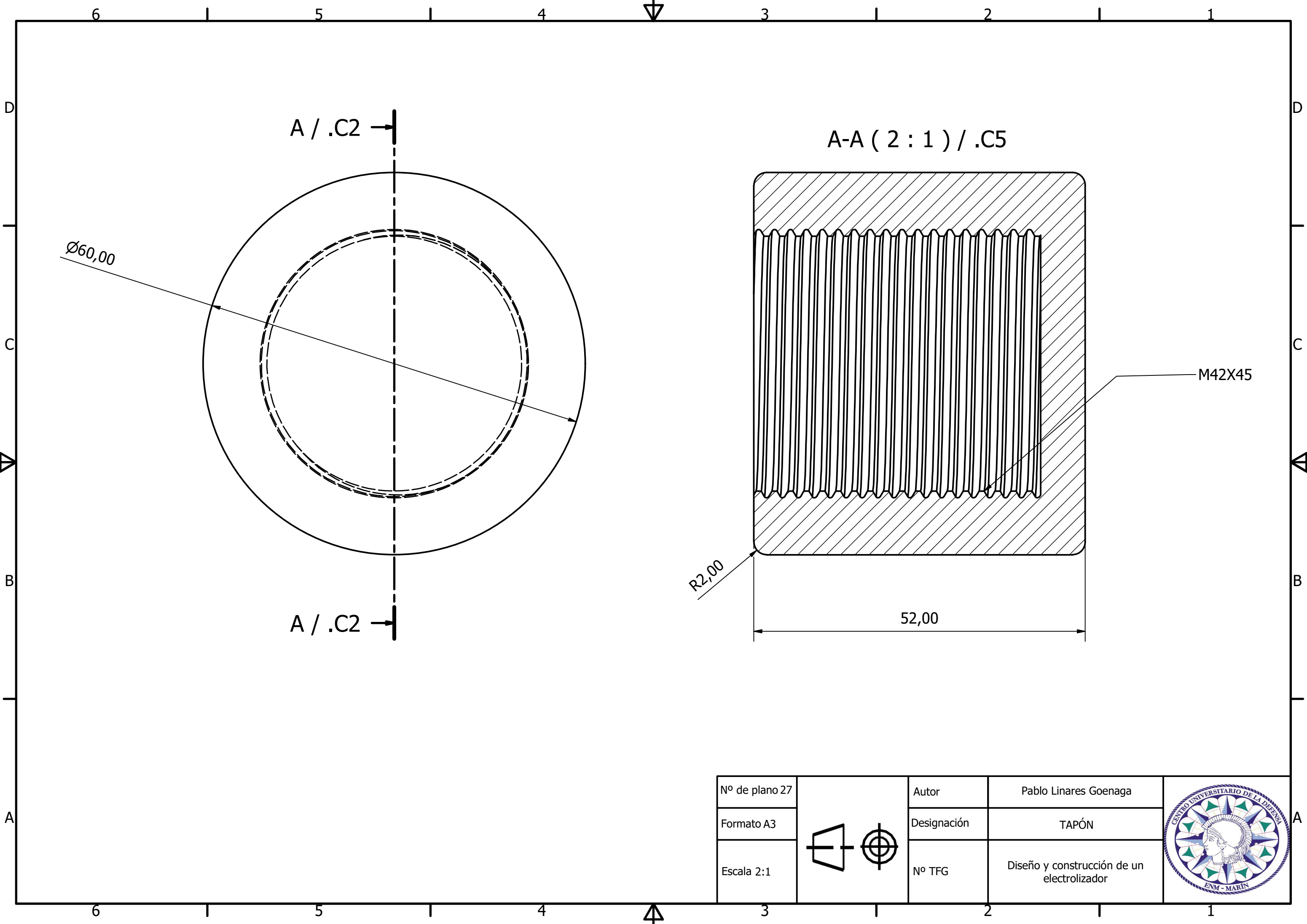
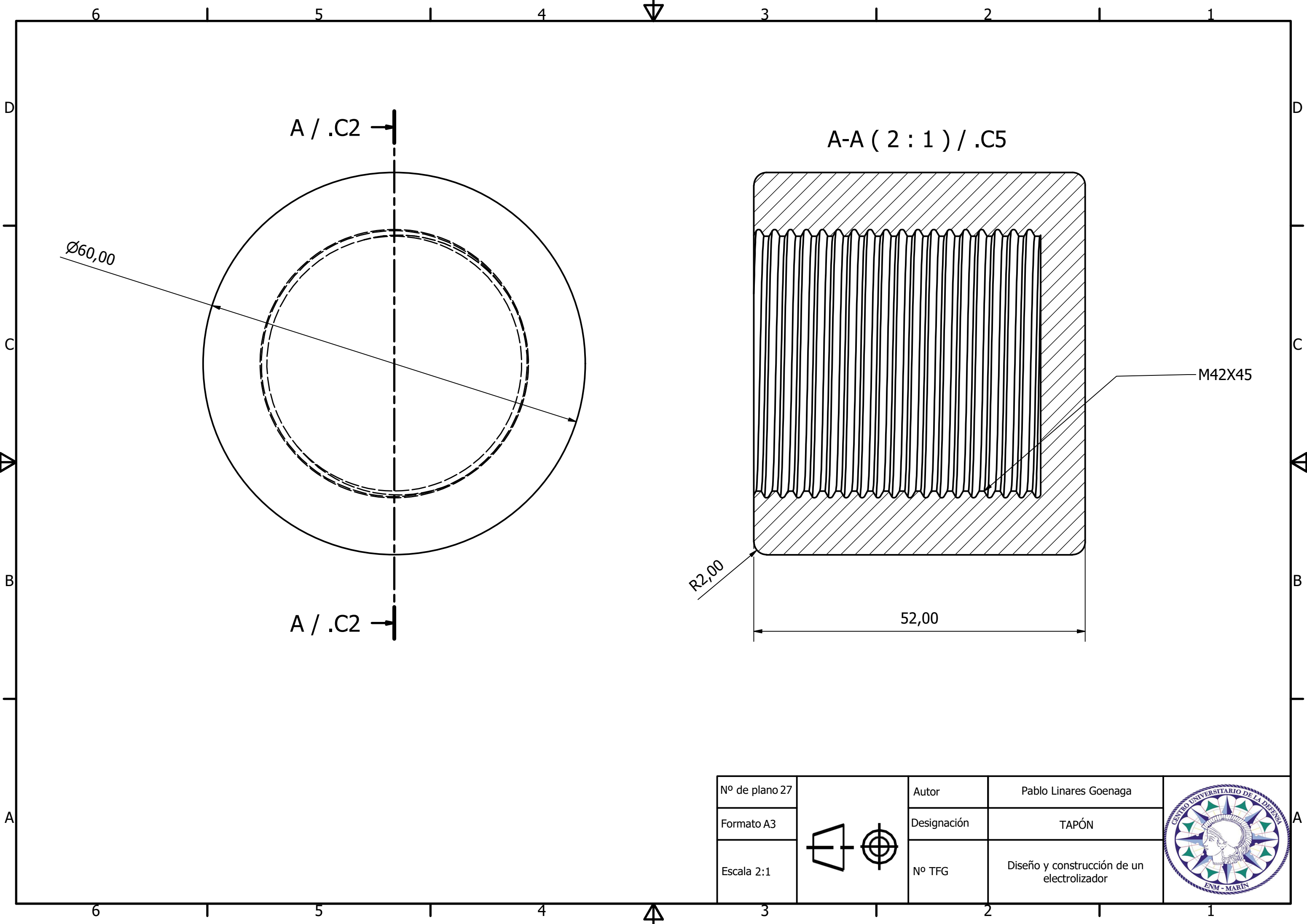
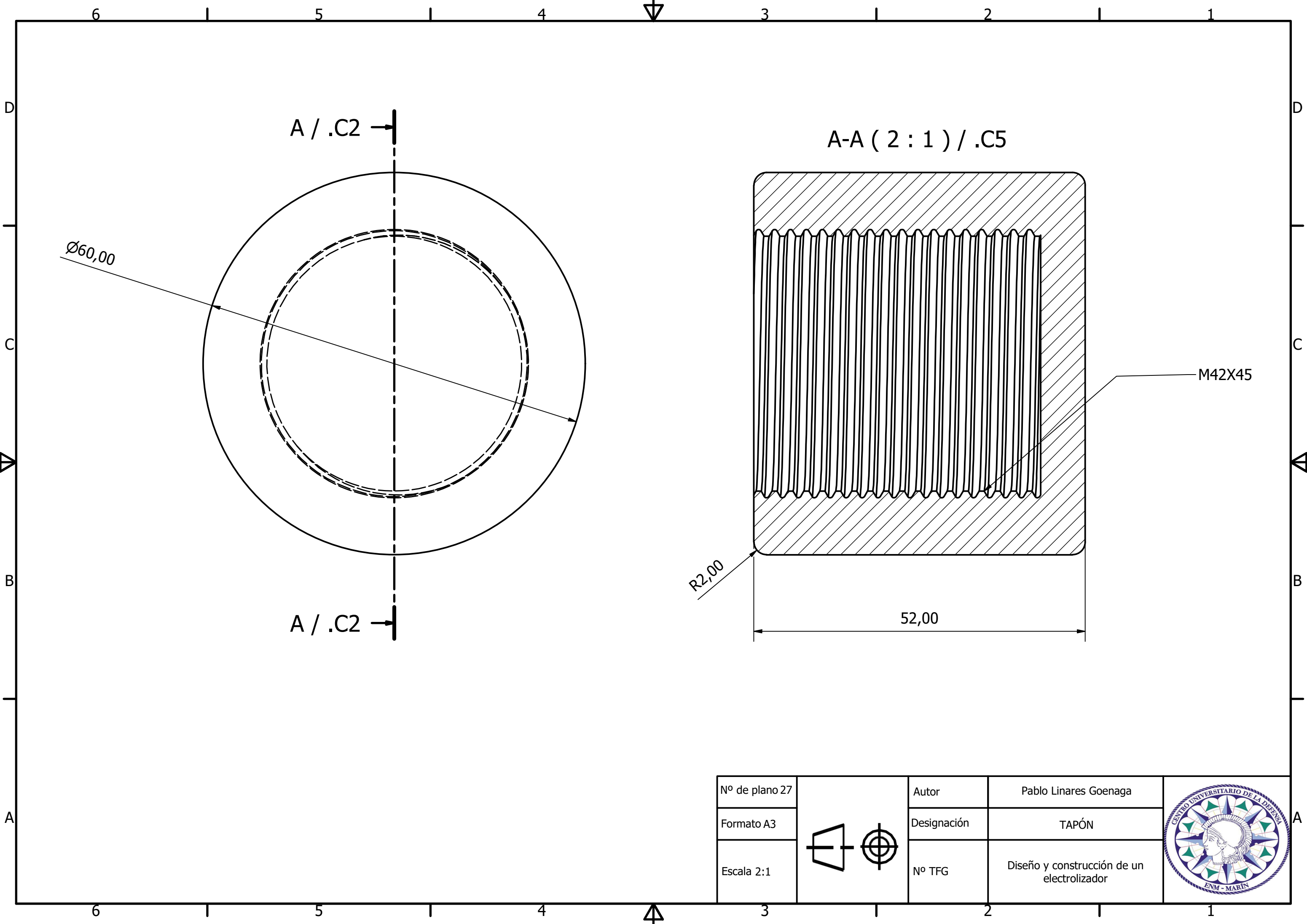
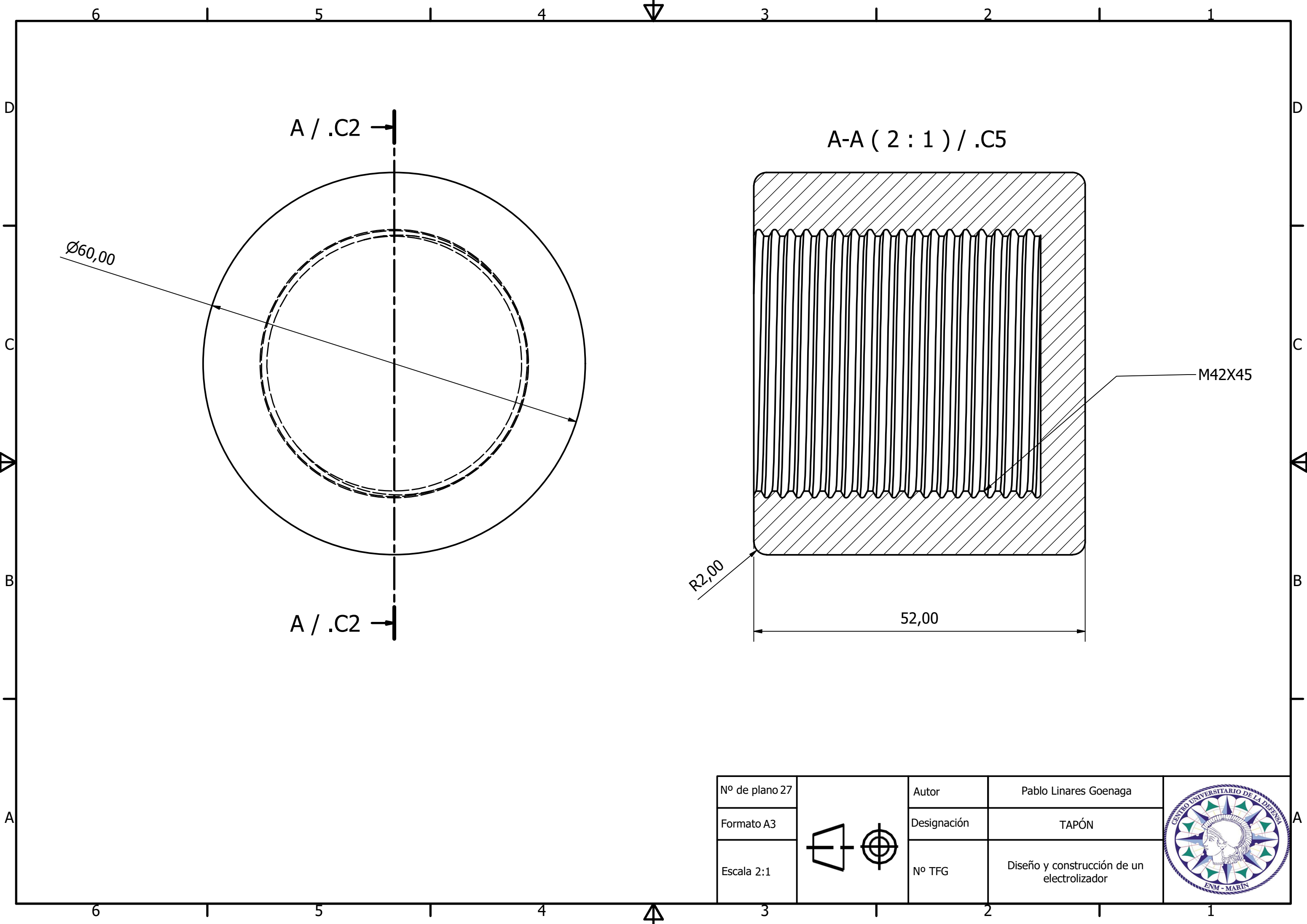
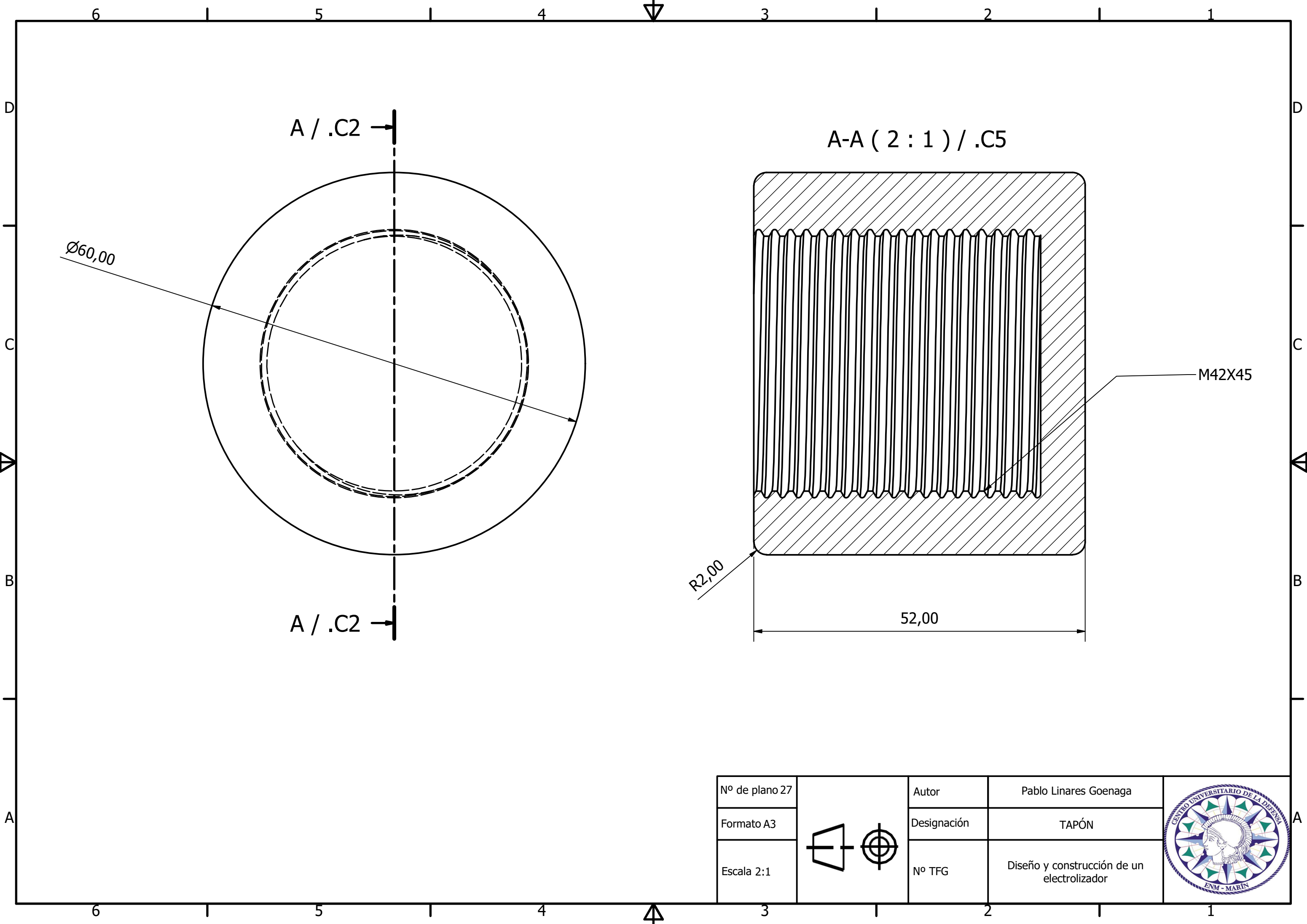
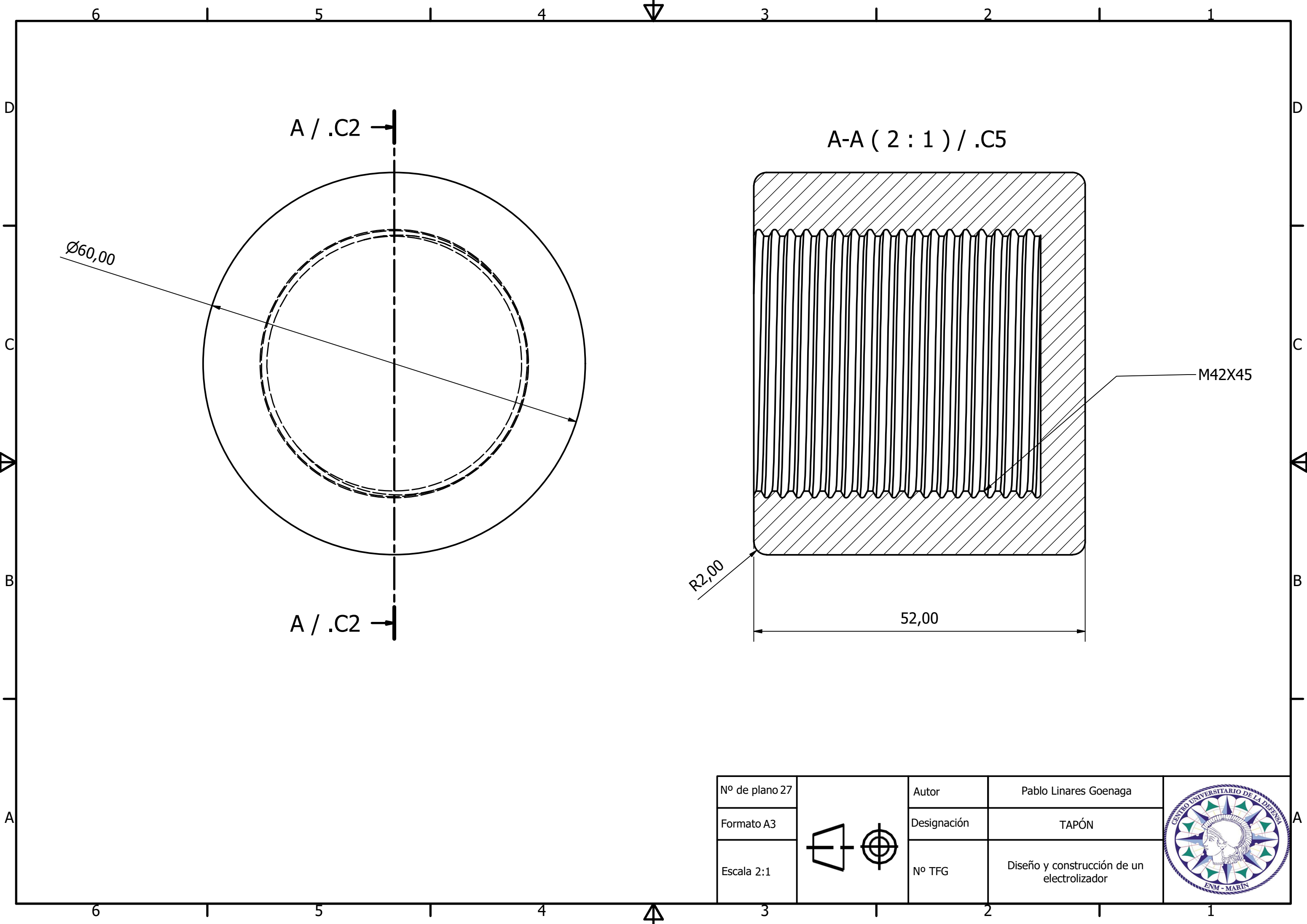
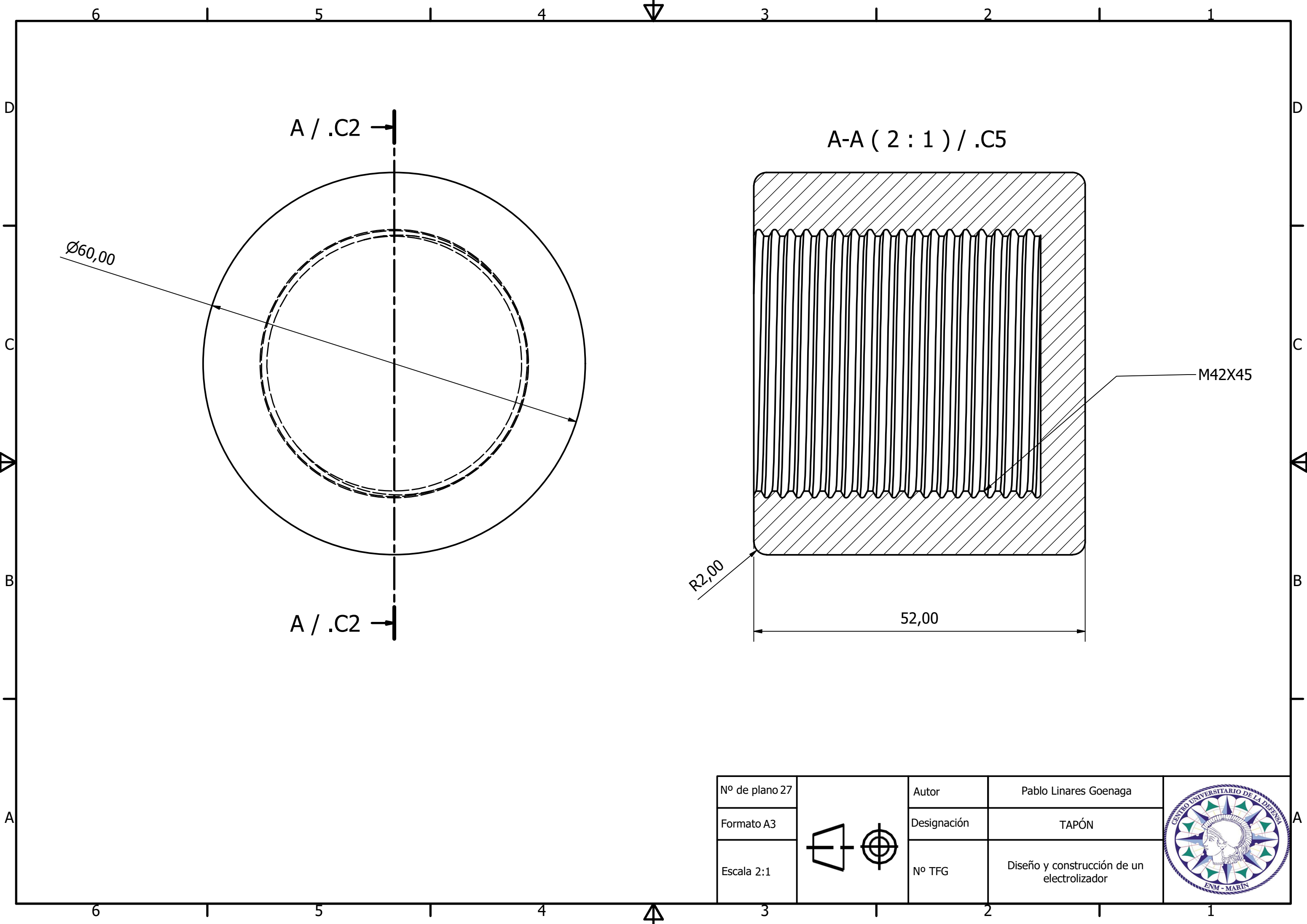
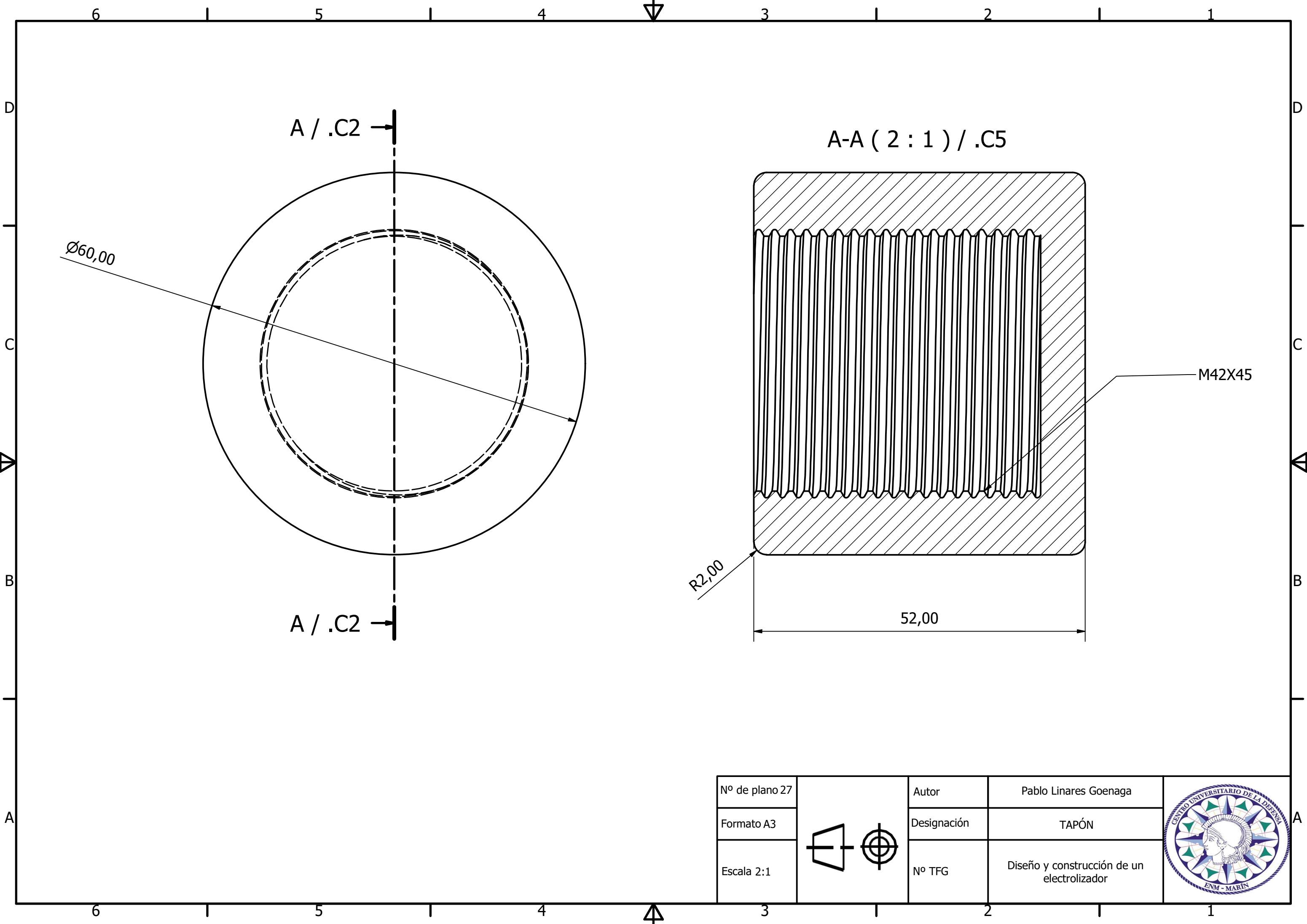
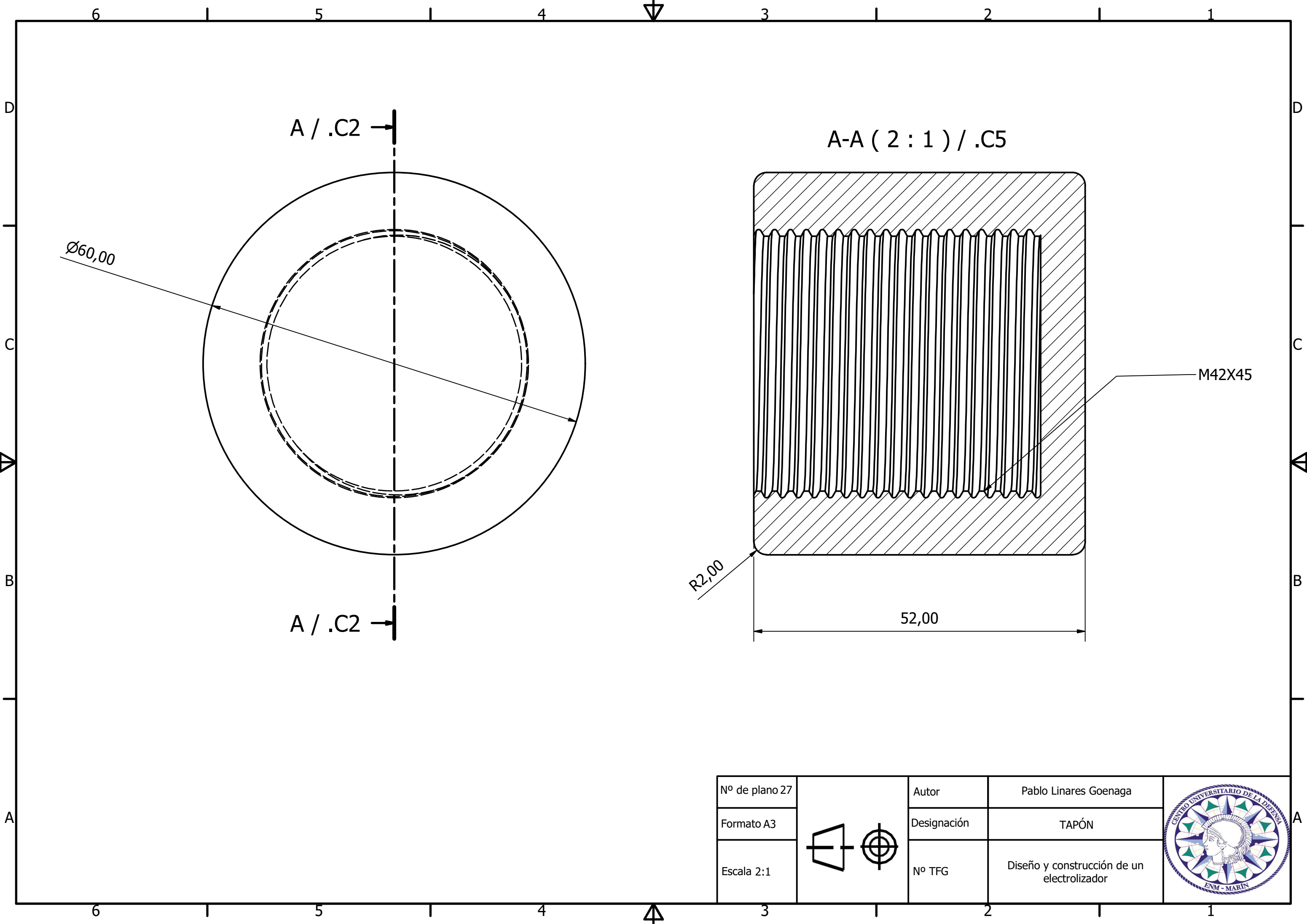
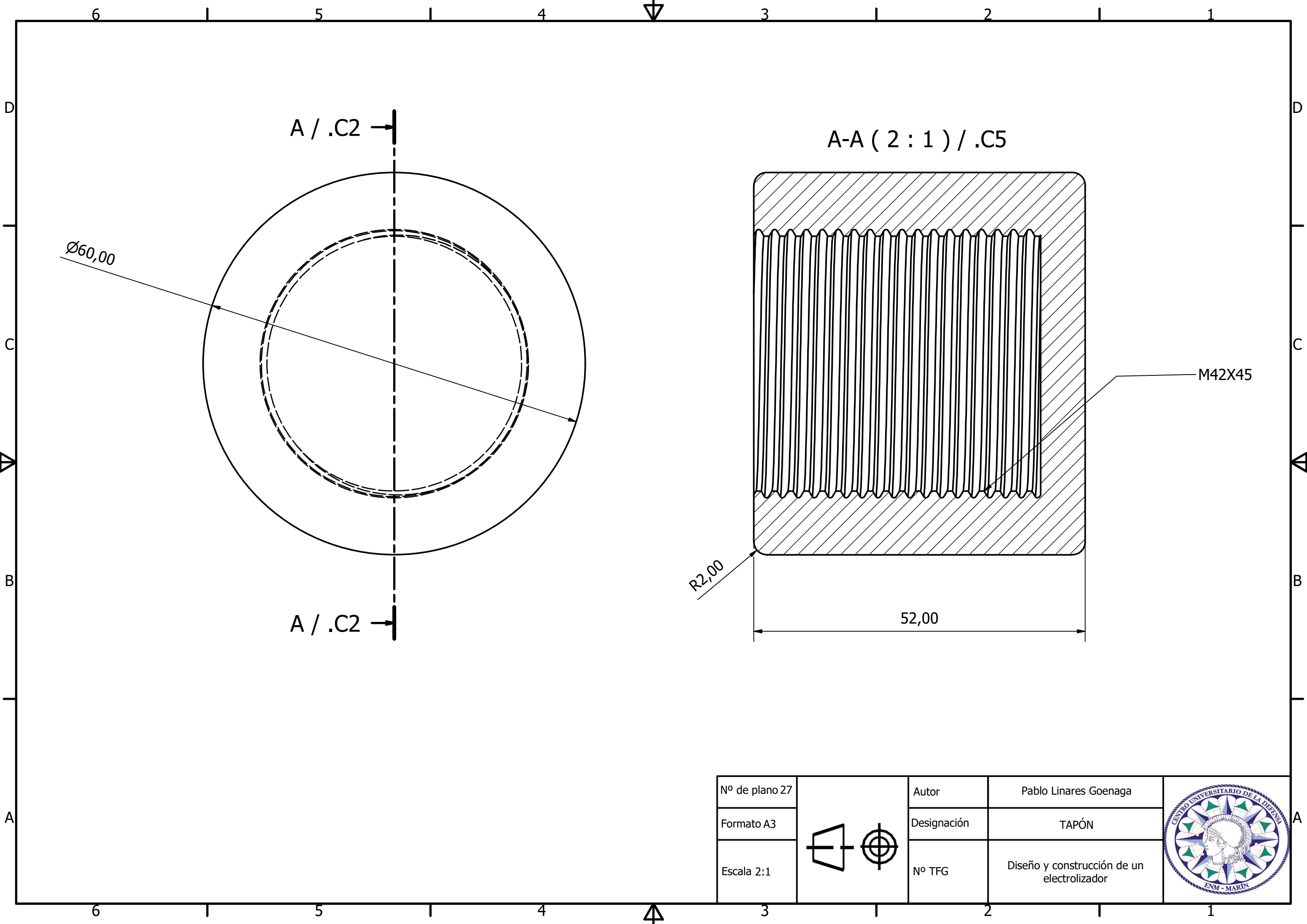
