

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

DISEÑO DE PANEL DE INTERFAZ HUMANA PARA SIMULADOR APOLO



Alumno: Martín Pesado, Iker

Director: Zuloaga Izaguirre, Aitzol

Curso: 2017-2018

Fecha: Bilbao, 28 de junio de 2018

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

Agradecimientos

A mi madre, Mamen, por haberme apoyado desde los primeros y más duros años de la carrera, por la paciencia infinita que ha tenido conmigo y la confianza de que tarde o temprano acabaría esta carrera, GRACIAS.

A mi padre, Ángel, por haber sacrificado tantísimo tiempo, esfuerzo y salud no solo para asegurarse de que tuviéramos cubiertas nuestras necesidades básicas, sino para darme la oportunidad de acabar esta carrera, GRACIAS.

A mi hermana, Arianna, por ser para mí un referente de lucha y superación personal ante las dificultades, y por enseñarme que con voluntad y perseverancia incluso de lo más difícil se sale, GRACIAS.

A la UPV/EHU y a la EIB, por proporcionarme el entorno y los medios necesarios para formarme, pero principalmente por haberme dado la posibilidad de conocer desde cerca el funcionamiento de esta institución y por el trato y la atención recibidos durante mi participación en los distintos ámbitos, GRACIAS.

Al profesorado gracias al que estoy aquí, pero también el profesorado a pesar del que estoy aquí, ya que he tenido que esforzarme para superar los retos de los primeros, pero también aprender a gestionar la frustración ante las trabas e injusticias de los segundos, GRACIAS.

A todas las personas con las que he tenido la suerte de coincidir y trabajar en los distintos órganos de representación estudiantil de la universidad, por las experiencias vividas, por el crecimiento personal y por toda la gente a la que durante estos años hemos podido ayudar, GRACIAS.

A mi tutor y amigo, Aitzol Zuloaga, por tenderme la mano cuando más lo necesitaba, por acercarme al mundo de la electrónica y hacerme recuperar la ilusión por la carrera, por proponerme este entrañable proyecto y por haber sabido presionarme cuando podía dar más de mí, ampliando así mis expectativas y horizontes, GRACIAS.

A Jon Rotaeché, por haberme enseñado que incluso trabajando en un proyecto apasionante lo más importante son las personas que lo componen, y que presionarlas de manera indiscriminada hace que finalmente sean ellas quienes decidan marcar los límites, gracias.

A mi querido novio, Galder, por tantas cosas... Por estos cinco años durante los cuales me has acompañado por este camino, me has animado a seguir adelante y a mirar las cosas con perspectiva; por apoyarme en las decisiones que he tomado, por haberme ayudado a rebisar este trabajo (salvo este párrafo) y por hacerme sentir tan sumamente afortunado, GRACIAS.

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

Resumen / Abstract / Laburpena

Resumen

El trabajo de fin de grado que se presenta a continuación se enmarca dentro del proyecto SMVA (Simulador Modular para Vehículos Aeroespaciales), cuyo propósito es desarrollar una arquitectura que pueda ser implementada en la creación de distintos simuladores.

Para este proyecto, se ha optado por desarrollar una reproducción del AGC-DSKY (*Apollo Guidance Computer*), el ordenador de a bordo del Apolo11, con el fin de dotarlo de atractivo ante distintos grupos de interés y que resulte útil en diversos ámbitos, como el apoyo al proceso de aprendizaje del estudiantado o el acercamiento de la tecnología a la sociedad mediante su presentación en ferias, exposiciones o jornadas de acogida.

A lo largo de los distintos apartados, se detallan los requerimientos del diseño, los componentes empleados y el desarrollo del esquemático y del circuito impreso, además del proceso de fabricación de la estructura que dará soporte al circuito. Seguidamente, se presenta un sencillo SW, creado para verificar el correcto funcionamiento del HW.

El resultado final es un prototipo funcional y revisado, preparado para operar a través de una comunicación serie vía USB o mediante la carga de un SW desarrollado *ex profeso* para la realización de pruebas o simulaciones en el propio circuito.

El trabajo aporta una valiosa herramienta para el ámbito de la docencia, ya que se puede emplear como ejemplo en diversas asignaturas de la rama de la electrónica, y resulta interesante y visualmente atractiva para el acercamiento de las telecomunicaciones a la sociedad y el fomento de la vocación tecnológica. Contribuye, además, al SMVA con el conjunto de librerías de componentes y de rutinas creadas, lo que facilitará el desarrollo de futuros simuladores enmarcados en él.

Palabras clave: simulador, AGC, DSKY, Apolo, vocación

Abstract

The present end-of-degree project is part of the Modular Simulator for Aerospace Vehicles (SMVA), a project whose purpose is to develop an architecture that can be implemented in the creation of different simulators.

For this project, it has been decided to develop a reproduction of the AGC-DSKY (Apollo Guidance Computer), the on-board computer of the Apollo11, in order to make it attractive to different interest groups and useful in several areas, like supporting the learning process of students, or approaching technology to society by showcasing it in fairs, exhibitions, or reception days.

Throughout the different sections of this project, the design requirements, the components used, and the development of the schematics and printed circuit are detailed, as well as the manufacturing process of the structure that will hold the circuit. Next, a simple SW is presented, which has been created to verify the correct functioning of the HW.

The final result is a functional, checked prototype, which is prepared to operate either through USB communication, or by loading a SW specifically developed to carry out tests or simulations on the circuit itself.

This project provides a valuable tool for the field of teaching, since it can be used as an example in various subjects of the branch of electronics, and is interesting and visually attractive for the approach of telecommunications to society and the promotion of technological vocation. It also contributes to SMVA with a set of component libraries and routines created during the project, which will facilitate the development of future simulators framed within it.

Keywords: simulator, AGC, DSKY, Apollo, vocation

Laburpena

Gratu amaierako lan hau Ibilgailu Aeroespazialeterako Simuladore Modularra (SMVA) proiektuaren barruan dago kokatuta, zeinaren helburua simuladore ezberdinak sortzeko implementa daitekeen arkitektura bat garatzea baita.

Proiektu honetarako, Apolo11 ontziko ordenagailu izandako AGC-DSKY (*Apollo Guidance Computer*) sistemaren erreproduzio bat garatzea erabaki da, hainbat interes-talderentzat erakargarri egiteko eta hainbat esparrutan erabilgarria izan dadin; esaterako, ikasleen ikaskuntza-prozesuan lagungarri izan dadin edo azoka, erakusketa eta harrera-jardunaldietan aurkeztuta, teknologia gizartera hurreratzeko tresna izan dadin.

Lan honen ataletan zehar, diseinuaren eskakizunak, erabilitako osagaiak eta eskematikoa nahiz zirkuitu inprimatua xehatzen dira, bai eta zirkuituaren euskarri izango den egituraren fabrikatzeko prozesua ere. Ondoren, SW bakun bat aurkezten da, HWak behar bezala funtzionatzen duela egiaztatzeko sortua.

Azken emaitza prototipo funtzional eta berrikusi bat da, bi eratan funtzionatzeko prestatua: USB bidezko komunikazioaren bidez edo, zirkuituan bertan probak eta simulazioak egiteko, *ex profeso* garatutako SW baten bidez.

Lan hau tresna baliotsua da irakaskuntzarako; izan ere, elektronikaren arloko hainbat ikasgaitan erabil daiteke adibide gisa, eta interesgarria eta bisualki erakargarria da telekomunikazioak jendarteratzeko eta bokazio teknologikoa sustatzeko. Halaber, sortutako osagai-liburutegien eta errutinen bidez, ekarpen garrantzitsua egiten dio SMVA proiektuari eta, horri esker, haren testuinguruan etorkizunean egingo diren beste simuladore batzuen garapena erraztuko da.

Gako-hitzak: simuladorea, AGC, DSKY, Apolo, bokazioa

Índice de contenidos

Agradecimientos.....	3
Resumen / Abstract / Laburpena.....	5
Resumen.....	5
Abstract.....	5
Laburpena.....	6
Índice de contenidos.....	7
Lista de acrónimos.....	9
Lista de tablas.....	11
Lista de ilustraciones.....	12
Memoria.....	13
Estado del arte.....	13
Conducción.....	14
Aviación.....	15
Navegación espacial.....	15
Objetivos y alcance del trabajo.....	17
Beneficios que aporta el trabajo.....	18
Análisis de alternativas.....	19
Open DSKY.....	20
AGCreplica by John Pultorak.....	21
Telemetrys LLC – Thedsky.com.....	22
Return to the moon – AGC in FPGA.....	23
EduCraft.....	24
Resumen.....	24
Análisis de riesgos.....	25
Descripción de la solución.....	27
SOFTWARE.....	27
PIC16F887.....	28
MAX7221.....	29
SW de pruebas.....	30
HARDWARE.....	32
Selección de componentes.....	32
Esquemático.....	33
Diseño de huellas.....	40

Diseño de PCB	41
Rutado del PCB.....	42
Creación de Gerber	43
Montaje de componentes.....	43
Creación de la estructura	44
Especificaciones	48
Resultado final	49
Metodología.....	50
Aspectos económicos.....	53
Presupuesto	53
Horas internas.....	53
Amortizaciones.....	53
Fabricación	54
Componentes BOM	54
Presupuesto completo	55
Conclusiones.....	56
Líneas futuras	57
Mejoras futuras.....	57
Referencias.....	59
Anexo I Normativa aplicable.....	61
Anexo II Esquemático PCB	63
Anexo III Planos PCB	67

Lista de acrónimos

3D	3 dimensiones
A/D	Analógico/Digital
ACTV	<i>ACTivity</i>
AGC	<i>Apollo Guidance Computer</i>
ALT	<i>ALTitude</i>
NPTH	<i>Not Plated Through Hole</i>
APERT	<i>Applied Electronics Research Group</i> (Grupo de Investigación en Electrónica Aplicada)
BOM	<i>Bill Of Materials</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
COMP	<i>COMputer</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
^{CR} / _{LF}	<i>Carriage Return/Line Feed</i>
CS	<i>Chip Select</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DE	<i>Driver output Enable</i>
DIG	<i>DIGit</i>
DM	Densidad Media
DRC	<i>Design Rule Checking</i>
DSKY	<i>DiSplay and KeYboard</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
EE.UU.	Estados Unidos de América
EIB	Escuela de Ingeniería de Bilbao
F1	Fórmula 1
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i>
GND	<i>GrouND</i>
GPIO	<i>General Purpose I/O</i>
HW	<i>HardWare</i>
I/O	<i>Input/Output</i>
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
ICSP	<i>In-Circuit Serial Programming</i>
KEYREL	<i>KEY RELease</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LLC	<i>Limited Liability Company</i>
LOLA	<i>Lunar Orbit and Landing Approach</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MSSP	<i>Master Synchronous Serial Port</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
OPRERR	<i>OPeRation ERRor</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PETG	<i>PolyEthylen Terephthalato Glycol</i>
SMVA	Simulador Modular para Vehículos Aeroespaciales
PIC	<i>Peripheral Interface Controller</i>
PLA	Poliácido Láctico
POT	<i>POTenciometer</i>
PROG	<i>PROGram</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>

RE	<i>Receiver output Enable</i>
RX	Recepción
SD	<i>Secure Digital</i>
SEG	<i>SEGment</i>
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
STBY	STand BY
SW	<i>SoftWare</i>
THT	<i>Through Hole Technology</i>
TIC	Tecnologías de la Información y la Comunicación
TX	Transmisión
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i>
URSS	Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
VCC	<i>Common Voltage</i>
VIN	<i>INput Voltage</i>
VPP	<i>Principal Voltage</i>
VR	<i>Virtual Reality</i>

Lista de tablas

Tabla 1 - Características básicas de la réplica del AGC de Telemetrics SSL.....	22
Tabla 2 – Valoración de cada alternativa según los requerimientos del proyecto	24
Tabla 3 - Principales características del PIC16F887 de Microchip ^[23]	28
Tabla 4 - Bits necesarios para el funcionamiento del AGC	29
Tabla 5 - Control dígitos de 7 segmentos (izda.) ^[19] y de un array de leds (dcha.) ^[3]	29
Tabla 6 - Lenguaje de comunicación PC-PIC	31
Tabla 7 - Pines disponibles para la expansión del circuito.....	36
Tabla 8 - Distribución de bits de puerto B	36
Tabla 9 - - Distribución de bits de puerto C	36
Tabla 10 - Distribución de dígitos conectados a los MAX7221	37
Tabla 11 - Distribución de indicadores conectados al MAX7221.....	39
Tabla 12 - Dimensiones de pistas y vías según red asignada.....	42
Tabla 13 - Ficheros gerber empleados para la fabricación del PCB	43
Tabla 14 - Materiales y técnicas empleadas en distintos elementos de la estructura....	44
Tabla 15 - Especificaciones técnicas del AGC - DSKY	48
Tabla 16 - Relación de tareas del proyecto.....	51
Tabla 17 - Coste de horas internas	53
Tabla 18 - Coste de las amortizaciones	53
Tabla 19 - Costes de fabricación	54
Tabla 20 - Coste de los componentes	55
Tabla 21 - Coste total del proyecto	55
Tabla 22 - Coste de fabricación de una réplica del AGC DSKY.....	55

Lista de ilustraciones

Ilustración 1 - Simulador Drive Seat 550ST, de la empresa DriveSim ^[8]	14
Ilustración 2 - Cabina del simulador MPS AirbusA320. Aviation Focus ^[2]	15
Ilustración 3 - Simulador LOLA de la NASA ^[21]	16
Ilustración 4 - Prototipo del AGC de la empresa S&TGeotronicsLLC ^[22]	20
Ilustración 5 - Réplica de J. Pultorak con cientos de conexiones visibles ^[6]	21
Ilustración 6 - Réplica del AGC, Edición 50 aniversario. Telemetrys LLC ^[28]	22
Ilustración 7 - Presentación del proyecto del AGC en FPGA en instructables.com ^[11]	23
Ilustración 8 - Piezas de la réplica en cartón del AGC de educraftdiversions.org ^[9]	24
Ilustración 9 - Margaret H.Hamilton junto al código impreso del Colossus2A ^[18]	27
Ilustración 10 - Diagrama de bloques del AGC-DSKY.....	28
Ilustración 11 - Esquema del módulo SW de control del teclado.....	30
Ilustración 12 - Ejemplo de uso del lenguaje de comunicación PC-PIC.....	31
Ilustración 13 - Esquemático del proyecto.....	33
Ilustración 14 - Circuito de alimentación y condensadores de protección.....	34
Ilustración 15 - <i>BUS</i> de conexiones del PIC17F887.....	34
Ilustración 16 - Conector USB.....	35
Ilustración 17 - Conector ICSP.....	35
Ilustración 18 - Conector de expansión.....	36
Ilustración 19 - Teclas dispuestas matricialmente (sup.) e individualmente (inf.).....	37
Ilustración 20 - Circuito de <i>reset</i>	37
Ilustración 21 - Ejemplo control <i>displays</i>	38
Ilustración 22 - Indicadores presentes en el DSKY.....	38
Ilustración 23 - Ejemplo control indicadores.....	39
Ilustración 24 - Retroiluminación pulsadores.....	40
Ilustración 25 - Huella para disposición de teclado matricial.....	40
Ilustración 26 - Posicionamiento de componentes.....	41
Ilustración 27 - Rutado del circuito (detalle en anexo III).....	42
Ilustración 28 - Circuito impreso ensamblado. Parte frontal (izda.) y trasera (dcha.).....	43
Ilustración 29 - Diseño inicial del AGC-DSKY.....	45
Ilustración 30 - Progresión de diseños de los pulsadores.....	45
Ilustración 31 - Soporte de <i>displays</i> . Diseño y resultado final.....	46
Ilustración 32 - Soporte de indicadores. Diseño y resultado final.....	46
Ilustración 33 - Carcasa frontal. Vista superior del diseño.....	47
Ilustración 34 - Carcasa frontal. Vista inferior del diseño.....	47
Ilustración 35 - Caja y soporte del PCB. Diseño y resultado final.....	48
Ilustración 36 - Resultado final del proyecto.....	49
Ilustración 37 - Diagrama de Gantt del proyecto.....	52
Ilustración 38 - Diagrama Esquemático (parte 1 de 3).....	64
Ilustración 39 - Diagrama Esquemático (parte 2 de 3).....	65
Ilustración 40 - Diagrama Esquemático (parte 3 de 3).....	66
Ilustración 41 - Ubicación de componentes fijos en el PCB.....	68
Ilustración 42 - Posicionamiento de componentes en la cara frontal, o <i>TOP</i>	69
Ilustración 43 - Posicionamiento de componentes en la cara trasera, o <i>BOTTOM</i>	70
Ilustración 44 - Rutado de la cara frontal, o <i>TOP</i>	71
Ilustración 45 - Rutado en la cara trasera, o <i>BOTTOM</i>	72

Memoria

Estado del arte

Si hubiera que emplear un único término para diferenciar al ser humano del resto de seres vivos del planeta Tierra, este podría ser adaptabilidad. La interacción con el entorno cambiante y las diversas condiciones de vida a las que han estado expuestos desde hace cerca de 7 millones de años hasta hoy en día son un claro ejemplo de esta capacidad. Si bien es cierto que especies como las medusas o las esponjas de mar, con 500 y 760 millones de años de antigüedad respectivamente, superan en varios órdenes de magnitud el tiempo que llevamos sobre este planeta, ninguna de ellas ha sido capaz de adaptarse y sobrevivir en nichos ecológicos tan diversos en cuanto a clima, distribución geográfica, condiciones medioambientales, flora y fauna local se refiere^[16]

El descubrimiento y colonización de dichos espacios ha sido posible, además de por la necesidad surgida de la búsqueda de recursos, por la naturaleza exploradora del ser humano. Nuestra curiosidad y predisposición a explorar lo desconocido se manifiesta prácticamente desde que nacemos^[5].

Es más, durante las primeras etapas de la vida, la gran mayoría de comportamientos e interacciones sociales que comúnmente se resumen en «juegos» no son más que un entrenamiento, una imitación del comportamiento de los adultos^[17].

Ahora bien, el juego es el «entrenamiento de los niños» para desarrollar habilidades que emplearán una vez sean adultos; pero, teniendo presente que durante la etapa adulta una persona puede enfrentarse a numerosas situaciones, algunas que incluso entrañan determinados riesgos, ¿cómo entrenan los adultos para desarrollar otras capacidades que les permita afrontarlos con mayor seguridad?

En palabras de Robert E. Shannon, «[l]a simulación proporciona un seguro barato y una herramienta para la toma de decisiones que resulta rentable para los gerentes. Nos permite minimizar los riesgos al permitirnos descubrir las decisiones correctas antes de tomar las equivocadas»^[25].

En otras palabras, nos permite aprender equivocándonos sin que nuestros errores causen el daño que provocaría cometerlos en la realidad.

Es por ello que, a la par del avance de la tecnología, concretamente en el entorno TIC, han ido surgiendo simuladores que recrean sin riesgo todo tipo de situaciones reales, ficticias e incluso fantásticas en las cuales se pone a prueba a la persona o personas que participan en la simulación.

Existen simuladores clínicos para la realización de diagnósticos sobre pacientes virtuales, simuladores musicales o artísticos para aprender a utilizar un instrumento o crear cuadros y esculturas, los hay de vida o sociales donde se obedecen (o no) ciertas normas de convivencia y relaciones personales, económicos o de gestión de recursos, políticos y bélicos, entre otros. Además de todos ellos, tal vez más conocidos por el público general, existen también simuladores de conducción, vuelo, navegación y todos aquellos en los que la persona usuaria maneja un vehículo. Si bien algunos de los primeros tipos de simuladores mencionados pueden tener una finalidad más lúdica, los

últimos se han convertido, sin duda, en un elemento clave en los procesos formativos de profesionales de distintas áreas, a través de las que pueden poner de manifiesto sus capacidades antes de llevarlas a cabo en una tarea real.

Sin embargo, no conviene circunscribir el uso de estas nuevas tecnologías al entorno meramente formativo o profesional. Es más, los simuladores representan un papel fundamental en la transferencia de conocimiento^[20].

Es por ello que varios de ellos han ido adaptando el enfoque de lo individual/privado a lo colectivo/público creando grandes comunidades de personas aficionadas que conforman redes de conocimiento de incalculable valor.

Algunos de los sectores donde los simuladores han supuesto una verdadera revolución por el incremento de la seguridad durante la formación de las personas que posteriormente manejarían un vehículo se ilustran a continuación:

Conducción

Una de las aplicaciones más cercanas de esta tecnología que se puede encontrar en la actualidad son los simuladores de conducción, empleados tanto para aprender a manejar un turismo en las autoescuelas, como para mejorar la capacidad de maniobra en vehículos grandes o articulados, o perfeccionar la técnica de competidores profesionales del mundo del motor mediante simuladores diseñados específicamente para ello, como puede ser el caso de los pilotos de F1 o de ralis.

Dentro de este perfil de simuladores, uno de los más empleados en autoescuelas en España es el simulador de conducción DriveSim, que permite diseñar multitud de pruebas en las que las personas usuarias se expondrán a distintos tipos de carreteras y caminos, condiciones climatológicas adversas, tráfico real con peatones y conductores agresivos, y experimentarán también las mejoras que proporcionan las ayudas a la conducción como la dirección asistida o el ABS.



Ilustración 1 - Simulador Drive Seat 550ST, de la empresa DriveSim^[8]

Aviación

Si tratándose de la seguridad del conductor de un turismo se estima oportuno que este disponga de un entorno en el que aprender a conducir sin poner en riesgo su integridad física ni la de los viandantes, resulta evidente que también lo es cuando el vehículo que se maneja transporta centenares de personas y un sencillo error puede causar una verdadera catástrofe, tal y como sucede con los pilotos de aviones comerciales como el Airbus A320.

Existen varios simuladores para futuros pilotos del Airbus A320 repartidos por el mundo con distintos propósitos, que van desde la familiarización con los mandos y controles de la aeronave hasta la realización de un trayecto comercial convencional, pasando por la preparación en caso de emergencias como fallos del motor, de los dispositivos de navegación o de otras circunstancias que pudieran darse durante un vuelo real. De este modo, ante una situación similar, las probabilidades de reaccionar de modo adecuado y, por tanto, de reducir en la medida de lo posible las consecuencias de un accidente mejoran de una manera sustancial.



Ilustración 2 - Cabina del simulador MPS Airbus A320. Aviation Focus^[2]

Navegación espacial

Tal y como se ha mencionado, el ser humano no conoce de límites a la hora de explorar, y la consecuencia lógica de este hecho es no moverse únicamente por la superficie terrestre o desplazarse sobre ella a unos pocos kilómetros, sino también atravesar la atmósfera y llegar hasta el espacio. Prueba de ello fue la encarnizada batalla entre los EE.UU. y la URSS por la conquista espacial durante la Guerra Fría, en la que ambas potencias compitieron por ser las primeras en alcanzar ciertos logros: desde el lanzamiento del Sputnik1 como primer satélite artificial, hasta que el astronauta Neil

Alden Armstrong se convirtiera en el primer ser humano en poner un pie en la Luna como parte del programa Apolo11^[27].

Aunque en la actualidad son varias las competiciones que se disputan entre distintas organizaciones (como la supremacía en Asia del vuelo espacial o la llegada del hombre a Marte) fue la disolución de la URSS lo que puso fin a la originalmente denominada carrera espacial.

Siendo así, también la NASA decidió en su momento que aterrizar sobre la superficie lunar suponía un reto para el que sus pilotos deberían formarse y practicar, enfrentándose a toda clase de casuísticas posibles con el fin de poder asegurar un alunizaje exitoso. Para ello, no dudó en desarrollar un simulador del módulo lunar del Apolo, el LOLA (*Lunar Orbit and Landing Approach*). Equipado con una réplica de los mandos y los controles que más tarde se emplearían, y con un sofisticado sistema de suspensión hidráulica que reproducía los movimientos durante el descenso y la toma de contacto con la superficie, la inversión de más de 2 millones de dólares se dio por amortizada el 21 de julio de 1969, cuando finalmente el hombre llegó a la Luna.

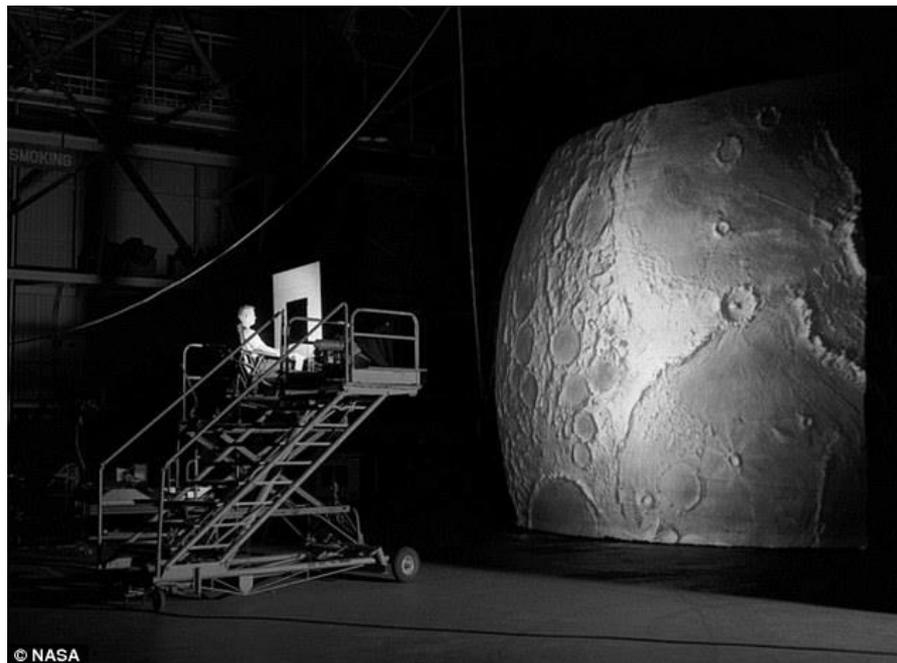


Ilustración 3 - Simulador LOLA de la NASA^[21]

Por todo ello, los simuladores como sistemas que otorgan a la persona usuaria la capacidad de experimentar, equivocarse, rectificar y mejorar representan un sector en el que, de la mano de las nuevas tecnologías, tienen todavía muchísimo potencial por explotar. En un mundo cada vez más competitivo donde el nivel de exigencia en determinados sectores se aproxima a la perfección, es mejor simular una realidad en la que se falla y se aprende que simular haber aprendido y fallar en la realidad, pues, como decía Lucio Anneo Séneca, «errar es humano» pero también «muy pocos aciertan antes de errar»^[24].

Objetivos y alcance del trabajo

Antes de definir los objetivos y el alcance concreto del presente proyecto conviene mencionar que no se trata en sí de un trabajo aislado, sino que tanto las herramientas empleadas como las desarrolladas durante el mismo forman parte de un proyecto mayor, todavía en desarrollo. Este proyecto global denominado *Simulador Modular para Vehículos Aeroespaciales* (en adelante, SMVA), tiene el objetivo de **diseñar una arquitectura que permita la creación y desarrollo de interfaces de usuario aplicadas a distintos simuladores.**

- Para ello, se busca que dicha arquitectura cumpla con las siguientes características:
 - o **Modular:** tanto los bloques funcionales (HW) como los programas o rutinas creados (SW) deberán requerir la menor interacción externa posible para llevar a cabo su cometido, empleando una conexión (HW) y una comunicación (SW) lo más sencilla posible.
 - o **Electrónica común:** los componentes electrónicos seleccionados deberán ser, en la medida de lo posible, fácilmente sustituibles en futuras versiones o adaptaciones del proyecto en cuestión.
 - o **Versátil:** la definición de las líneas de trabajo de los proyectos deberá permitir que, con la menor cantidad de ajustes posibles, estos puedan ser adaptados a distintas aplicaciones.

De modo secundario, el SMVA persigue también los siguientes objetivos.

- Generar una base de datos que recopile todo el material generado, tanto HW como SW, de modo que puedan ser revisados y empleados en futuros proyectos.
- Proporcionar al sector educativo, principalmente, una herramienta de apoyo en el proceso de aprendizaje tanto teórico como práctico.
- Fomentar la vocación tecnológica, visibilizando las aplicaciones reales de la formación en materia de telecomunicación; concretamente, en el ámbito de la electrónica.

Siendo así, **se plantea la realización del proyecto** desarrollado en el presente documento y que cumple con una serie de objetivos particulares que a continuación se detallan:

- Desarrollar un simulador específico que implemente la arquitectura del PG.
- Crear un modelo físico totalmente operativo.
- Desarrollar un SW básico que permita verificar el correcto funcionamiento del modelo.
- Revisar, corregir, ampliar y completar la documentación disponible en la base de datos.
- Describir la potencialidad del proyecto y usos previstos, así como futuras ampliaciones y/o mejoras.

Siguiendo las directrices marcadas por el SMVA, se ejecutaron entre 2015 y 2016 varios paneles correspondientes a un simulador de vuelo del avión AirbusA320. En origen, el objetivo del presente proyecto era el de continuar diseñando sucesivos paneles, pero, debido a causas ajenas al desarrollo del mismo, tuvo que ser suspendido, de modo que

se decidió adaptar el trabajo realizado y crear un simulador que, aun siendo más complejo, fuese totalmente independiente de los anteriores.

Este nuevo simulador sería el Apollo Guidance Computer Display and Keyboard, o AGC-DSKY.

Beneficios que aporta el trabajo

El primero y más evidente de los beneficios del presente trabajo es la contribución realizada al proyecto global, ya que durante el desarrollo del AGC se han creado y ajustado varios elementos, ampliando las librerías de HW y SW con aquellos componentes que no habían sido empleados antes.

El resultado final del proyecto es un **prototipo totalmente operativo**, fácilmente replicable y enfocado a poder ser complementado con multitud de periféricos, según se estime oportuno. Gracias a ello, el propio prototipo podría ser usado para favorecer el acercamiento de las telecomunicaciones a futuros estudiantes, fomentando la vocación tecnológica, o como muestra ante posibles inversores o grupos de interés, pudiendo comercializarse de manera inminente.

Dispone de **varias vías para comunicarse** tanto con el PC como con otros paneles, de modo que **pueden ampliarse las prestaciones** del proyecto (memoria adicional, sincronización con otros paneles...) sin necesidad de alterar el HW.

Representa un **compendio de los conocimientos adquiridos durante la carrera**. Tanto para el diseño del esquemático como para el PCB, se han empleado las competencias y habilidades adquiridas en múltiples asignaturas de la titulación, no siendo necesaria una formación adicional. Este hecho implica que el mismo **proyecto puede ser utilizado como ejemplo y referencia en el aula**.

Asimismo, se ha contado con el asesoramiento de varios departamentos de la universidad, como el Departamento de Física aplicada en la selección de los materiales y elementos ópticos necesarios, como del Departamento de Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería para el desarrollo de los modelos en 3D de los elementos diseñados, además del propio Departamento de Tecnología Electrónica al que corresponde el proyecto, poniendo de manifiesto la aportación de las distintas disciplinas impartidas en la EIB.

Otro de los beneficios del proyecto ha sido el empleo de SW libre para la creación tanto del esquemático como del PCB y los gerber, y de SW gratuito para el diseño del prototipo en 3D, por lo que las **herramientas empleadas no suponen un coste y son de fácil acceso**.

Finalmente, cabe destacar que, por las características del SMVA, se trata de un **proyecto versátil, adaptable** y que fácilmente podría ser modificado para su implementación en otros simuladores, como podrían ser los AGC de las sucesivas misiones espaciales.

Análisis de alternativas

Hace prácticamente 50 años que el AGC mostró al mundo su potencial. Por ello, tanto nostálgicos aficionados que tratan de reproducirlo de la forma más fiel posible como aquellos que han decidido renovarlo completamente haciendo uso de las tecnologías más punteras, existen en el mercado varias alternativas que pueden desempeñar una función similar. No obstante, hay que tener presente que el objetivo de este proyecto va más allá de lo meramente funcional, ya que para poder desarrollarlo se ha tenido presente un conjunto de factores entre los que destacan los siguientes:

- **Arquitectura versátil con el procesamiento centrado en el PC.** Este ha sido, sin lugar a dudas, el punto fuerte del proyecto. La simplificación y modularidad del HW del circuito y el hecho de que todo el procesamiento de la información se realice en el PC ha permitido transformar el proyecto original del simulador del Airbus en el actual simulador del AGC con una inversión mínima de recursos. Esta característica facilitará enormemente la aplicación del proyecto en futuros simuladores.
- **Funcionalidad.** Como es lógico, el proyecto tenía que dar como resultado un prototipo con el que se pudiera interactuar de modo que reprodujera de manera fiel el funcionamiento del AGC original.
- **Tecnología actual:** otro de los aspectos relevantes que puede verse reflejado también en algunas de las alternativas analizadas ha sido el de manifestar los avances producidos durante estas décadas, optando por el empleo de materiales, elementos y tecnología actual (LEDs, microcontroladores, fabricación aditiva, corte láser...).
- **Reproducción fiel:** Dentro de las limitaciones del presupuesto marcado, se ha apostado por hacer uso de la tecnología de fabricación aditiva para confeccionar de la manera más realista posible las piezas que componen el recubrimiento del circuito.
- **Ampliable y adaptable.** A diferencia de ciertas alternativas que se han valorado, no se pretende que este sea un proyecto cerrado, sino que pueda seguir desarrollándose mediante la inclusión progresiva de nuevas funcionalidades y periféricos, al tiempo que deja una puerta abierta a la innovación.
- **Orientación a la docencia.** Existe en la red una comunidad de aficionados que, en mayor o menor medida, comparten sus versiones del AGC. No obstante, no es fácil encontrar una fuente que haga pública la documentación y los detalles de cada etapa del proyecto, incluyendo las especificaciones técnicas, la selección de componentes y cálculos realizados para la misma, y el proceso de montaje y mejora, y que finalmente se centre en el bloque del SW. Gracias a este proyecto se dispone de toda la información recopilada durante su desarrollo, que podrá ser empleada incluso como ejemplos en el aula.
- **Económico.** Un aspecto fundamental para la viabilidad del proyecto ha sido optimizar el prototipo para que sea totalmente funcional desde el principio. Se ha apostado por invertir un mayor número de horas en la optimización del circuito, asegurando no solo que cumple con su cometido, sino que se reducen de manera considerable los riesgos y simplifica la tarea de los desarrolladores de las futuras versiones.

Siendo así, se muestran a continuación algunas de las alternativas analizadas y los motivos por los que han sido descartadas.

Open DSKY

Open DSKY es un proyecto *opensource* liderado por la empresa S&TGeotronicsLLC, formada por los ingenieros y amantes del Arduino James Sanderson y Marc Tessier. Se trata de un proyecto financiado mediante *crowdfunding* que avanza a medida que recibe donaciones. Si bien disponen de los materiales necesarios para construir una réplica modestamente fiel a la interfaz original, además del SW para hacerla funcionar, todavía no ha comenzado formalmente su distribución, por lo que no habría sido una alternativa viable dados los plazos requeridos para este proyecto.

En líneas generales, el funcionamiento del circuito estaría controlado por un Arduino Nano que haría las veces de comunicación interna (detección de pulsadores, control de indicadores y *displays*) como de externa, mediante el puerto USB integrado. No prevé la posibilidad de añadir más periféricos a los ya existentes en el diseño y tampoco se dispone de los detalles del mismo, como el esquemático empleado.

Por último, cabe reseñar que, probablemente con el fin de reducir costes, se ha optado por simplificar el diseño de la caja del dispositivo y alterar las medidas y proporciones de las teclas, pantallas y separaciones de componentes, provocando una notable distorsión sobre el AGC original.



Ilustración 4 - Prototipo del AGC de la empresa S&T Geotronics LLC^[22]

AGC replica by John Pultorak

La réplica del AGC construida por John Pultorak es, sin lugar a dudas, la más fiel al modelo original en cuanto al hardware se refiere. Desde el módulo de control hasta el módulo I/O en el bloque de HW pasando por una adaptación del código original que complementa con varios programas sencillos de simulación en el de SW, Pultorak desarrolló, basándose en la toda la información pública que pudo recopilar, un ambicioso proyecto que le llevó 4 años culminar. Una vez finalizado, decidió subir a la red toda la documentación empleada en el proyecto, poniéndolo a disposición del público de manera totalmente gratuita.

Dicho proyecto requirió una inversión de cerca de 3.000\$ y más de 2.500h de trabajo, ya que su objetivo era reconstruir elemento a elemento una réplica exacta, tanto a nivel HW como SW, del ordenador desarrollado por el MIT 40 años atrás.

Con más de 3.500 pies de hilo de cobre y unas 15.000 conexiones realizadas a mano, resultaría una alternativa excesivamente costosa y orientada exclusivamente a un simulador concreto.

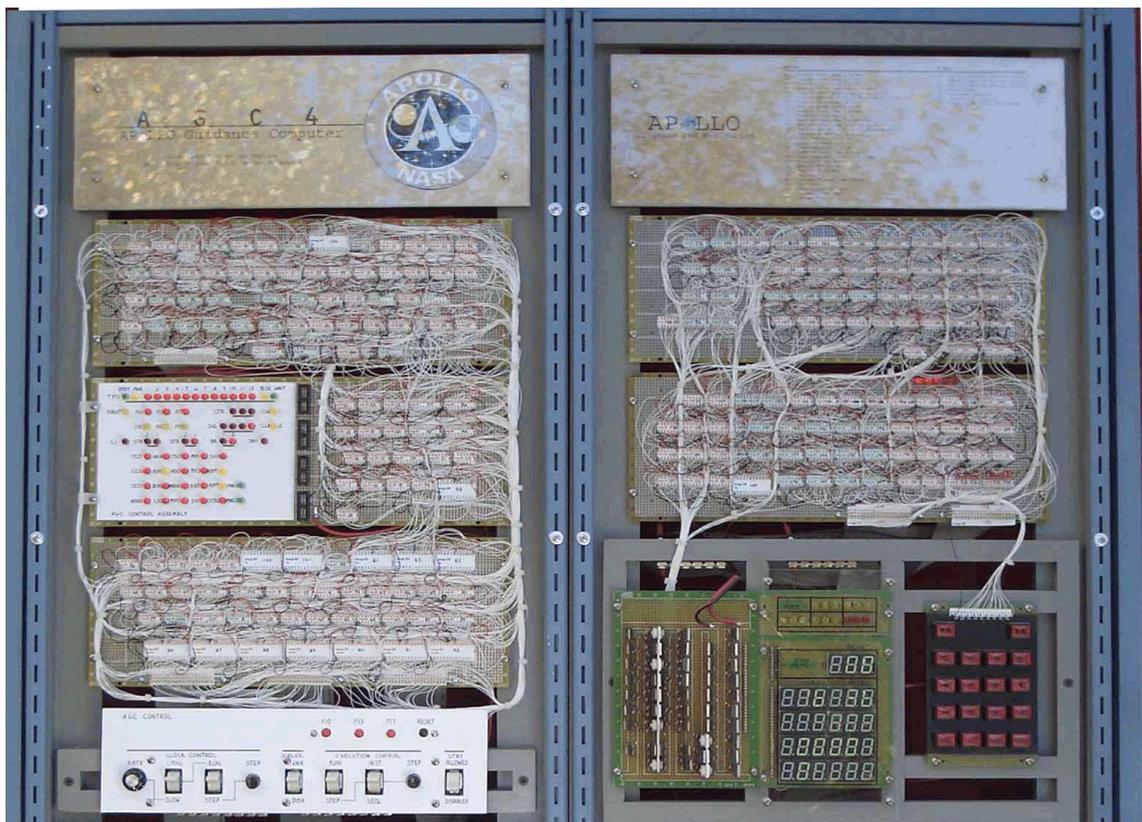


Ilustración 5 - Réplica de J. Pultorak con cientos de conexiones visibles^[6].

Telemetrys LLC – Thedsky.com

La empresa Telemetrys LLC, en Florida, se especializa en la fabricación de réplicas de distintas versiones del DSKY.

En contraposición a la alternativa anterior, esta versión del AGC ha sido totalmente rediseñada para emplear materiales y componentes de última generación. La carcasa está fabricada en aluminio y los displays e indicadores de la pantalla derecha han sido sustituidos por una pantalla LCD totalmente operativa.

En cuanto a la arquitectura del circuito, se trata, en resumidas cuentas, de un ordenador completo con las siguientes características:

The Telemetrys Apollo 11 DSKY

<i>Sistema operativo</i>	Raspian Linux
<i>Procesador</i>	64bit CPU
<i>Memoria interna</i>	1GB
<i>Conectividad</i>	4 USB ports,
<i>Conectividad inalámbrica</i>	Wi-Fi, Bluetooth
<i>Expansión de memoria</i>	MicroSD hasta 32GB

Tabla 1 - Características básicas de la réplica del AGC de Telemetrys SSL.

Esta versión totalmente actualizada del AGC incluye en su SW además del código original del proyecto Apolo una serie de misiones prediseñadas, demostraciones y multitud de parámetros configurables. No obstante, el haber apostado por utilizar un HW tan complejo, así como haberlo dotado de una capacidad de cómputo tan elevada tiene un efecto más que evidente sobre el costo de cada una de estas réplicas, que oscila entre los 1 500 y los 2 000€ dependiendo del modelo.



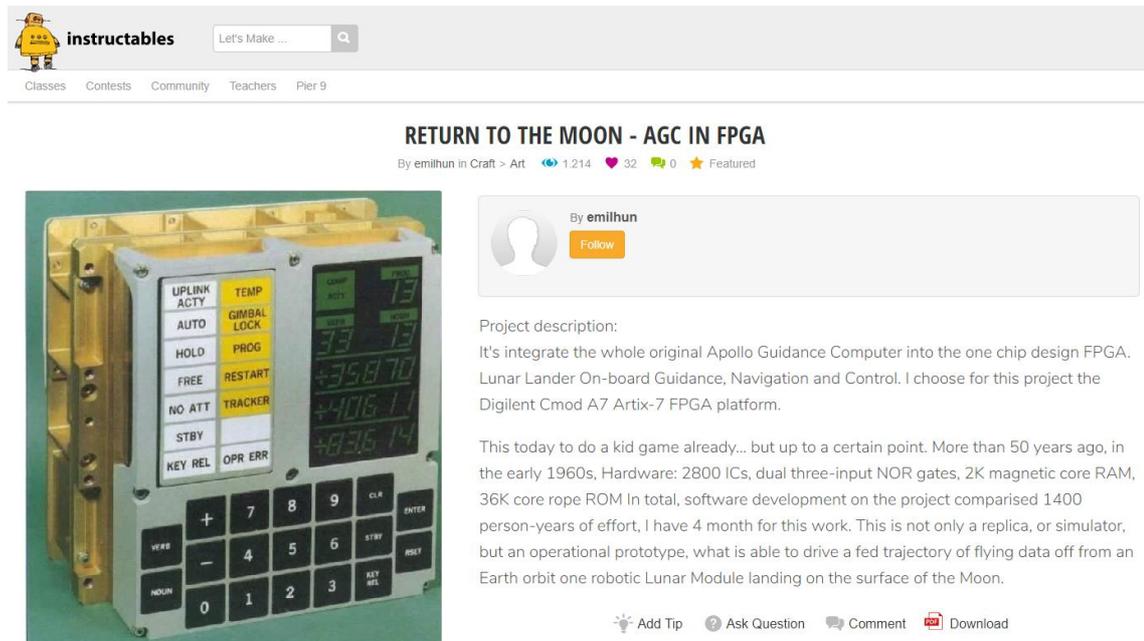
Ilustración 6 - Réplica del AGC, Edición 50 aniversario. Telemetrys LLC^[28]

Return to the moon – AGC in FPGA

En la plataforma de desarrollo e innovación Indestructables, nacida del germen del MIT Media Lab ^[1] el usuario emilhun planteó en mayo de 2017 el inicio de la creación de su propia versión de la réplica del AGC.

Basándose en la Digilent Cmod A7 Artix-7 FPGA, el usuario ha ido poniendo a disposición de la comunidad varios documentos empleados durante el desarrollo del proyecto. Resulta interesante reseñar que el empleo de dicha FPGA permitiría futuras ampliaciones y la inclusión de nuevos elementos en el circuito. Además, dispone de capacidad de procesamiento suficiente para ejecutar el código del simulador sin necesidad de un PC, algo que, en principio, no resulta imprescindible.

Por último, cabe mencionar que, aunque la publicación data de mayo del 2017 y menciona que la duración del proyecto será de cuatro meses, a fecha de elaboración del presente documento no existe ninguna información nueva al respecto, de lo que se deduce que aún no ha sido finalizado.



RETURN TO THE MOON - AGC IN FPGA
 By emilhun in Craft > Art 1,214 32 0 Featured

Project description:
 It's integrate the whole original Apollo Guidance Computer into the one chip design FPGA. Lunar Lander On-board Guidance, Navigation and Control. I choose for this project the Digilent Cmod A7 Artix-7 FPGA platform.

This today to do a kid game already... but up to a certain point. More than 50 years ago, in the early 1960s, Hardware: 2800 ICs, dual three-input NOR gates, 2K magnetic core RAM, 36K core rope ROM In total, software development on the project comparised 1400 person-years of effort, I have 4 month for this work. This is not only a replica, or simulator, but an operational prototype, what is able to drive a fed trajectory of flying data off from an Earth orbit one robotic Lunar Module landing on the surface of the Moon.

Add Tip Ask Question Comment Download

Ilustración 7 - Presentación del proyecto del AGC en FPGA en instructables.com^[11]

EduCraft

Por último, se ha podido comprobar que existen varias versiones que, no siendo operativas, están siendo empleadas en centros educativos para conocer tanto la estructura como la configuración de los diferentes módulos del AGC.

Aun habiendo varios niveles de detalle, desde aquellas que replican únicamente la estructura y que están fabricadas con distintos materiales a otras en las que hay un mínimo de electrónica, principalmente iluminación de fondo con fines estéticos, su utilidad queda relegada sólo a los ámbitos educativos o de exposiciones.