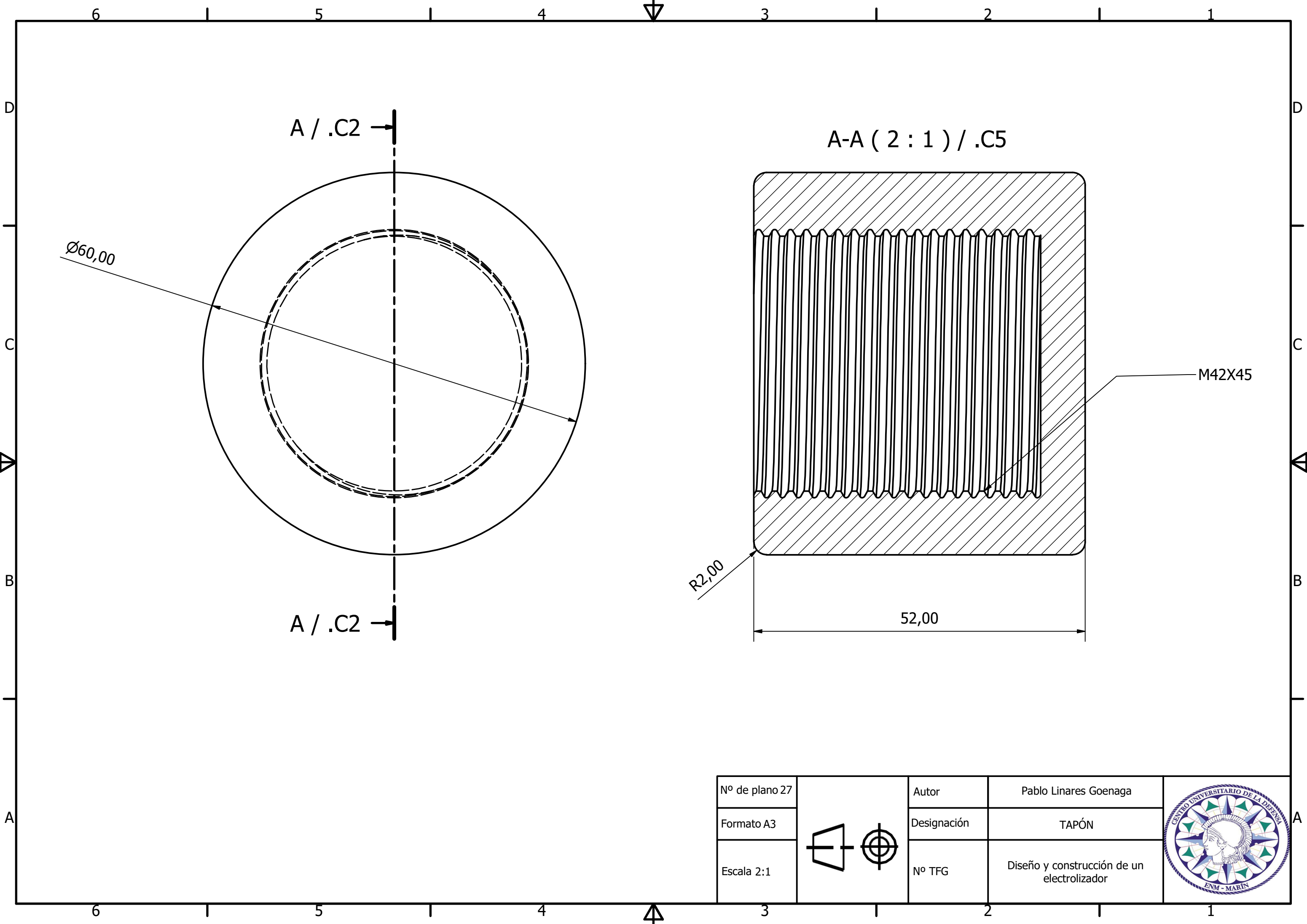
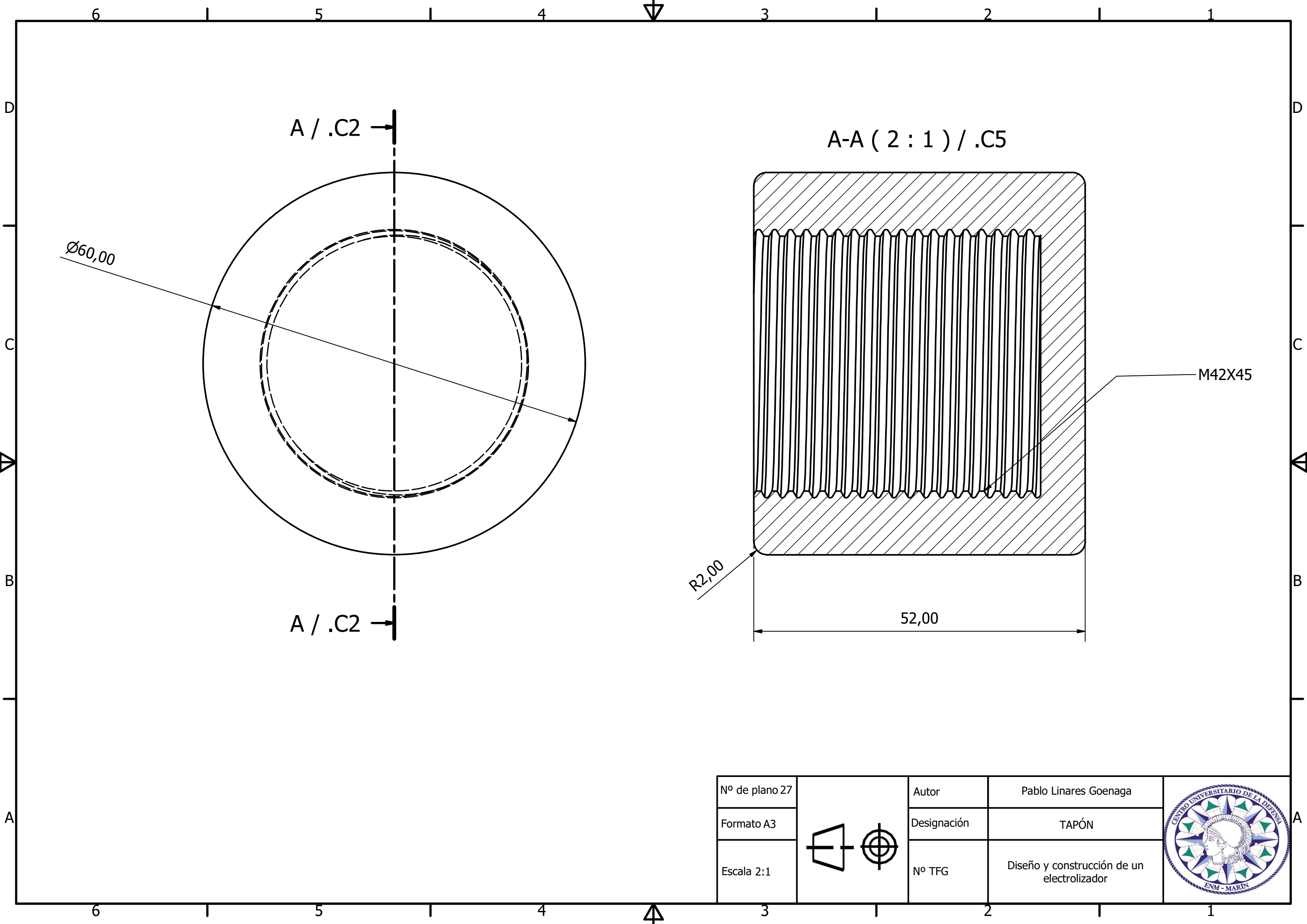
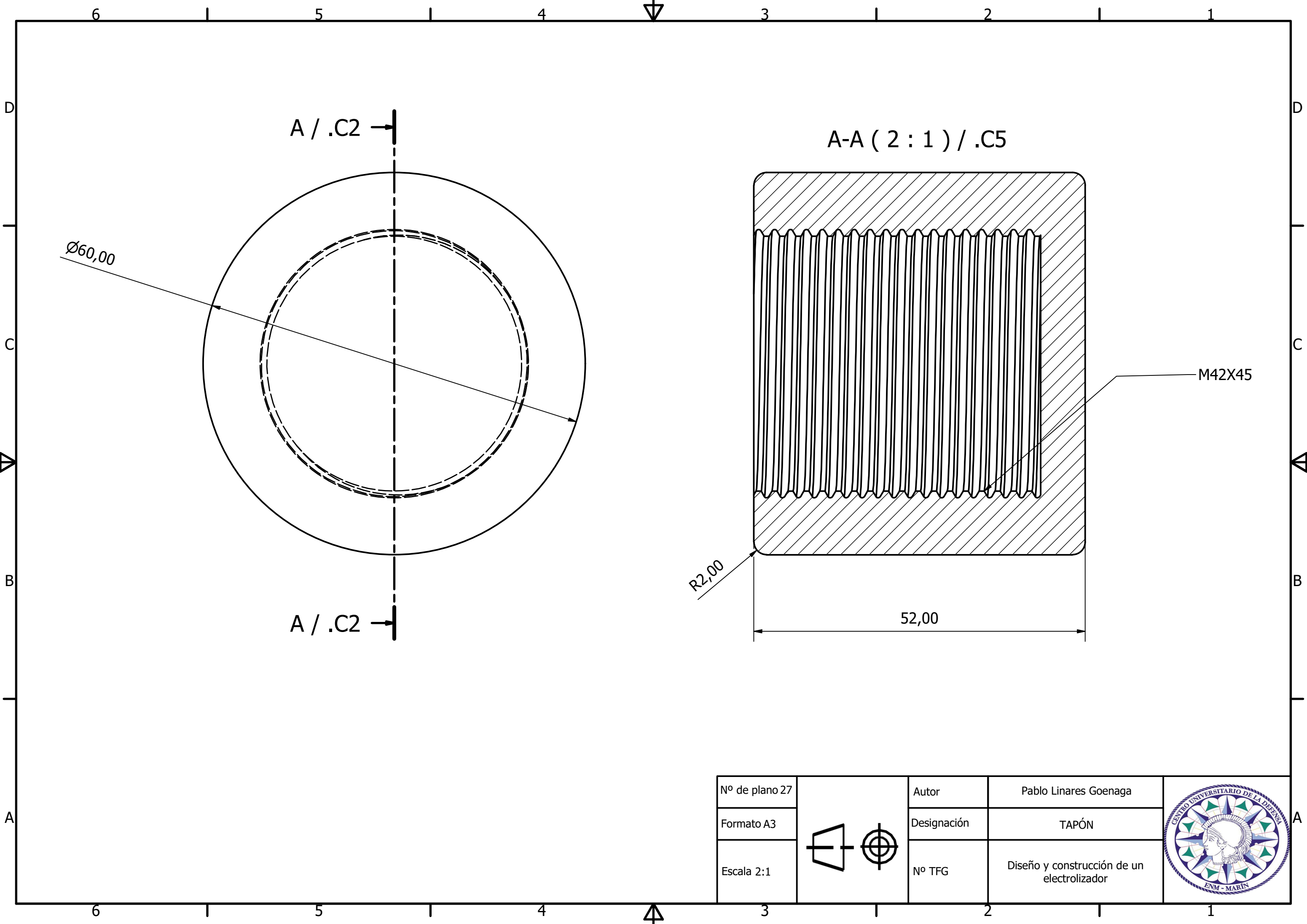
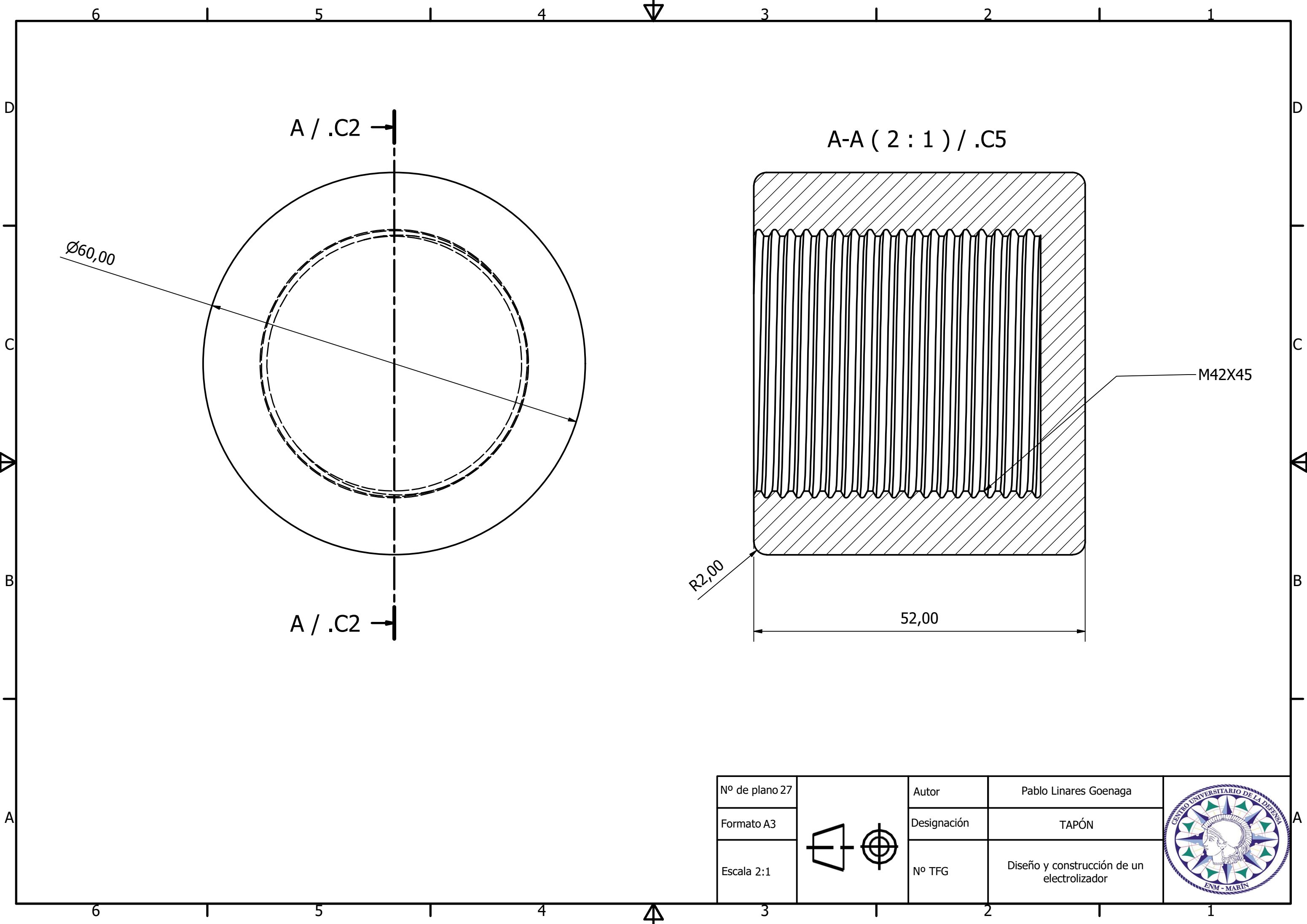
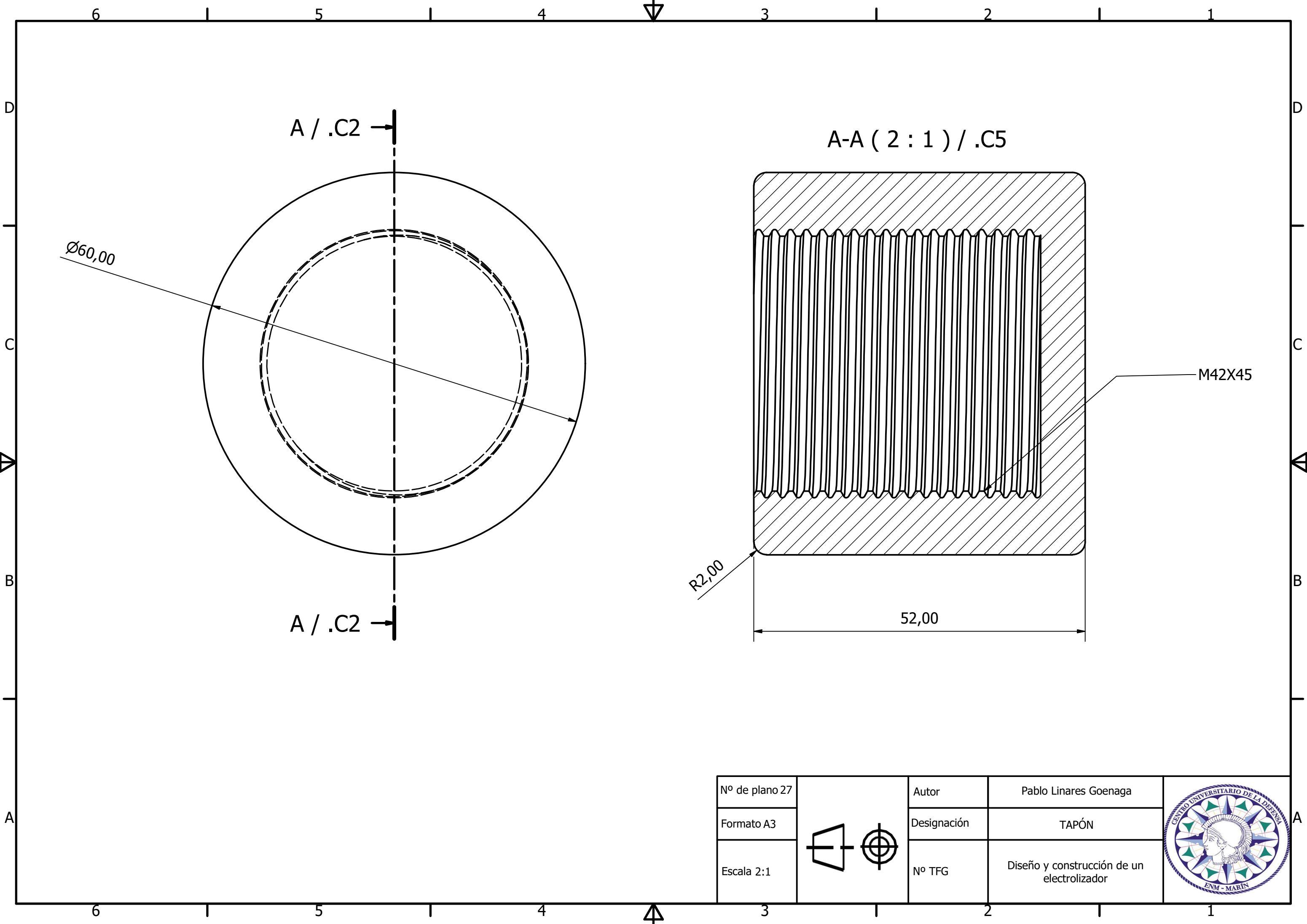
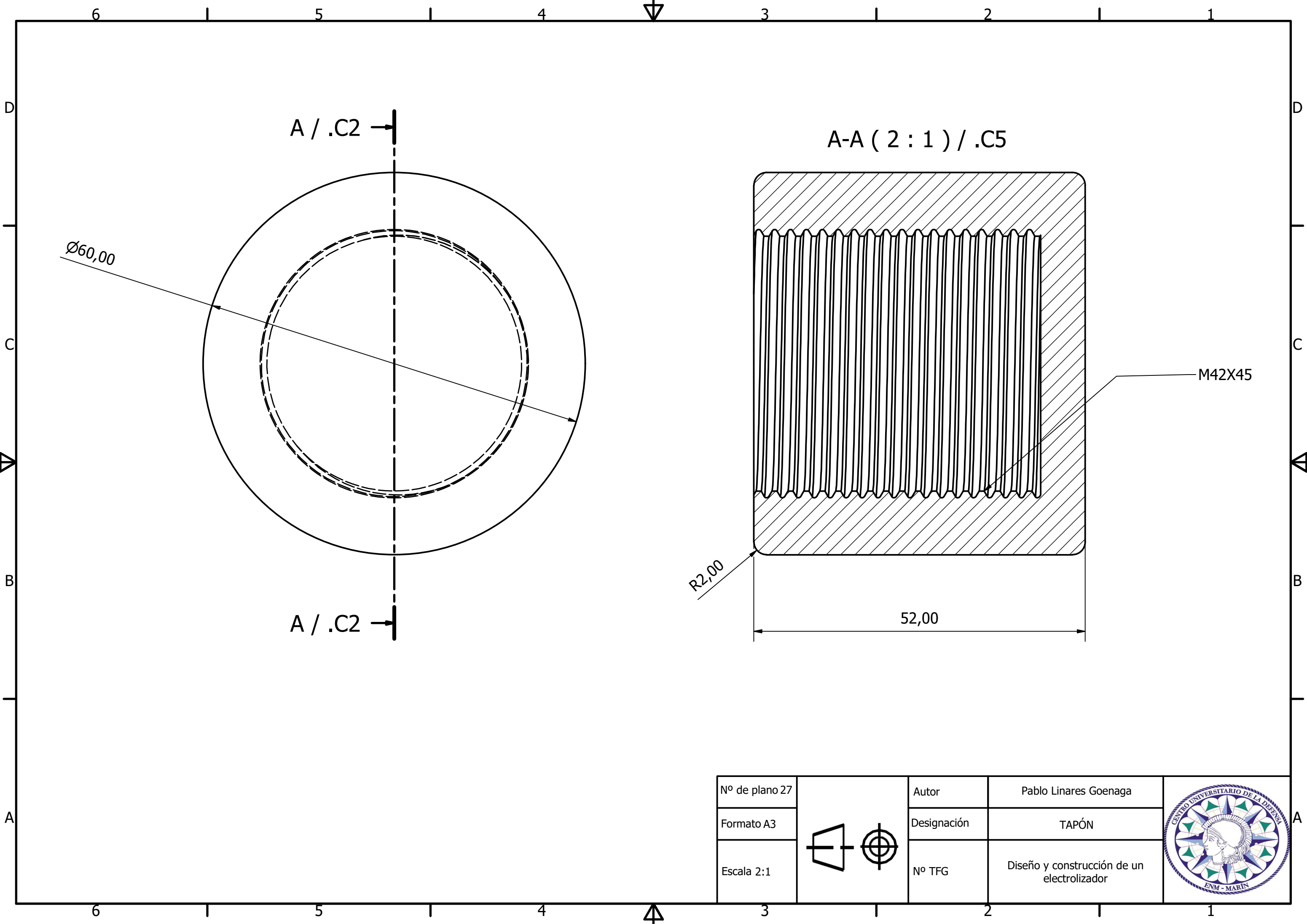
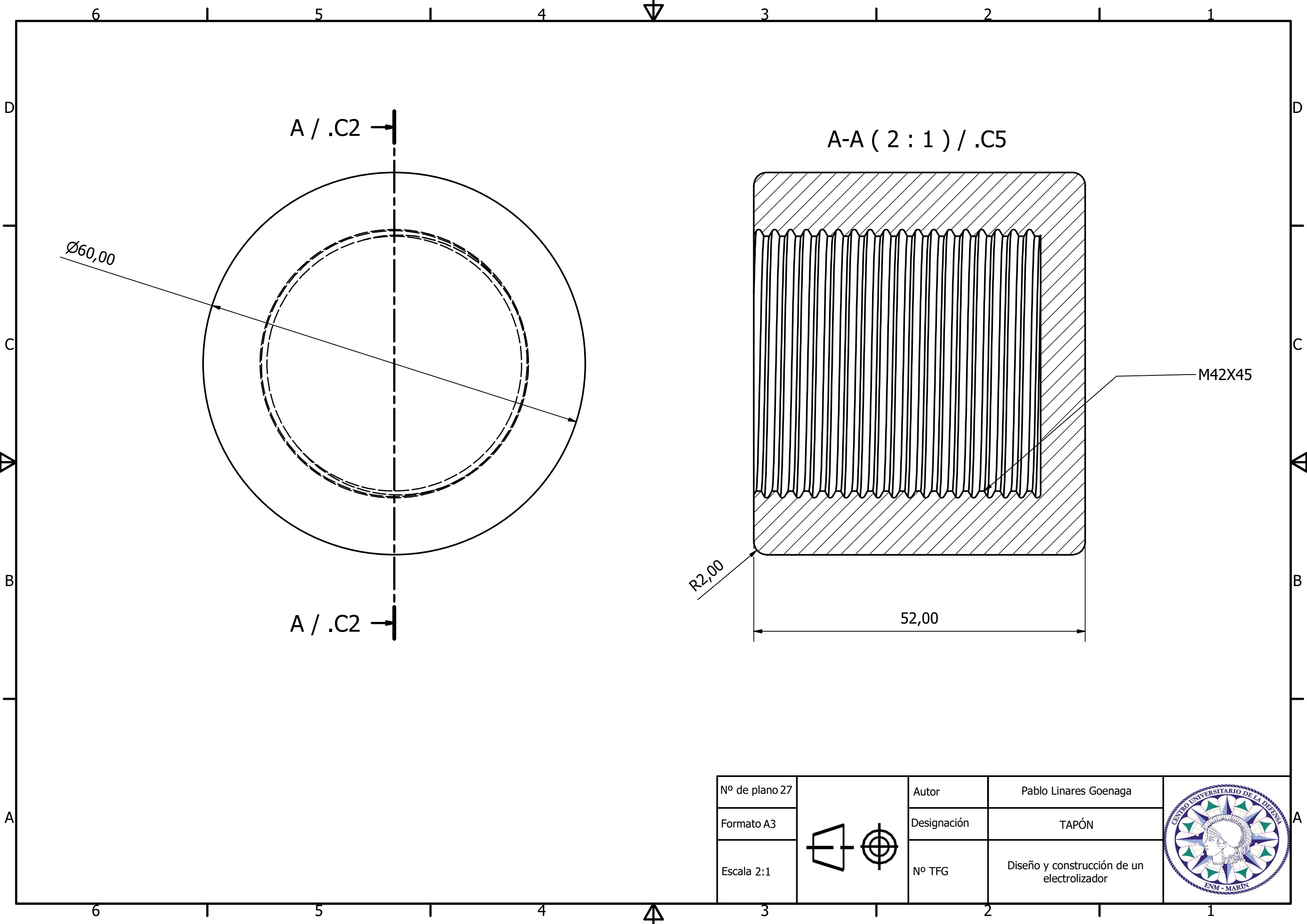
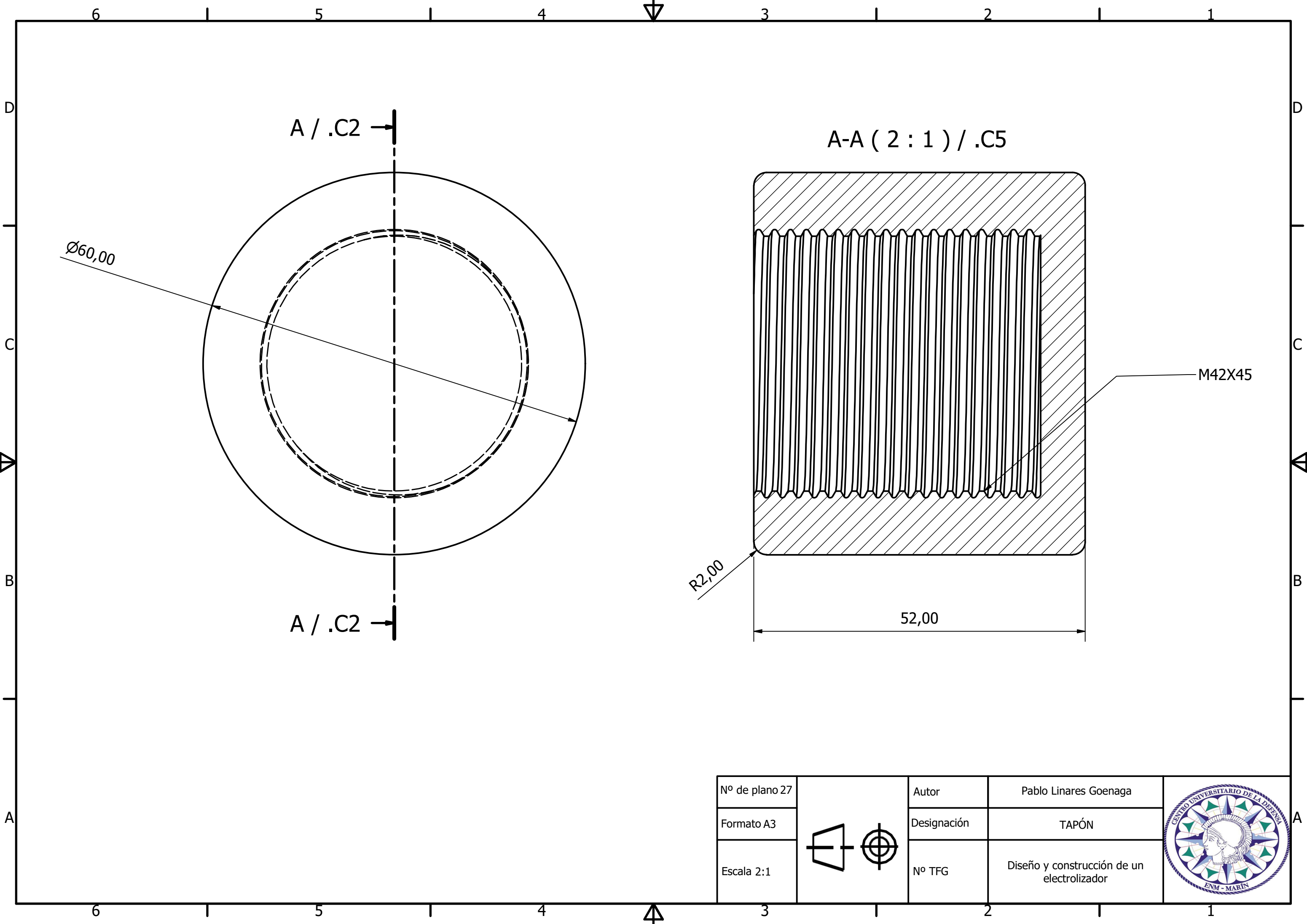
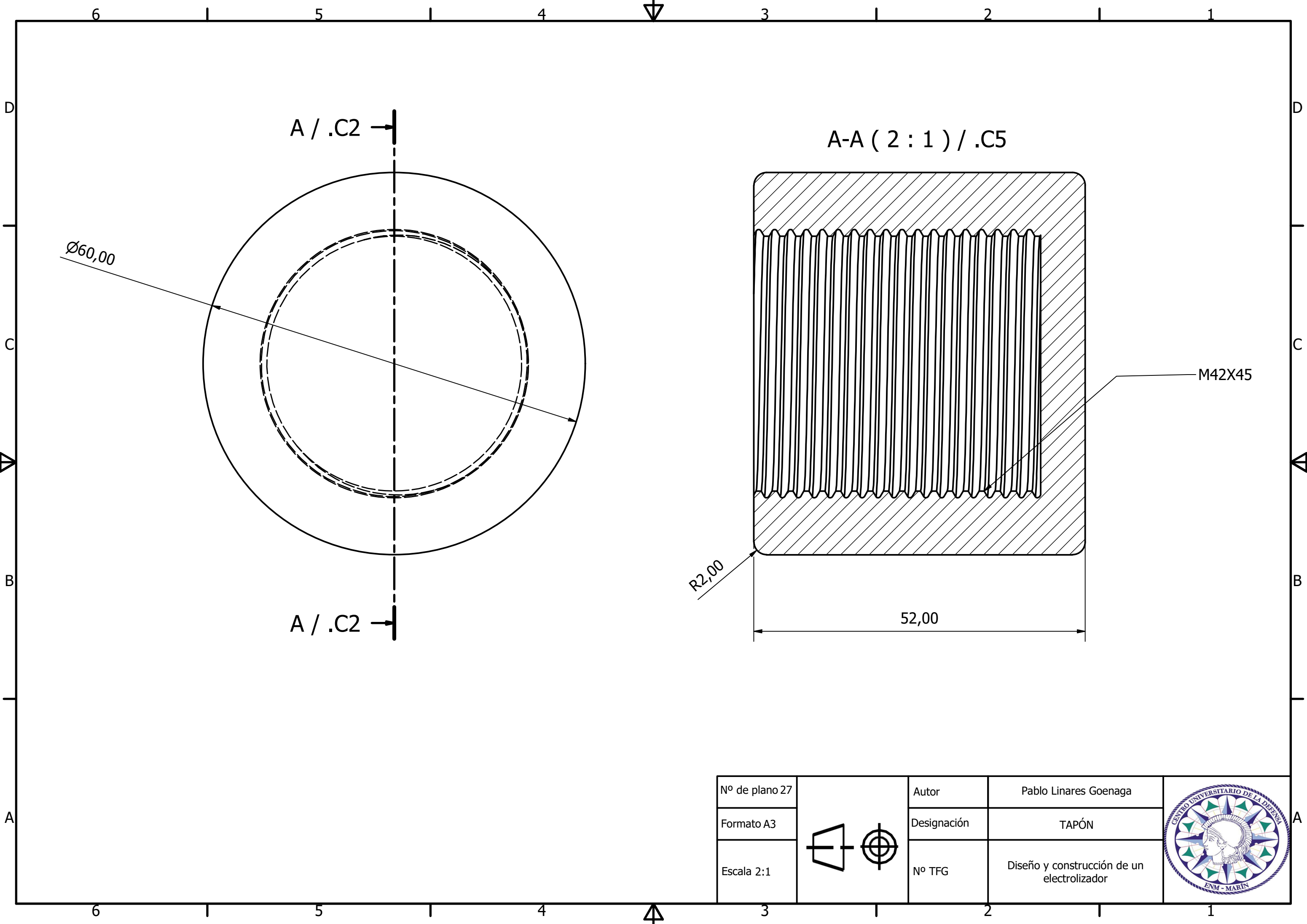