Ilustración 8 - Piezas de la réplica en cartón del AGC de educraftdiversions.org^[9]

Resumen

Por tanto, tras revisar detalladamente cada una de las alternativas planteadas, se procede a puntuar del 1 al 5 el grado de cumplimiento de cada uno de los requerimientos el proyecto con el fin de poder realizar una valoración cuantitativa de la conveniencia de cada una de ellas. Siendo 1 la puntuación más baja y 5 la más alta, se obtienen los siguientes resultados:

	Open DSKY	AGC Rep J.Plut	AGC FPGA	Telemet. LLC	Educraft	Proyecto
<i>Funcional</i>	4	4	3	5	1	4
<i>Tec. Actual</i>	4	1	4	5	1	4
<i>Rep. Fiel</i>	3	5	3	4	4	4
<i>Ampliable</i>	3	1	4	4	1	5
<i>Versátil</i>	2	2	2	2	1	5
<i>Docencia</i>	4	4	3	2	4	5
<i>Económico</i>	2	1	3	1	5	4
<i>Total</i>	3,14	2,57	3,14	3,29	2,43	4,43

Tabla 2 – Valoración de cada alternativa según los requerimientos del proyecto

Análisis de riesgos

A lo largo del apartado anterior se han mencionado varias alternativas y su grado de similitud con el proyecto a desarrollar. No obstante, nada parece indicar que el propósito de dichas empresas sea el de producir un modelo con los requerimientos fijados en este documento, por lo que, aunque conviene seguir la pista a posibles nuevos focos de competencia que pudieran surgir, actualmente no se considera que supongan un riesgo para la viabilidad del proyecto. En su lugar, se han identificado varios aspectos que, dada la naturaleza del trabajo sí que podrían suponer un peligro para su desarrollo y que conviene tener presentes. Son los siguientes:

- **Nuevas tecnologías.** Paradójicamente, la vertiginosa evolución de la tecnología puede resultar también en un riesgo para el proyecto. La aparición de nuevas formas de interacción con la persona usuaria, como los simuladores de realidad virtual^[15], pueden suponer una amenaza para un proyecto que, inicialmente, está basado en la interacción física tradicional mediante teclas y pantallas.
- **Discontinuidad en la producción de componentes.** Aunque el grueso de los componentes electrónicos del proyecto son elementos muy básicos con pocos visos de sufrir escasez (de hecho, cada vez es más fácil obtenerlos, y a un precio más competitivo), sí que hay ciertos elementos fundamentales como el PIC que podrían dejar de producirse en algún momento.
- **Escepticismo o indiferencia del público.** Otro de los riesgos asociados al proyecto es que, tratando de resultar atractivo e interesante para potenciales futuros estudiantes o sus familias, acabe siendo excesivamente técnico, de modo que despierte poco interés.
- **Riesgos técnicos.** Cualquier producto que pase por determinados procesos se expone al inherente riesgo de que se produzcan fallos durante alguna de sus etapas. Tanto por errores en el diseño como por imprecisiones durante su fabricación, existe la posibilidad de que alguno de ellos afecte al resultado final, perjudicándolo e, incluso, inutilizándolo.
- **Complicación SW.** La programación, sobre todo a bajo nivel, puede resultar complicada y poco intuitiva si no se disponen de los conocimientos adecuados. Por ello, emplear HW muy básico en el circuito corre el riesgo de convertir la tarea de crear los programas necesarios para su funcionamiento en un proceso tedioso y con altas probabilidades de cometer errores.
- **Interrupción del desarrollo del proyecto.** Dependiendo del entorno en el que vaya a desarrollarse el proyecto, los requerimientos del mismo, los medios dedicados y el nivel de exigencia pueden variar sustancialmente. En un entorno empresarial, por ejemplo, donde se busque priorizar el beneficio económico del mismo, podría darse el caso de que uno o varios de esos tres elementos se viera descompensado, poniendo en riesgo la viabilidad del proyecto.

Con el fin de minimizar el riesgo que supone cada uno de estos aspectos, se plantean una serie de medidas que, dependiendo de las circunstancias, conviene tener presentes para actuar de inmediato.

- **Nuevas tecnologías.** A día de hoy, el mercado de la VR es aún muy incipiente. Esto implica que, aunque poco a poco van abriéndose camino entre las distintas plataformas de ocio y simulación, la variedad de dispositivos y aplicaciones disponibles para ellos es todavía lo suficientemente limitada como para suponer que, a corto plazo, desplazarán a los simuladores físicos con los que se interactúa directamente. Además, otras tecnologías como la realidad aumentada^[10], también incipientes, podrían resultar el complemento perfecto para el desarrollo de un simulador que hiciera uso del modelo físico que se desarrolla en este proyecto.

- **Discontinuidad.** Para minimizar el riesgo de desabastecimiento, se procederá a seleccionar componentes comunes y ampliamente empleados en el mundo de la electrónica. De entre aquellos que sean más específicos, se optará por aquellas versiones más recientes de los componentes que llevan un tiempo en el mercado (como los MAXIM7221) o alternativas cuyas versiones posteriores tienden a ser retrocompatibles, como los PIC de Microchip.

- **Escepticismo o indiferencia del público.** El empleo del SW que reproduzca en su totalidad el funcionamiento del Apolo podría resultar pesado y muy técnico para público no familiarizado con él. Una posible solución sería desarrollar un SW más sencillo e intuitivo, diseñando versiones del simulador que resulten más atractivas, pudiendo añadir periféricos y otros medios de interacción más interesantes. Una «reconstrucción» del aterrizaje en la luna en la que, además, habría que controlar una torreta láser para eliminar extraterrestres que tratan de boicotear la misión podría dotar al simulador de un encanto añadido.

- **Riesgos técnicos.** Para minimizar los riesgos vinculados a este apartado, además de elegir un fabricante que, dentro del presupuesto fijado, otorgara un menor margen de error, se han tomado una serie de precauciones durante el desarrollo del circuito, como son: el empleo de *pads* cuadrados para aumentar el área de soldadura dotándola de mayor resistencia, el empleo de dobles lazos en los circuitos de alimentación y tierra para garantizar la conectividad en caso de abrirse el circuito, la ampliación de márgenes de seguridad (taladros, máscaras de soldadura...) sobre los predefinidos, y el montaje sobre zócalos de componentes, de modo que puedan ser sustituidos en caso de fallo. Asimismo, todos los componentes relativos a la alimentación se encuentran en posiciones de fácil acceso, de modo que, en caso de que hubiera algún error de cálculo, podrían ser sustituidos por aquellos de valor adecuado.

- **Complicación SW.** La forma más sencilla de prevenir los riesgos asociados a la programación de bajo nivel es la de derivar el desarrollo SW y la creación de todos los programas necesarios a un dispositivo externo que, en este caso, será el PC. De este modo, se podrán emplear lenguajes de alto nivel para programar aplicaciones todo lo complejas que se desee, enviando y recibiendo únicamente la información necesaria mediante una comunicación serie con el DSKY.

- **Interrupción del desarrollo del proyecto.** Cuando alguno de los parámetros varía (requisitos, medios y exigencia), por un lado, el respaldo existente y, por otro, el propio enfoque del proyecto, permite adaptarse en la medida de lo razonable a estos cambios. Además, llegado el caso de suspender un proyecto concreto, gran parte del trabajo desarrollado podrá ser incorporado a la base de datos y empleado en futuros proyectos.

Descripción de la solución

Una vez analizados en detalle los requisitos del proyecto, valoradas las alternativas disponibles y teniendo presentes los riesgos inherentes al proyecto, se procede a definir la solución del mismo. El presente apartado tiene como fin desgranar, dentro de los límites del proyecto, los distintos aspectos relativos tanto al HW como al SW del mismo, aportando ejemplos y referencias, así como la justificación de la toma de las decisiones más relevantes.

SOFTWARE

Tal y como se ha indicado en el apartado de objetivos, la finalidad del proyecto no es desarrollar el SW que se ejecutará en el PC y que permitirá llevar a cabo todas las rutinas y funcionalidades necesarias para simular el funcionamiento del AGC. Es más, el código del Colossus2A, el programa original que regía el funcionamiento del Apolo11 y que fue desarrollado por la matemática Margaret H. Hamilton, es de dominio público desde que el MIT decidió exponer en su museo una copia íntegra del mismo y su conservador autorizó su digitalización y difusión^[26]. De este modo, es posible disponer del código e incluso hacer uso del mismo para desarrollar los distintos programas o simulaciones que se estimen oportunas.



Ilustración 9 - Margaret H. Hamilton junto al código impreso del Colossus 2A^[18]

Por todo ello, el SW empleado para el desarrollo de este proyecto tiene como único fin el comprobar la correcta comunicación entre el PC y los distintos elementos del DSKY de acuerdo con el diagrama de bloques de la página siguiente:

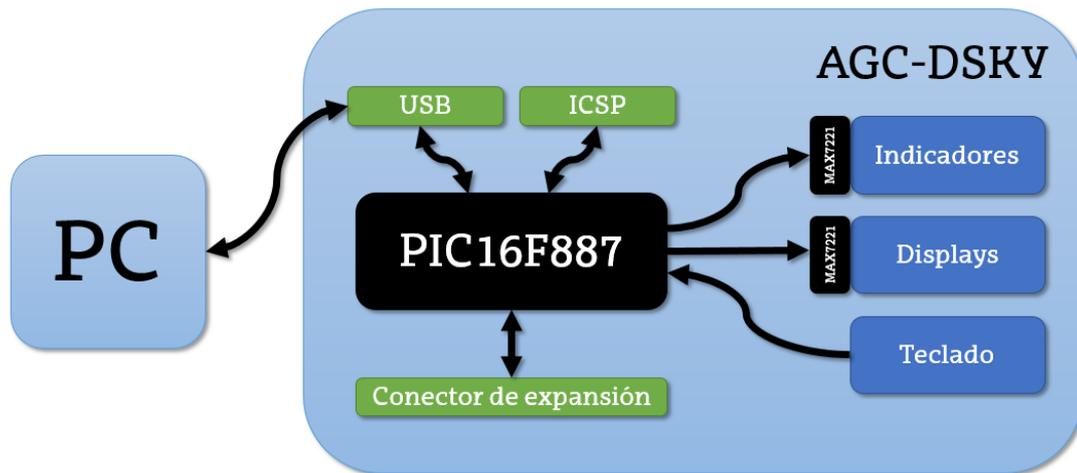


Ilustración 10 - Diagrama de bloques del AGC-DSKY

Tal y como se puede observar, son dos los integrados principales que intervienen en la comunicación del circuito, cuyas características principales se detallan a continuación:

PIC16F887

El PIC16F887 de Microchip ofrece una versatilidad suficiente para atender a las necesidades propias del proyecto. Conviene tener presentes, antes de detallar su funcionamiento, las especificaciones técnicas del mismo:

PIC16F887

Familia	Microcontroladores CMOS 8-bit
Alimentación	2-5,5V
Memoria de programa FLASH	8.192palabras
Memoria de datos SRAM	368bytes
Memoria de datos EEPROM	256bytes
N.º entradas/salidas digitales I/O	35
N.º entradas/salidas analógicas A/D	14
Conectividad exterior	ICSP, EUSART, MSSP

Tabla 3 - Principales características del PIC16F887 de Microchip^[23]

El empleo del PIC en el circuito permite llevar a cabo las siguientes tareas:

- Comunicación con el PC vía USB (EUSART).
- Encendido/Apagado de los indicadores.
- Presentación de datos en los *displays* de 7 segmentos.
- Detección de pulsaciones de las teclas.
- Escritura/Lectura de los periféricos conectados al conector de expansión.

No obstante, una vez analizados los requerimientos del circuito, se puede comprobar que la asignación de un bit de puerto I/O a cada uno de los elementos con los que el PIC interactúa no es suficiente, por lo que ha sido necesario realizar algunos cambios además de la inclusión de otro integrado, tal y como se puede observar a continuación:

Dispositivo	Bits inicio	Solución	Bits fin
Teclado [*]	19+1	Teclado matricial de 4x4+4 teclas individ.	12
Indicadores [**]	14	MAX7221	1+2
Displays [***]	8+24	4x MAX7221	4 (+2)
Conectividad	2(+3)	Sin cambios	2(+3)
Expansión	0	Aprovechar pines libres	13(+2)
Total	68		34

Tabla 4 - Bits necesarios para el funcionamiento del AGC

Entre paréntesis se indican los bits de puerto que, por ser multifuncionales, ya han sido contabilizados en dispositivos anteriores.

[*] 19 teclas frontales + 1 para el reset.

[**] Con el MAXIM se emplean 2 bits para la comunicación serie + 1 para cada CS.

[***] 24 caracteres de 8 bits conectados a través de 4 MAXIM.

La práctica totalidad de rutinas necesarias para el manejo de los distintos dispositivos han sido previamente definidas y testeadas, por lo que solo es necesario adaptar aquellas empleadas para:

- Comunicación serie PIC-PC
- Lectura de teclado matricial
- Lectura de teclas independientes

MAX7221

El empleo del integrado MAX7221 producido por la empresa Maxim Integrated permite controlar, a través de una comunicación serie, un *display* LCD de 7 segmentos y cátodo común de hasta 8 dígitos. Dispuestos de manera adecuada, esto se traduce en la capacidad de controlar hasta 64 LEDs (o grupos de LEDs, siempre que la corriente requerida sea inferior al máximo especificado en el *datasheet*).

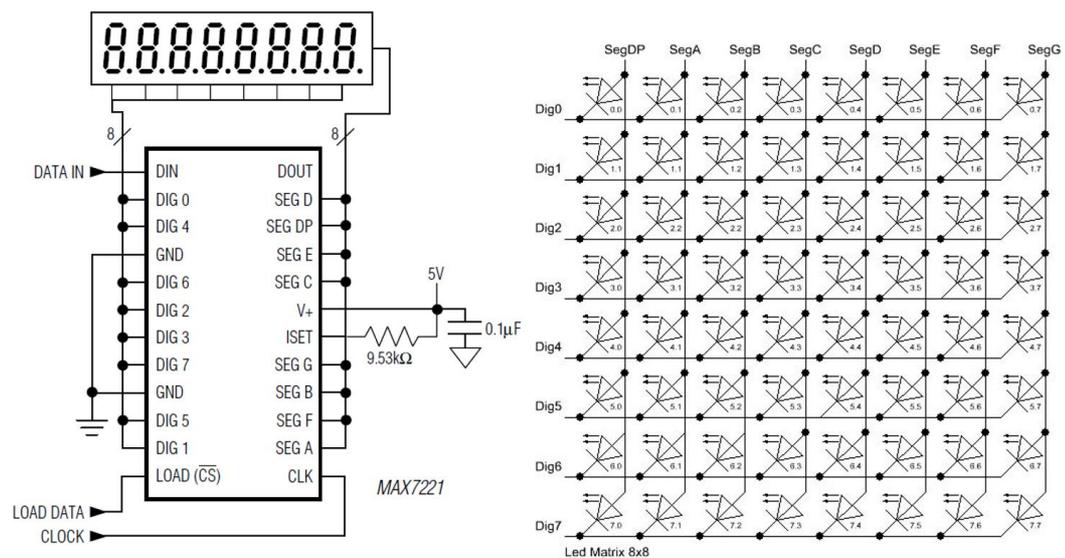


Tabla 5 - Control dígitos de 7 segmentos (izda.)^[19] y de un array de leds (dcha.)^[3]

En el apartado de HW se detallará cuál es la distribución exacta tanto de los LEDs como de los *displays* de 7 segmentos presentes en el circuito.

La rutina empleada para el manejo de los MAXIM, al igual que las mencionadas en el apartado anterior, se encuentra disponible en la base de datos del proyecto global, por lo que con apenas un par de ajustes será empleada para el control de los distintos elementos, ya sean LEDs o *displays* de 7 segmentos.

SW de pruebas

Atendiendo a la ilustración 10, se puede observar cómo la comunicación entre el PC y el PIC es bidireccional, y cómo la comunicación entre el PIC y los dispositivos de interfaz humana como los *displays*, los indicadores y el teclado es unidireccional. Para verificar el correcto funcionamiento de cada uno de estos componentes se han desarrollado los siguientes cuatro módulos SW básicos.

Inicialización

Una vez comience la ejecución del programa principal, este verificará que todos los indicadores y *displays* están apagados, y establecerá la comunicación vía USB con el PC a la espera de recibir los parámetros oportunos.

Control teclado

Cuando el PIC detecte que ha sido pulsada alguna de las 19 teclas del teclado, se producirá un evento tras el que se transmitirá al PC una cadena de caracteres con el formato «TXX^{CR/LF}», donde XX será del 1 al 19 el número de tecla pulsada y el salto de línea determina el final de la trama.

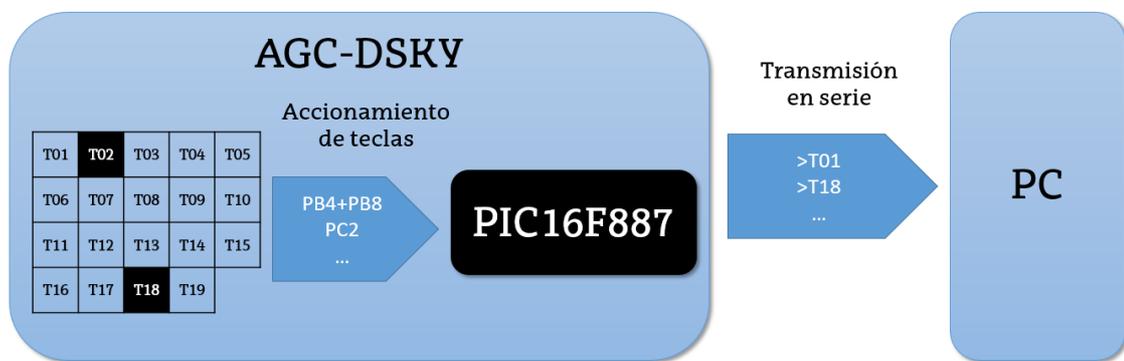


Ilustración 11 - Esquema del módulo SW de control del teclado

Control *displays* e indicadores

Para poder mostrar la información numérica en los *displays* y encender o apagar los indicadores, se ha creado un sencillo lenguaje mediante el que el PIC responderá a las tramas que reciba, realizando las conversiones oportunas y activando o desactivando los LEDs que correspondan a través de los *maxim*.

Dispositivo	Formato trama	Valores admitidos	Ejemplos de uso
<i>Displays 6 díg.</i>	DXSNNNNN	Destino X: [A], [B], [C] Signo S: [-]=negativo, [0]=positivo Valor N: [0], [1], ... [9]	>DB-23256 >DC002311
<i>Displays 2 díg.</i>	DXNN	Destino X: [D], [E], [F] Valor N: [0], [1], ... [9]	>DD02 >DF61
<i>Indicadores</i>	ENN	Estado E: [i]= apagado, [I]= encendido Destino NN: [01],[02], ... [18]	>I15 >i08

Tabla 6 - Lenguaje de comunicación PC-PIC

Siendo así, se muestra un ejemplo de lo que podría ser una secuencia de tramas para introducir varios datos en los *displays* y modificar el estado de algunos indicadores:

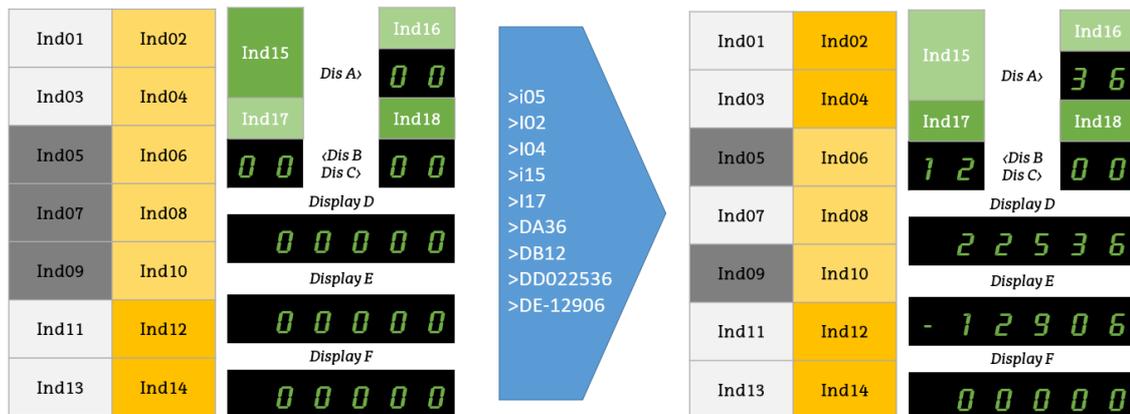


Ilustración 12 - Ejemplo de uso del lenguaje de comunicación PC-PIC

Test HW

Una vez que se dispone de los programas de inicialización, control del teclado y de los *displays* e indicadores, se puede comprobar el correcto funcionamiento de todos ellos enviando desde el PC al PIC la trama de cinco bytes «TEST^{CR}/LF» donde el salto de línea para detectar el fin de la trama. A continuación, el módulo de test de HW procederá a activar todos los indicadores y *displays*, para posteriormente permitir al usuario accionar cada pulsador del teclado y mostrar en pantalla su correcta lectura.

HARDWARE

Para abordar el que en este caso es el eje central del proyecto, se ha dividido esta sección en varios apartados, de modo que inicialmente se presenta la relación de componentes empleados y sus características principales. A continuación, se expone el circuito esquemático y se estudian de manera pormenorizada cada uno de los bloques funcionales del mismo. Posteriormente, se presenta el circuito PCB, especificando las distintas etapas de su creación y los criterios seguidos. Por último, se muestra el resultado del circuito antes y después del montaje de componentes y el procedimiento seguido para diseñar y fabricar la caja demás elementos mecánicos.

Selección de componentes

El LM7805 es un regulador de tensión de tres terminales que permite proporcionar a la salida una tensión fija de 5V que alimentará todos los componentes activos y gran parte de los pasivos del circuito. Posee un limitador de corriente interno y autoapagado térmico, y con una refrigeración adecuada puede proporcionar hasta 1A de corriente a la salida.

El microcontrolador PIC16F887 será el «cerebro» de todo el circuito. Aunque su funcionamiento se detallará en los siguientes apartados, cabe reseñar que será el encargado de gestionar tanto la interfaz con la persona usuaria a través de los pulsadores, indicadores y *displays*, como de la comunicación con el PC vía USB.

MAX7221. Se trata de un driver de comunicación serie para *displays*-LED de cátodo común que será empleado también para controlar los LEDs que conforman los diferentes indicadores del circuito.

Displays 7seg. Agrupados en *displays* de dos o tres dígitos, servirán para visualizar la información numérica en los distintos de la pantalla derecha.

LEDs 2835/3014. Dispuestos en bloques de dos o cuatro LEDs, forman los distintos tipos de indicadores que se encenderán o apagarán dependiendo del estado.

Switches/pulsadores. A través de ellos, la persona usuaria podrá introducir valores y códigos y seleccionar las distintas funciones para interactuar con el AGC. Existe, además, un pulsador de *reset*.

Conector ICSP. Aunque el PIC puede ser fácilmente extraído del circuito y programado en una placa de pruebas, se ha estimado oportuno incluir un conector que proporcione acceso directo a los pines ICSP (*In-Circuit Serial Programming*).

Conector USB. Dado que el PIC dispone de un módulo EUSART (*Enhanced Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*) que se puede utilizar para la comunicación tanto con el PC como con otros periféricos, se ha incorporado al diseño un conector que lo permite.

Conector expansión: Con el fin de permitir el máximo aprovechamiento del PIC, se ha incluido este conector que permite acceder a todos los pines de puertos que, en este proyecto, no han sido utilizados.

Esquemático

El esquemático mostrado a continuación (ver detalle en el anexo II) está formado por los 4 bloques funcionales del circuito, que son:

- Alimentación
- Procesamiento
- Comunicación
- Interfaz de usuario
- Iluminación

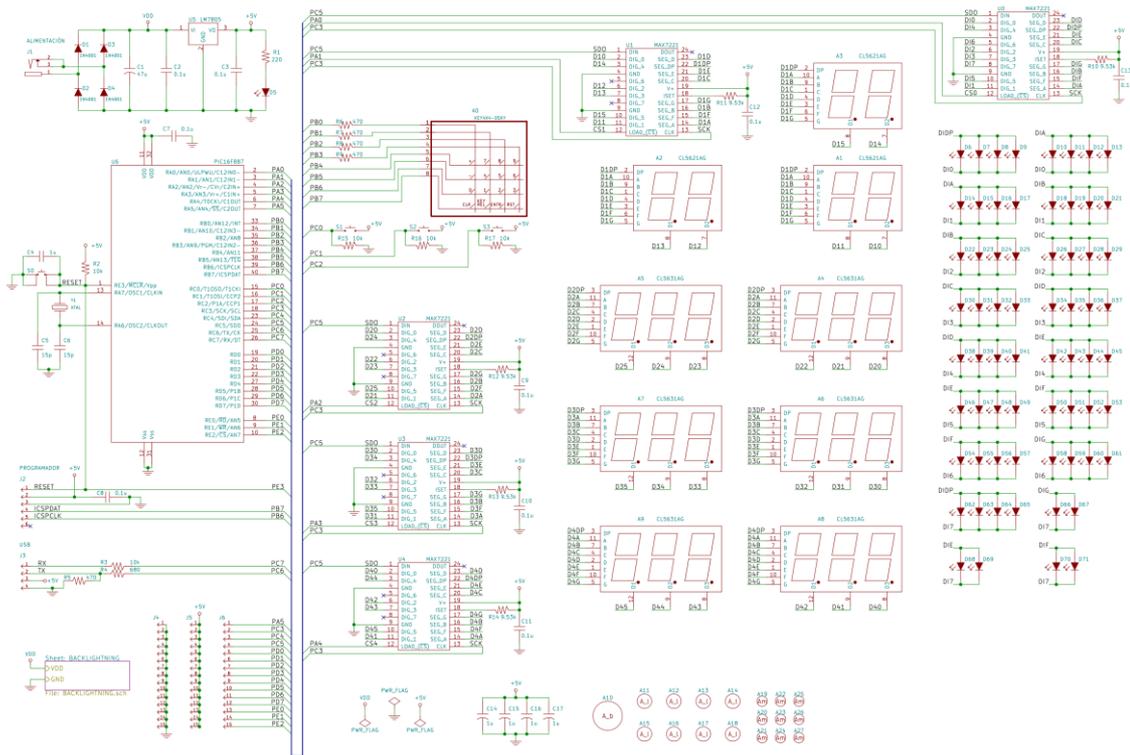


Ilustración 13 - Esquemático del proyecto (detalle en anexo II)

Alimentación

El bloque funcional correspondiente a la alimentación está compuesto por un conector hembra de alimentación en chasis, al cual habrá que conectar una fuente de 12V. De este modo, tras atravesar el puente de diodos, se proporcionará al circuito dos tensiones: una de 12V a la que se conectará la retroiluminación, y otra de 5V que servirá para alimentar al PIC, los MAX7221, el conector de expansión y el resto de elementos que lo requieran. Se han incluido, además, cuatro condensadores de refuerzo en puntos críticos del circuito para garantizar una tensión estable en los componentes que puedan generar picos de corriente.

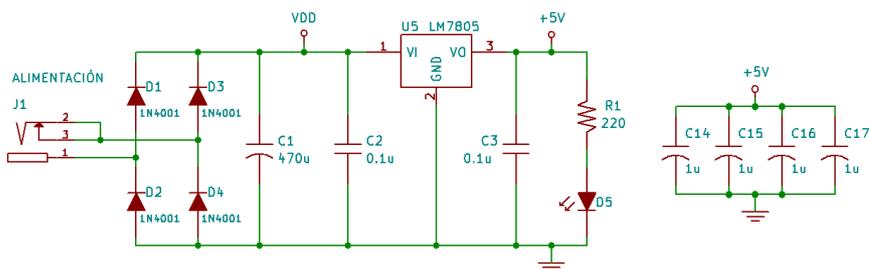


Ilustración 14 - Circuito de alimentación y condensadores de protección

Procesamiento

Toda la información, tanto de entrada como de salida, que circula por el circuito lo hace a través del PIC16F887. Tal y como se ha mencionado en el apartado de SW, este está conectado, por una parte, al PC a través de un conector USB y, por otra, a los *displays*, los indicadores y el teclado del AGC-DSKY. Cada uno de estos elementos se analizará en los apartados siguientes, y sus conexiones se representan en el esquemático a través de un *BUS*, PIC del siguiente modo:

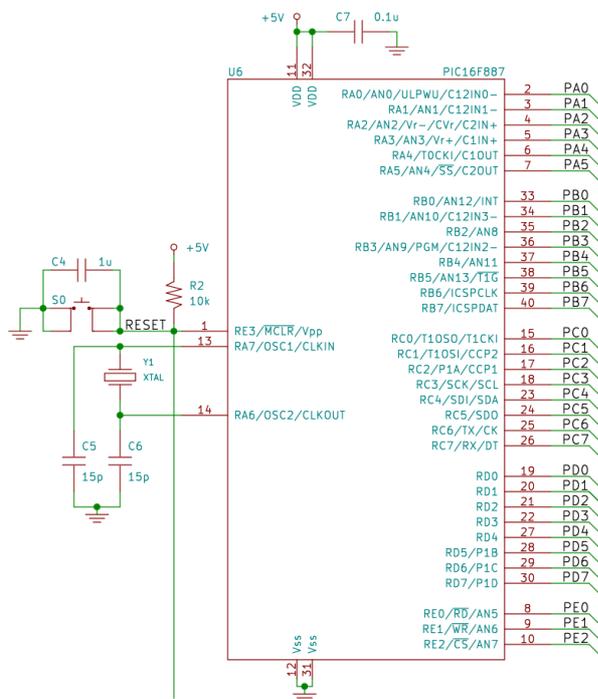


Ilustración 15 - BUS de conexiones del PIC17F887

Comunicación

Se prevén, tal y como se ha indicado en el apartado anterior, tres vías a través de las que el circuito podrá comunicarse con el exterior, y que se exponen a continuación:

Conector USB/EUSART

Gracias al módulo de comunicación serie EUSART que incorpora el PIC16F887, es posible establecer un enlace USB con el exterior, que en este caso será la forma predeterminada de comunicarse con el PC. Se ha optado por no hacer uso de un conector específico y poner a disposición de la persona usuaria los 4 pines necesarios para que pueda ser empleado aquel que más conveniente resulte, dependiendo del uso que se le vaya a dar.

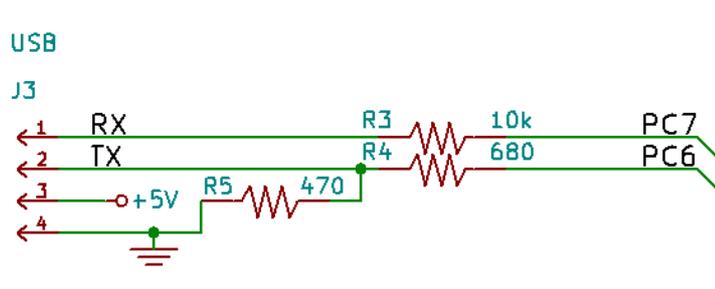


Ilustración 16 - Conector USB

Conector ICSP

El conector ICSP, siguiendo el criterio del anterior, también se presenta en forma de pines con el fin de que la persona usuaria emplee el conector que estime oportuno a la hora de acceder al PIC para la programación del mismo o la realización de tareas de testeo, monitorización o depuración del programa cargado.

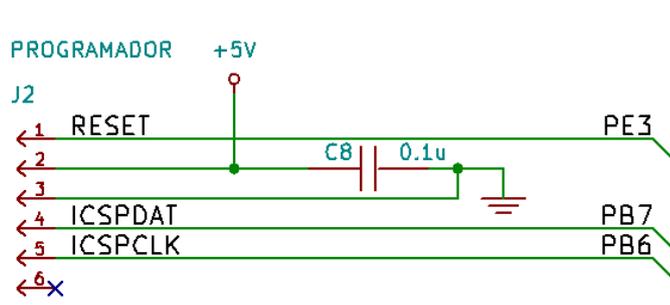


Ilustración 17 - Conector ICSP

Conector de expansión

Este conector de 15 pines proporciona acceso directo a los bits de puerto a los que no se les ha asignado ninguna función o que, teniéndola, pueden tener también otros usos. Se han dispuesto de manera ordenada por funcionalidad y con la configuración estándar de una conexión de servo (*GND-VCC-Signal*) para facilitar la alimentación de los elementos que se conecten, si fuera necesario.

En la siguiente tabla se muestran agrupados según sus características:

Puerto-Pin	Tipo	Func.	Otras funciones	Uso potencial
PA5	I/O	N/C	RA5/AN4/SS/C2OUT	GPIO, Analog Input for ADC SPI com I2C com.
PC3	I/O	SCL	RC3/SCK	
PC4	I/O	N/C	RC4/SDI/SDA	
PC5	I/O	SDO	RC5	
PD0-4	I/O	N/C	RD0-4	Expansion
PD5-7	I/O	N/C	P1B, P1C, P1D	Expansion, PWM output
PE0-2	I/O	N/C	AN5,AN6,AN7	GPIO, Analog Input for ADC

Tabla 7 - Pines disponibles para la expansión del circuito

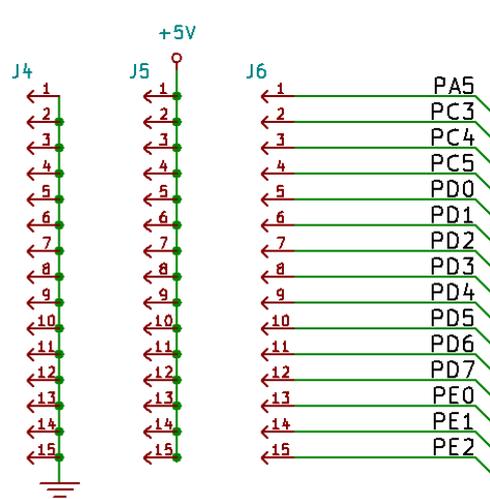


Ilustración 18 - Conector de expansión

Interfaz usuario

Con el SW correspondiente en ejecución, tanto en el PC como en el AGC, la interacción básica de la persona usuaria con el DSKY se circunscribe a tres bloques funcionales. Cada uno de ellos estará convenientemente conectado al PIC, que se encargará de procesar la información necesaria en cada momento. Siendo así, se detallan a continuación dichos bloques junto con la asignación de pines correspondiente:

Teclado

De las 19 teclas existentes, se dispondrán 16 en forma de *array* de 4x4, de modo que, conectados al puerto B del PIC, permitirán optimizar las salidas del mismo a la vez que facilita la reutilización de rutinas ya desarrolladas. Las teclas se dispondrán del siguiente modo:

PortB	PB0	PB1	PB2	PB3
PB4	+	7	8	9
PB5	-	4	5	6
PB6	0	1	2	3
PB7	CLR	KEYREL	ENTER	RSET

Tabla 8 - Distribución de bits de puerto B

PortC	PC0	PC1	PC2
tecla	PROG /STBY	VERB	NOUN

Tabla 9 - - Distribución de bits de puerto C

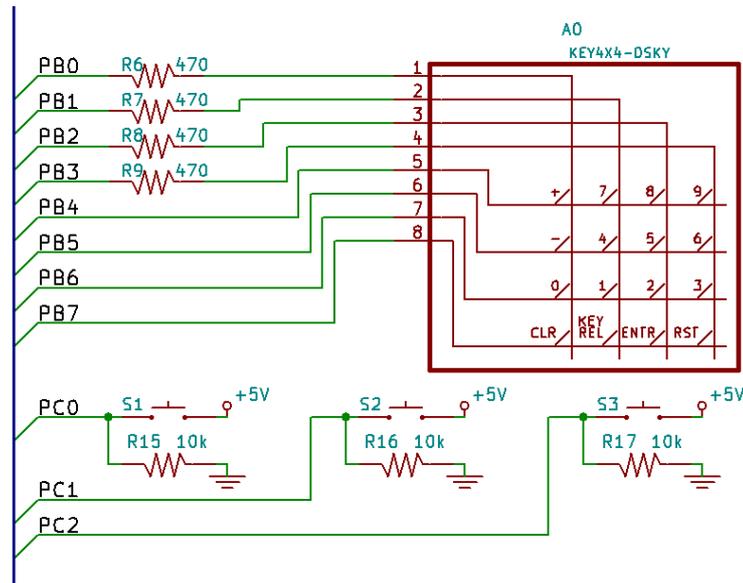


Ilustración 19 - Teclas dispuestas matricialmente (sup.) e individualmente (inf.)

Existe, además, una última tecla que cumple una función fundamental: la de resetear el circuito en caso de bloqueo o entrada en bucle del PIC o alguno de los periféricos. Esta función está asignada al bit de puerto PE3 del PIC, en el pin 1, y además de tener acceso a ella a través del pin 1 del conector ICSP es posible activarla desde el pulsador S0 presente en el circuito de *reset*:

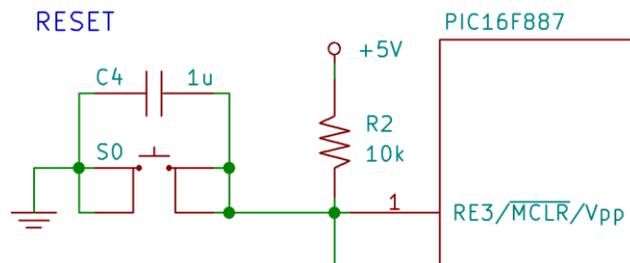


Ilustración 20 - Circuito de reset

Displays

Para mostrar los datos requeridos en los distintos registros de la pantalla derecha del DSKY, se emplean los siguientes *displays* conectados a cuatro MAXIM7221 correspondientes y que mostrarán los dígitos señalados:

Reg.	Nº díg.	Displays		MAX	CS	Dígitos mostrados**	
		2 dig	3 dig				
NOUN	2	A1		1	PA1	D10 D11	
VERB	2	A2		1	PA1	D12 D13	
PROG	2	A3		1	PA1	D14 D15	
REG1	5 (+1*)		A4,5	2	PA2	D20 D21 D22	D23 D24 D25
REG2	5 (+1*)		A6,7	3	PA3	D30 D31 D32	D33 D34 D35
REG3	5 (+1*)		A8,9	4	PA4	D40 D41 D42	D43 D44 D45

Tabla 10 - Distribución de dígitos conectados a los MAX7221

* 1 dígito para el signo

** DXV: **X** indica el MAXIM que lo controla e **Y** el dígito del dígito al que corresponde

Como ejemplo ilustrativo, se puede observar el detalle de la conexión del MAXIM U1 y los tres *displays* de 2 dígitos que controla.

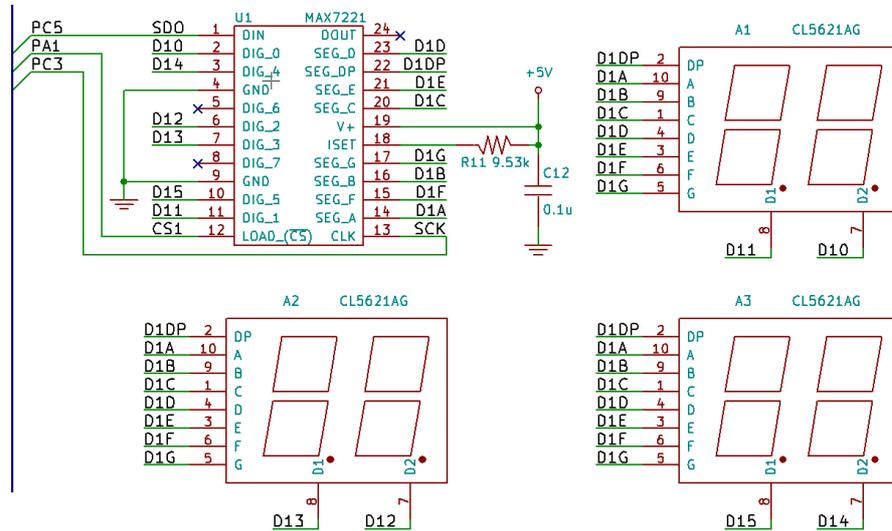


Ilustración 21 - Ejemplo control *displays*

Indicadores

El DSKY dispone de un total de 18 indicadores lumínicos, repartidos en dos columnas de siete en la mitad izquierda y otros cuatro en la mitad derecha del panel, del siguiente modo:

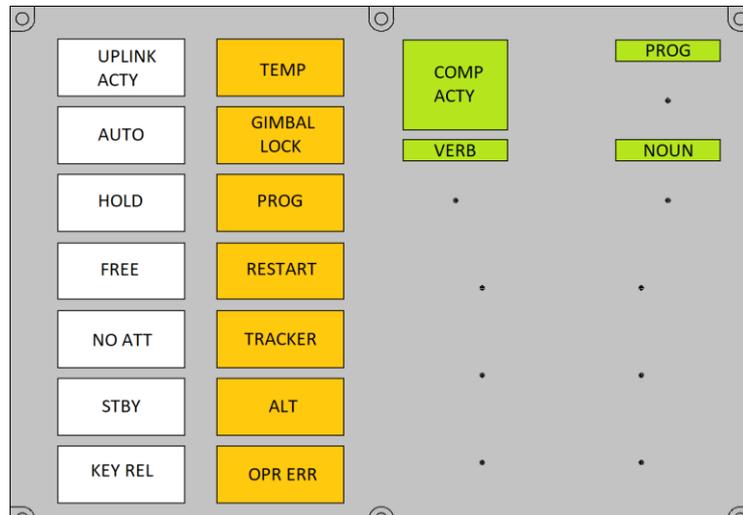


Ilustración 22 - Indicadores presentes en el DSKY

Para iluminarlos de un modo homogéneo, después de realizar varias pruebas de iluminación con distintos materiales y distribuciones de puntos de luz, se ha decidido emplear cuatro LEDs 2835 en fila para cada uno de los 14 indicadores de la izquierda, cuatro 3014 dispuestos en cuadratura para el indicador COM ACTY, y dos en hilera para cada uno de los tres restantes.

Dado el reducido consumo de los LEDs, y para evitar que ante el fallo de alguno de ellos quede inutilizado un indicador, se ha optado por conectarlos en paralelo, de modo que el MAXIM que los controla los toma como un solo diodo. Aun así, para distribuir la corriente de la forma más homogénea posible entre todos los dígitos y segmentos, se conectarán del siguiente modo:

	SDP	SA	SB	SC	SD	SE	SF	SG	LEDs
D0	UPLINK ACTY	TEMP							8
D1		AUTO	GIMBAL LOCK						8
D2			HOLD	PROG					8
D3				FREE	RESTART				8
D4					NO ATT	TRACKER			8
D5						STBY	ALT		8
D6							KEY REL	OPR ERR	8
D7	CMP ACTY					VERB	NOUN	PROG	10

Tabla 11 - Distribución de indicadores conectados al MAX7221

Al igual que con los *displays* de 7 segmentos, se incluye un ejemplo de la conexión del MAXIM con algunos de los indicadores que controla.

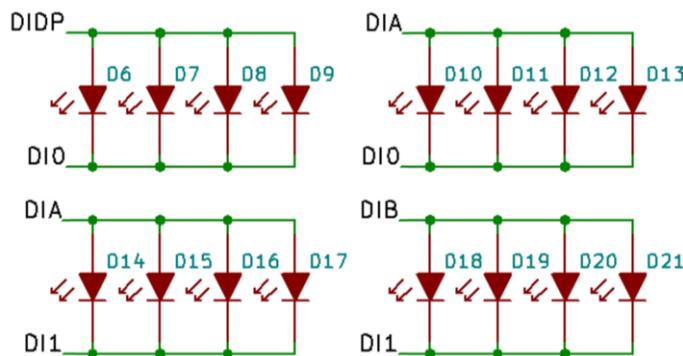
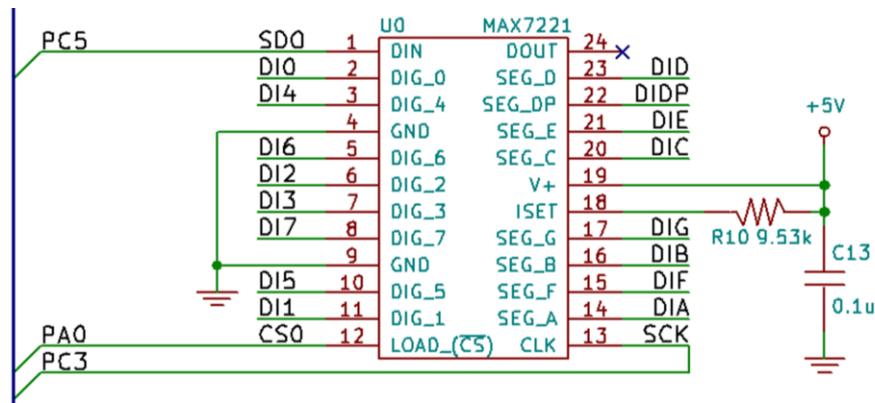


Ilustración 23 - Ejemplo control indicadores

Iluminación

Al margen de los LEDs que componen los indicadores, el circuito dispone de una iluminación que permite identificar fácilmente los pulsadores del teclado en condiciones de baja luminosidad.

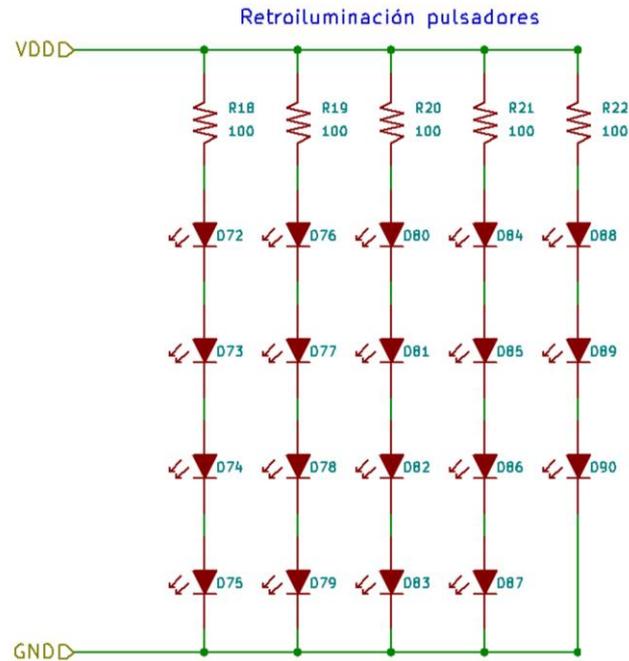


Ilustración 24 - Retroiluminación pulsadores

Diseño de huellas

Tal y como ha quedado patente en los apartados anteriores, la mayoría de los componentes empleados son tan comunes que no ha sido necesario diseñar prácticamente ninguna huella. No obstante, dado que se ha decidido estructurar parte del teclado de forma matricial, con el fin de reducir las probabilidades de error en el emplazamiento y rutado de los pulsadores en el PCB, se ha creado una huella *ex profeso*.