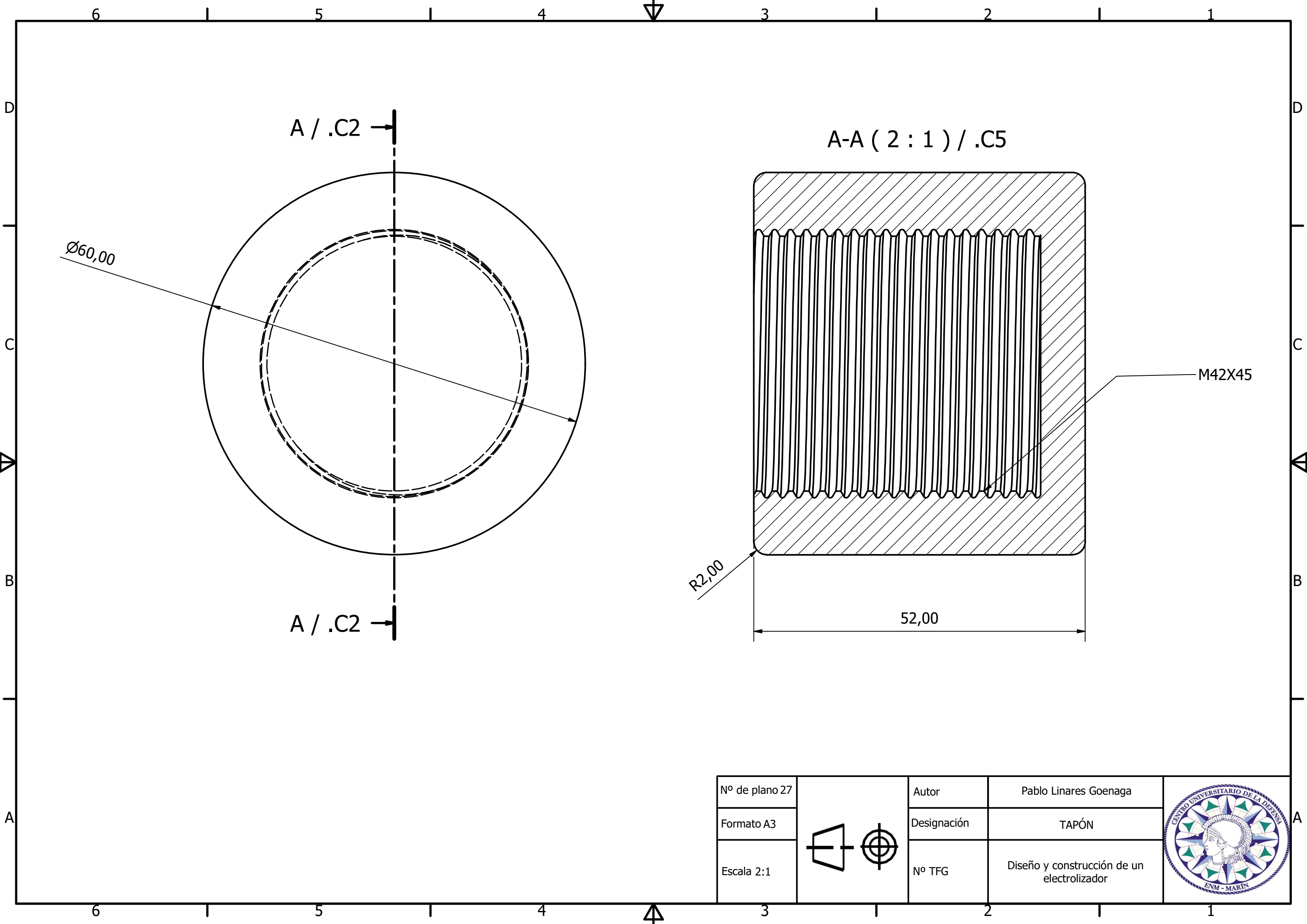
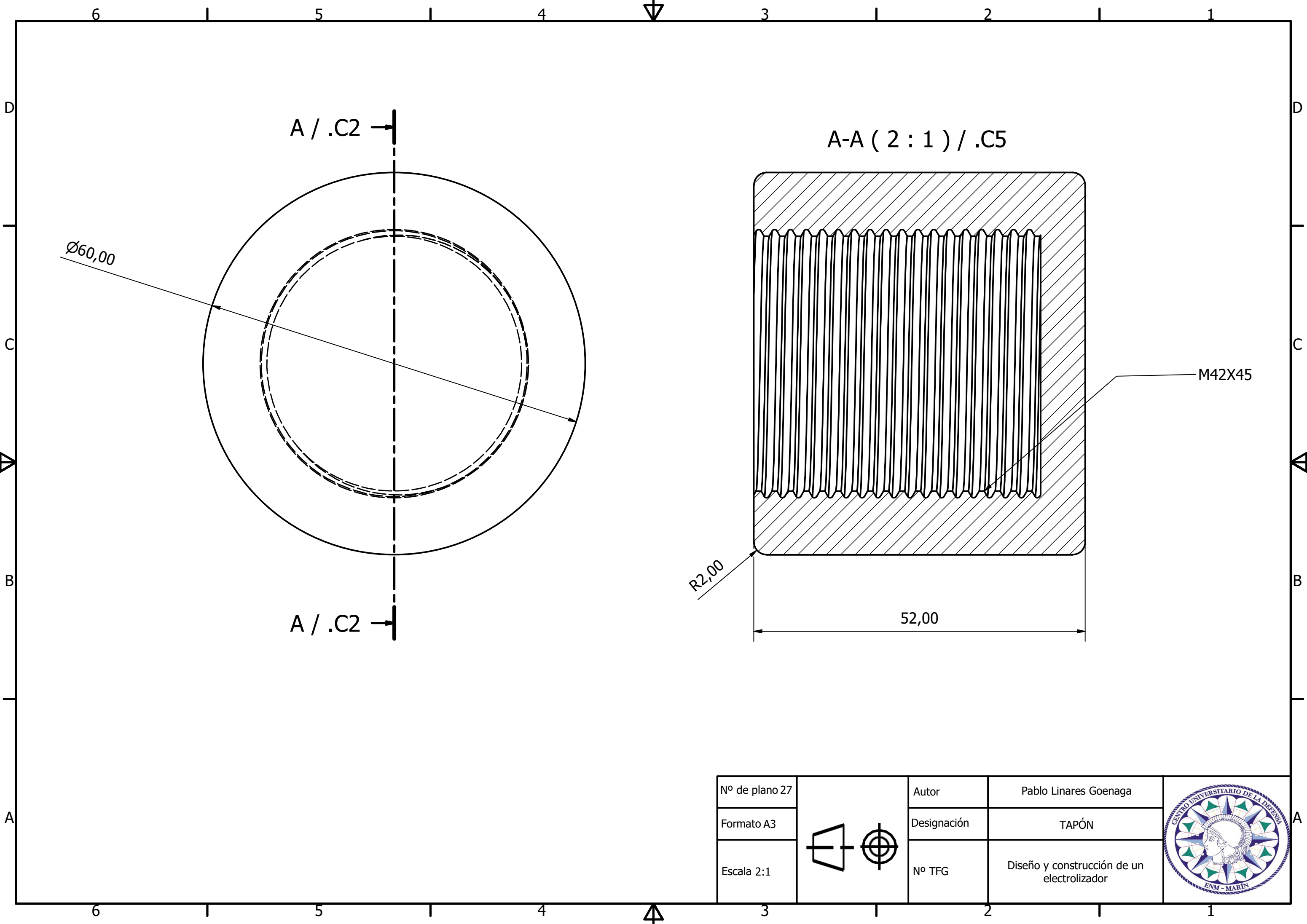
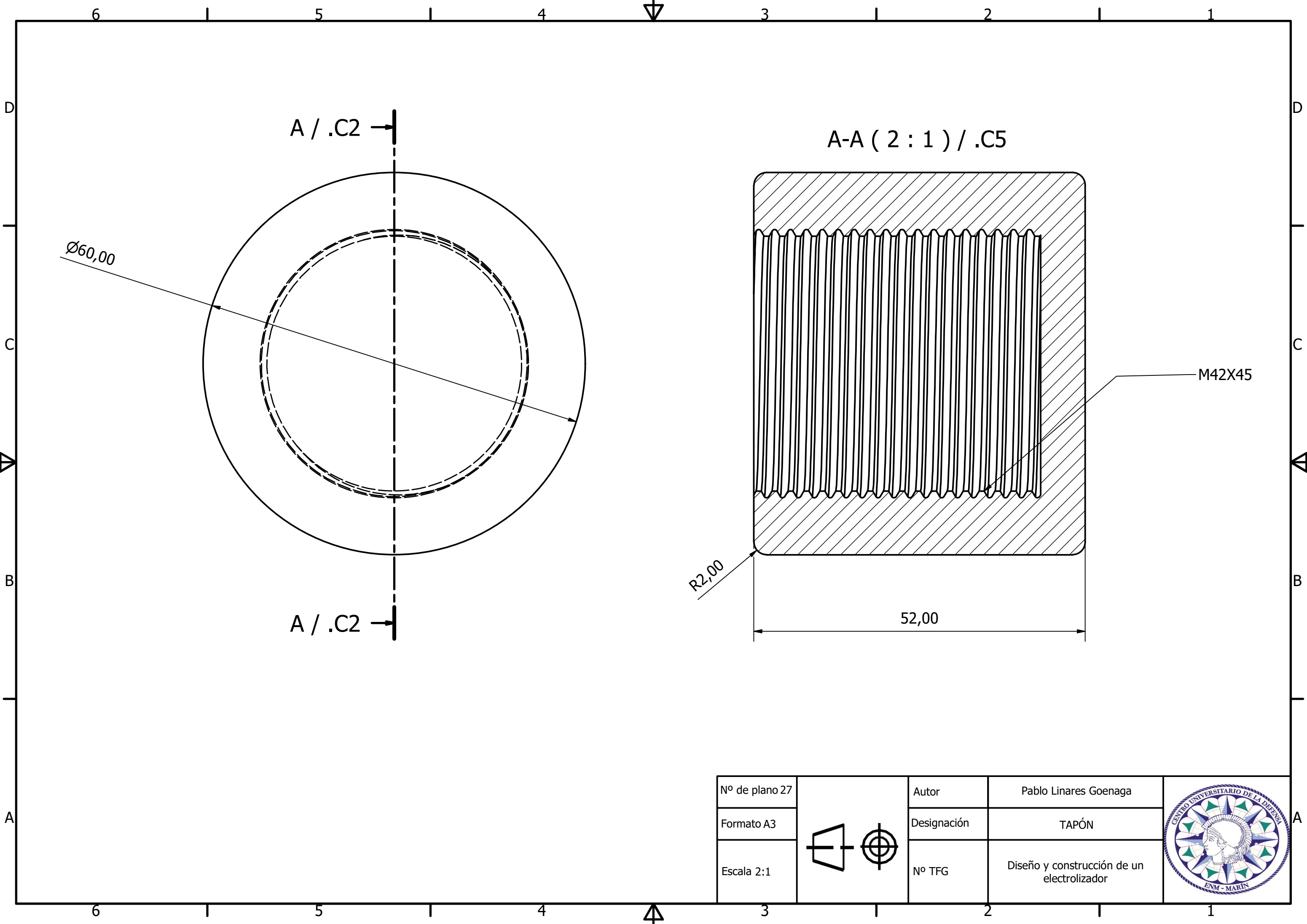
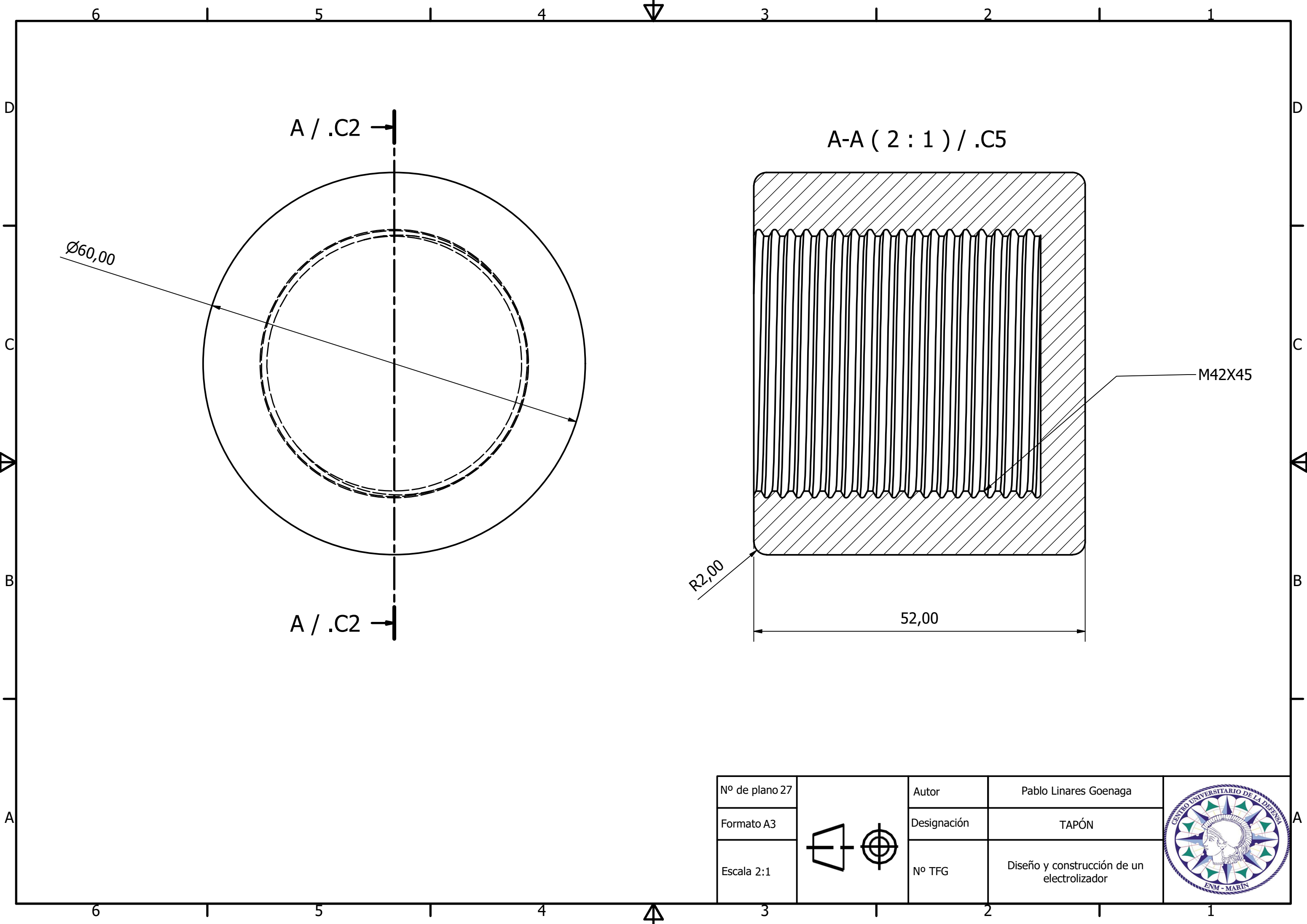
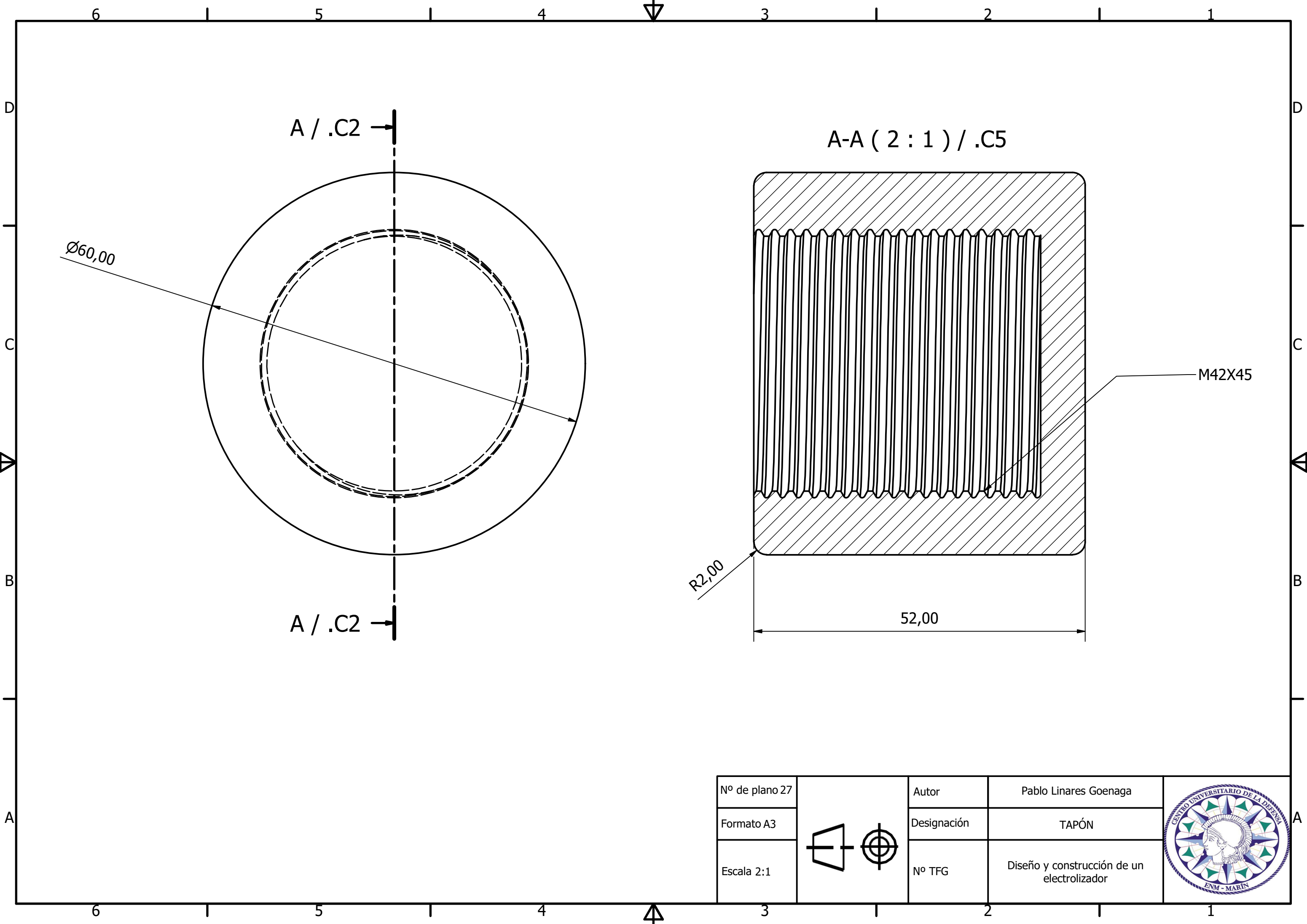
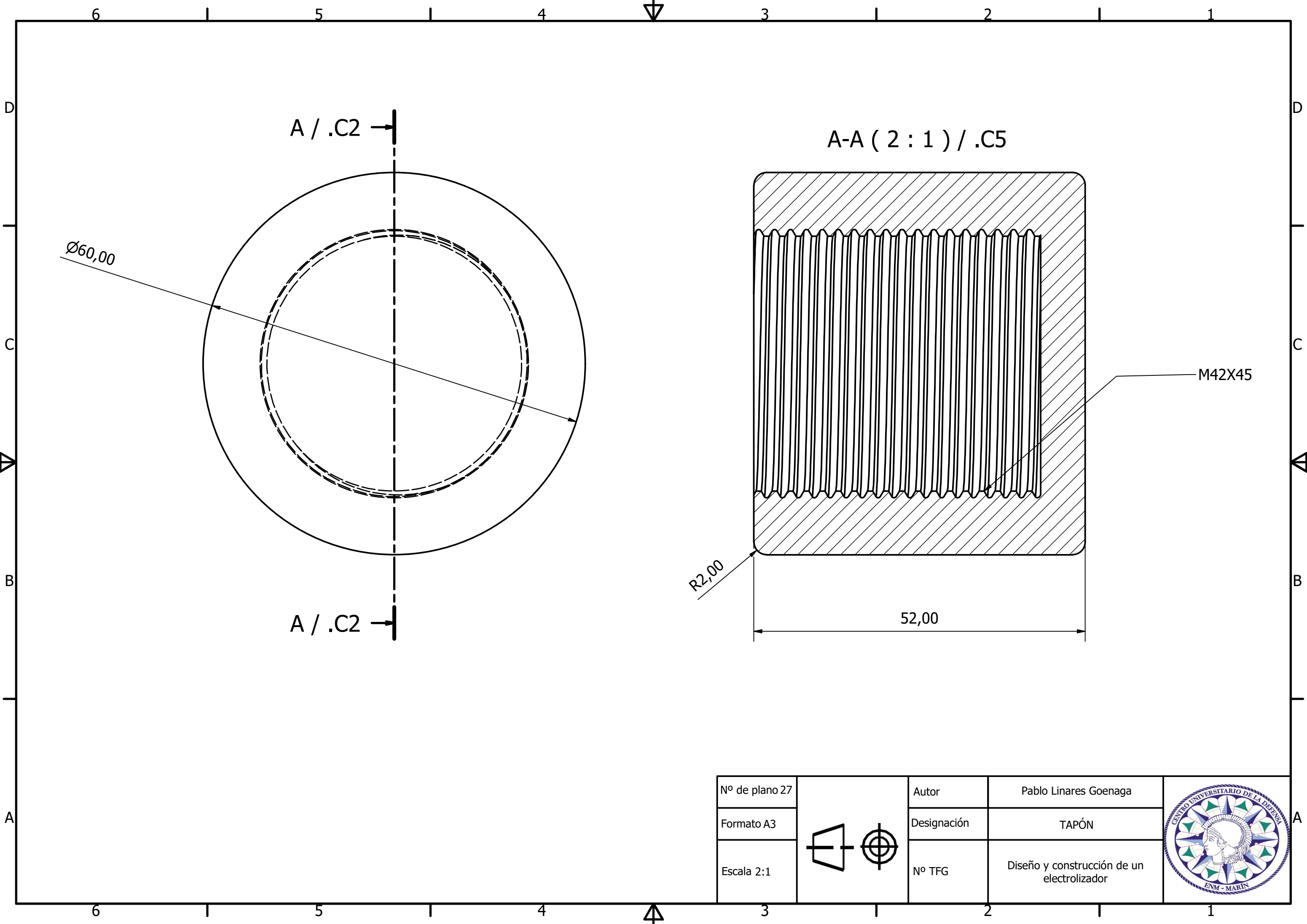
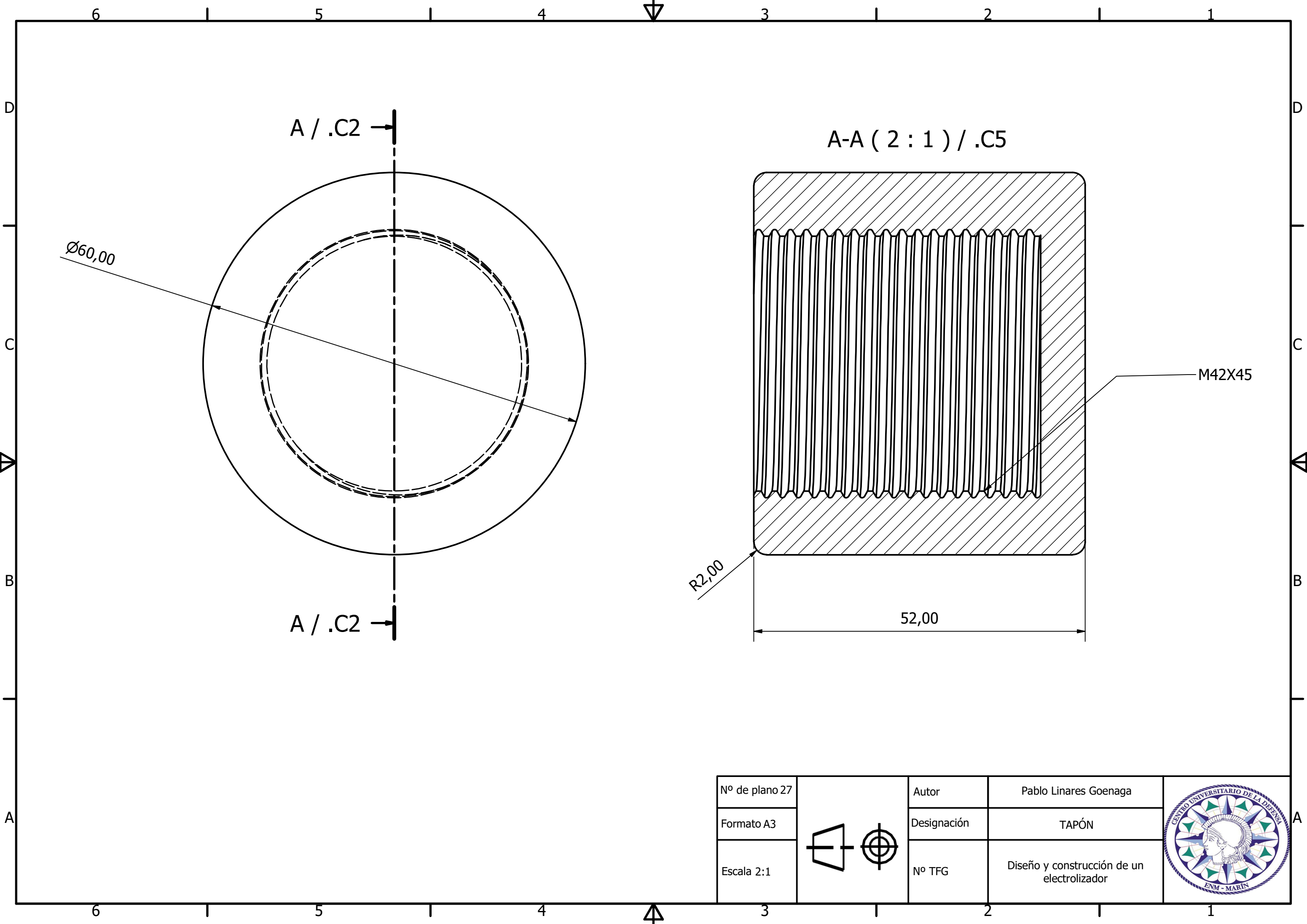
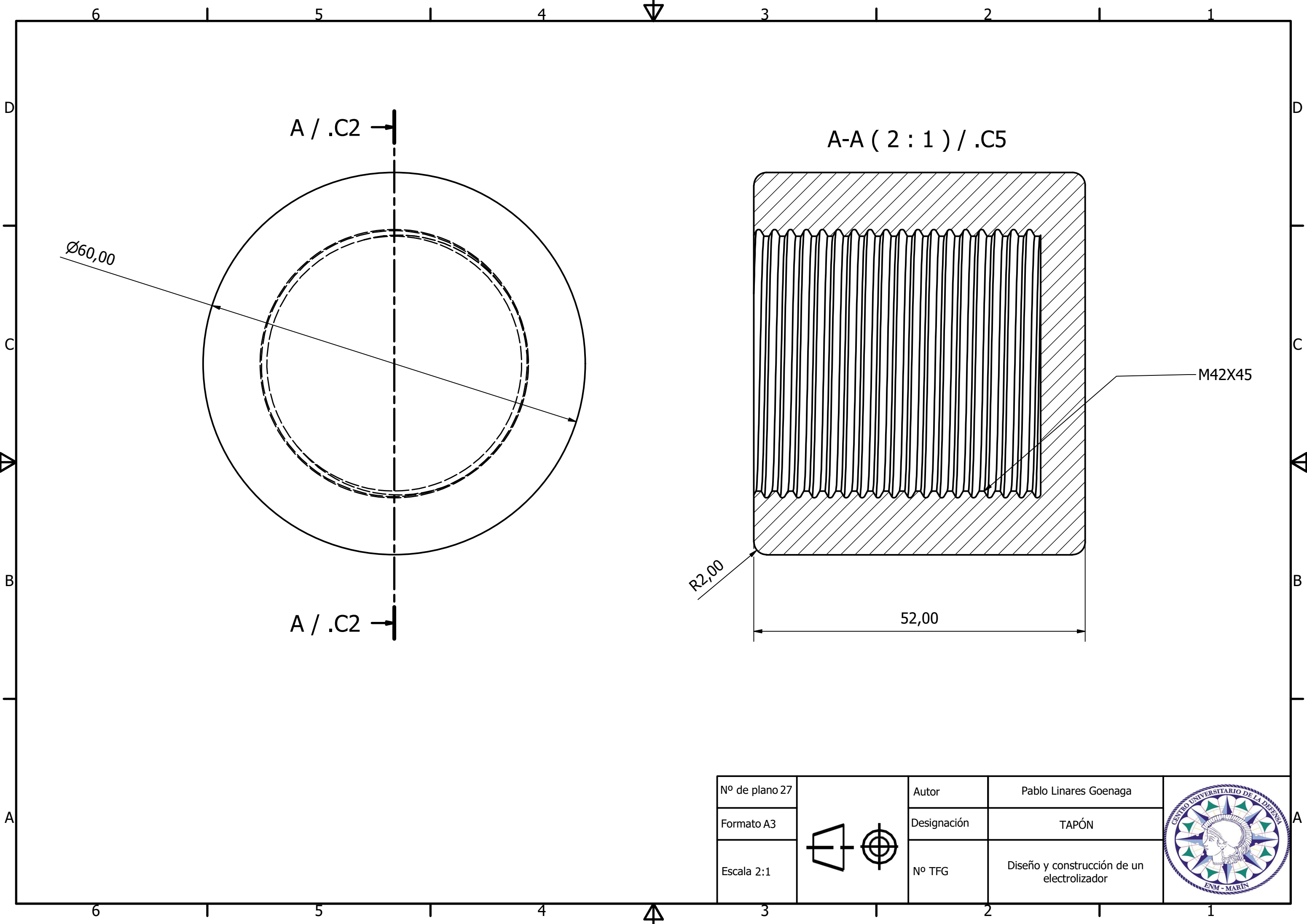
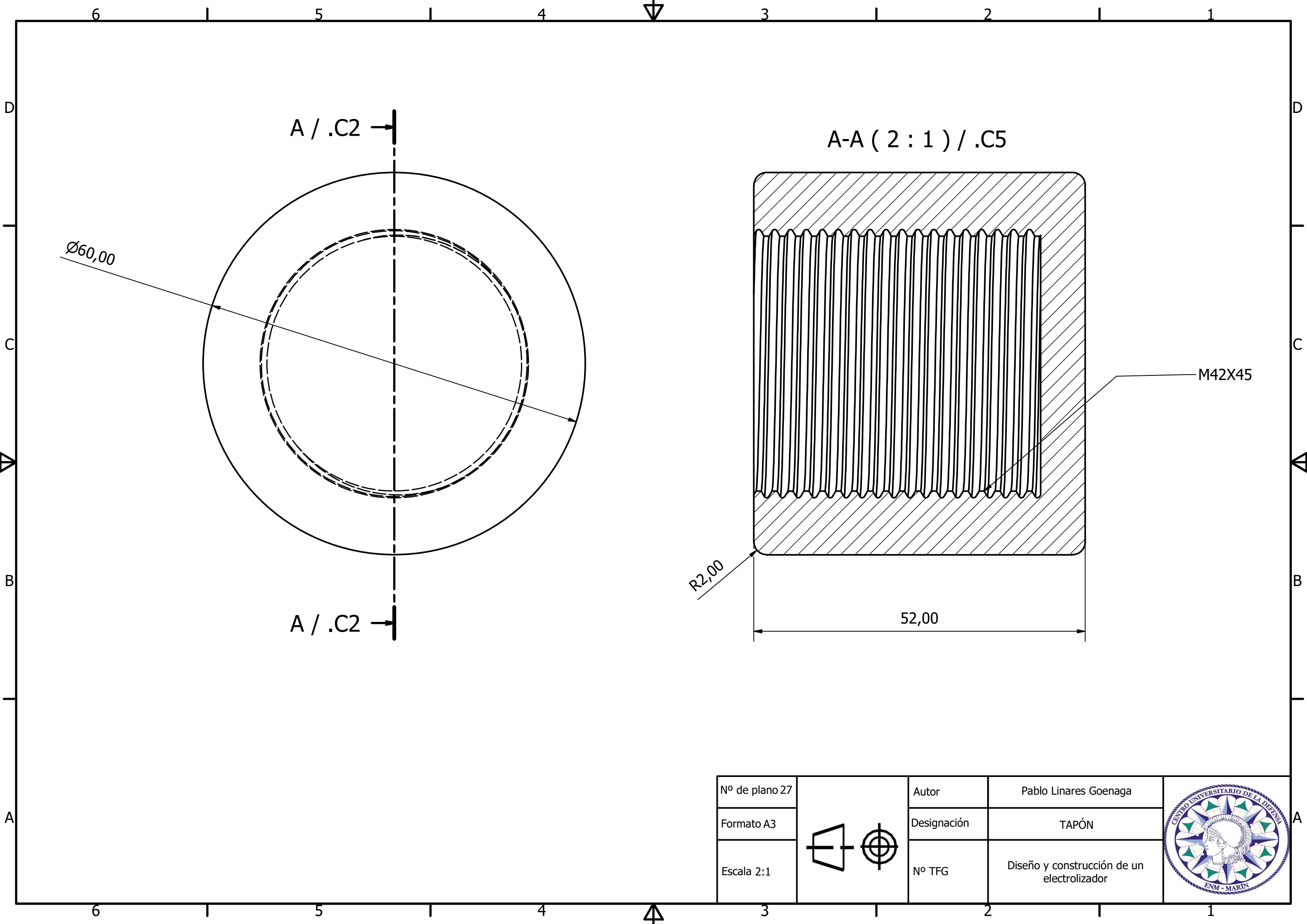
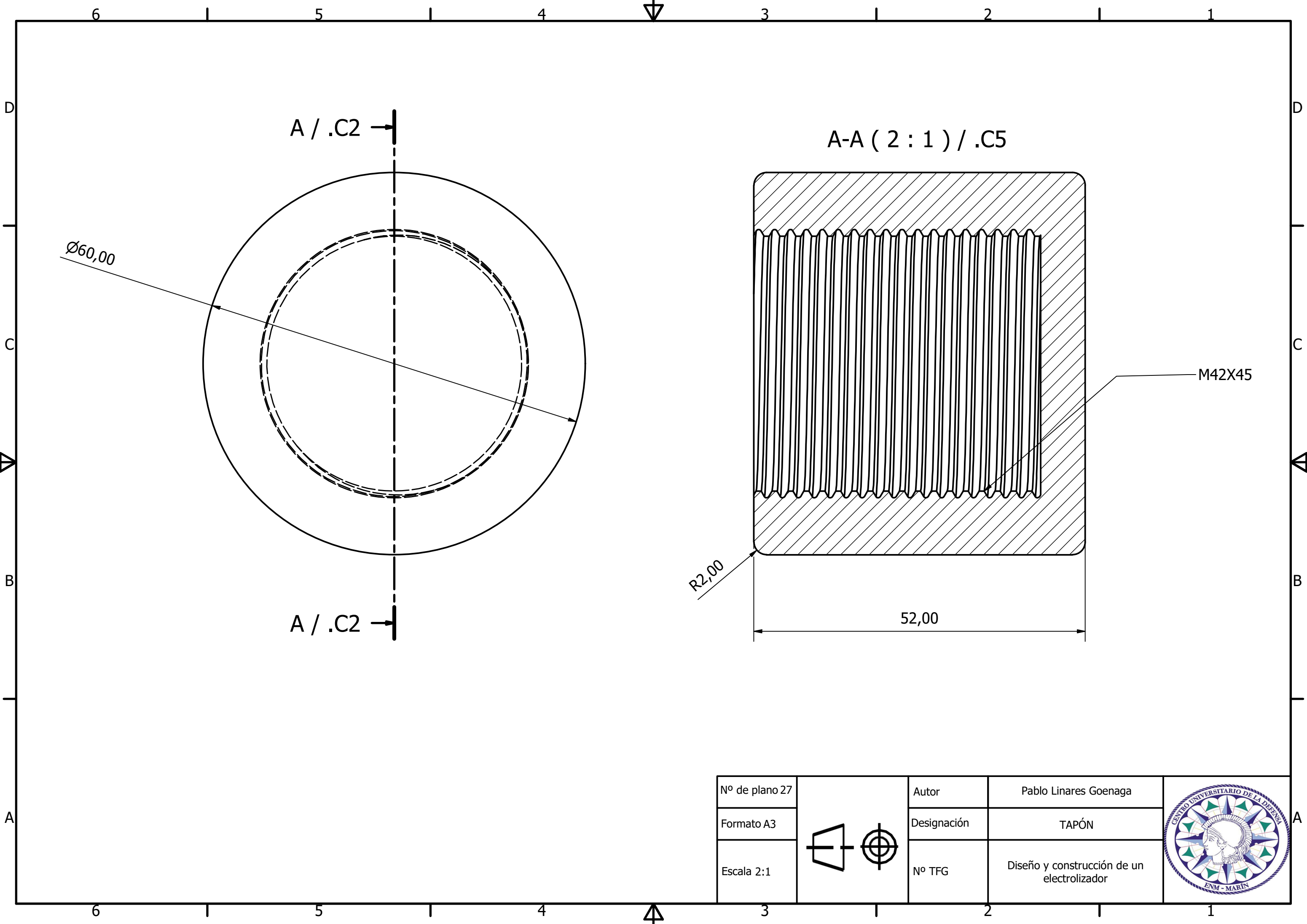
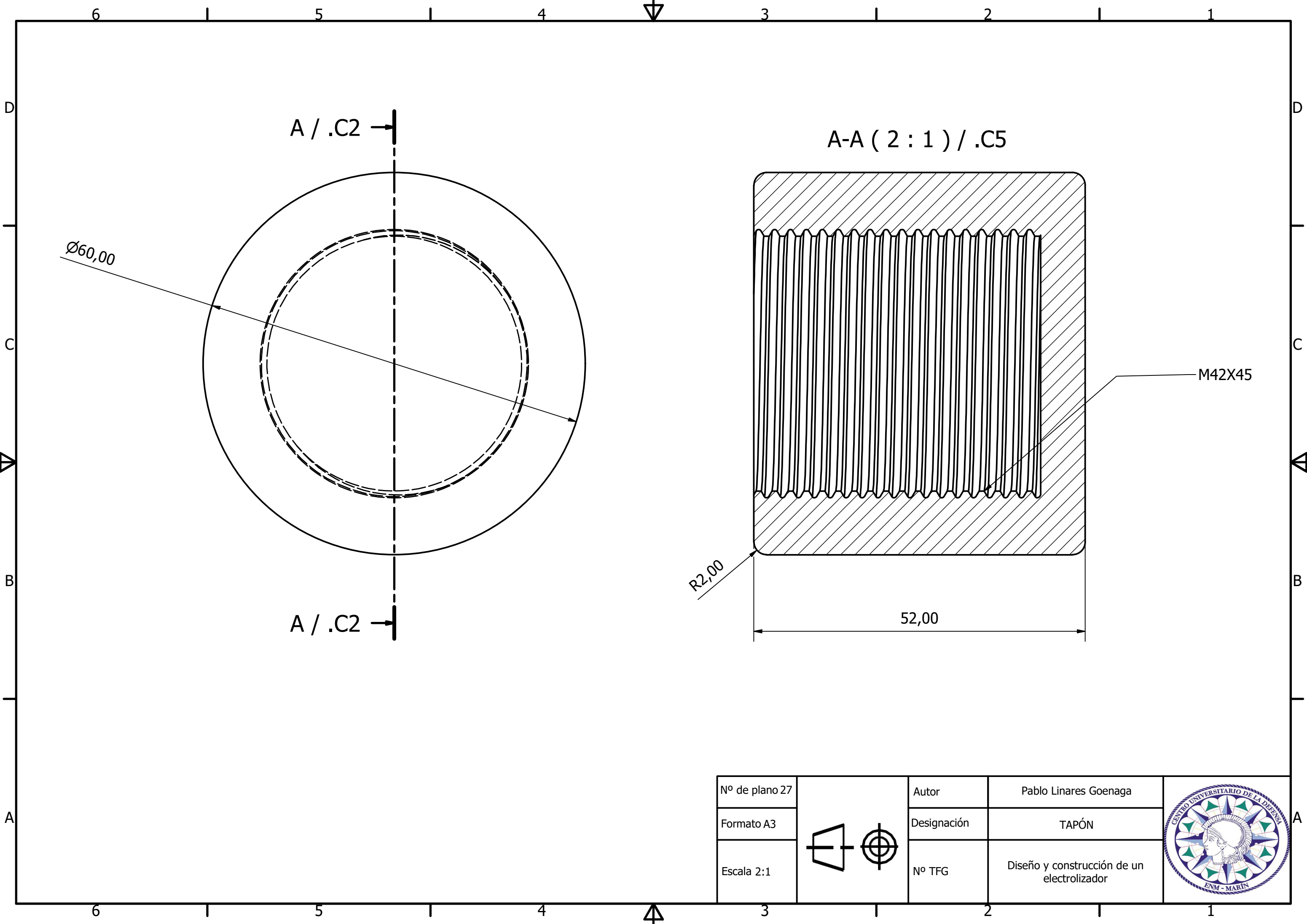
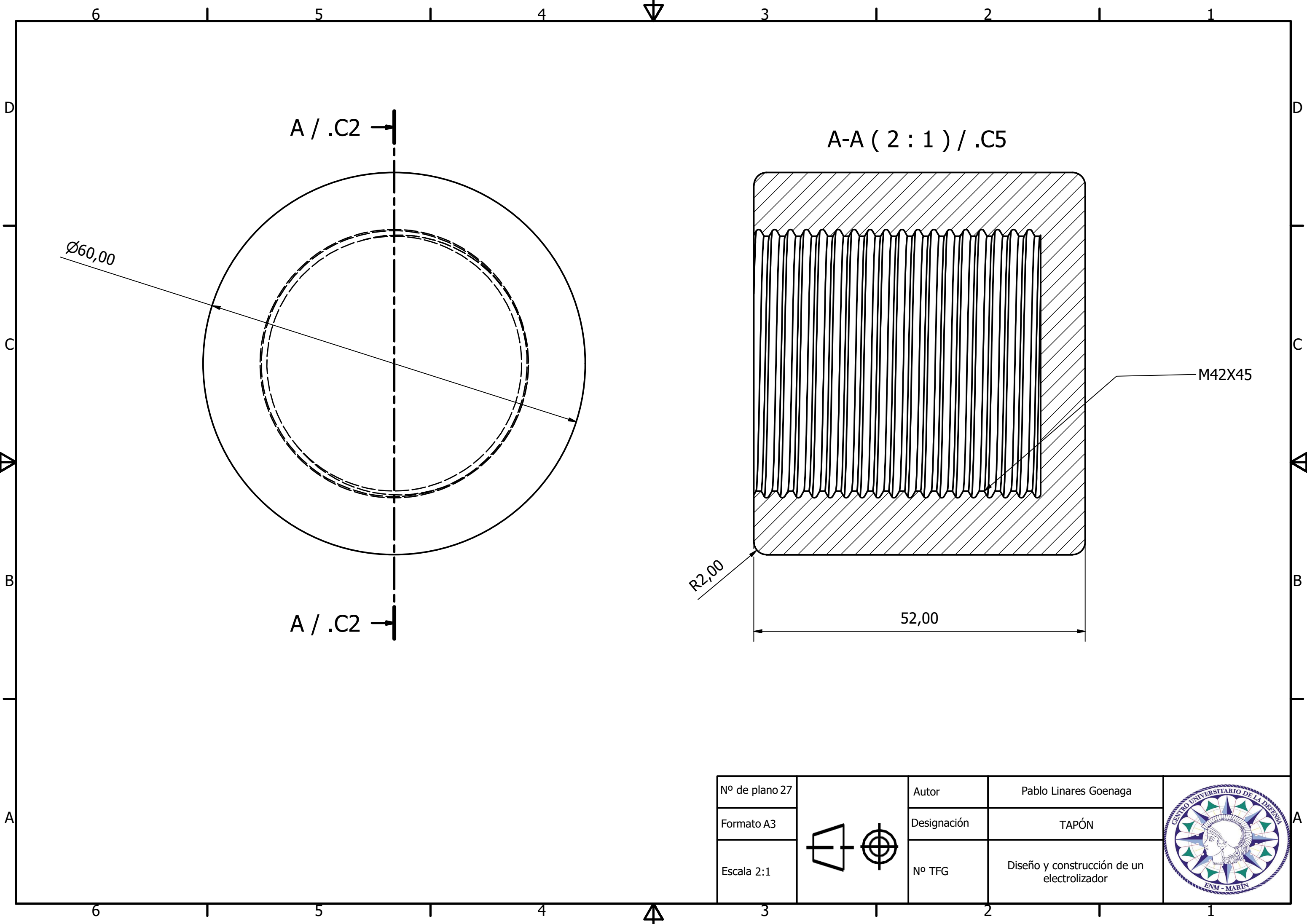
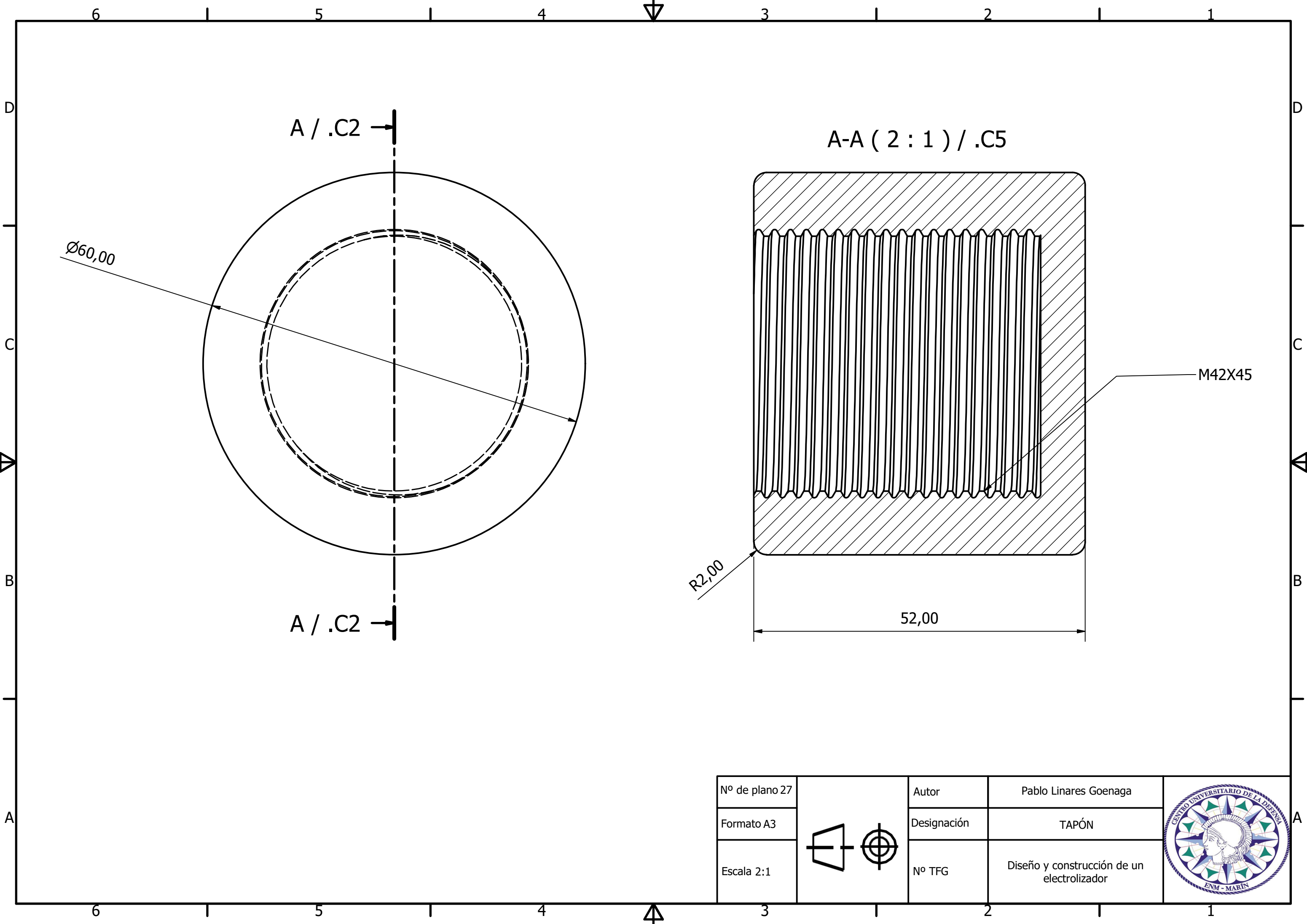
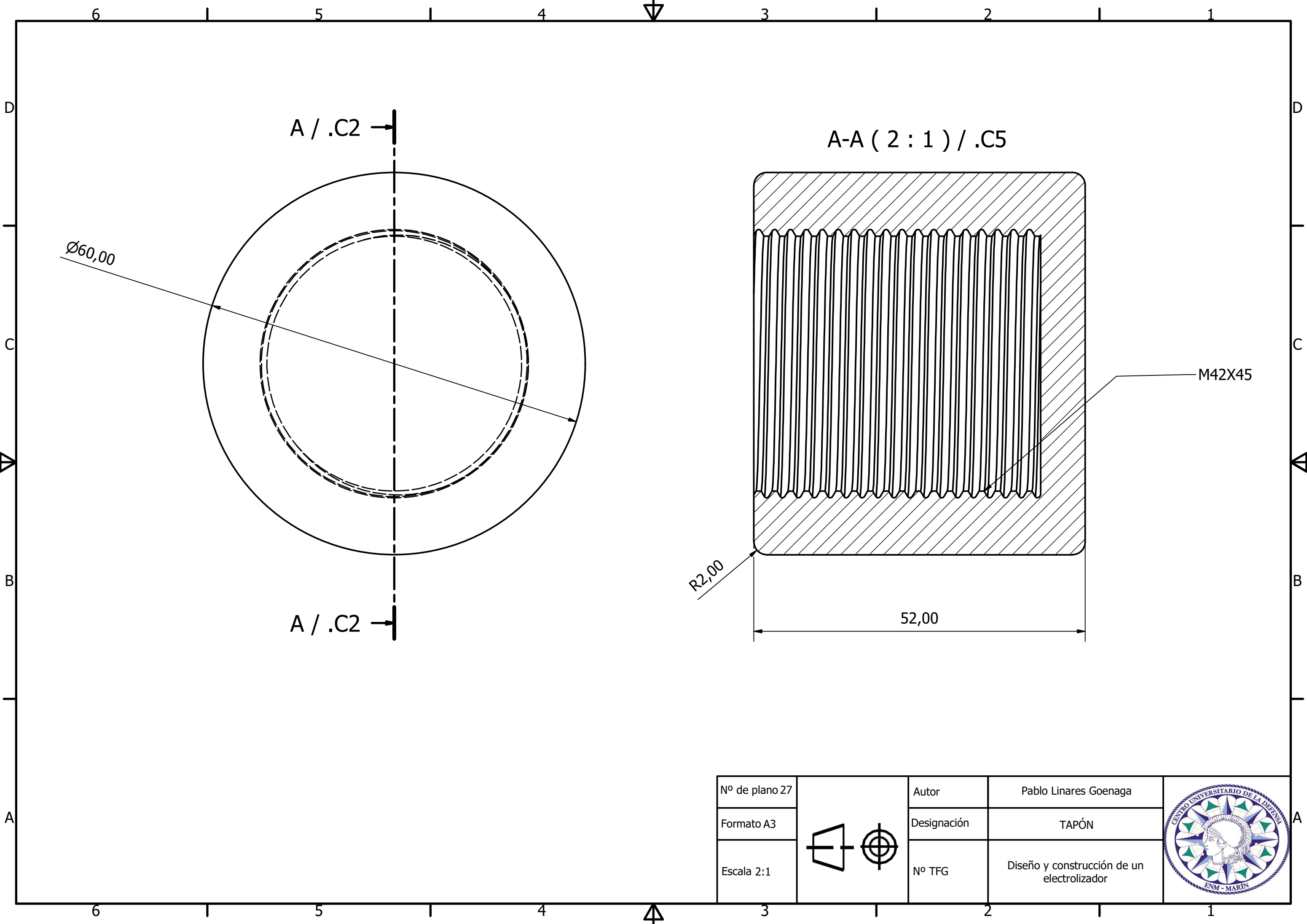
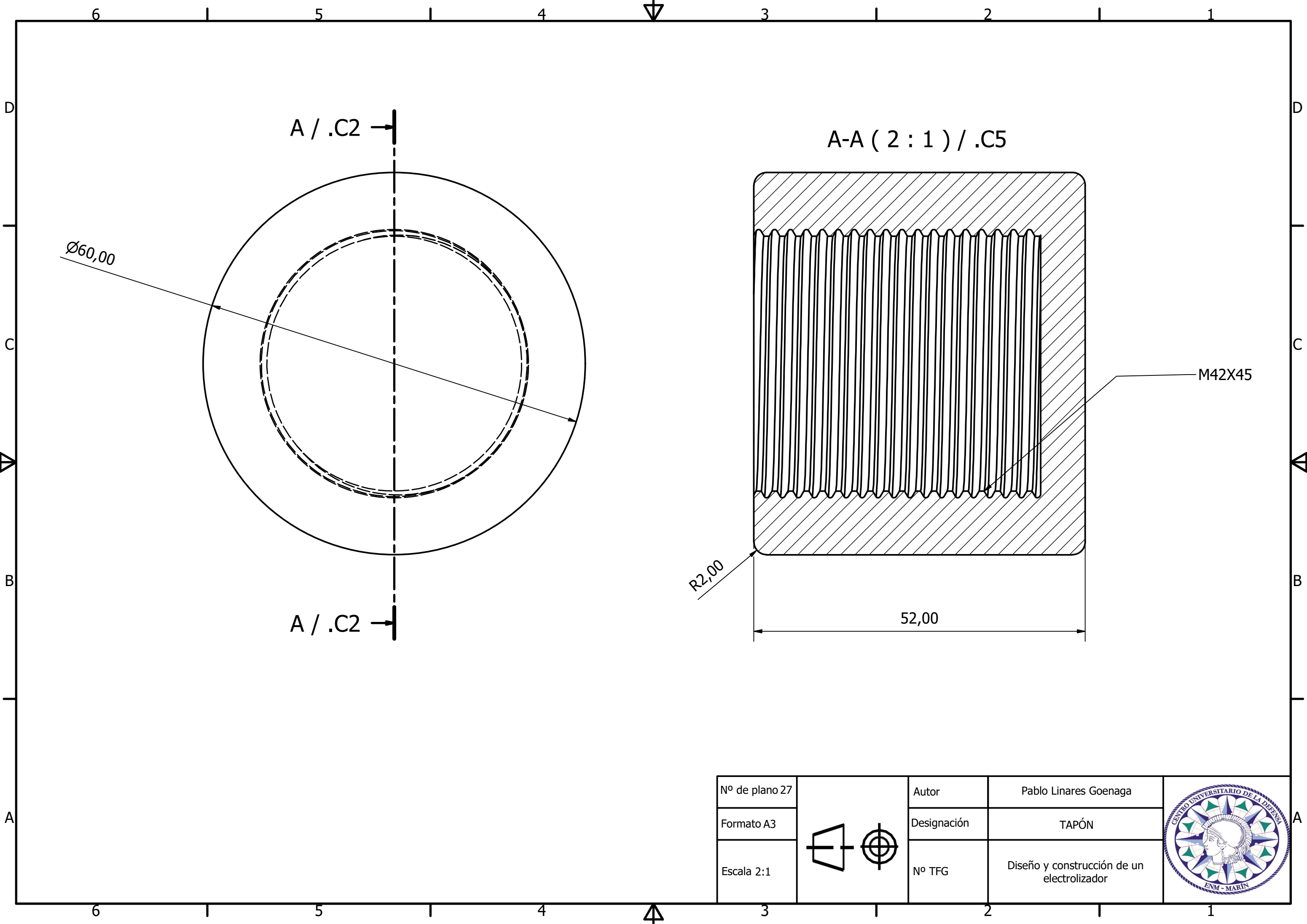
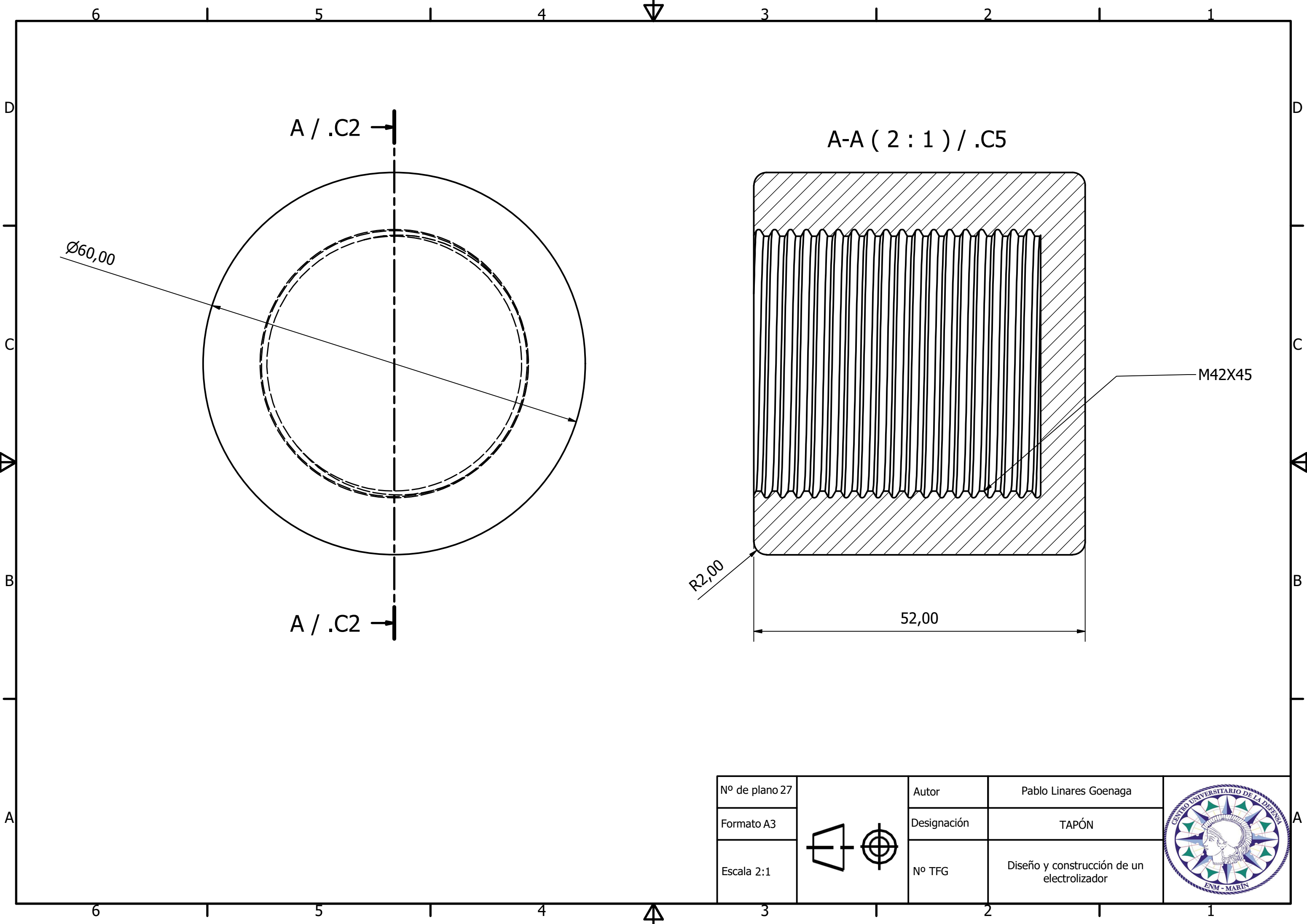
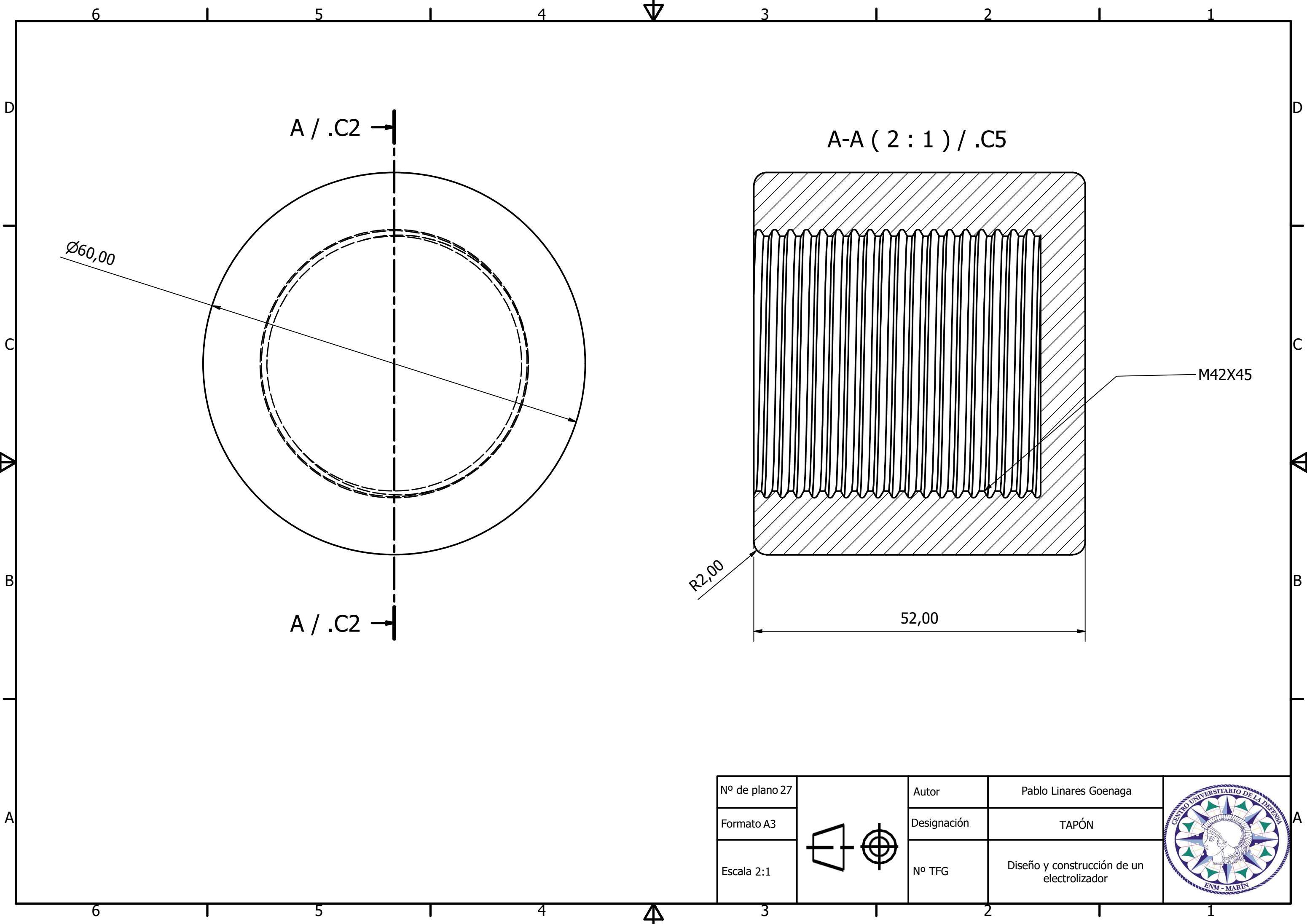
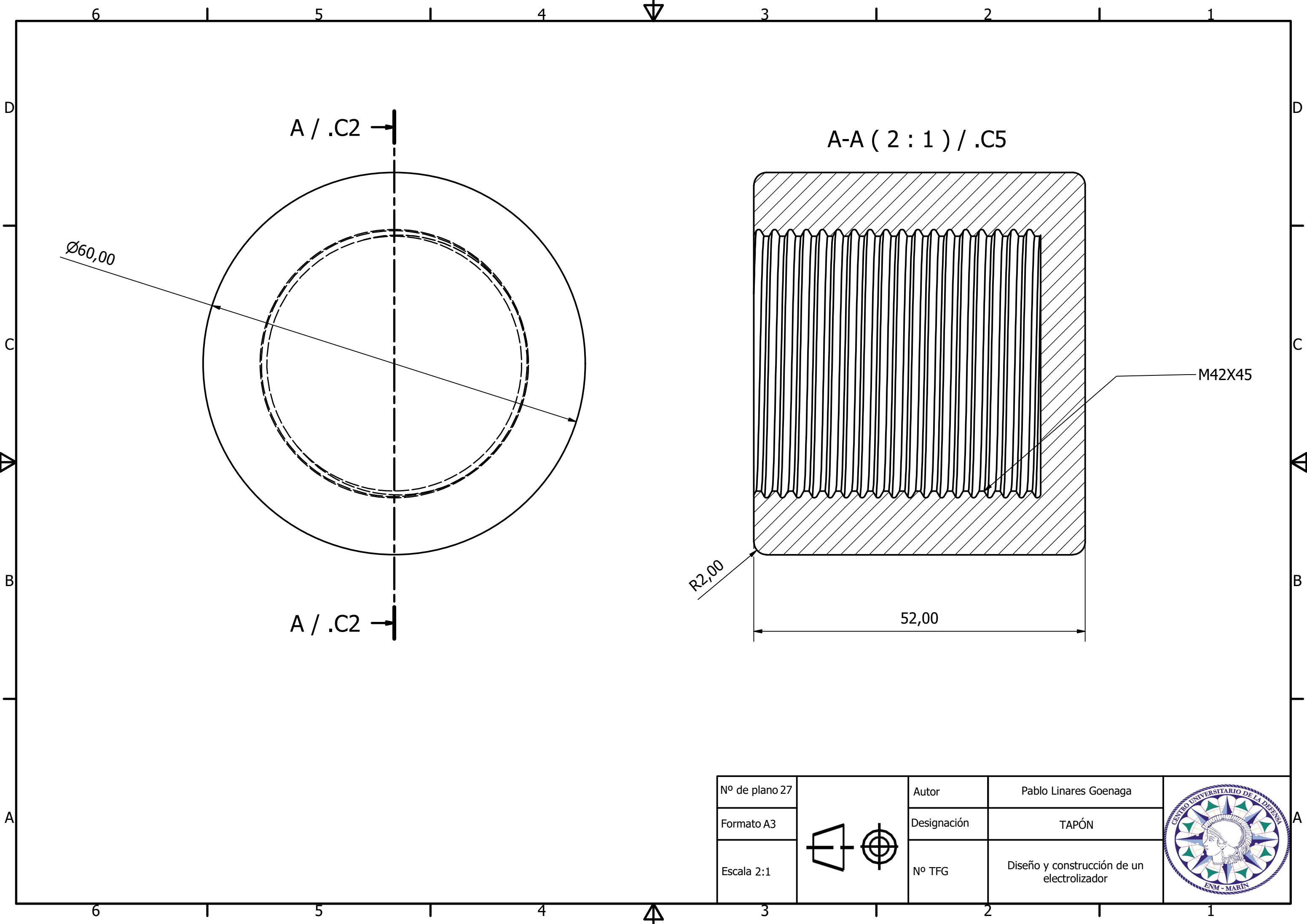
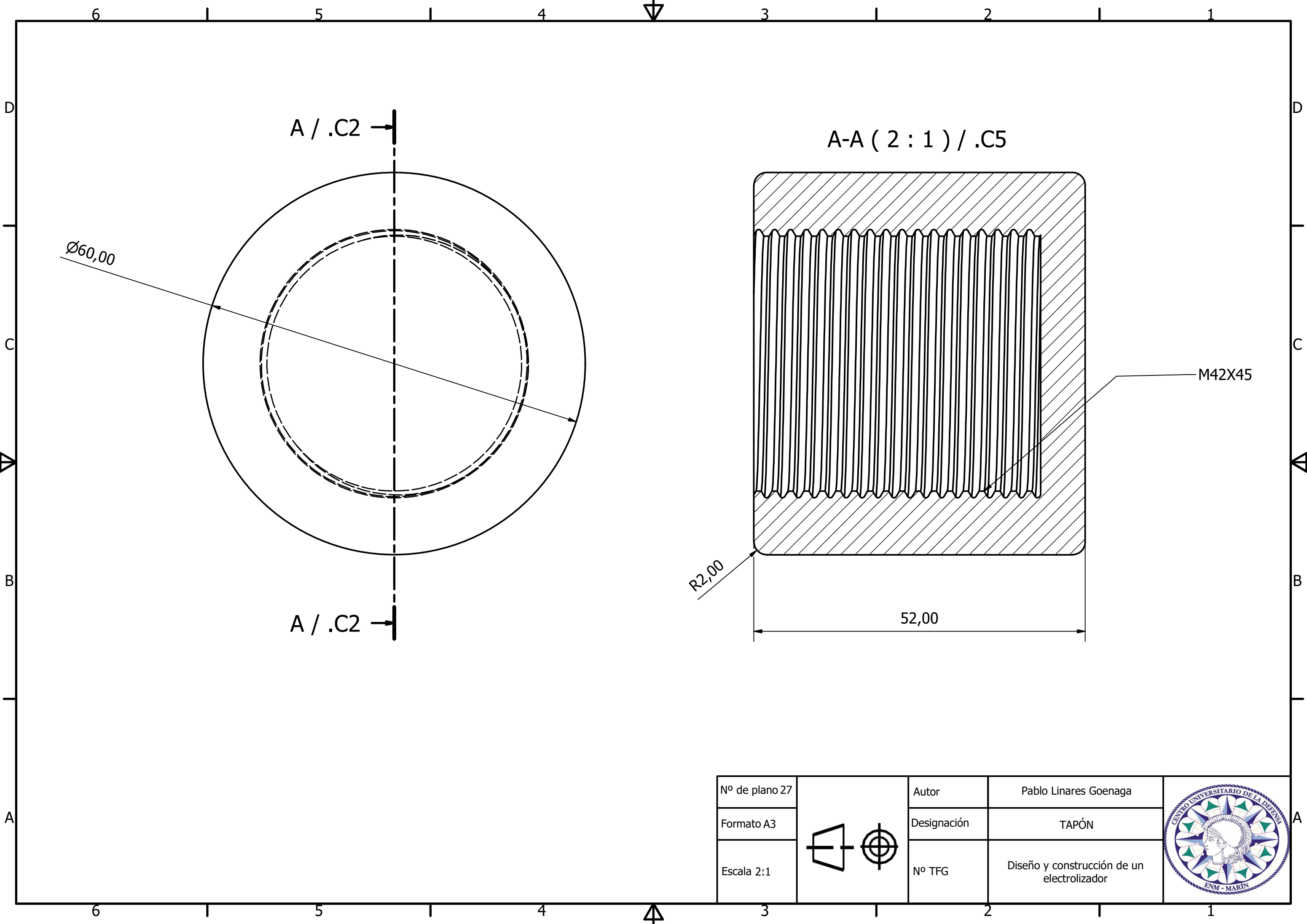