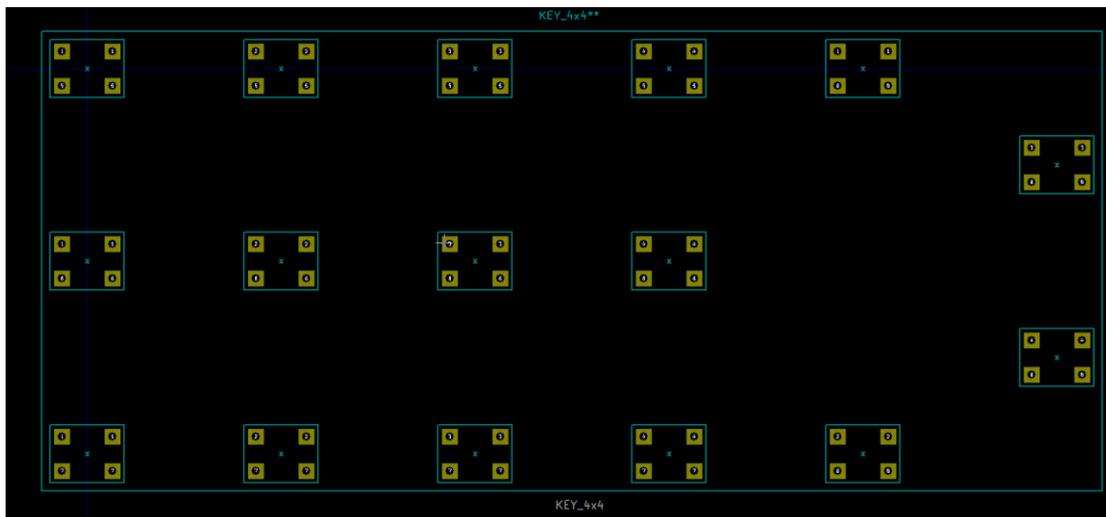


Ilustración 25 - Huella para disposición de teclado matricial

Diseño de PCB

Tomando como base la información recopilada desde distintas fuentes y no disponiendo de una acotación completa que recogiera exactamente todas las medidas necesarias (dimensión de las pantallas, los dígitos y pulsadores, margen entre pulsadores y hasta el borde del panel...), ha sido necesario realizar numerosas pruebas con el fin de poder ubicar todos los componentes fijos tratando de ser lo más fieles posibles al diseño original del AGC. Una vez definidas estas dimensiones, se procedió a señalar el punto exacto en el que habrían de posicionarse los *displays*, los pulsadores y los taladros para los tornillos externos (Anexo XX).

A continuación, se posicionaron el PIC, los conectores USB, ICSP y de expansión, los MAX7221, los LEDs de los indicadores y la retroiluminación, ubicándolos de modo que no interfirieran con soportes que se emplearían para sostener el resto de elementos no electrónicos. Por último, se dispusieron las resistencias, condensadores y el resto de componentes necesarios para completar el circuito.

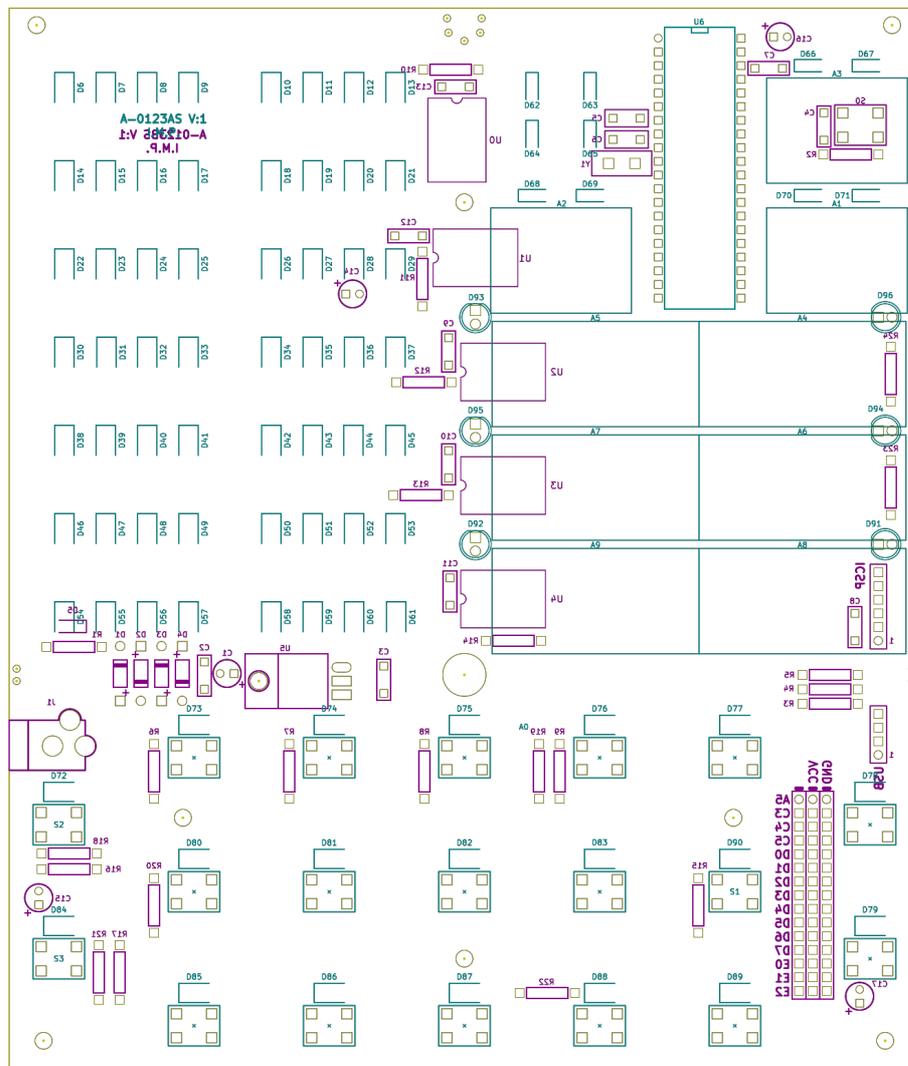


Ilustración 26 - Posicionamiento de componentes

Rutado del PCB

Inicialmente se barajaba la posibilidad de realizar un PCB de cuatro capas, empleándose las dos exteriores para el rutado y las dos interiores como alimentación y tierra. No obstante, se abordó el rutado de tal modo que, dependiendo de la densidad de líneas y la disposición de las mismas, se pudieran emplear las dos capas exteriores para proporcionar también la alimentación y la tierra al circuito. Finalmente, una vez realizado el rutado inicial, se decidió suprimir las dos capas interiores, abaratando así el coste del circuito sin afectar a la funcionalidad ni al rendimiento del mismo. Como criterio general, se ha empleado la capa frontal, o TOP, para el rutado horizontal, y la alimentación de 5V y la capa trasera, o BOTTOM, para el rutado vertical y la tierra del circuito, siguiendo las medidas que a continuación se detallan:

Tipo de pista	Ancho pista	Margen	Diám. vía	Tdro. vía
<i>Señal</i>	0,01	0,009	0,016	0,008
<i>+5V, GND</i>	0,025	0,015	0,04	0,02
<i>+12V</i>	0,04	0,02	0,06	0,03
<i>Contorno +5V, GND</i>	0,1	0,02	-	-

Tabla 12 - Dimensiones de pistas y vías según red asignada

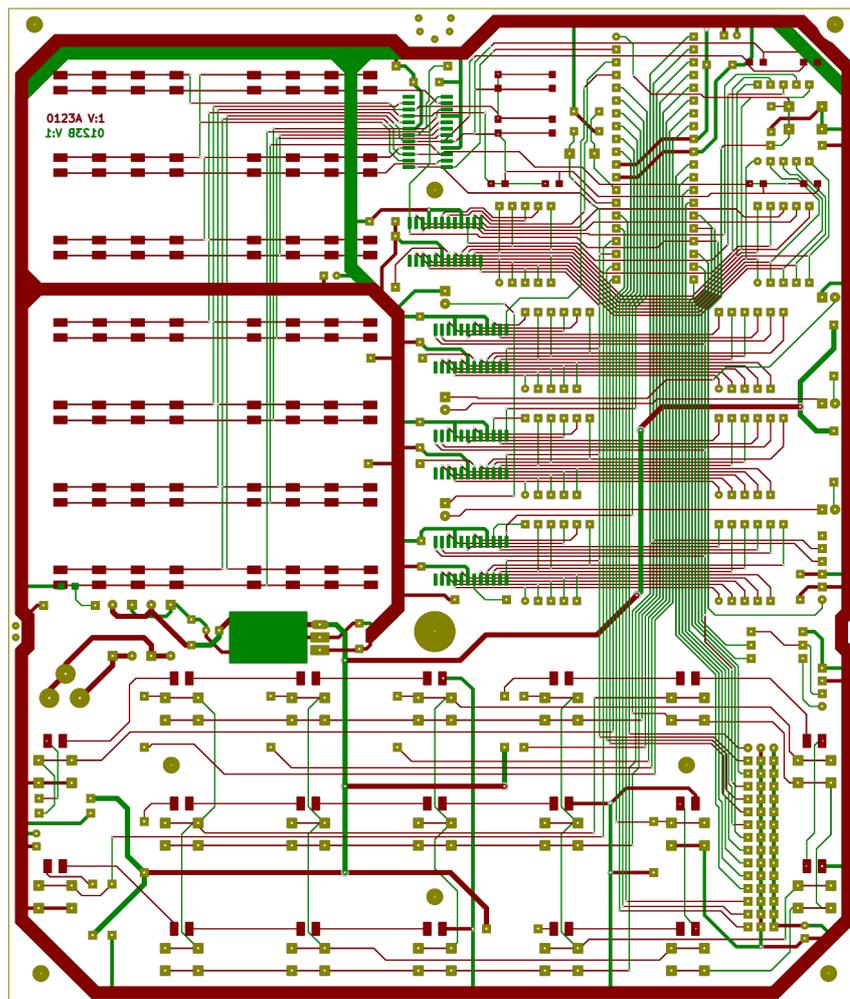


Ilustración 27 - Rutado del circuito (detalle en anexo III)

Creación de Gerber

KiCad, al igual que la mayoría de entornos de desarrollo de PCBs, dispone de un sistema DRC (*Design Rule Checking*) que permite verificar que no existen problemas físicos (superposición de componentes, taladros o vías de tamaños inadecuados...) ni eléctricos (cortocircuitos, vías/*pads* mal conectados o sin conectar...). Gracias a ello se dispone de la certeza de que el circuito es «técnicamente correcto», pero conviene tener presente que durante el proceso de fabricación y/o montaje existen unos márgenes de error que pueden perjudicar e incluso inutilizar el circuito. Por ello, una vez creados los gerber, se han revisado minuciosamente las conexiones, distancias entre líneas y *pads*, vías y demás elementos para realizar varios ajustes que aumentarían, en la medida de lo posible, el margen de error disponible en puntos críticos con el fin de minimizar futuros riesgos. Los gerber empleados para la fabricación del circuito son los siguientes:

PCB NAME	A-0123IM
LAYERS	2
PCB EXTERNAL BORDERS	A-0123IM-Edge.Cuts.gbr
COMPONENT SIDE LAYOUT	A-0123IM-F.TOP.gbr
SOLDER SIDE LAYOUT	A-0123IM-B.BOTTOM.gbr
COMPONENT SIDE SOLDERSTOP	A-0123IM-F.Mask.gbr
SOLDER SIDE SOLDERSTOP	A-0123IM-B.Mask.gbr
COMPONENT SIDE MARKING-PRINT	A-0123IM-F.SilkS.gbr
SOLDER SIDE MARKING-PRINT	A-0123IM-B.SilkS.gbr
DRILL PLACEMENT	A-0123IM.drl
DRILL PLACEMENT (NPTH)	A-0123IM-NPTH.drl

Tabla 13 - Ficheros gerber empleados para la fabricación del PCB

Montaje de componentes

Tras recibir del fabricante el circuito, se procedió al montaje y soldado de los componentes detallados en la tabla 20, quedando del siguiente modo:

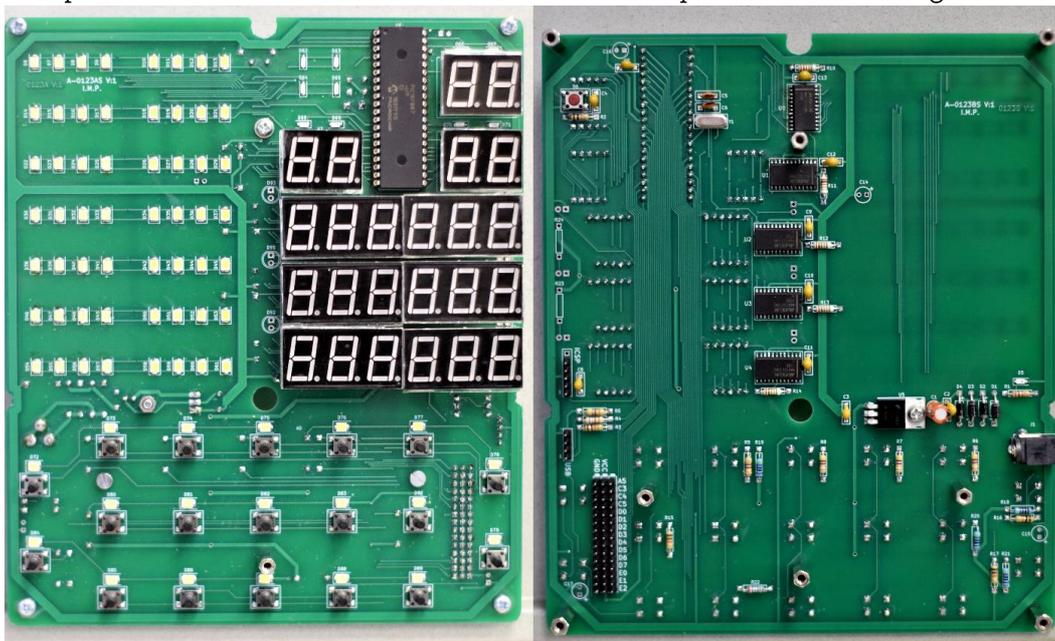


Ilustración 28 - Circuito impreso ensamblado. Parte frontal (izda.) y trasera (dcha.)

Creación de la estructura

Todo circuito integrado requiere de una estructura o soporte en el que ser fijado con el fin de proporcionarle una base firme y estable que le permita soportar las presiones cuando se interactúa sobre él (pulsado de teclas, enchufar o desenchufar conectores...) y que lo proteja frente a los riesgos externos a los que pueda verse expuesto, como golpes, polvo o humedad. Además, esta estructura puede tener otras funciones, como puede ser la de proteger el exterior de las emisiones radioelétricas del circuito, de quemaduras por componentes de alta temperatura o similares; señalar las distintas partes o conexiones del circuito para el usuario, e incluso una finalidad estética, que hacen que el prototipo resulte atractivo al tacto o la vista.

En la siguiente tabla se muestra la relación de materiales empleados para construir o acabar los distintos elementos de la estructura, así como la técnica empleada para su manejo. A estas técnicas se les suman ajustes realizados manualmente, como lijados y algunos taladros.

Elemento	Uds	Material	Técnica
<i>Caja del circuito</i>	1	DM 5mm	Corte láser
<i>Carcasa frontal</i>	1	PLA gris	Fab. aditiva
<i>Soporte indicadores</i>	1	PLA gris	Fab. aditiva
<i>Pantalla indicadores</i>	17	Metacrilato 5mm nieve	Corte láser
<i>Soporte displays</i>	1	PLA negro	Fab. aditiva
<i>Pantalla protectora</i>	2	Metacrilato 3mm cristal	Corte láser
<i>Pulsadores</i>	19	Metacrilato 3mm nieve PET-G transparente Fotolito	Fab. aditiva Corte láser Impresión
<i>Unión de piezas</i>	1	Pegamento de polimerización	Aplicación directa

Tabla 14 - Materiales y técnicas empleadas en distintos elementos de la estructura

Tanto para la fabricación aditiva como para el corte por láser, ha sido necesario realizar los modelos previamente en un programa de diseño 2D/3D. Para esta labor, se ha empleado la aplicación gratuita Google Sketchup Make 2017 junto con la extensión *solid inspector*, que permitía corregir errores en los modelos 3D.

Los diseños necesarios para el proyecto han sido los siguientes:

- Pulsadores
- Soporte para *displays* e indicadores derechos
- Soporte para indicadores izquierdos
- Indicadores
- Carcasa frontal
- Caja y estructura interna para la fijación del circuito y la carcasa

Cada uno de estos diseños han sido debidamente ajustados para asegurar un encaje perfecto, cuyo resultado final puede observarse en las ilustraciones que se muestran a continuación:

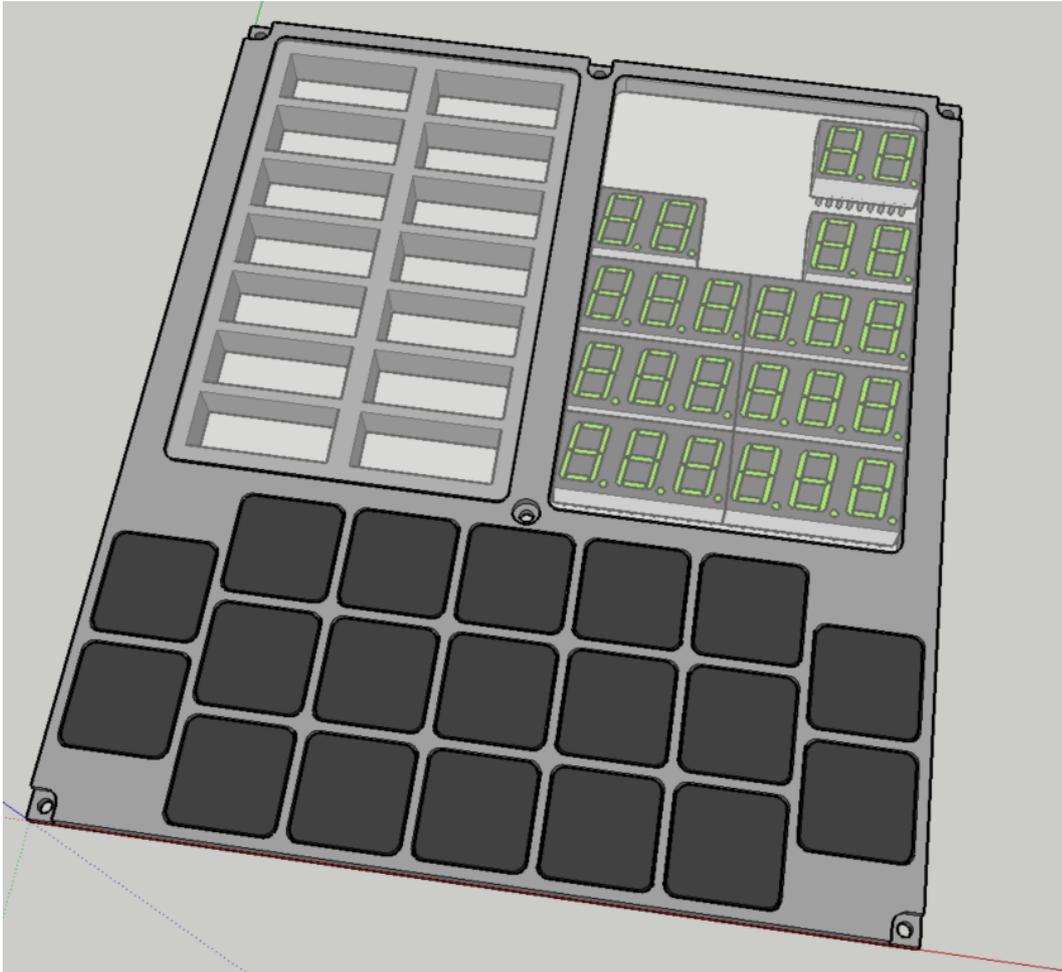


Ilustración 29 - Diseño inicial del AGC-DSKY

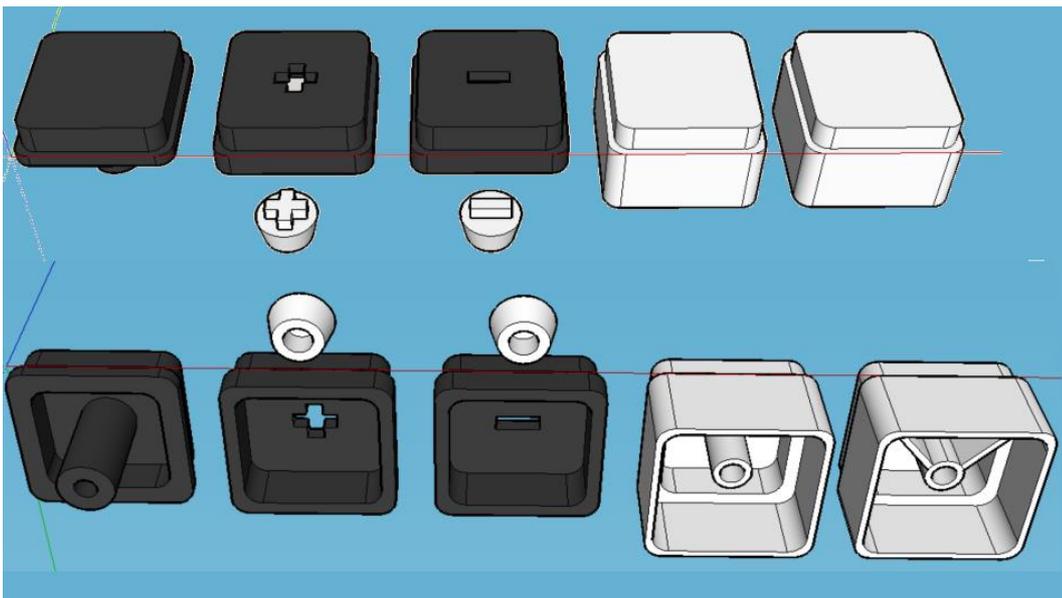


Ilustración 30 - Progresión de diseños de los pulsadores.