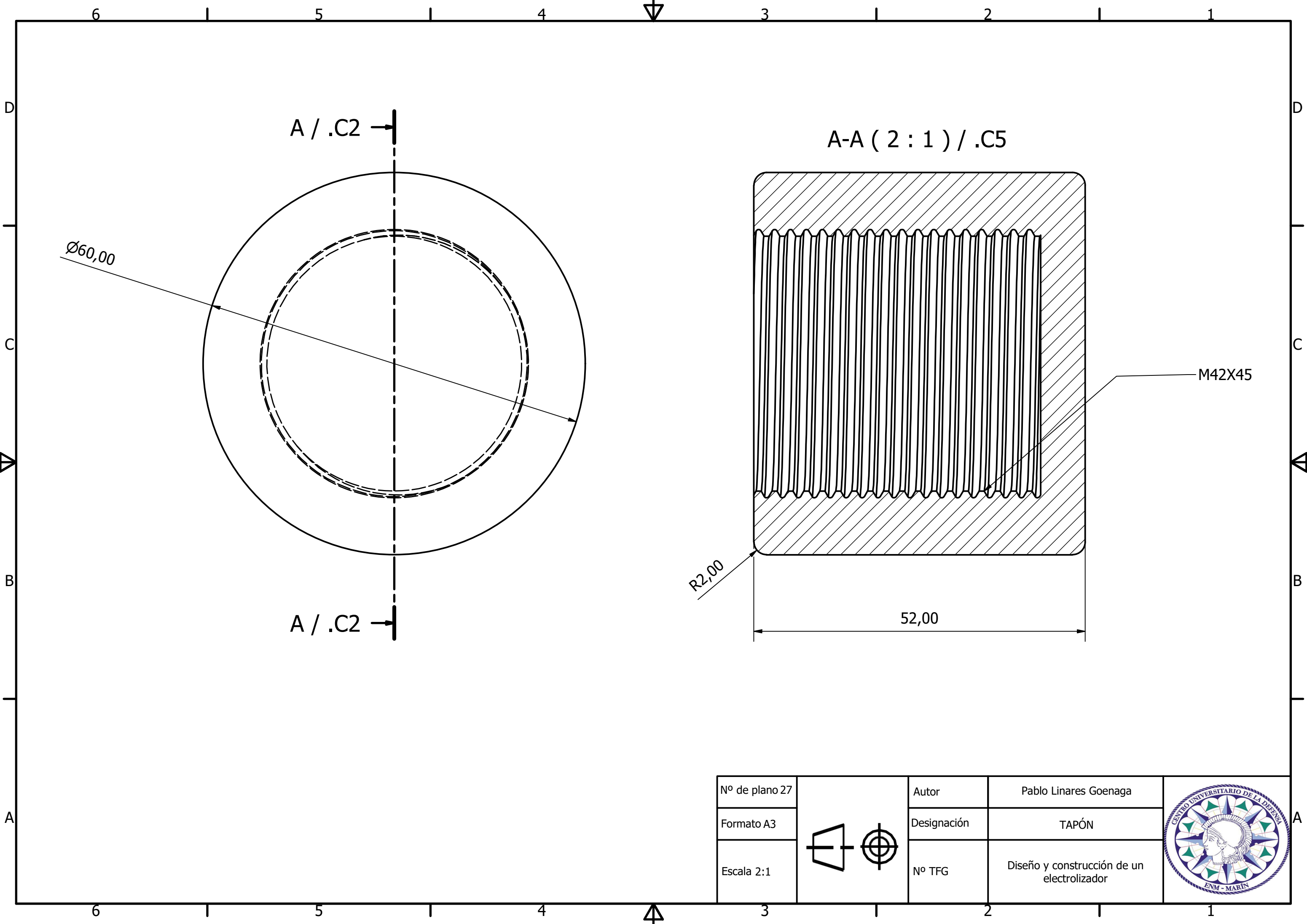
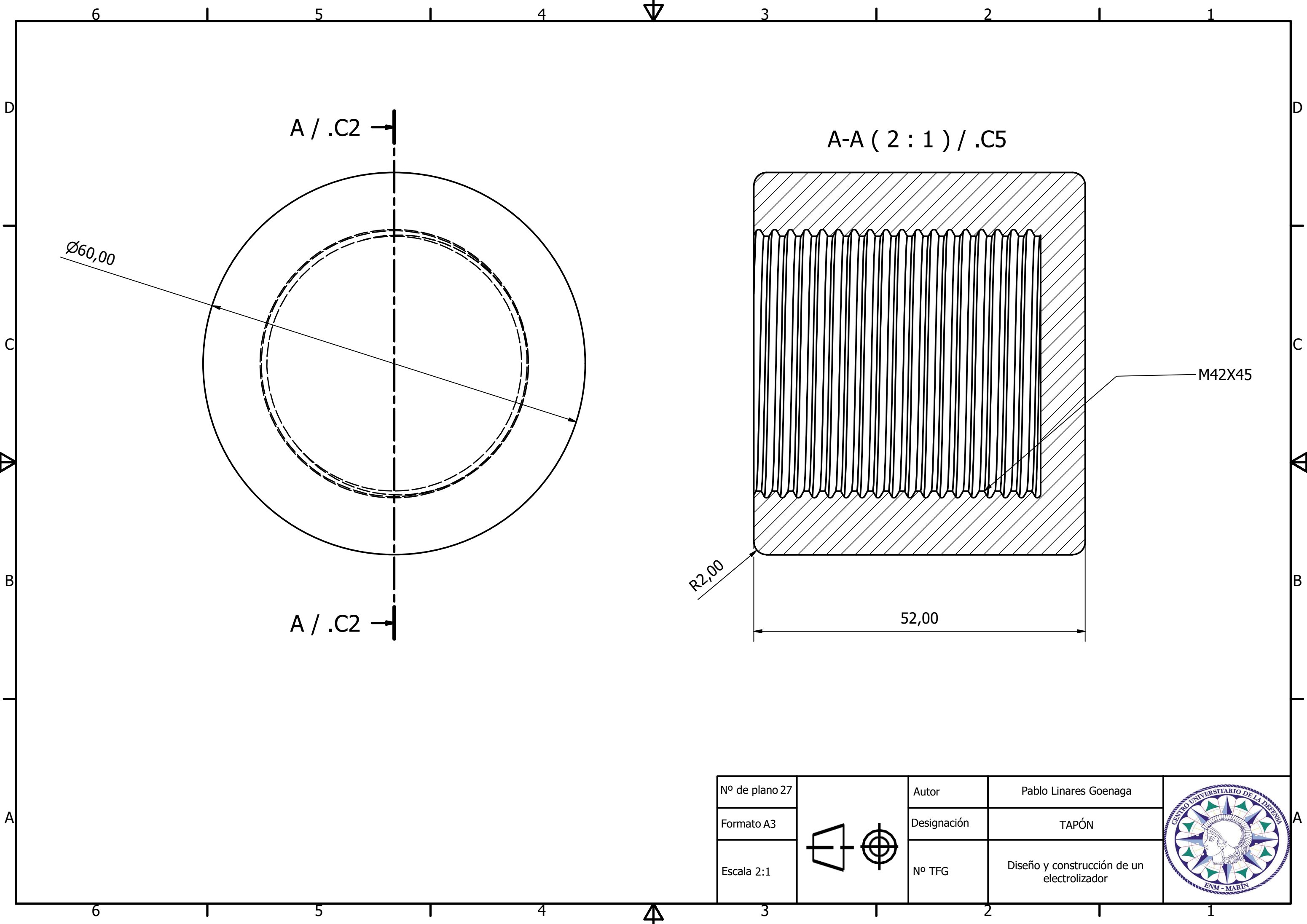
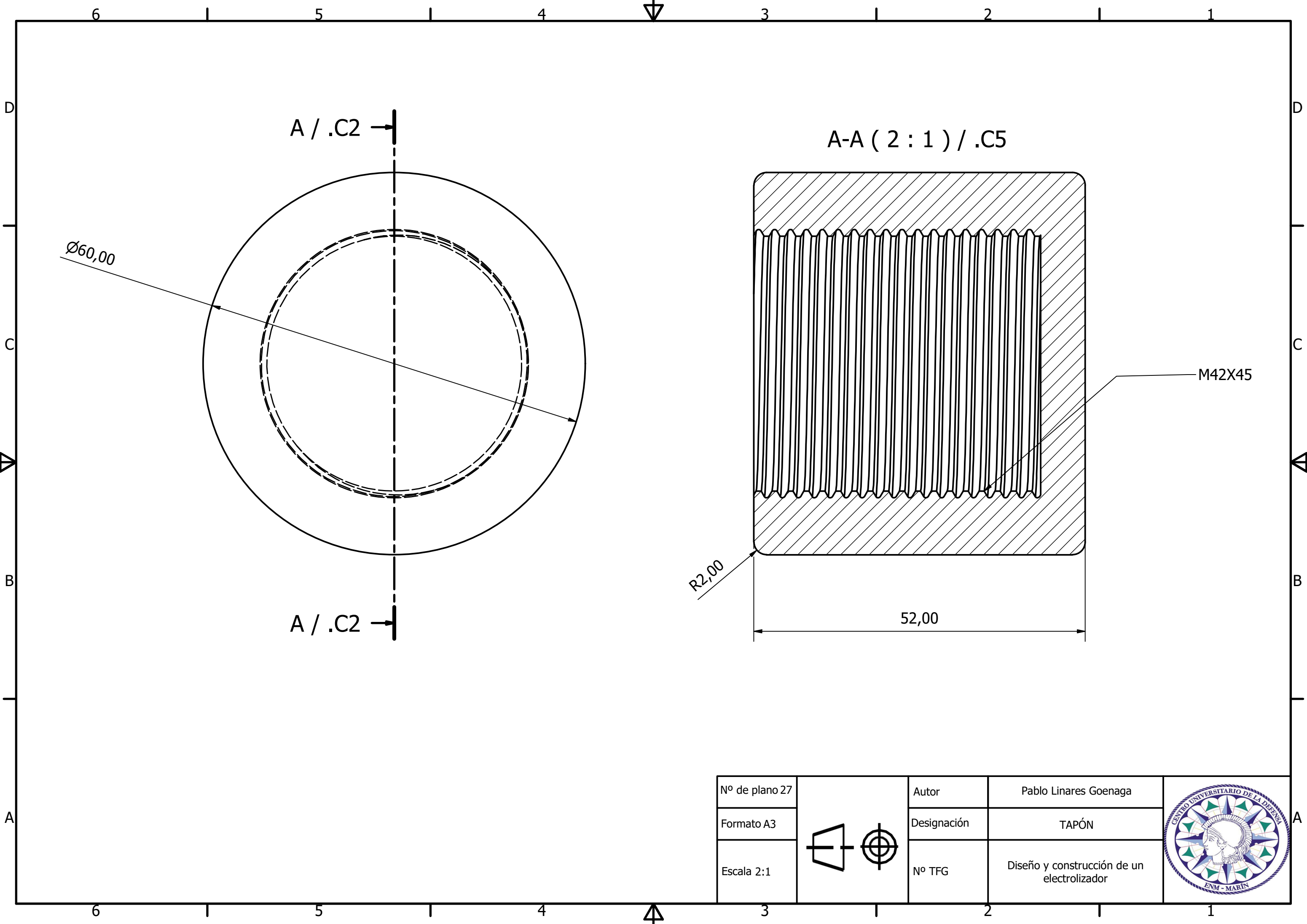
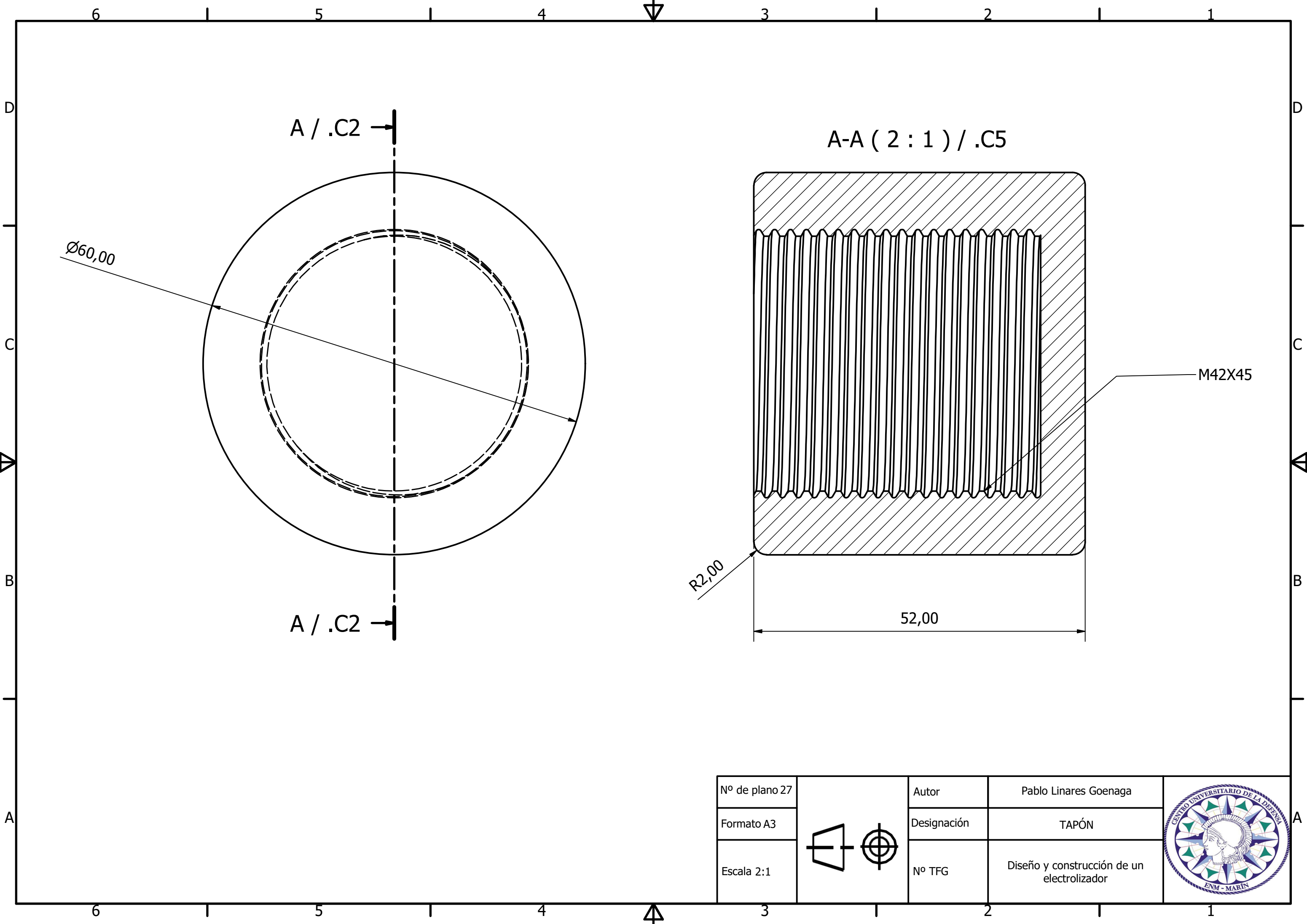
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 24 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA EMPUJADORA (SUPERIOR)                 |  |
| Escala 1:1,5   |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |

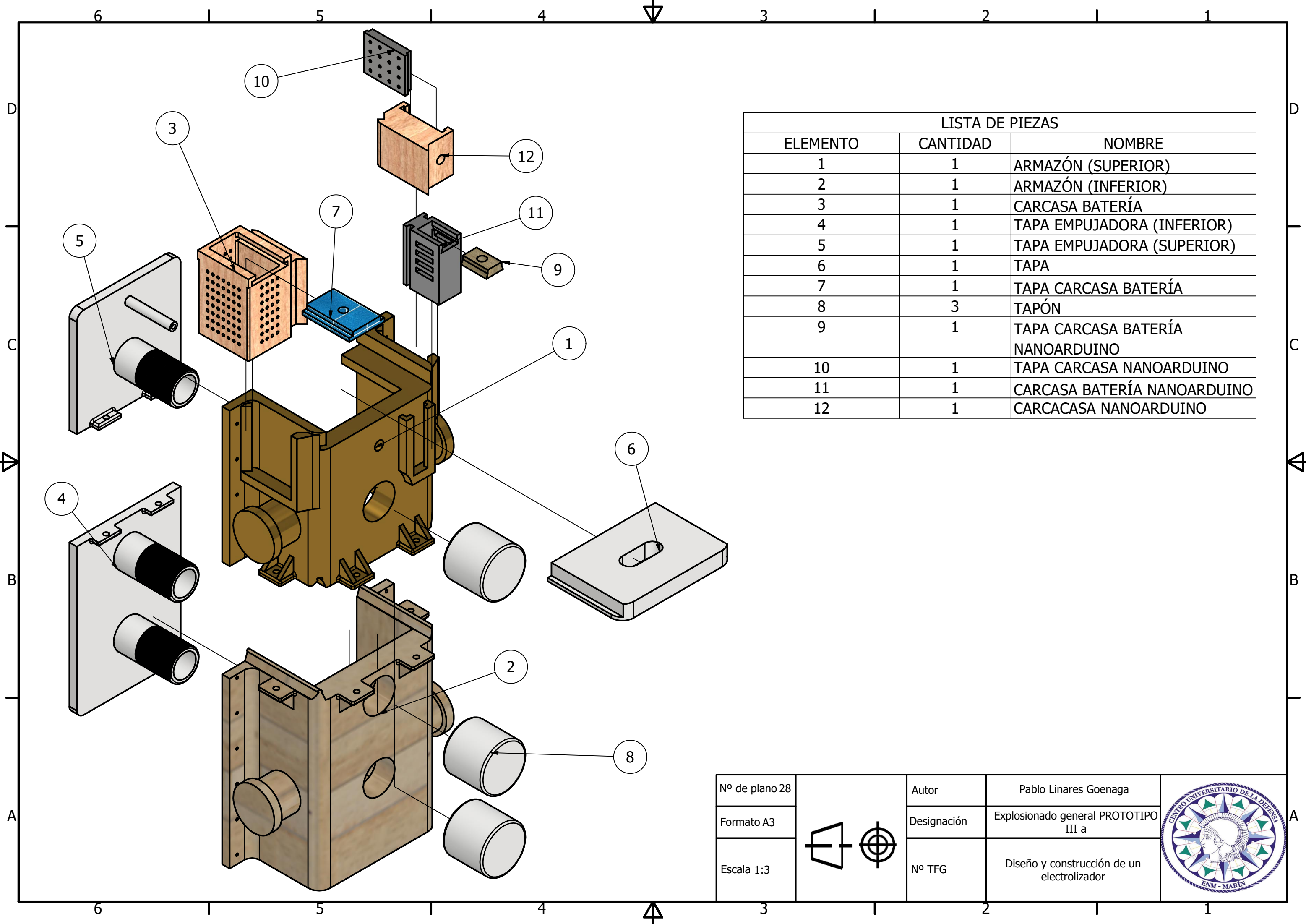


|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 25 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA                                       |  |
| Escala 1:1     |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



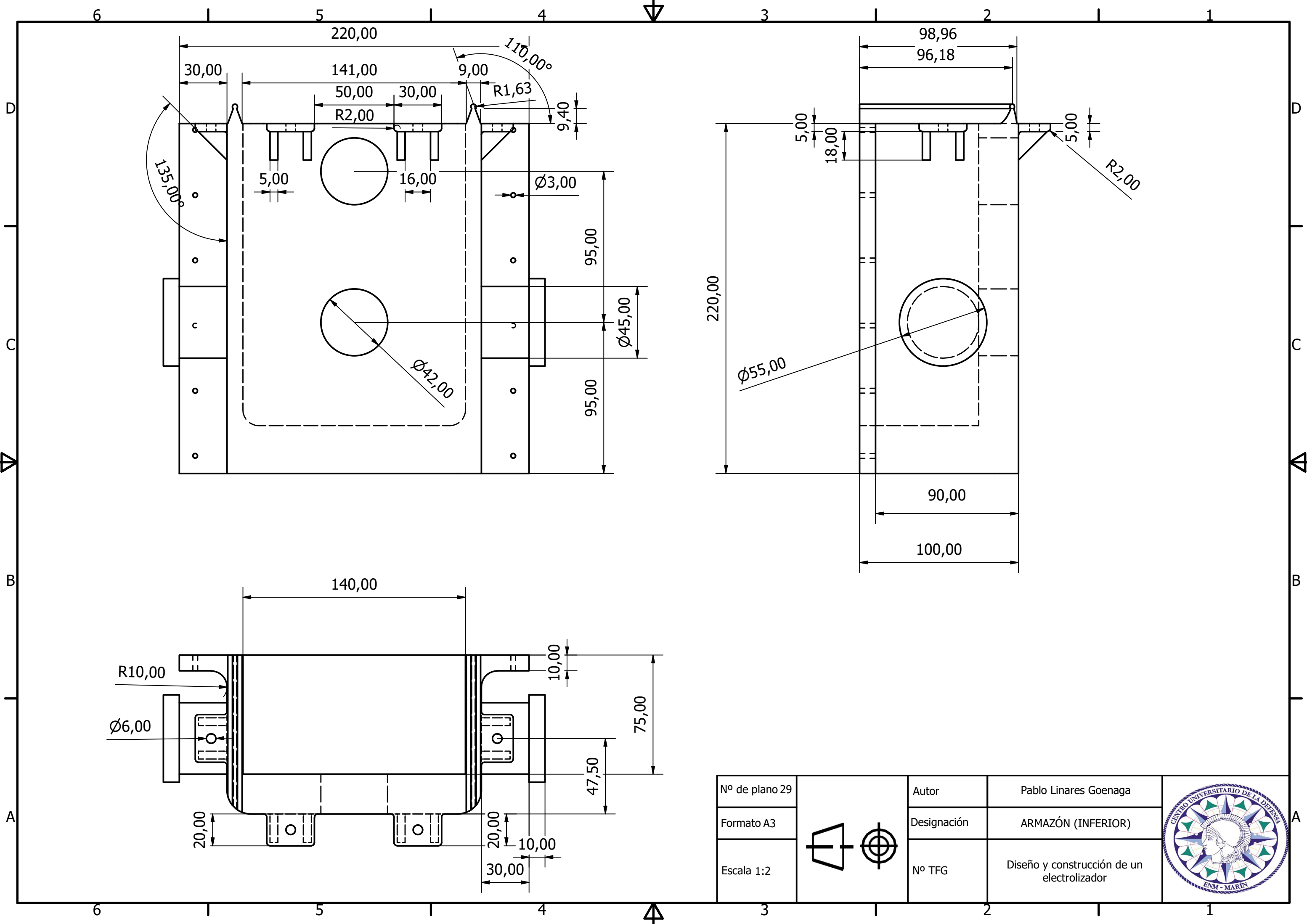
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 26 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA CARCASA BATERÍA                       |  |
| Escala 1:0,5   |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |