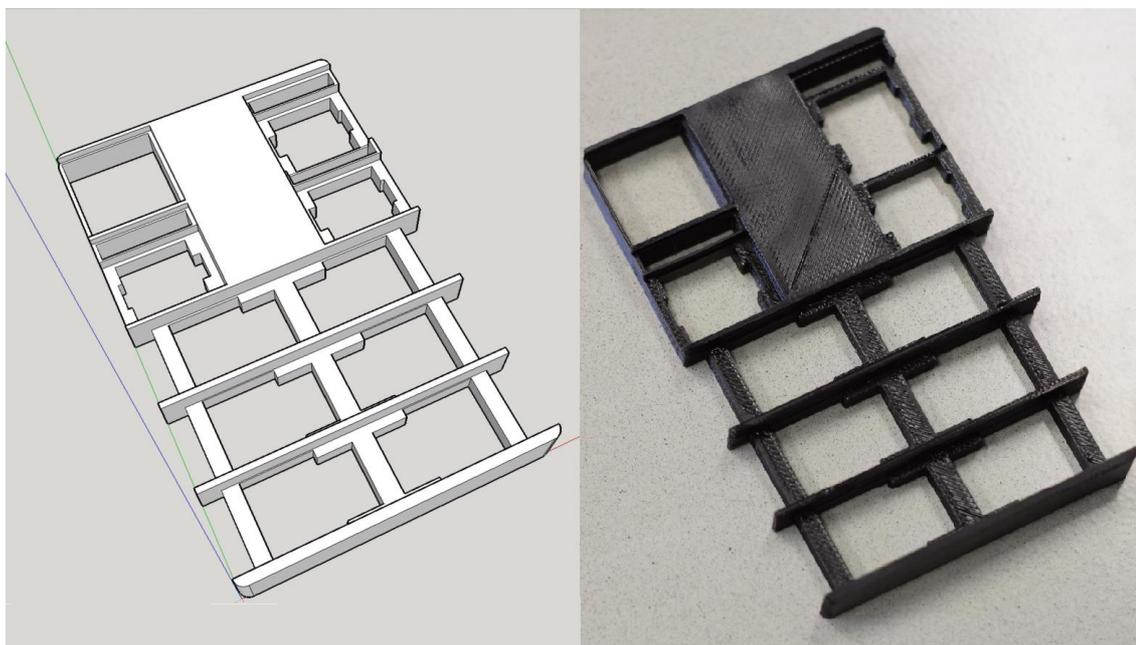


Ilustración 31 - Soporte de *displays*. Diseño y resultado final.

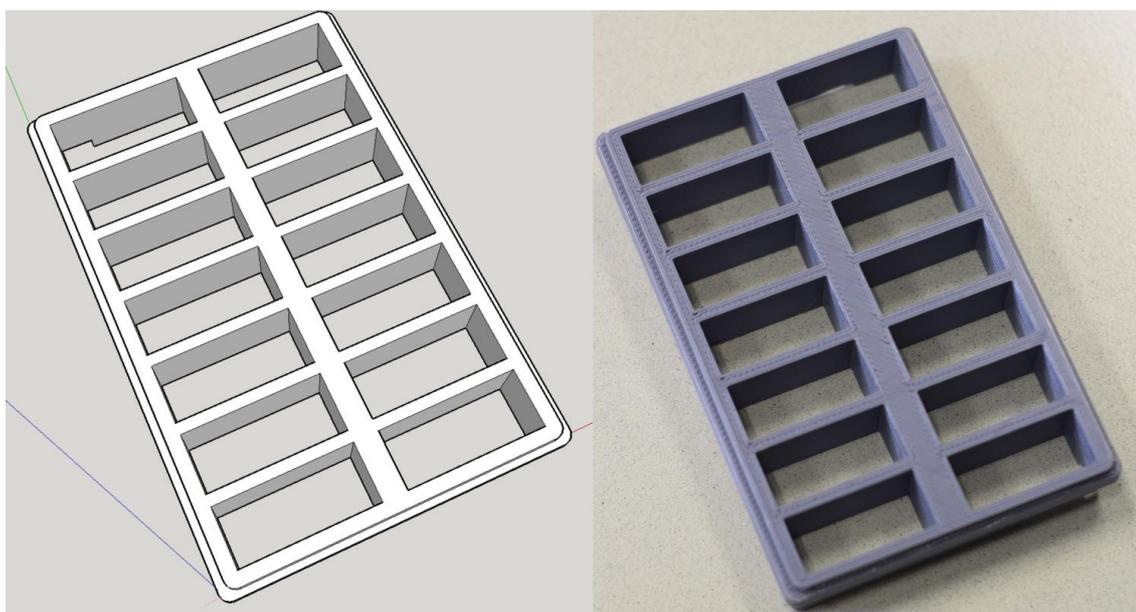


Ilustración 32 - Soporte de indicadores. Diseño y resultado final.

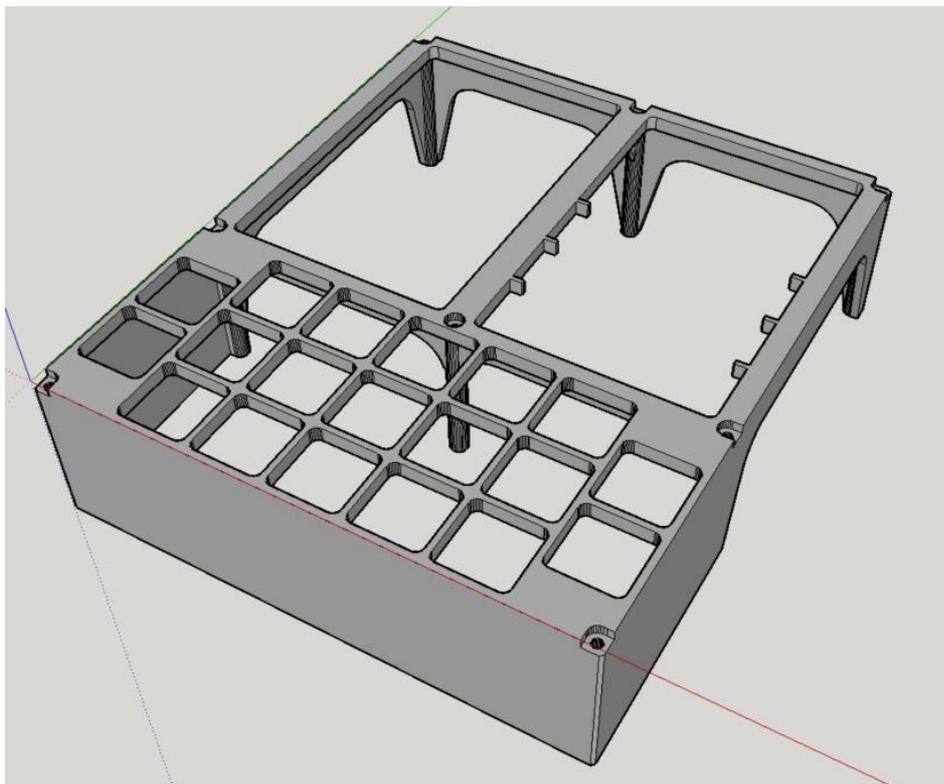


Ilustración 33 - Carcasa frontal. Vista superior del diseño.

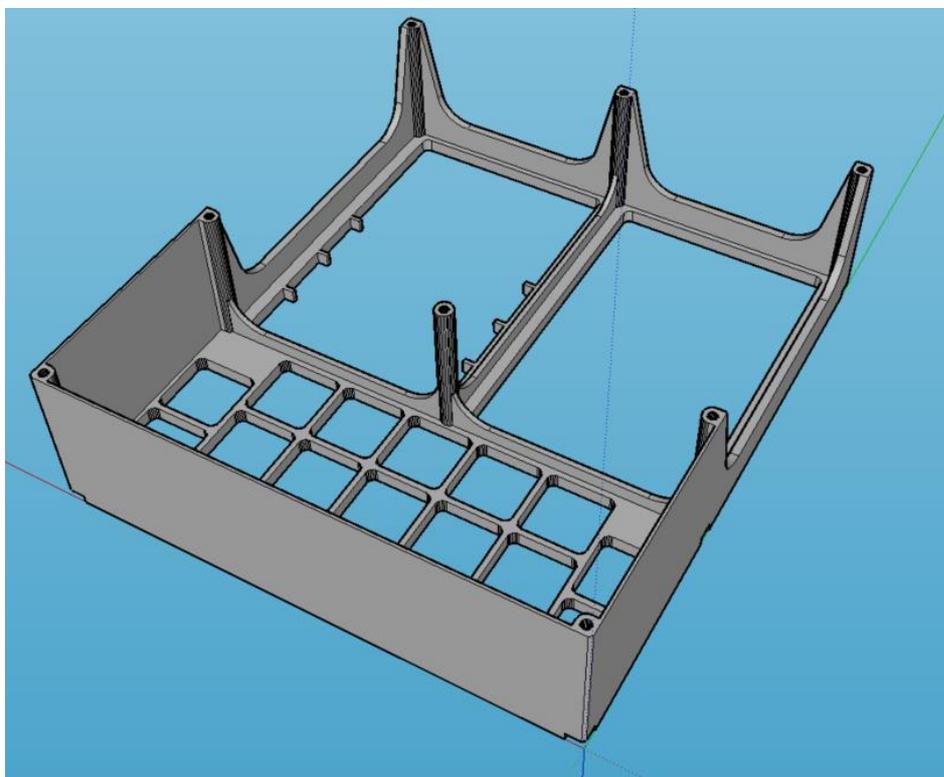


Ilustración 34 - Carcasa frontal. Vista inferior del diseño.

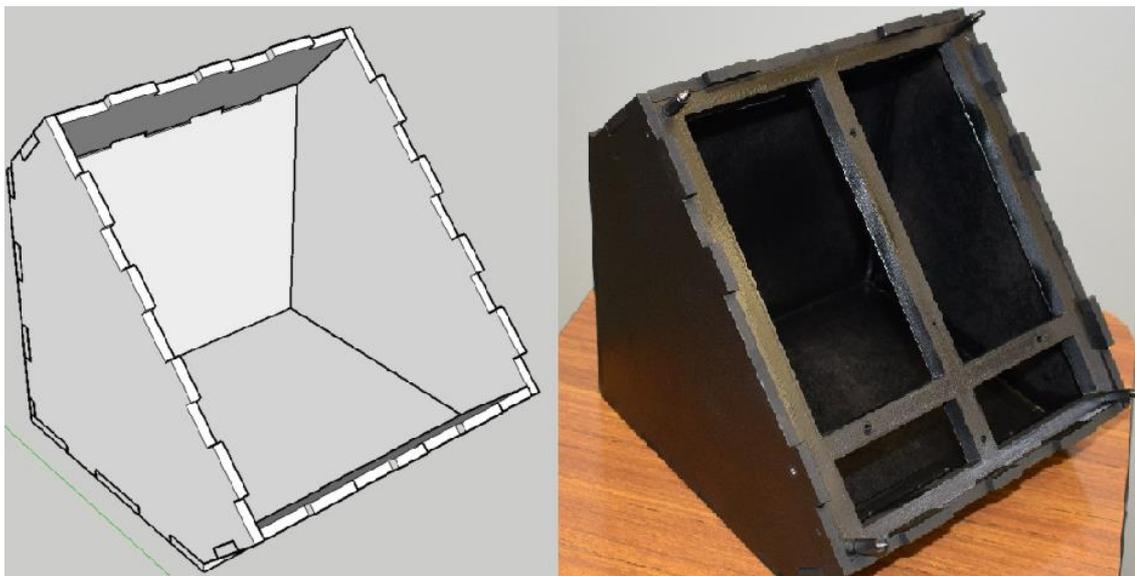


Ilustración 35 - Caja y soporte del PCB. Diseño y resultado final

Especificaciones

Una vez finalizado el montaje del circuito y realizadas las pruebas pertinentes para verificar su correcto funcionamiento, se resumen en la siguiente tabla las principales características técnicas:

AGC - DSKY

Tensión de alimentación	10-18	V DC
Tensión recomendada	12	V DC
Corriente mínima de operación a 12 V	200	mA
Corriente máxima de operación a 12 V	850	mA
Frecuencia del cristal	16	MHz
Comunicación		USB, ICSP
Pines de expansión analógicos	4	
Pines de expansión digitales	8 +4*	

Tabla 15 - Especificaciones técnicas del AGC - DSKY

*4 pines compatibles con entradas tanto analógicas como digitales

Resultado final

Una vez ensambladas todas las piezas y tras realizar los últimos ajustes, se da por concluido el desarrollo del presente proyecto:



Ilustración 36 - Resultado final del proyecto

Metodología

Con el fin de garantizar una adecuada progresión en el desarrollo del proyecto para que cumpliera con las especificaciones requeridas en el plazo establecido, se han definido las siguientes etapas:

Análisis de la propuesta. La primera tarea llevada a cabo para la realización del proyecto ha sido la de analizar el objetivo, el alcance y las implicaciones de la propuesta. Para ello, se realiza una investigación acerca de las alternativas existentes en el mercado y se reúne documentación relevante.

Definición de las líneas de trabajo. A partir de la información recopilada en la etapa anterior, se procede a estructurar el resto de fases del proyecto. Se define un calendario concreto, se establecen hitos y *deadlines*, se otorgan prioridades a las acciones necesarias, se identifican posibles riesgos y se valoran alternativas.

Análisis de los requerimientos y componentes necesarios. Considerando las características del proyecto, se establecen los límites y se toman las medidas necesarias para futuras fases. Se seleccionan también los componentes más adecuados para el circuito y se revisa el manual del SW a utilizar durante todo el proyecto, haciendo varias pruebas previas para familiarizarse con el uso del mismo.

Diseño del esquemático. Con la selección de componentes realizada, se procede a diseñar los símbolos no disponibles en las librerías básicas, así como a revisar aquellos imprecisos. Se realizan los cálculos necesarios para elegir los valores adecuados de los componentes pasivos presentes en el circuito. Por último, se ubican los componentes agrupados por áreas de interés (alimentación, indicadores, *displays*, taladros...) y se crean las correspondientes conexiones.

Diseño PCB. Antes de la creación del *netlist*, se asigna a cada componente la huella correspondiente. Para ello, se revisan una a una aquellas disponibles en las librerías de referencia y se crean aquellas ausentes. A continuación, se crea una plantilla donde se señala la posición exacta de cada componente fijo (*displays*, indicadores, pulsadores y taladros) y se emplea para posicionarlos*. Una vez hecho esto, se posicionan el resto de componentes del circuito y se procede al rutado y a la posterior creación de los gerber.

Fabricación del circuito. Durante el periodo de tiempo entre que los gerber son enviados a la fábrica y se reciben los circuitos, se revisan nuevamente los cálculos realizados en el diseño del esquemático y se hace acopio de los mismos.

Montaje de componentes. Tras recibir los PCB, se procede a posicionar y soldar los componentes necesarios para el funcionamiento del circuito, dejando los secundarios (condensadores, LEDs extra en la retro...) accesibles para un futuro uso.

Pruebas. Para reducir al mínimo la probabilidad de error, se comprueban una a una las soldaduras y conexiones del circuito para garantizar que existe conectividad total. Además, se crea y carga en el PIC un sencillo programa que permite verificar el correcto funcionamiento de todos los elementos de interacción con la persona usuaria, como son los *displays*, los indicadores y los pulsadores, así como su comunicación vía USB con el PC.

*** Reevaluación y ajuste del proyecto.** Tal y como se ha mencionado en el apartado de los objetivos del proyecto, el enfoque de simulador de uno de los paneles del Airbus A320 tuvo que ser interrumpido, por lo que fue necesario dedicar un periodo de tiempo a la reevaluación de las necesidades del nuevo simulador del AGC. Afortunadamente, se trataba de un riesgo conocido y, gracias a que este suceso se produjo antes de la fabricación del circuito y la compra de componentes, el perjuicio sobre el desarrollo del proyecto ha sido prácticamente nulo. Además de ajustar ligeramente los plazos de rutado y montaje, se ha aprovechado el tiempo transcurrido durante la fabricación del circuito para diseñar y crear la nueva caja y resto de elementos externos del circuito.

A continuación, se presenta de manera pormenorizada la relación de tareas llevadas a cabo para la realización del proyecto y que se complementa con el diagrama de Gantt mostrado en la página siguiente:

Tarea	Fecha de inicio	Fecha de fin
Análisis de la propuesta	02/10/17	13/10/17
Definición de líneas de trabajo	16/10/17	18/12/17
Análisis de requerimientos y componentes necesarios	13/11/17	18/12/17
Cálculo de dimensiones	13/11/17	17/11/17
Definición de componentes necesarios	20/11/17	28/12/17
Familiarización con el SW a utilizar	29/11/17	18/12/17
Diseño del esquemático	19/12/17	30/01/18
Creación de símbolos	19/12/17	27/12/17
Realización de cálculos	28/12/17	01/01/18
Diseño del circuito	02/01/18	19/01/18
Interconexión de componentes	22/01/18	30/01/18
Diseño PCB	31/01/18	07/05/18
Creación de huellas	31/01/18	08/02/18
Posicionamiento de componentes fijos	09/03/18	15/03/18
Posicionamiento del resto de componentes	16/03/18	26/03/18
Rutado del circuito	27/03/18	30/04/18
Creación y revisión de gerbers	01/05/18	07/05/18
Reevaluación y ajuste del proyecto	09/02/18	08/03/18
Análisis de requerimientos y componentes necesarios	09/02/18	14/02/18
Diseño del esquemático	15/02/18	07/03/18
Creación de huellas	08/03/18	08/05/18
Fabricación del circuito	08/05/18	24/05/18
Adquisición de componentes	08/05/18	08/05/18
Diseño de caja y botones	09/05/18	15/05/18
Pruebas e impresión 3D	16/05/18	24/05/18
Montaje de componentes	25/05/18	04/06/18
Pruebas	05/06/18	21/06/18
Pruebas de conectividad	05/06/18	11/06/18
Desarrollo de SW de demostración	12/06/18	18/06/18
Pruebas del SW de demostración	19/06/18	21/06/18

Tabla 16 - Relación de tareas del proyecto

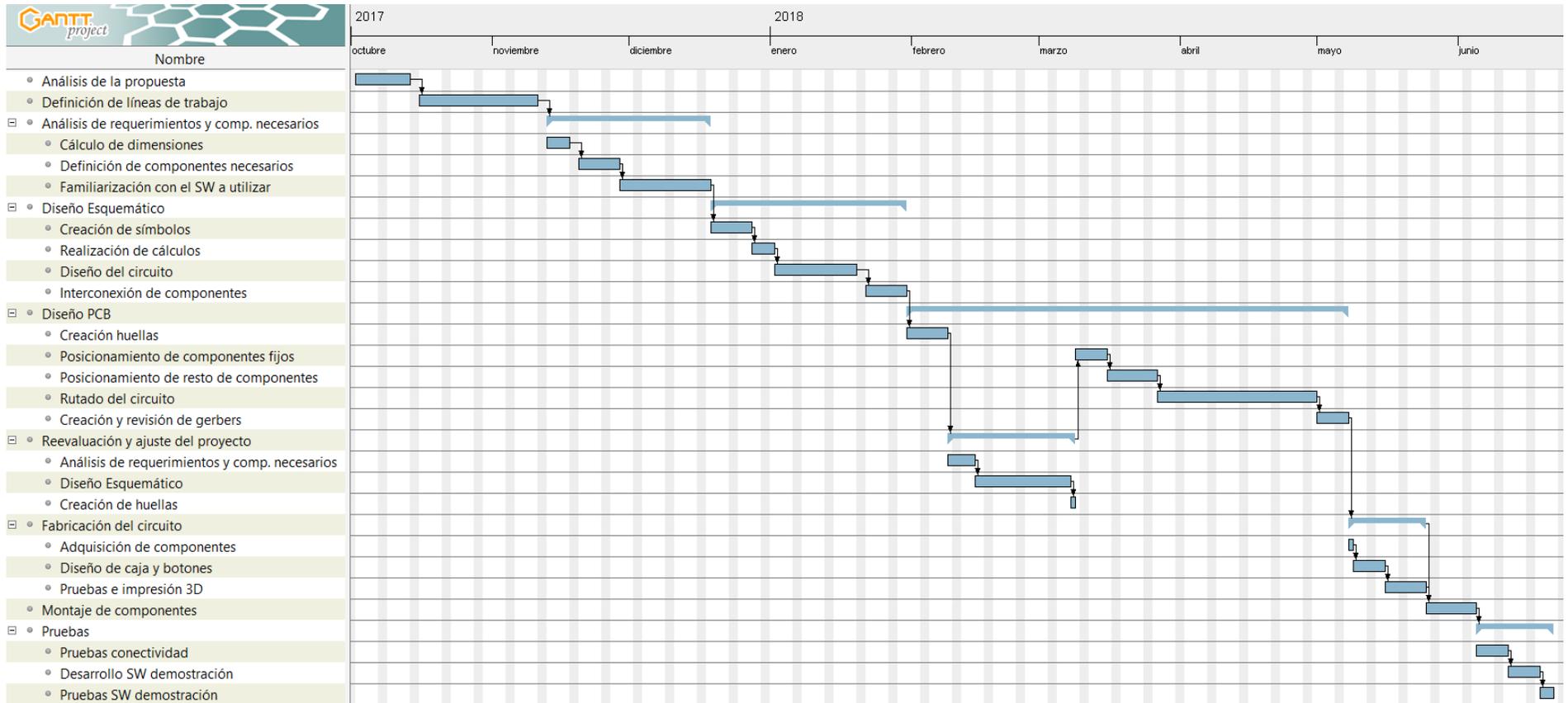


Ilustración 37 - Diagrama de Gantt del proyecto

Aspectos económicos

En el apartado de análisis de alternativas, se menciona que uno de los factores tenidos en cuenta a la hora de estudiar la viabilidad del proyecto ha sido su coste; no solo el hecho de que el precio final del mismo sea bajo, sino que también sea inferior al resto de alternativas que se presentaban. Siendo así, este apartado presenta el coste de desarrollo del proyecto íntegro, así como el coste de producción de cada una de las sucesivas réplicas que se pudieran fabricar.

Presupuesto

Horas internas

Todo el proyecto, tanto el apartado de HW como el de SW ha sido desarrollado con base en las competencias adquiridas durante la titulación del Grado en Ingeniería en Tecnología de Telecomunicación, luego el perfil profesional adecuado para ello ha sido el del Ingeniero Técnico. Asimismo, el montaje, soldadura y testeo del circuito y el diseño y fabricación de las piezas que componen la estructura pueden ser llevadas a cabo por un técnico superior, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Personal	Coste horario (€/h)	Horas (h)	Coste (€)
<i>Ingeniero técnico</i>	40	150	6.000
<i>Técnico 1</i>	17,5	30	525
<i>Técnico 2</i>	17,5	20	350
		Subtotal	6.875

Tabla 17 - Coste de horas internas

Amortizaciones

El equipamiento empleado para llevar a cabo el proyecto ha sido proporcionado en su práctica totalidad por el Grupo de Investigación APERT del Departamento de Tecnología Electrónica. Las amortizaciones de las distintas herramientas utilizadas se detallan a continuación:

Inversión/Activo	Coste de adquisición (€)	Vida útil (h)	Tiempo de uso (h)	Amortización (€)
<i>Ordenador</i>	800	3.000	150	40
<i>Impresora 3D</i>	2.200	10.000	100	22
<i>Estación de soldadura</i>	2.500	5.000	30	15
<i>Microscopio</i>	6.000	10.000	30	18
			Subtotal	95

Tabla 18 - Coste de las amortizaciones

Fabricación

Las piezas necesarias para el montaje del prototipo se dividen en tres bloques: la fabricación del propio PCB, la creación por fabricación aditiva de la carcasa, soportes y parte de los pulsadores, y el corte a medida del DM y el metacrilato empleados en indicadores, frontal de las pantallas y la tapa de los pulsadores. Los costes asociados al proceso de fabricación son, por tanto, los que siguen:

Concepto	Coste unitario	Uds. empleadas	Coste (€)
AGC-DSKY (A-0123)	32	1	32
Filamento PLA	17,95	0,5	8,975
Filamento PETG	34,45	0,1	3,445
Metacrilato	35	0,2	7
DM	7,1	0,2	1,42
Corte	21	2	42
Portes*			8,105
		Subtotal	94,84

Tabla 19 - Costes de fabricación

* Costes asociados a los portes de todos los elementos

Componentes BOM

Se ha empleado un total de 193 componentes electrónicos para el montaje del circuito, tal y como se muestra a continuación:

Componente	Valor	Uds.	Código Farnell	Coste unitario (€)	Coste (€)
U0-U4	MAX7221	5	2516083	7,67	38,35
U5	LM7805	1	1102157	0,77	0,77
U6	PIC16F887	1	1439541	2,2	2,2
U6 (Zócalo)		1	1103855	0,984	0,984
A0	6x6mm SW	16	2533101	0,0577	0,9232
A1-A3	CL5621AG	3	2449704	2,21	6,63
A4-A8	CL5631AG	6	2335752	1,01	6,06
A11-A18	Tornillos 3mm	8	1420120	1,47	11,76
A11-A18 Bis	Separadores	8	1466762	0,423	3,384
S0-S3	6x6mm switch	4	2533101	0,0577	0,2308
D1-D4	1N4001	4	2677317	0,0431	0,1724
D5	3014 R-LED	1	2853289	0,034	0,034
D6-D61, D72-D90	2835 LED	75	2853276	0,0299	2,2425
D62-D71	3014 G-LED	14	2853289	0,034	0,476
D91-D96	5mm THT LED	6	2853276	0,0299	0,1794
C1	470µF	1	8126208	0,162	0,162
C2-C4, C7-C13	0,1µF	10	1141775	0,0793	0,793
C5,C6	15pF	2	1141759	0,0674	0,1348

<i>C14-C17</i>	1μF	4	2346598	0,185	0,74
<i>R1</i>	220	1	9339299	0,0218	0,0218
<i>R2,R3, R15-R17</i>	10k	5	9339060	0,023	0,115
<i>R4</i>	680	1	9339655	0,0239	0,0239
<i>R5-R9</i>	470	5	9339531	0,0221	0,1105
<i>R10-R14</i>	9,53k	5	1563284	0,112	0,56
<i>Z1</i>	Cristal 16MHz	1	2508458	0,182	0,182
<i>J1</i>	Barrel jack	1	1737246	0,647	0,647
<i>J2-J6</i>	4 +6 +3*15 pin	4	2356165	0,698	2,792
				Subtotal	80,68

Tabla 20 - Coste de los componentes

Presupuesto completo

Con todos los costes del proyecto definidos, únicamente resta presentar el presupuesto global del mismo:

Concepto	Coste (€)
<i>Horas internas</i>	6.875,00
<i>Amortizaciones</i>	95,00
<i>Fabricación</i>	63,34
<i>Componentes</i>	80,68
Total	7.114,02

Tabla 21 - Coste total del proyecto

Cabe reseñar que el elevado coste inicial del proyecto se debe en gran parte al proceso de diseño y realización de pruebas que atañen tanto al desarrollo del circuito impreso como a la creación de la estructura. No obstante, para sucesivas versiones o réplicas del AGC-DSKY que se quisieran fabricar, el coste de cada una de ellas sería mucho menor, tal y como muestra el siguiente presupuesto:

Concepto	Coste (€)
<i>Horas internas</i>	122,50
<i>Amortizaciones</i>	19,17
<i>Fabricación</i>	63,34
<i>Componentes</i>	80,68
Total	285,68

Tabla 22 - Coste de fabricación de una réplica del AGC DSKY

Conclusiones

«La experiencia es una llama que no alumbrá sino quemando»

Es una frase del conocido novelista español Benito Pérez Galdós, que no sin razón mantenía que aprender de experiencias vividas siempre tiene un precio. Prácticamente un siglo tras su muerte, esta frase sigue siendo tan cierta como entonces. El ser humano yerra y aprende de sus errores, pero a este aprendizaje le acompañan la búsqueda de métodos y herramientas que le permitan llevarlo a cabo «quemándose» lo menos posible.

El empleo de los simuladores desempeña un papel fundamental en la formación y la adquisición de experiencia de diversos de profesionales que contribuye a salvar la vida de multitud de personas ya no solo en el sector de la conducción o el pilotaje^{[13][30]}, sino en otros ámbitos como en la medicina y ciencias de la salud^{[29][4]}. Suponen, por tanto, una herramienta indispensable hoy día, con un tremendo potencial todavía por descubrir.

El SMVA en el que se enmarca el trabajo descrito en este documento apuesta por el desarrollo de un modelo genérico de simulador, sencillo y fácil de implementar en proyectos menores que pueden llegar a ser todo lo específicos que se requiera, abarcando un amplio espectro de disciplinas que no queda limitado a un sector concreto.

Se ha pretendido poner en valor aquellas competencias adquiridas durante la titulación, principalmente en el ámbito de la electrónica, la gestión de bases de datos o, de un modo más superficial, la experimentación de interacción de materiales con elementos ópticos. No solo eso, sino que se han aplicado también aquellas competencias específicas y transversales adquiridas fuera del programa formativo, tales como la optimización de recursos, el diseño gráfico y mecánico, la configuración de los parámetros para realizar la impresión aditiva y, principalmente, la capacidad de reacción ante un imprevisto que altera gravemente el desarrollo del proyecto, logrando finalmente realizar los ajustes necesarios para garantizar que este llega a buen fin.

En la era de la Industria 4.0, las *smart cities*, el IoT y, en general, el auge de las TICs, la tecnología evoluciona a un ritmo vertiginoso. Esto puede convertirse en una peligrosa amenaza o en una valiosa oportunidad, dependiendo de la relación que el SMVA mantenga con los nuevos avances tecnológicos. Cara a la persona usuaria promedio, la tecnología parece sencilla e intuitiva, pero quienes la desarrollan saben perfectamente que desde su lado esto no siempre es así. Habrá pues que extremar las precauciones para mantener el equilibrio entre la sencillez del proyecto y el atractivo de lo *smart*.

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el enfoque bajo el que se ha diseñado el AGC-DSKY lo dota de una versatilidad que le permitirá dar respuesta rápida de un modo sencillo a futuras ampliaciones, mejoras o extras que se le quisieran incluir. Una vez disponga del SW necesario para desarrollar todo su potencial, será posible comprobar de una forma empírica el alcance del proyecto. No obstante, hasta el momento en el que dicho SW esté operativo, el modelo presentado podrá ser empleado desde este momento en el apoyo de la labor docente del aula o de los laboratorios de electrónica,

así como en las próximas jornadas de puertas abiertas, presentación en centros de secundaria o bachillerato o demás eventos en los que quiera acercarse la tecnología a la sociedad en general.

La falta de vocación tecnológica entre el potencial futuro estudiantado es un problema cada vez más acuciante^{[14][7]} y, aunque diversos organismos trabajan por potenciarla, parece evidente que cualquier contribución a esta tarea será bien recibida por la sociedad^{[31][12]}.

Líneas futuras

En cuanto al HW se refiere, el prototipo creado cumple con todos los requisitos necesarios para poder llevar a cabo todas las tareas de comunicación entre la persona usuaria y el PC. Aun así, el proyecto necesita seguir avanzando y evolucionando con el fin de ser plenamente operativo.

- **Desarrollo SW.** Aunque existen en el mercado varios simuladores espaciales, ninguno está preparado para interactuar con una réplica del AGC como control del mismo. Por ello es necesario dotar al PC de un programa que se encargue de procesar toda la información recibida, ejecutar las rutinas oportunas y devolver los resultados esperados tanto al AGC como al usuario que maneja el PC, y que representará el entorno de la simulación. Se ha mencionado anteriormente que el código original del AGC, el Colossus2A, está disponible en la red, por lo que podría ser un buen punto de partida a la hora de abordar esta línea de trabajo.
- **Desarrollo del lenguaje de comunicación.** En el apartado de SW, se propone un lenguaje elemental que permite comunicar al AGC-DSKY con el PC vía USB y realizar las comprobaciones oportunas. No obstante, sería conveniente revisar y complementar (o replantear íntegramente) dicho lenguaje con el objetivo de que satisfaga las necesidades del programa de simulación que se desarrolle en el PC, garantizando que se minimizan los tiempos de transmisión en el caso de que se conecten varios módulos.
- **Ampliación e inclusión de periféricos.** Con apenas unos servos, algunos LEDs y una pequeña réplica que sirva de elemento móvil, se puede diseñar una maqueta de «Apolo móvil» que rote en varios ejes (dependiendo de los parámetros introducidos en el DSKY) y encienda o apague las luces que simbolizan el accionamiento de los motores, la apertura de la puerta o cualquier otro suceso que se estime oportuno.
- **Comunicación con otro simulador.** Una vez desarrollado el SW oportuno, podría resultar interesante plantear una simulación en la que dos AGC tuvieran que comunicarse entre sí para llevar a cabo una misión coordinada. Es más, en el alunizaje del Apolo11 fueron empleados de manera simultánea dos módulos, uno en el módulo lunar y otro en el módulo de control o servicio.

Mejoras futuras

El prototipo presentado en este documento, aun siendo totalmente operativo, ha sido realizado empleando componentes y materiales relativamente sencillos. No obstante, se han detectado durante su desarrollo varios aspectos que podría resultar interesante

revisar para futuras versiones del mismo y que, con una pequeña inversión adicional, podrían incluirse para proporcionar un mejor acabado al proyecto. Algunas de estas mejoras podrían ser.

- **Uso de pulsadores con retroiluminación incorporada.** Aunque los pulsadores empleados disponen de una retroiluminación a través de un LED ubicado sobre ellos, ha sido necesario realizar varias pruebas y diseños para las tapas de los mismos con el fin de que el resultado final fuera satisfactorio. Sustituir en el diseño el binomio pulsador+LED por alguno de los múltiples pulsadores con el led incorporado disponibles en el mercado puede servir para simplificar tanto el diseño del circuito como el diseño de los propios pulsadores.
- **Reorganización de los *displays* de 7 segmentos.** Por razones económicas, se han diseñado los *displays* haciendo uso solo de dos tipos de módulos: de dos y de tres dígitos. Una posibilidad de mejora podría ser la de sustituir cada pareja de módulos de tres dígitos por un módulo de tres dígitos, un módulo de dos dígitos y un módulo de un dígito para el signo. Aunque esto incrementaría ligeramente el coste del diseño, como resultado se obtendría un *display* más fiel al diseño original del AGC-DSKY.
- **Construcción de indicadores y *displays* en módulos independientes.** Otra de las concesiones que ha habido que hacer en pro de la economía, fiabilidad y simplificación del circuito ha sido integrar todos los componentes en una sola placa. El modelo original del AGC-DSKY, así como algunas de las réplicas existentes, respetan este criterio en el diseño, disponiendo tanto el conjunto de indicadores de la izquierda como los *displays* e indicadores de la derecha en dos circuitos impresos independientes que encajan en la placa principal.
- **Disposición del teclado como matriz de 4x5.** El principal motivo para disponer las 19 teclas en un *array* de 4x4 y 3 independientes ha sido poder reutilizar sin apenas cambios las rutinas ya definidas en el SMVA. No obstante, tanto para el proyecto presentado como para ampliar el repertorio HW y SW de la base de datos, una posibilidad es la de diseñar un teclado de 5x4 y la subrutina correspondiente para poder controlar de forma matricial hasta 20 teclas.
- **Recubrimiento de la estructura.** Una posibilidad que proporcionaría una mayor protección y un acabado todavía más estético sería la de diseñar y mandar fabricar un fotograbado o *stencil* en aluminio tanto para la carcasa exterior como para los pulsadores.

Referencias

- [1] About Instructables. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <http://www.instructables.com/about/>
- [2] AirbusA320 FTD/FBS Flight Simulator. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <https://www.aviationfocus.aero/flight-simulators/mps/airbus-a320/>
- [3] Arduino Playground - MAX72XXHardware. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <http://playground.arduino.cc/Main/MAX72XXHardware>
- [4] Barquero, K. (2018, June 06). Simuladores apoyan aprendizaje de futuros médicos. Retrieved June 19, 2018, from <https://www.larepublica.net/noticia/simuladores-apoyan-aprendizaje-de-futuros-medicos>
- [5] Baxter, A., & Switzky, H. N. (2017). Exploration and Curiosity .*Reference Module in Neuroscience and Biobehavioral Psychology*. doi:10.1016/b978-0-12-809324-5.05804-1
- [6] Block I Apollo Guidance Computer (AGC). (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <http://agcreplica.outel.org/>
- [7] Cartagena, M. A. (2014, July 10). "Hay déficit de 15.000 ingenieros" para industria TIC: Mintic. Retrieved June 19, 2018, from <https://www.elespectador.com/noticias/economia/hay-deficit-de-15000-ingenieros-industria-tic-mintic-articulo-503625>
- [8] Cockpits - Simulador de coche | DriveSim. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <http://drivesimsimulator.com/asientos-de-conduccion/>
- [9] DSKY (DISPLAY KEYBOARD APOLLO GUIDANCE COMPUTER (AGC) FROM LM-5 - MODEL ART CRAFT KIT 1:1. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <http://www.educraftdiversions.org/ProductDetails.asp?ProductCode=DSKY>
- [10] Historia de la realidad aumentada. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <http://realidadaugmentada.info/realidad-aumentada/>
- [11] Instructables. (2017, September 19). Return to the Moon - AGC in FPGA. Retrieved June 19, 2018, from <http://www.instructables.com/id/Return-to-the-Moon-AGC-in-FPGA/>
- [12] J. (2016, September 14). Nace INSPIRA, un proyecto para el fomento de la vocación tecnológica entre las niñas. Retrieved June 19, 2018, from <https://www.fecyt.es/es/noticia/nace-inspira-un-proyecto-para-el-fomento-de-la-vocacion-tecnologica-entre-las-ninas>
- [13] Jurado, A. (2015, September 09). Piloto salva 172 pasajeros tras incendio de avión en Las Vegas (VIDEO). Retrieved June 19, 2018, from <http://atodomomento.com/internacionales/piloto-salva-172-pasajeros-tras-incendio-de-avion-en-las-vegas-video/>
- [14] La escasez de ingenieros supone un peligro para el desarrollo. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from https://www.oei.es/historico/divulgacioncientifica/noticias_523.htm
- [15] Lamkin, P. (2018, May 03). Best VR headsets 2018: HTC Vive, Oculus, PlayStation VR compared. Retrieved June 19, 2018, from <https://www.wareable.com/vr/best-vr-headsets-2017>

- [16] Lange, C. D. (2013). Earths first animals were made of jelly. *New Scientist*, 220(2948-2949), 10. [doi:10.1016/s0262-4079\(13\)62924-3](https://doi.org/10.1016/s0262-4079(13)62924-3)
- [17] Lucas, F. M. (2017). The Game as an Early Childhood Learning Resource for Intercultural Education. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 237, 908-913. [doi:10.1016/j.sbspro.2017.02.127](https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2017.02.127)
- [18] Margaret Hamilton. (2018, June 09). Retrieved June 19, 2018, from [https://es.wikipedia.org/wiki/Margaret_Hamilton_\(científica\)#/media/File:Margaret_Hamilton_-_restoration.jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Margaret_Hamilton_(científica)#/media/File:Margaret_Hamilton_-_restoration.jpg)
- [19] MAX7221 Serially Interfaced, 8-Digit, LED Display Drivers - Maxim. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <https://www.maximintegrated.com/en/products/power/display-power-control/MAX7221.html>
- [20] Montoya, G. C., & Torres, R. G. (2010). Uso de simuladores como recurso digital para la transferencia de conocimiento. *Apertura*, 10(1). Retrieved June 19, 2018, from <http://www.udgvirtual.udg.mx/apertura/index.php/apertura/article/view/22/32>
- [21] NASA's Apollo Moon Landing Simulator. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <https://sservi.nasa.gov/articles/nasas-moon-simulator/>
- [22] OPEN DSKY. (n.d.). The Only OPEN DSKY replica. Retrieved June 19, 2018, from <https://opensky.com/>
- [23] PIC16F887. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/PIC16F887>
- [24] Seneca, L. A., & Manuel, D. T. (2013). *Séneca: Consolaciones; Diálogos; Apocolocintosis; Epístolas morales a Lucilio*. Madrid: Gredos.
- [25] Shannon, R. (1998). Introduction to the art and science of simulation. *1998 Winter Simulation Conference. Proceedings (Cat. No.98CH36274)*. [doi:10.1109/wsc.1998.744892](https://doi.org/10.1109/wsc.1998.744892)
- [26] Source Code. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <https://www.ibiblio.org/apollo/listings/Comanche055/MAIN.agc.html>
- [27] Space Race. (2018, June 18). Retrieved June 19, 2018, from https://en.wikipedia.org/wiki/Space_Race
- [28] TELEMETRICS SPACE INSTRUMENT REPLICAS. (n.d.). Retrieved June 19, 2018, from <http://thedsky.com/>
- [29] U. (n.d.). Murcia.com. Retrieved June 19, 2018, from <https://www.murcia.com/noticias/2018/05/30-ginecologos-de-toda-espana-conocen-los-simuladores-de-alta-gama-de-la-ucam.asp>
- [30] Una tormenta de granizo destruye en pleno vuelo el morro de un avión de American Airlines (FOTO). (2018, June 05). Retrieved June 19, 2018, from <https://actualidad.rt.com/actualidad/274432-tormenta-granizo-sin-morro-avion>
- [31] Vocación Tecnológica. (2017, December 20). Retrieved June 19, 2018, from <http://ceet.org.es/download/vocacion-tecnologica/>

Anexo I Normativa aplicable

La normativa aplicable a un proyecto de estas características es amplia debido a que puede ser empleado en distintos ámbitos, y las ampliaciones que se realicen podrán requerir el cumplimiento de normas adicionales. Dicho esto, las principales normas a tener presentes durante el desarrollo del proyecto y el uso del prototipo son las que siguen:

Relativas a la naturaleza electrónica del proyecto:

Directiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 8 de junio de 2011, sobre restricciones a la utilización de determinadas sustancias peligrosas en aparatos eléctricos y electrónicos. Fuente: [enlace](#)

Real Decreto 123/2017, de 24 de febrero, por el que se aprueba el Reglamento sobre el uso del dominio público radioeléctrico. Fuente: [enlace](#)

Real Decreto 842/2002, de 2 de agosto, por el que se aprueba el Reglamento electrotécnico para baja tensión. Fuente: [enlace](#)

Relativas al uso como simulador del proyecto

ORDEN FOM/2233/2002, de 4 de septiembre, por la que se adoptan los requisitos conjuntos de aviación relativos a los simuladores de vuelo, los dispositivos de entrenamiento de vuelo y los entrenadores de procedimientos de navegación y vuelo de avión. Fuente: [enlace](#)

UNE-EN 60073: Principios básicos y de seguridad para la interfaz hombre-máquina, el marcado y la identificación. Principios de codificación para los indicadores y los actuadores. Fuente: [enlace](#)

CEI 60447: Principios básicos y de seguridad para la interfaz hombre-máquina, el marcado y la identificación. Principios de maniobra. Fuente: [enlace](#)

Relativas al uso en el ámbito docente del proyecto:

Real Decreto 1393/2007, de 29 de octubre, por el que se establece la ordenación de las enseñanzas universitarias oficiales. Fuente: [enlace](#)

Orden CIN/352/2009, de 9 de febrero, por la que se establecen los requisitos para la verificación de los títulos universitarios oficiales que habiliten para el ejercicio de la profesión de Ingeniero Técnico de Telecomunicación. Fuente: [enlace](#)

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

Anexo II Esquemático PCB

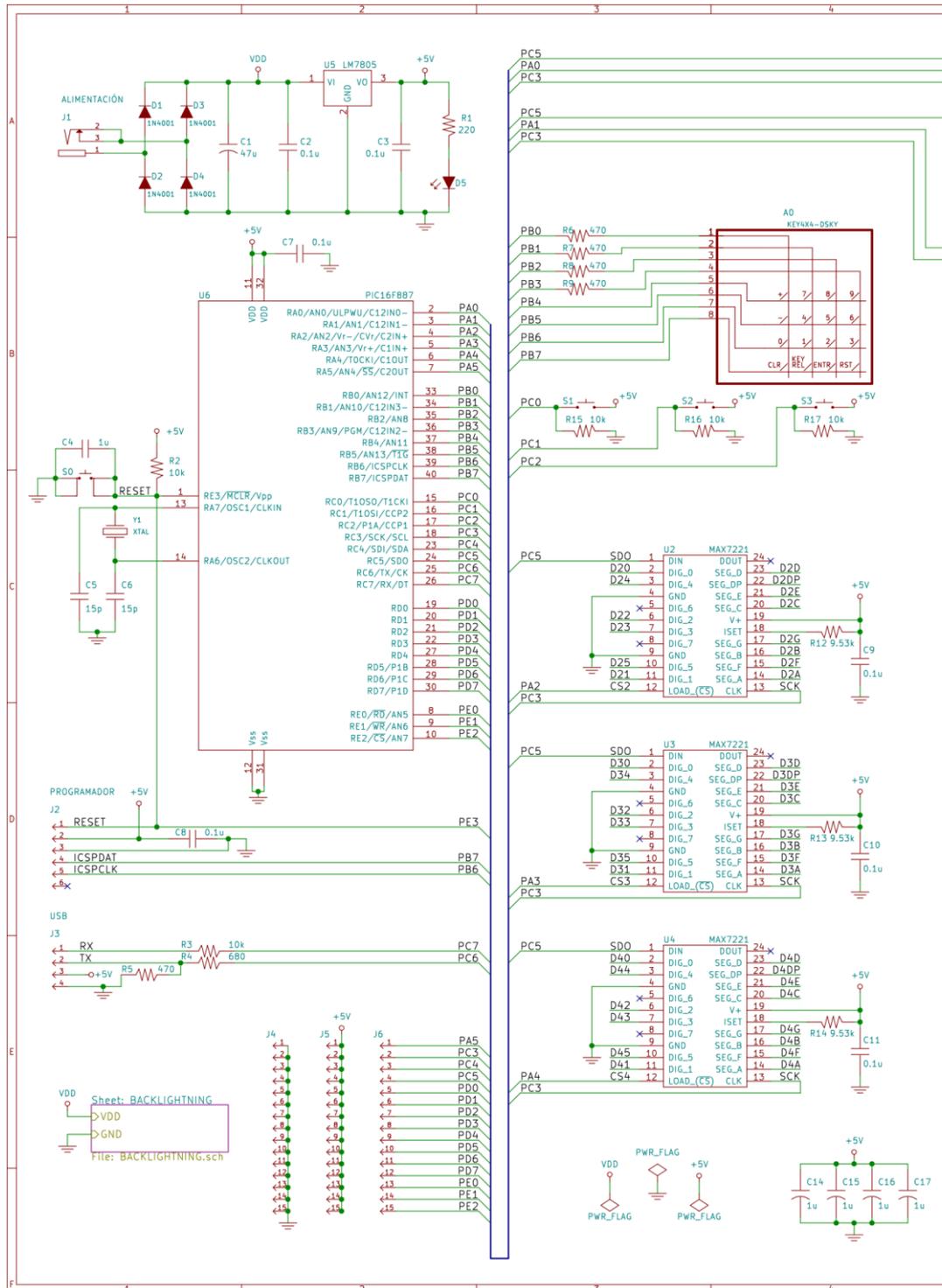


Ilustración 38 - Diagrama Esquemático (parte 1 de 3)