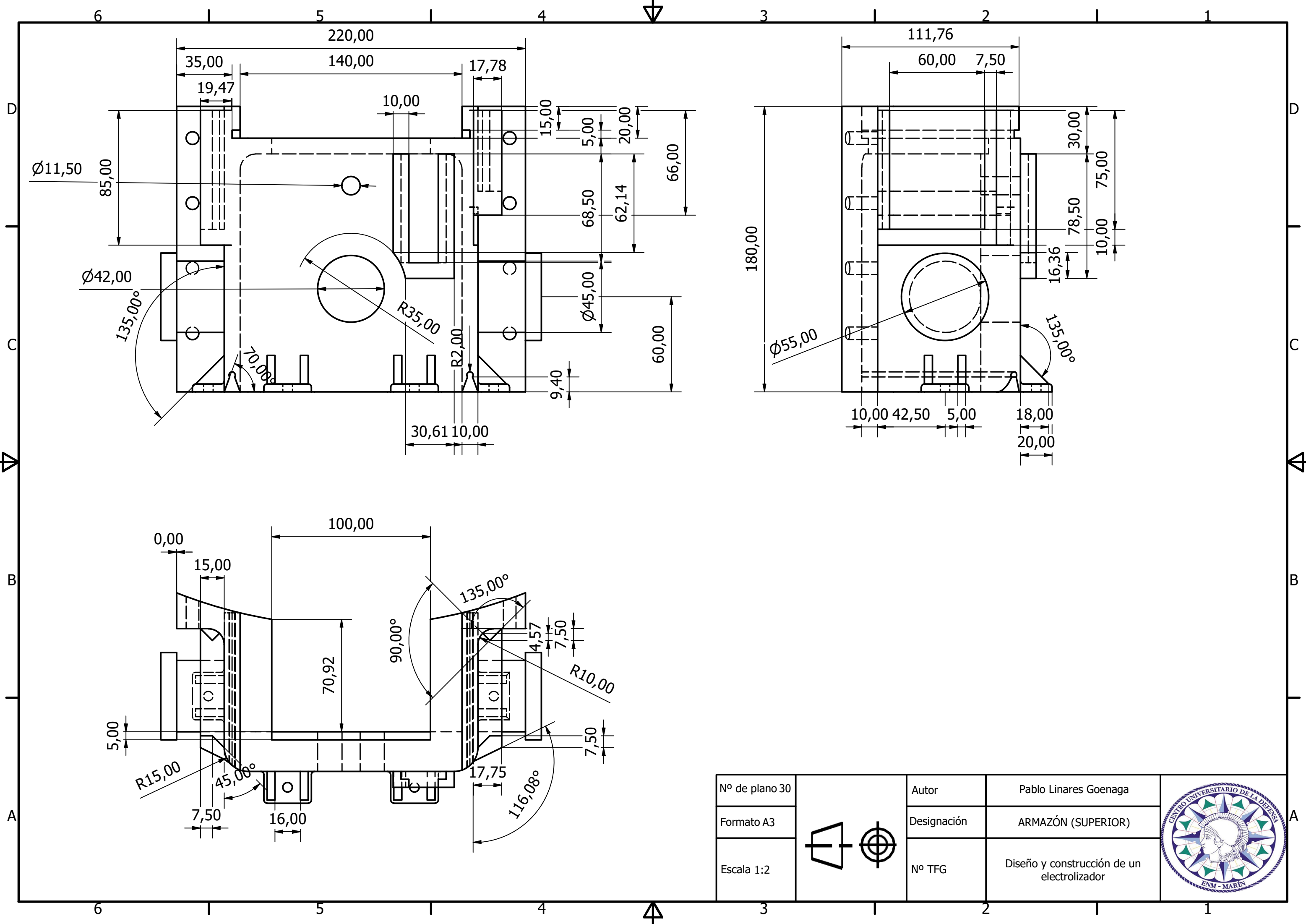


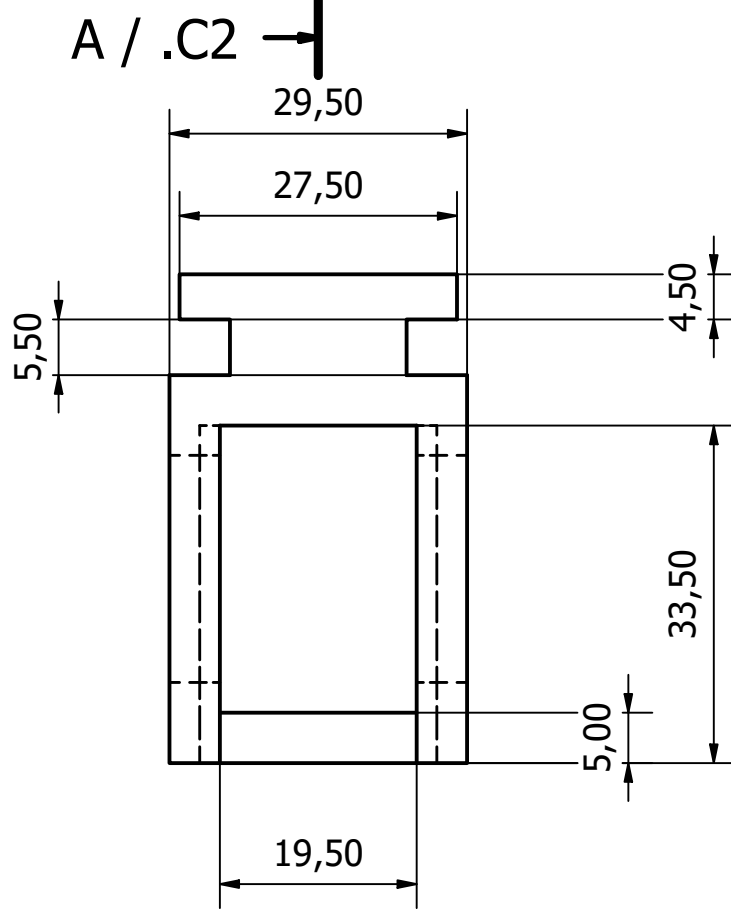
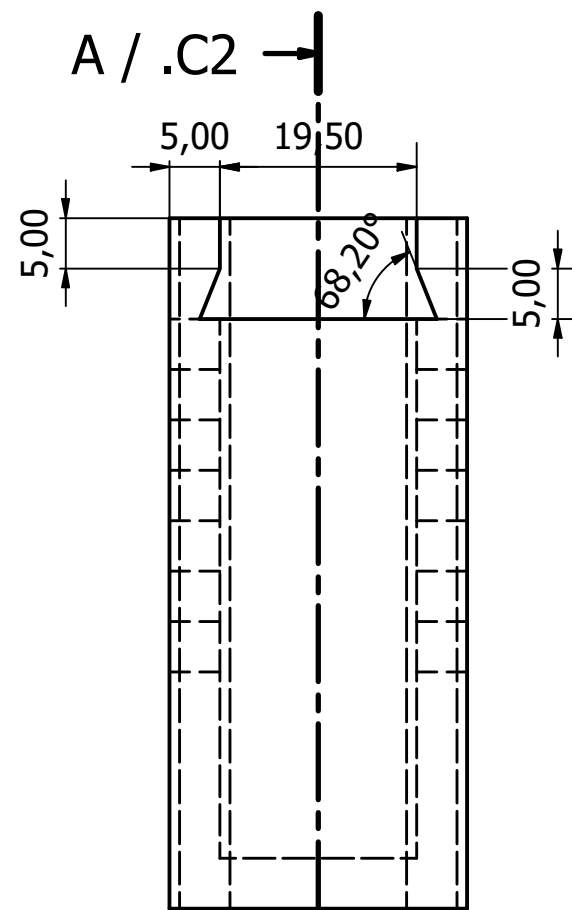


| LISTA DE PIEZAS |          |                                  |
|-----------------|----------|----------------------------------|
| ELEMENTO        | CANTIDAD | NOMBRE                           |
| 1               | 1        | ARMAZÓN (SUPERIOR)               |
| 2               | 1        | ARMAZÓN (INFERIOR)               |
| 3               | 1        | CARCASA BATERÍA                  |
| 4               | 1        | TAPA EMPUJADORA (INFERIOR)       |
| 5               | 1        | TAPA EMPUJADORA (SUPERIOR)       |
| 6               | 1        | TAPA                             |
| 7               | 1        | TAPA CARCASA BATERÍA             |
| 8               | 3        | TAPÓN                            |
| 9               | 1        | TAPA CARCASA BATERÍA NANOARDUINO |
| 10              | 1        | TAPA CARCASA NANOARDUINO         |
| 11              | 1        | CARCASA BATERÍA NANOARDUINO      |
| 12              | 1        | CARCACASA NANOARDUINO            |

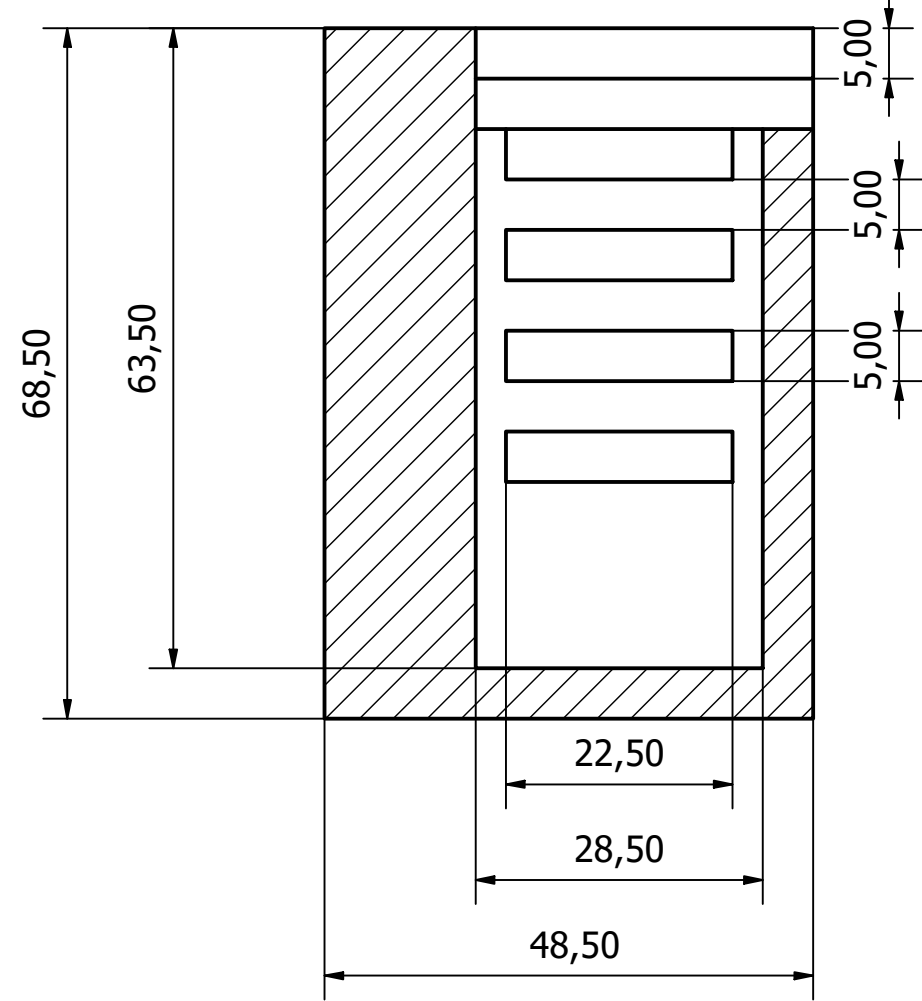
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 28 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | Explosionado general PROTOTIPO III a       |  |
| Escala 1:3     |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



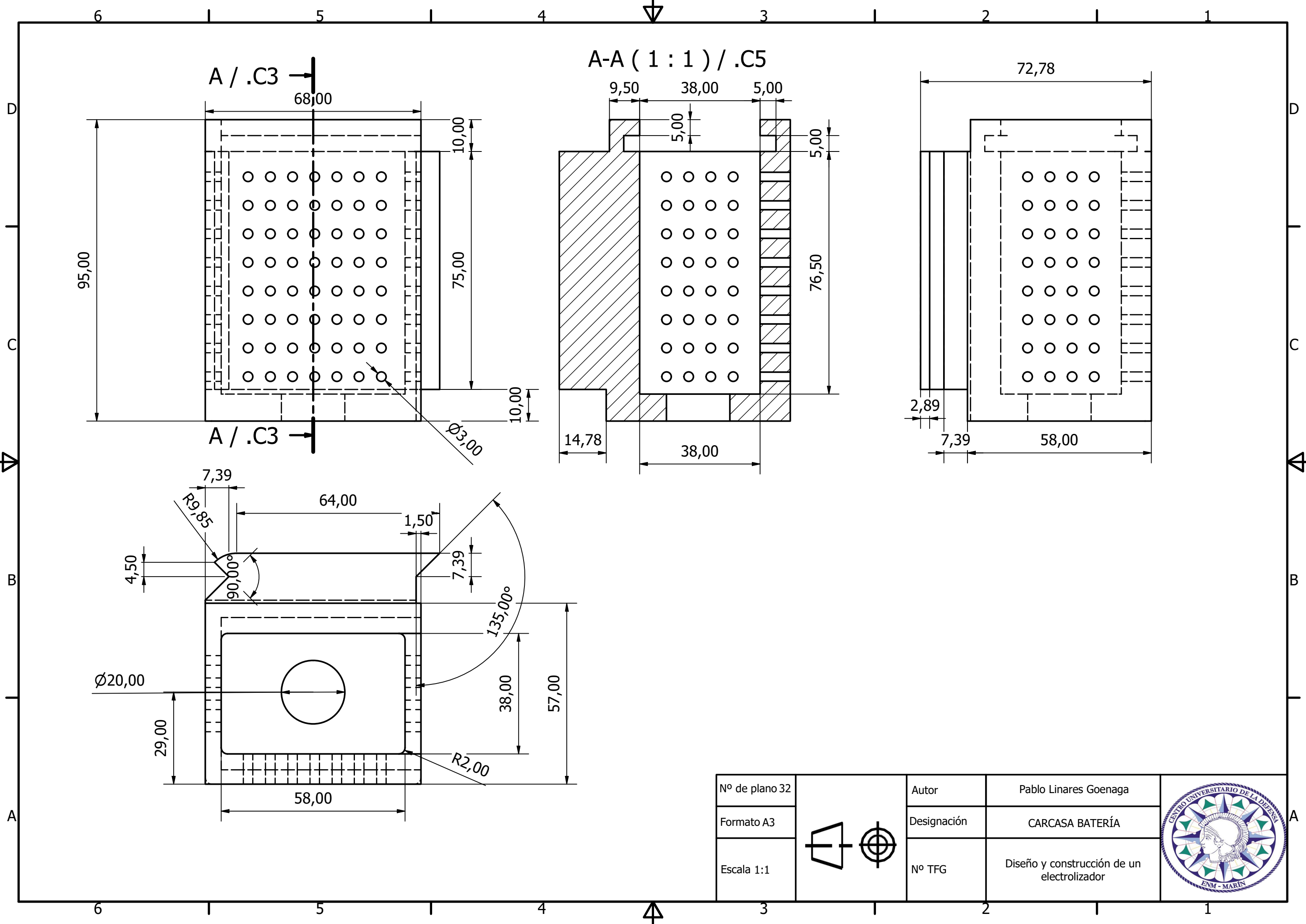


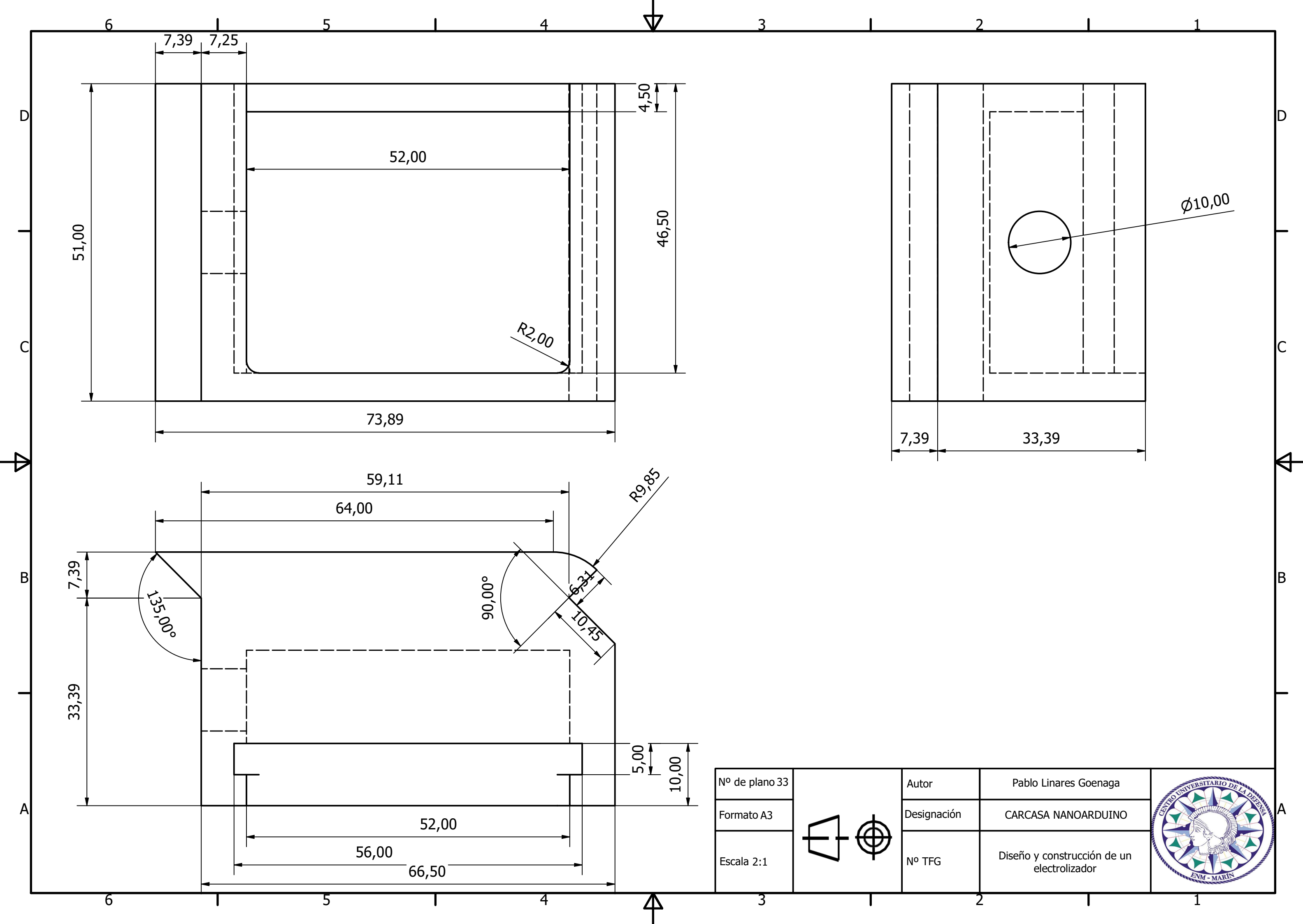


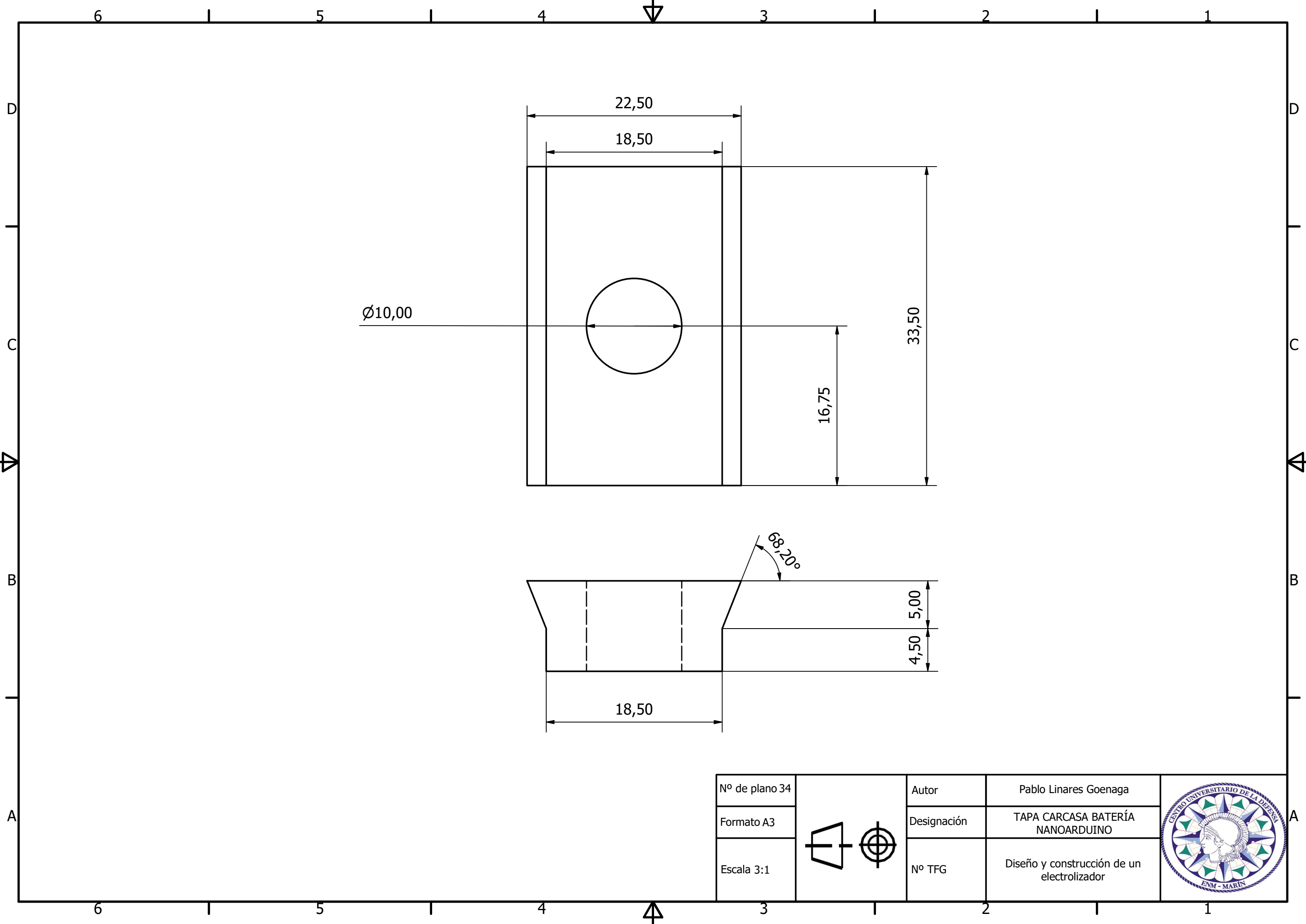
A-A ( 1 : 0,75 ) / .C5

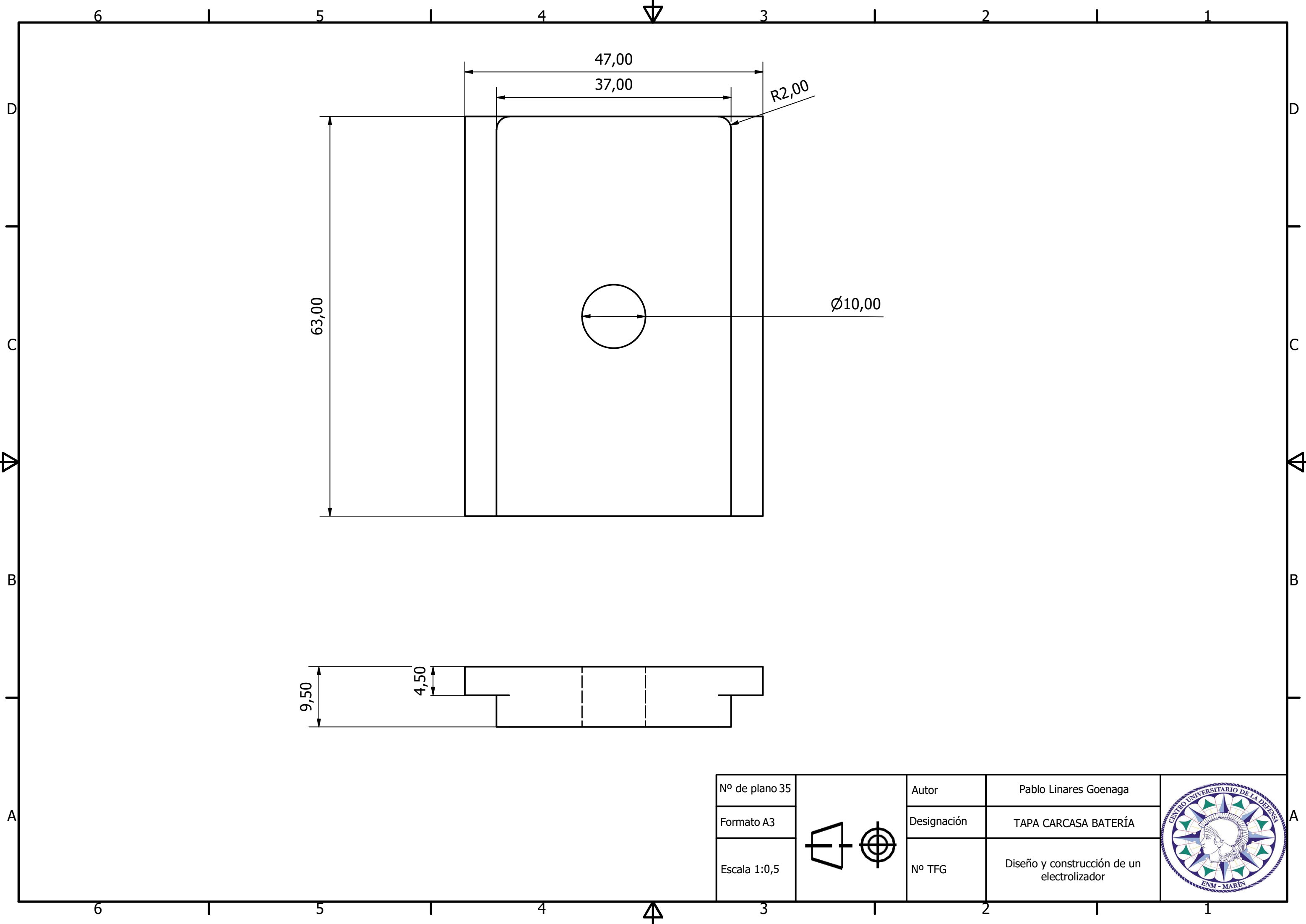


|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 31 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | CARCASA BATERÍA NANOARDUINO                |  |
| Escala 1:0,75  |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |

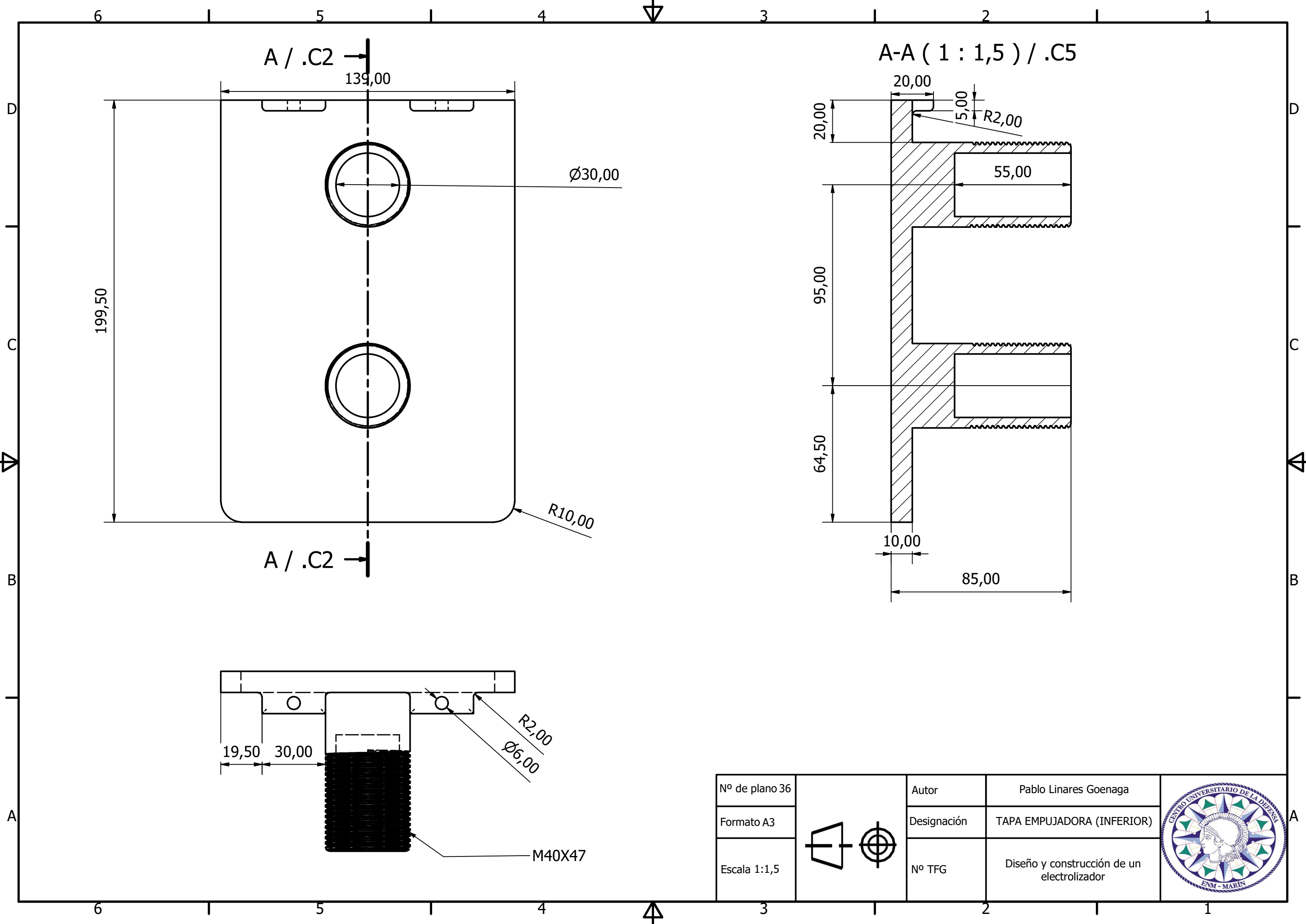




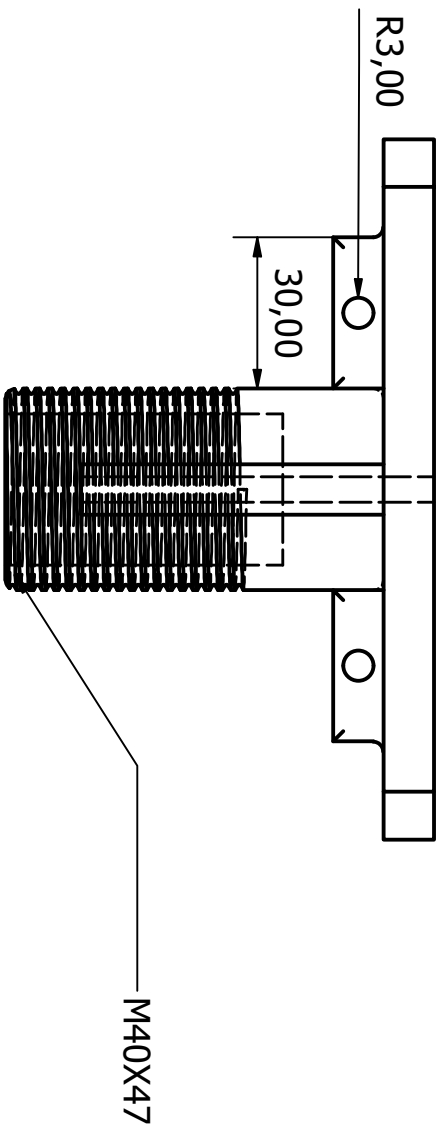
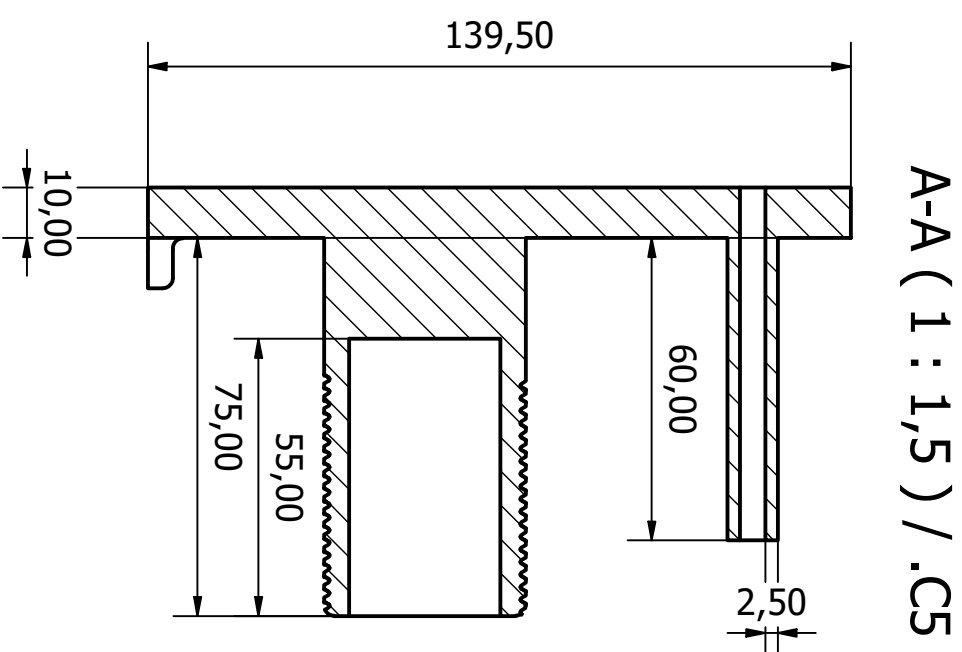
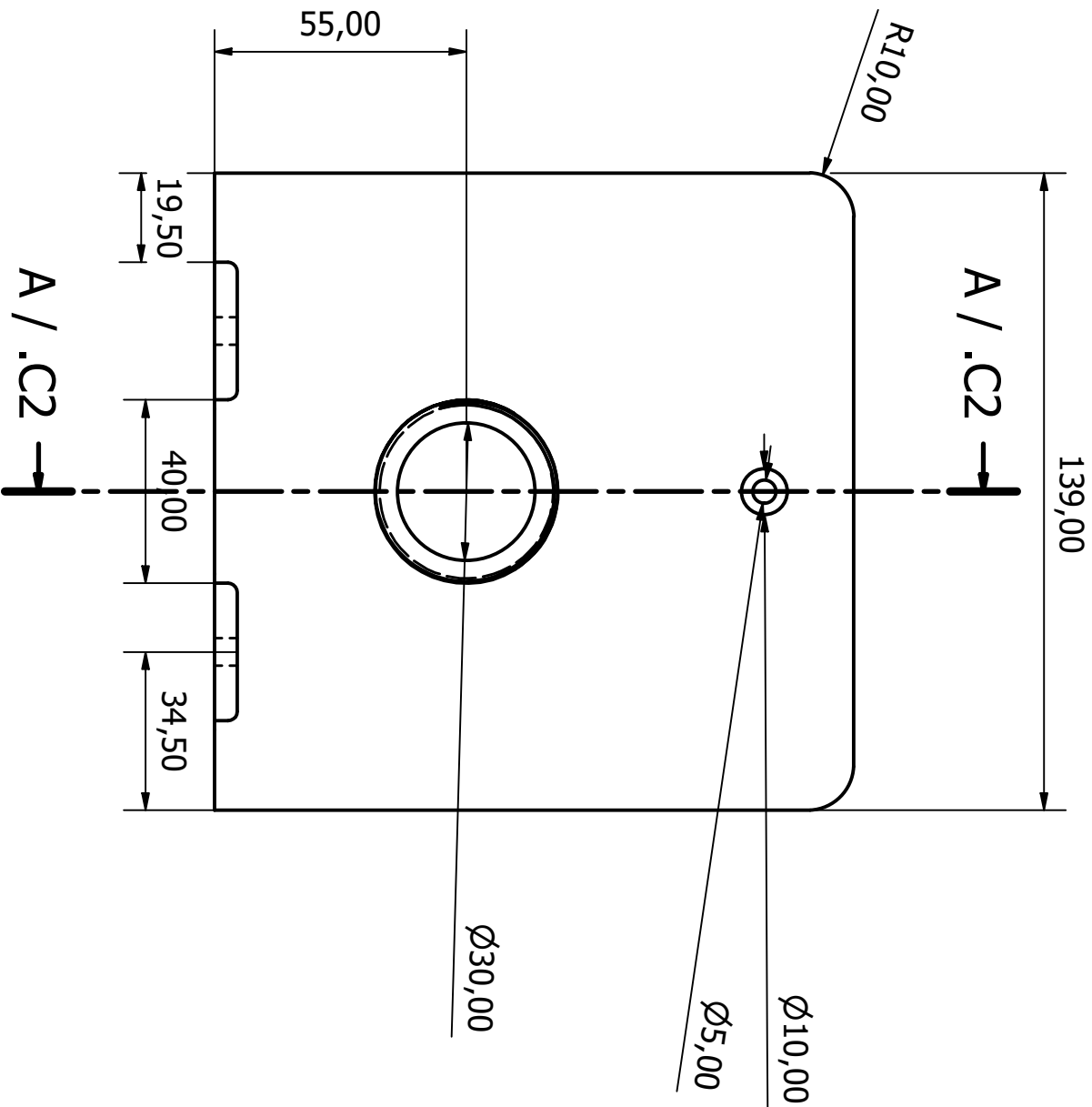




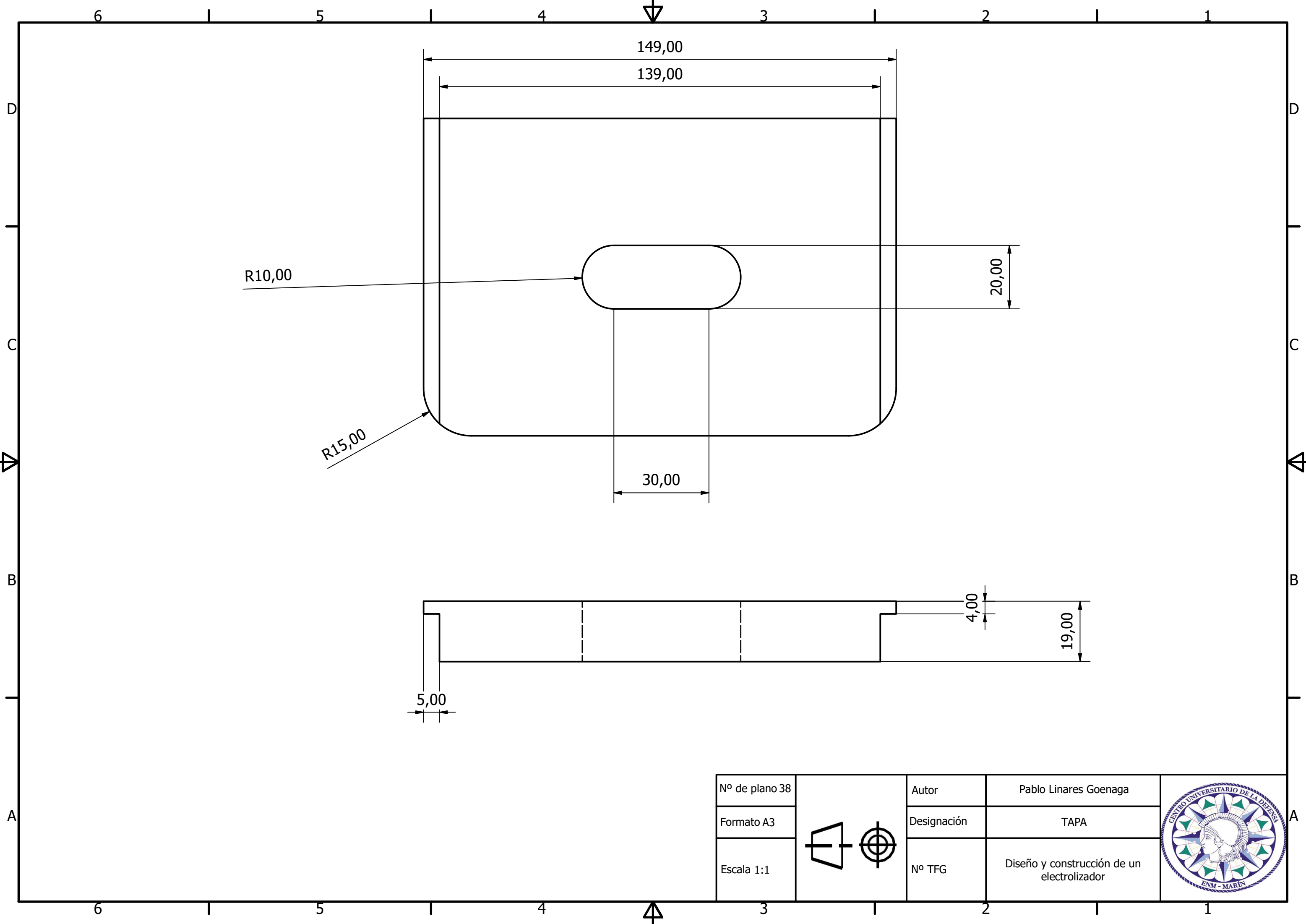
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 35 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA CARCASA BATERÍA                       |  |
| Escala 1:0,5   |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



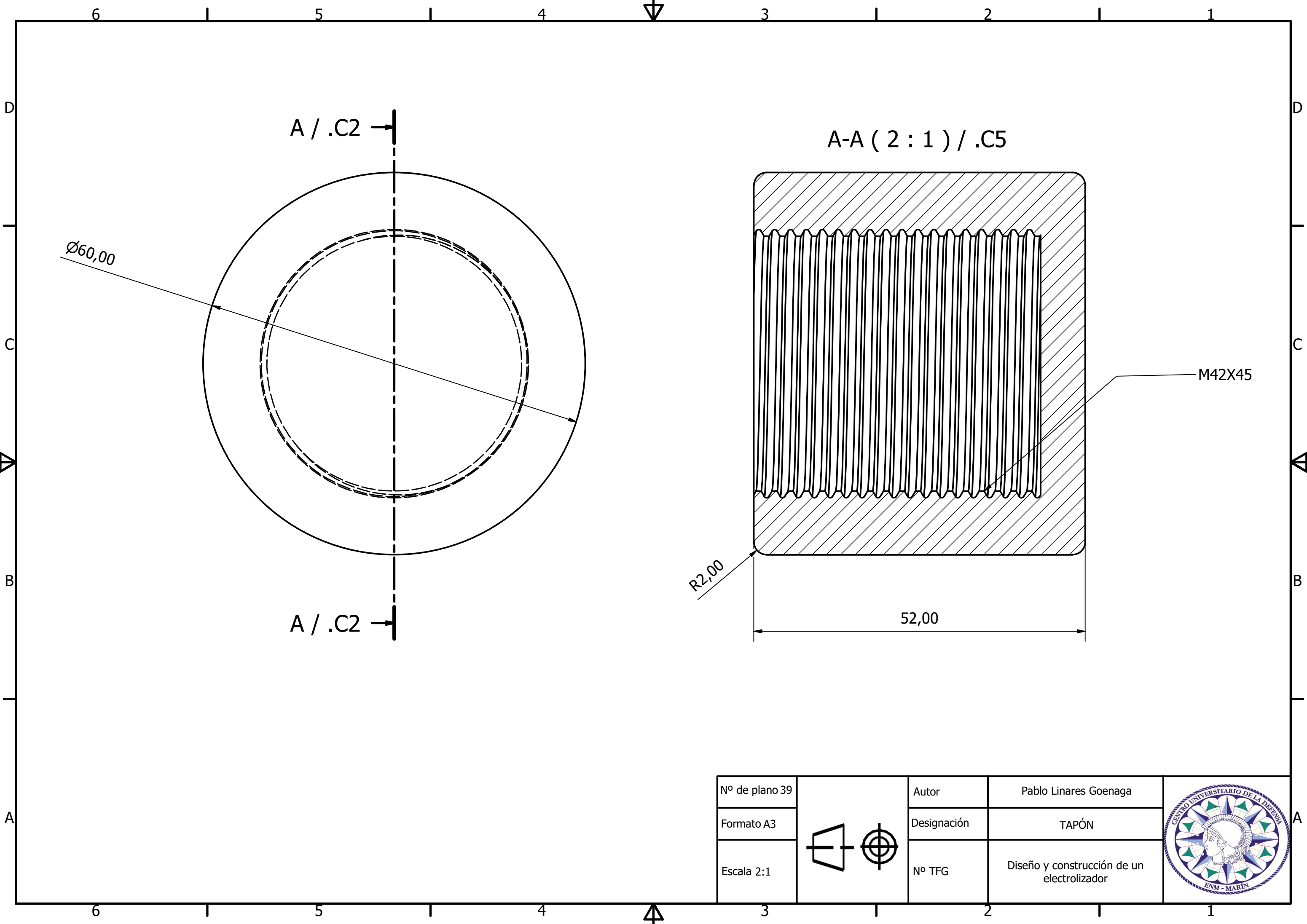
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 36 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA EMPUJADORA (INFERIOR)                 |  |
| Escala 1:1,5   |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



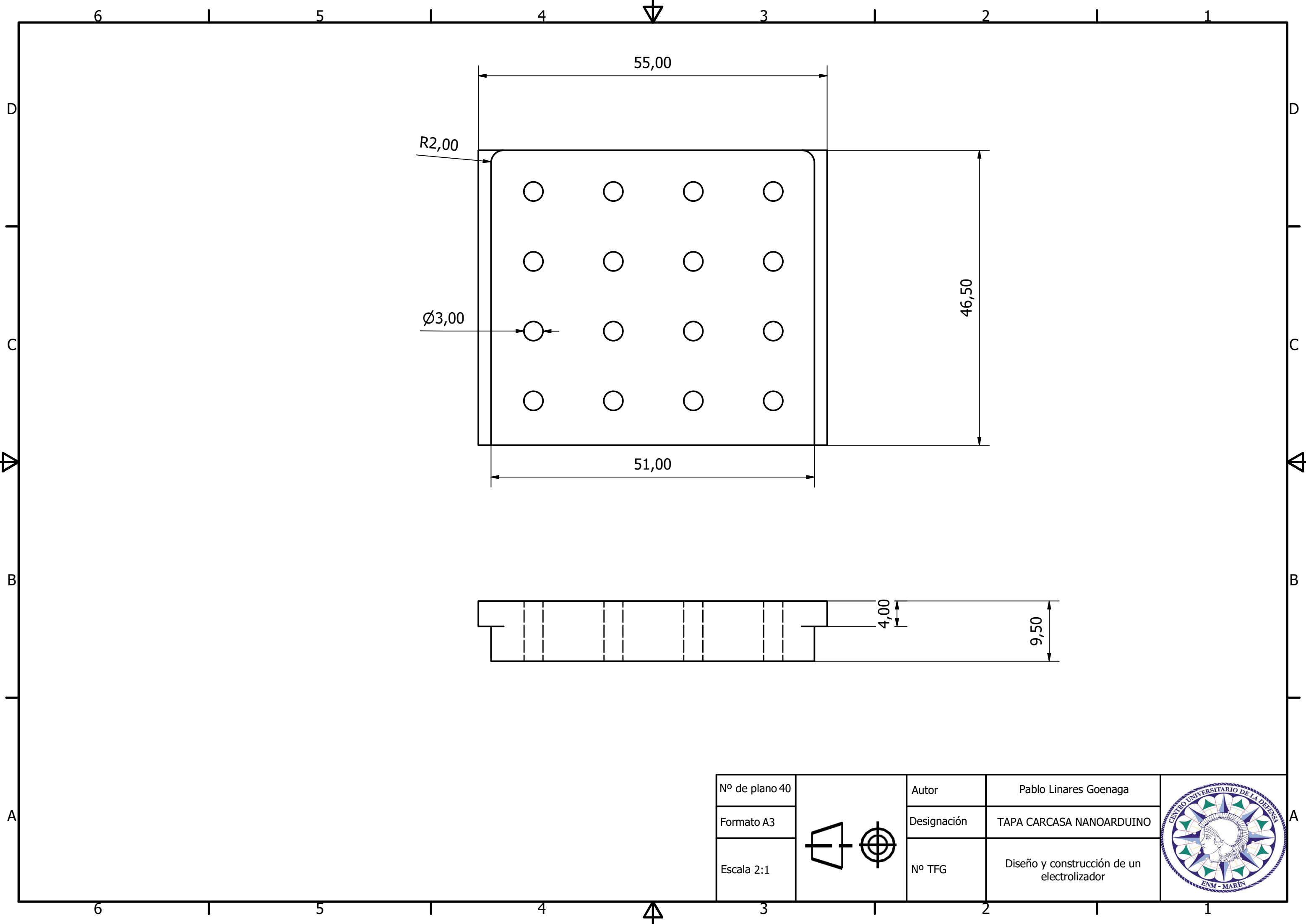
|                |                                                                                     |             |                                            |                                                                                    |
|----------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Nº de plano 37 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |                                                                                     | Designación | TAPA EMPUJADORA (SUPERIOR)                 |                                                                                    |
| Escala 1:1,5   |                                                                                     | No TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |                                                                                    |



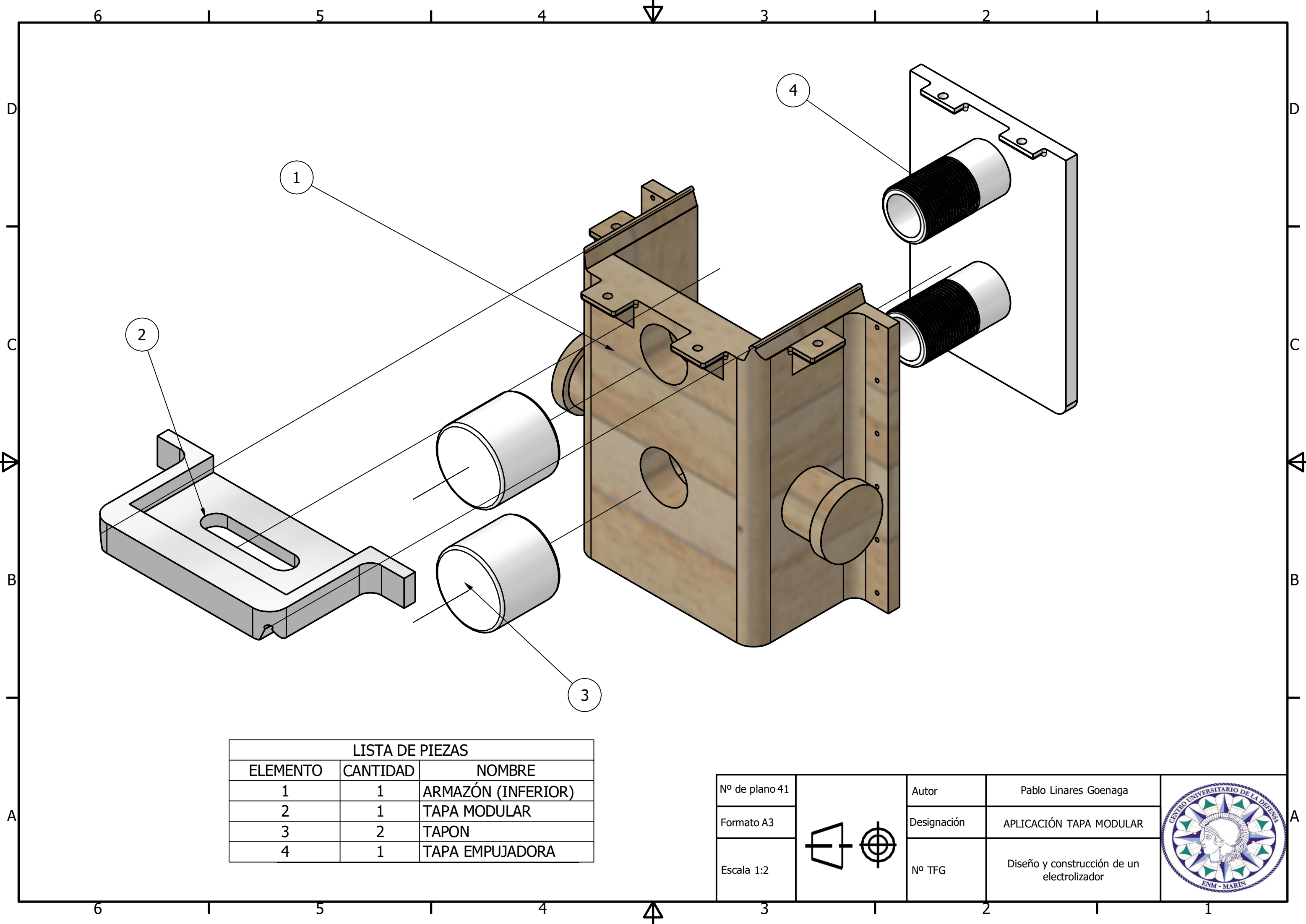
|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 38 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA                                       |  |
| Escala 1:1     |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 39 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPÓN                                      |  |
| Escala 2:1     |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |

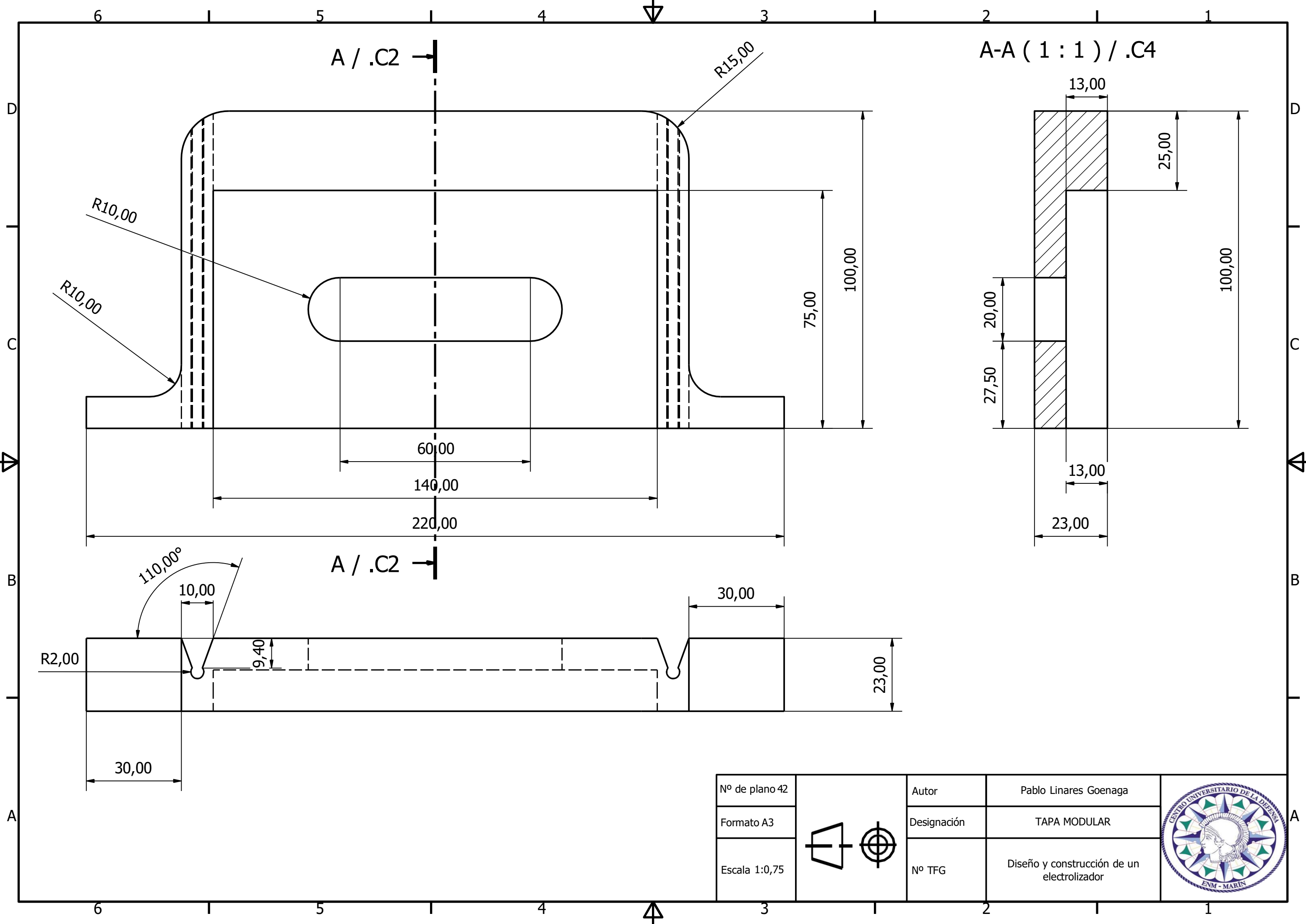


|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 40 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA CARCASA NANOARDUINO                   |  |
| Escala 2:1     |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



| LISTA DE PIEZAS |          |                    |
|-----------------|----------|--------------------|
| ELEMENTO        | CANTIDAD | NOMBRE             |
| 1               | 1        | ARMAZÓN (INFERIOR) |
| 2               | 1        | TAPA MODULAR       |
| 3               | 2        | TAPON              |
| 4               | 1        | TAPA EMPUJADORA    |

|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 41 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | APLICACIÓN TAPA MODULAR                    |  |
| Escala 1:2     |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |



|                |  |             |                                            |  |
|----------------|--|-------------|--------------------------------------------|--|
| Nº de plano 42 |  | Autor       | Pablo Linares Goenaga                      |  |
| Formato A3     |  | Designación | TAPA MODULAR                               |  |
| Escala 1:0,75  |  | Nº TFG      | Diseño y construcción de un electrolizador |  |