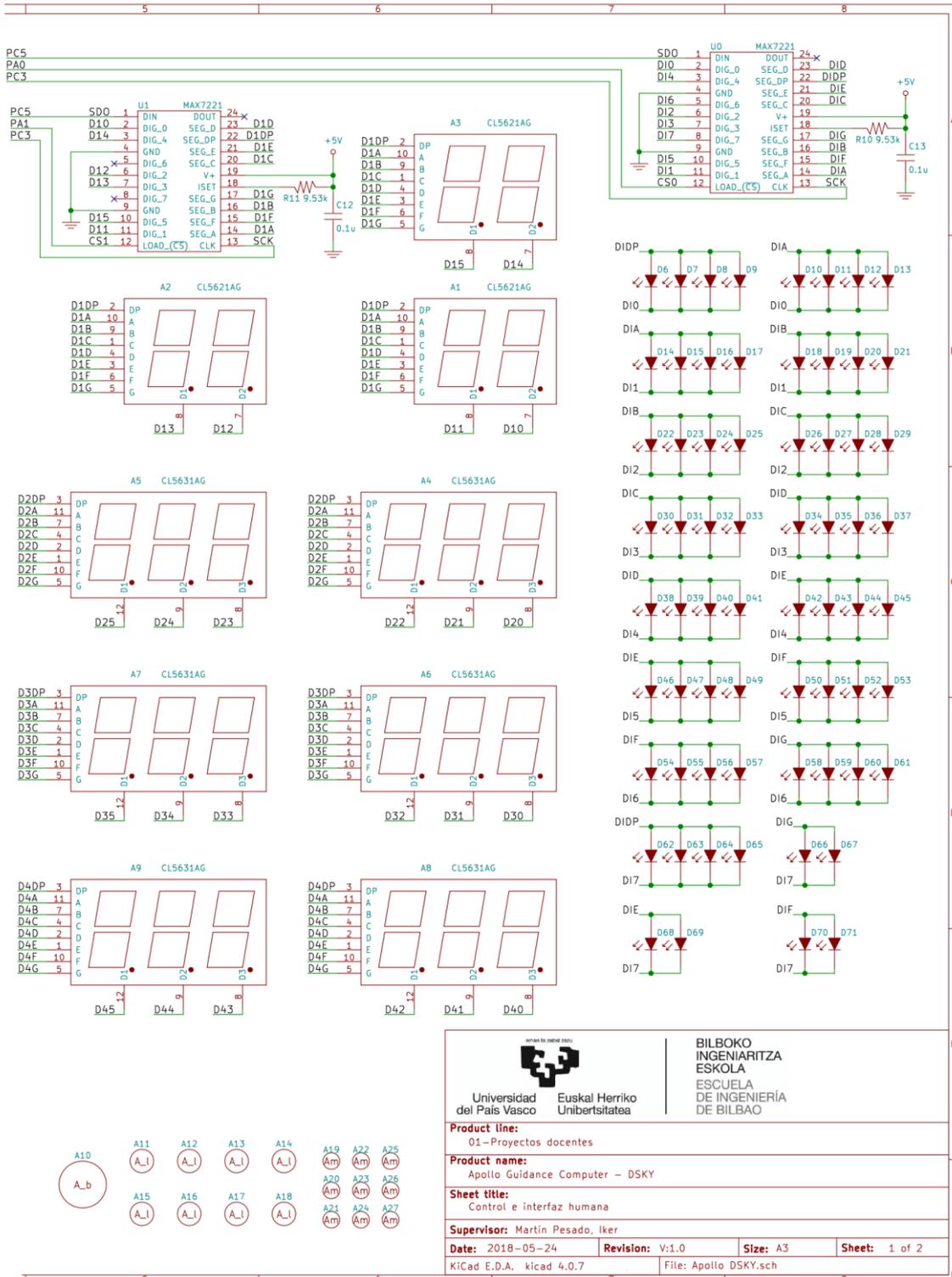
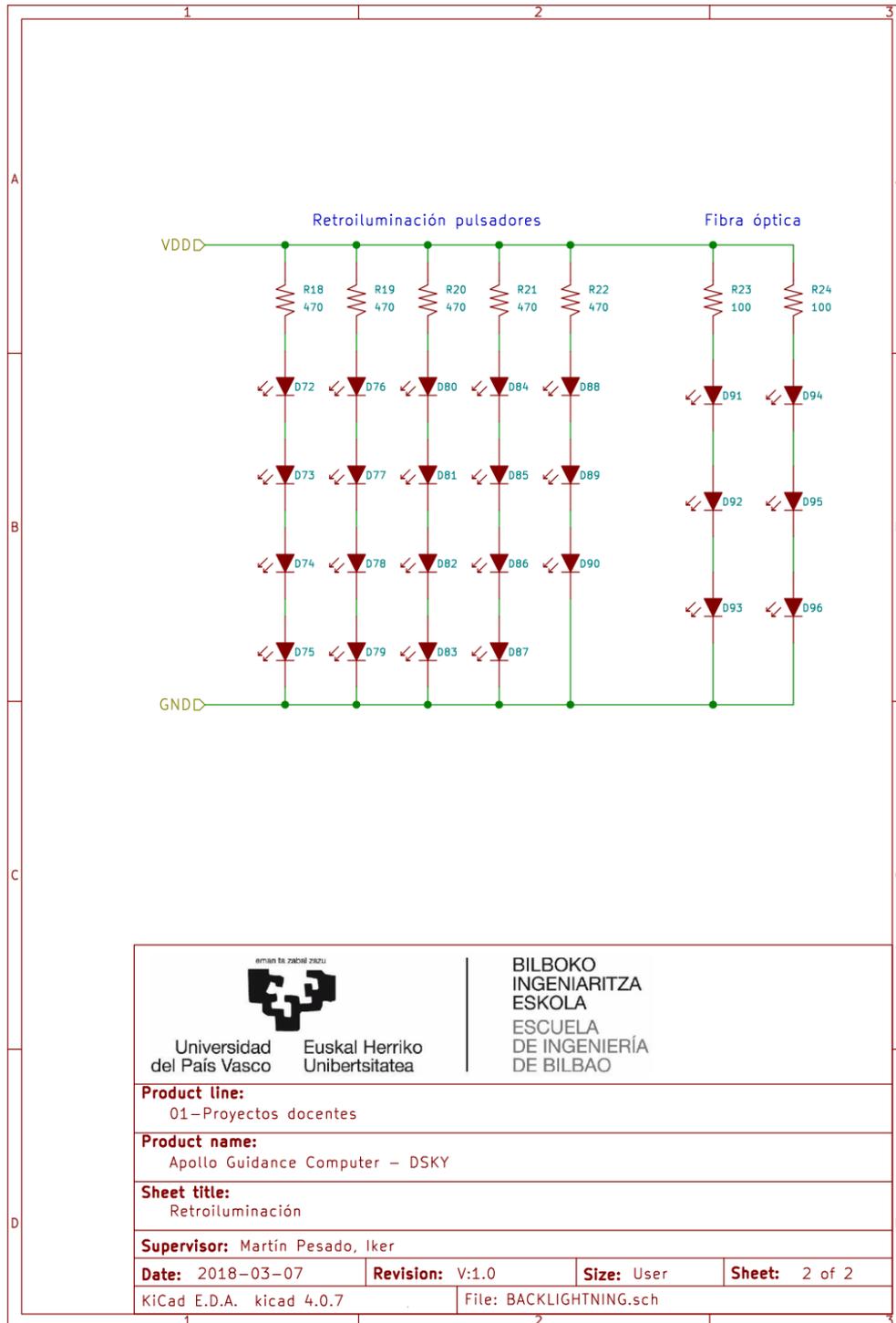


Ilustración 39 - Diagrama Esquemático (parte 2 de 3)



 Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea		BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO	
Product line:			
01-Proyectos docentes			
Product name:			
Apollo Guidance Computer - DSKY			
Sheet title:			
Retroiluminación			
Supervisor: Martín Pesado, Iker			
Date: 2018-03-07	Revision: V:1.0	Size: User	Sheet: 2 of 2
KiCad E.D.A. kicad 4.0.7		File: BACKLIGHTNING.sch	

Ilustración 40 - Diagrama Esquemático (parte 3 de 3)

Anexo III Planos PCB

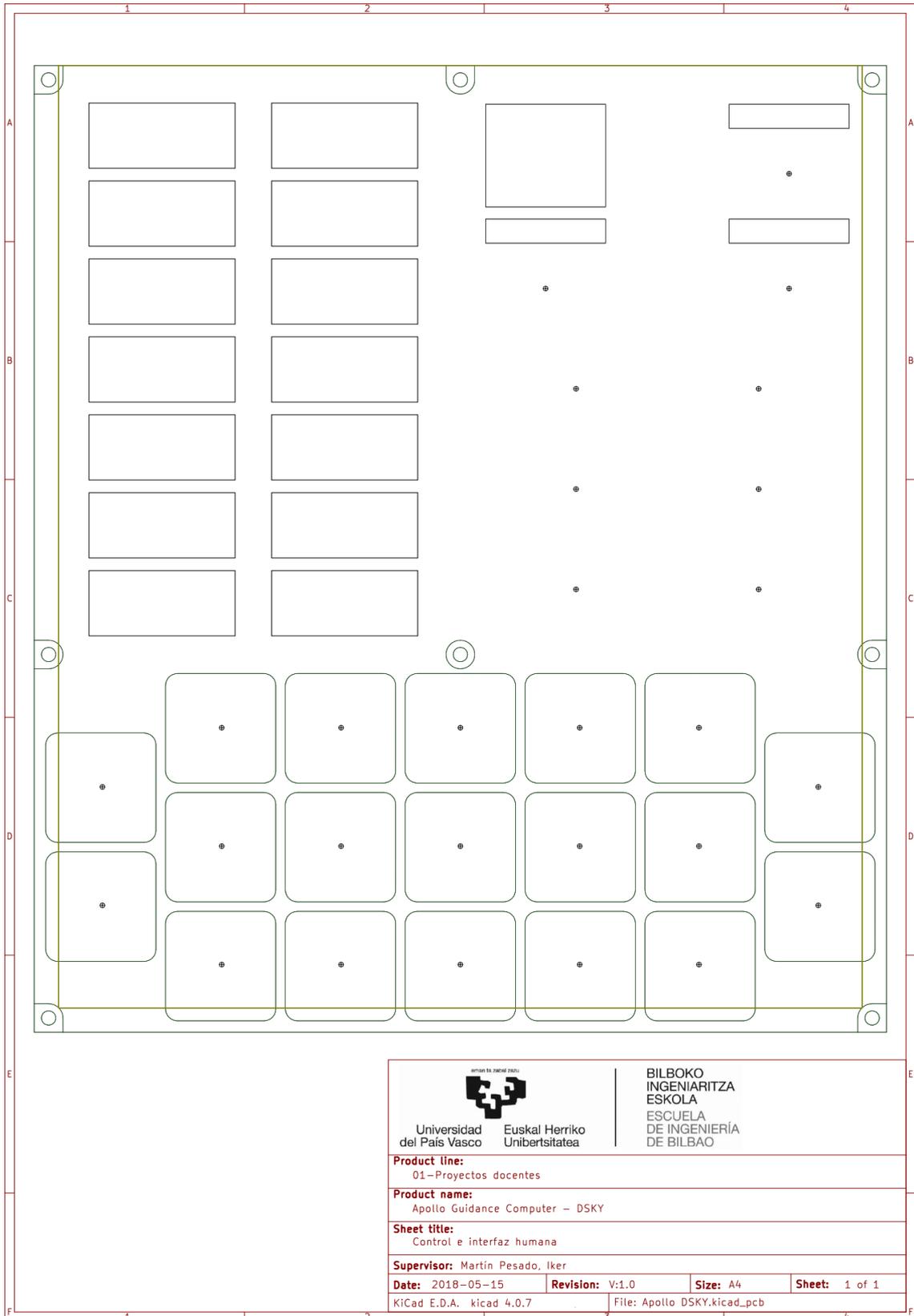


Ilustración 41 - Ubicación de componentes fijos en el PCB

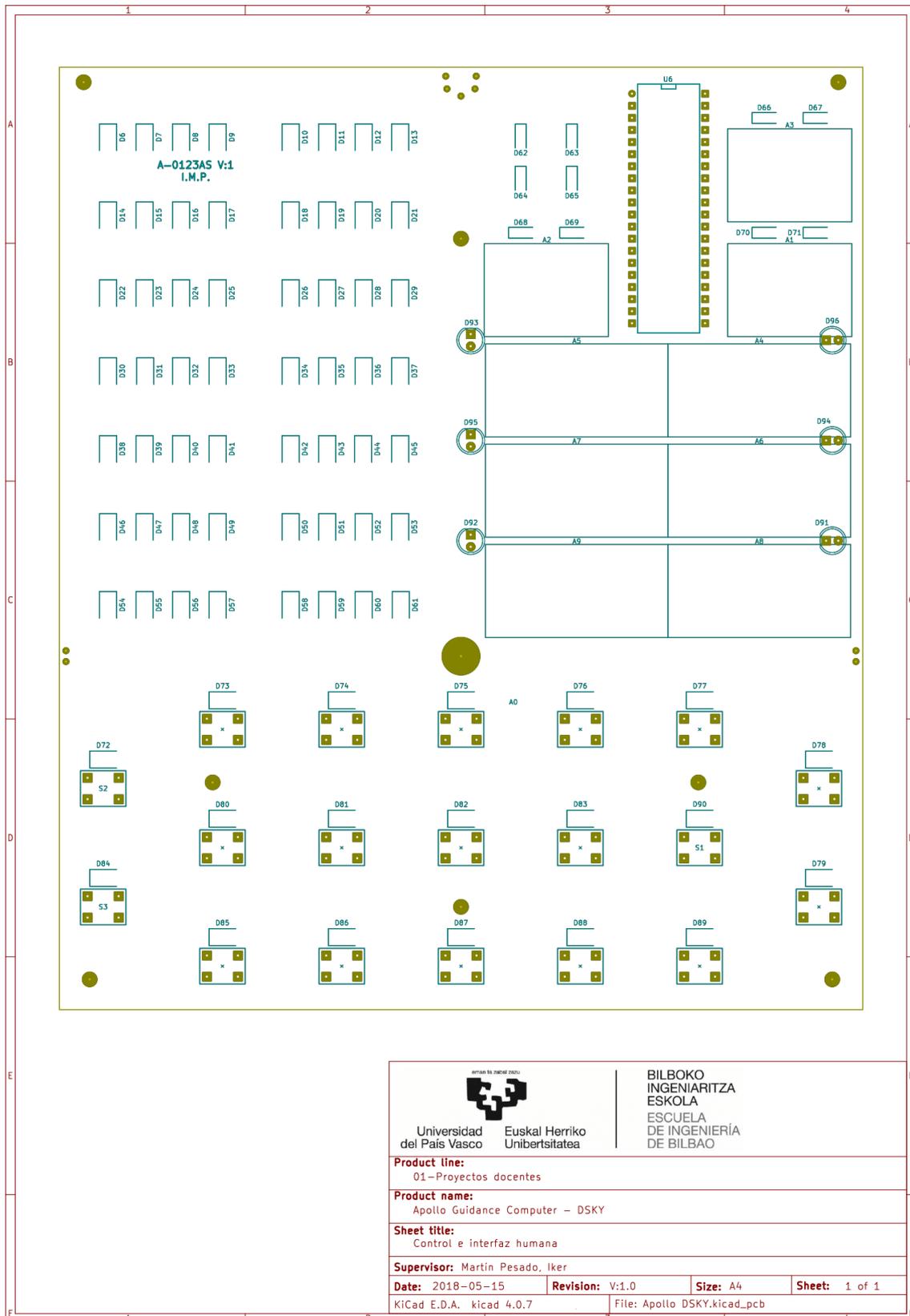


Ilustración 42 - Posicionamiento de componentes en la cara frontal, o TOP

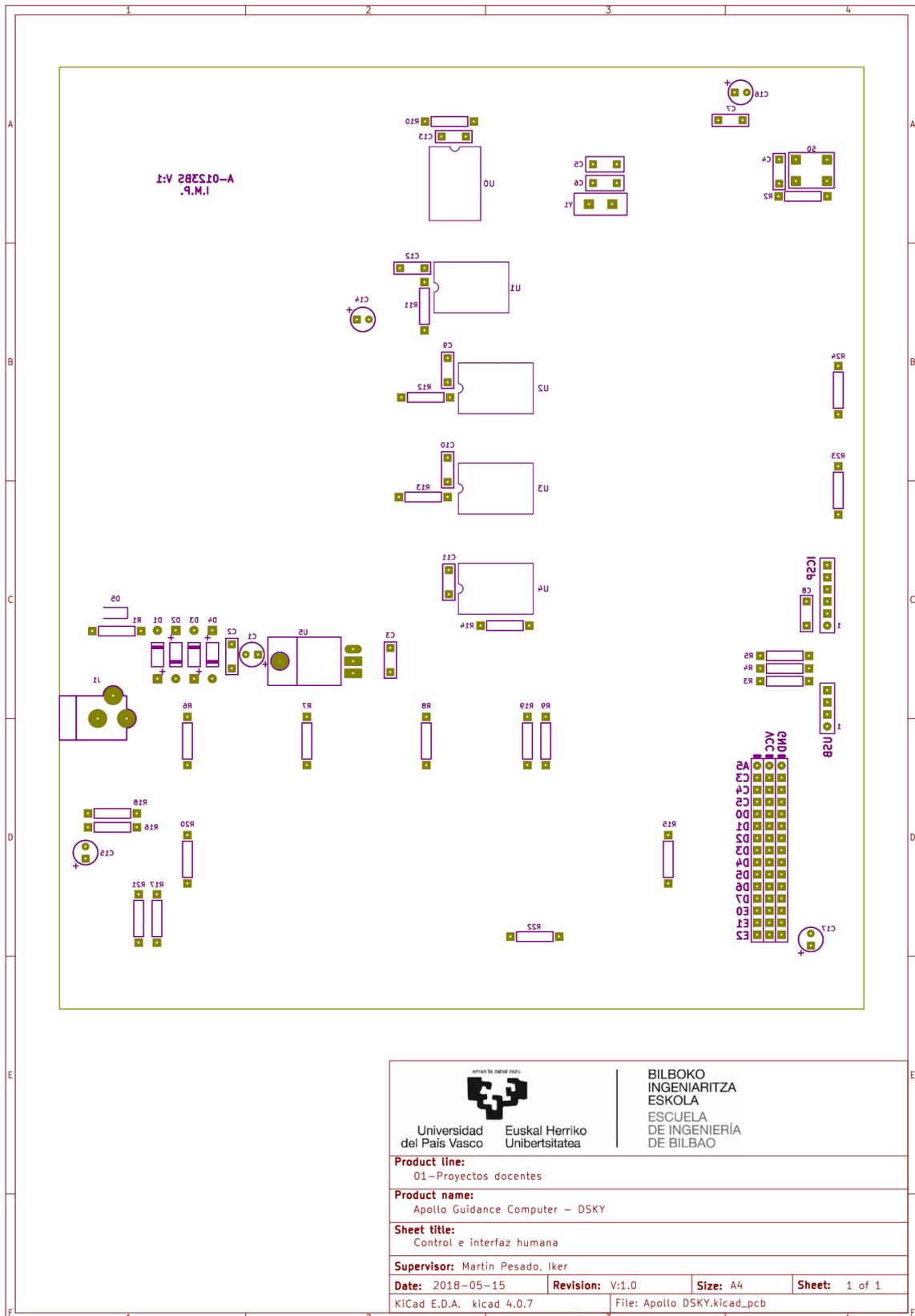


Ilustración 43 - Posicionamiento de componentes en la cara trasera, o *BOTTOM*

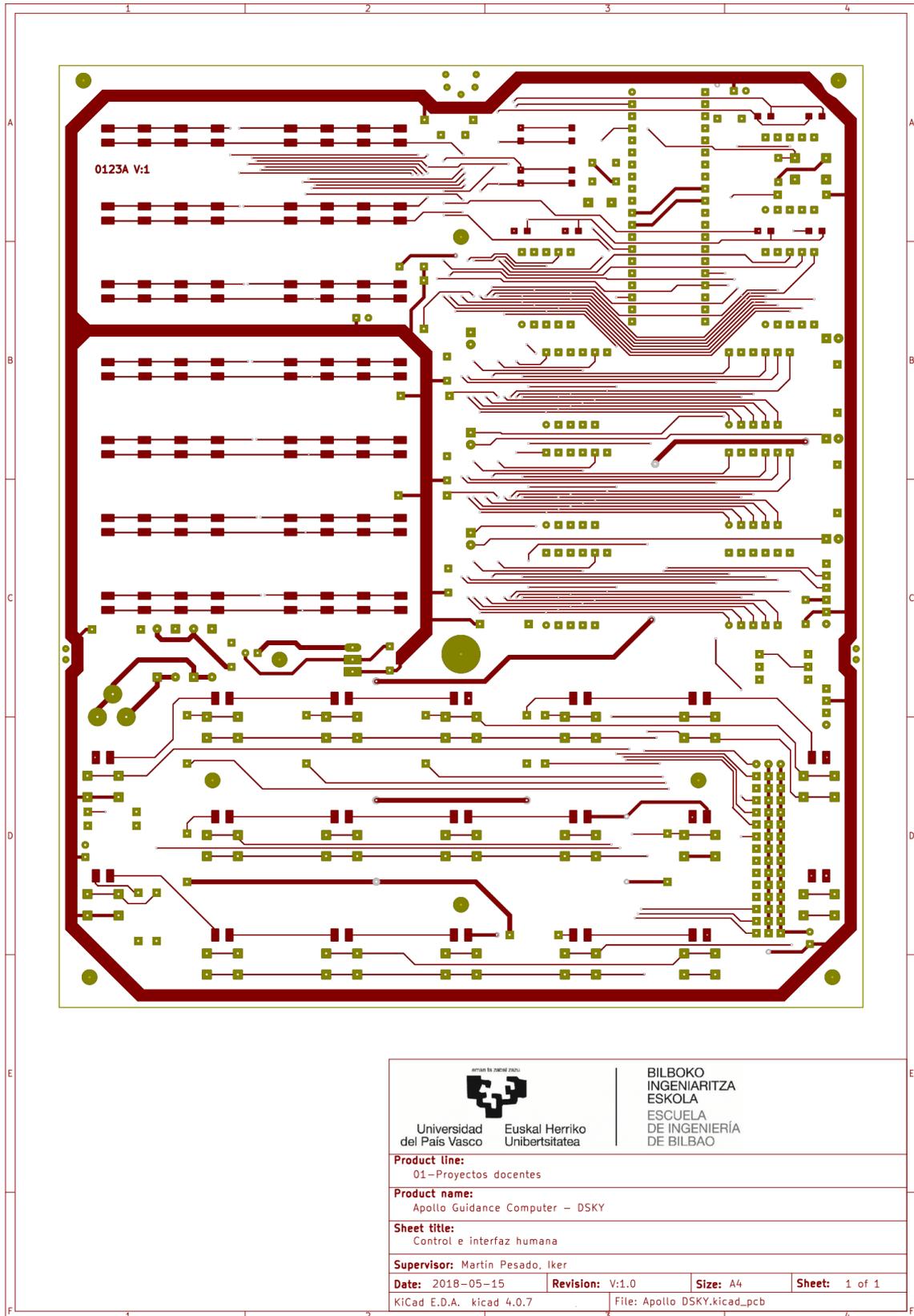
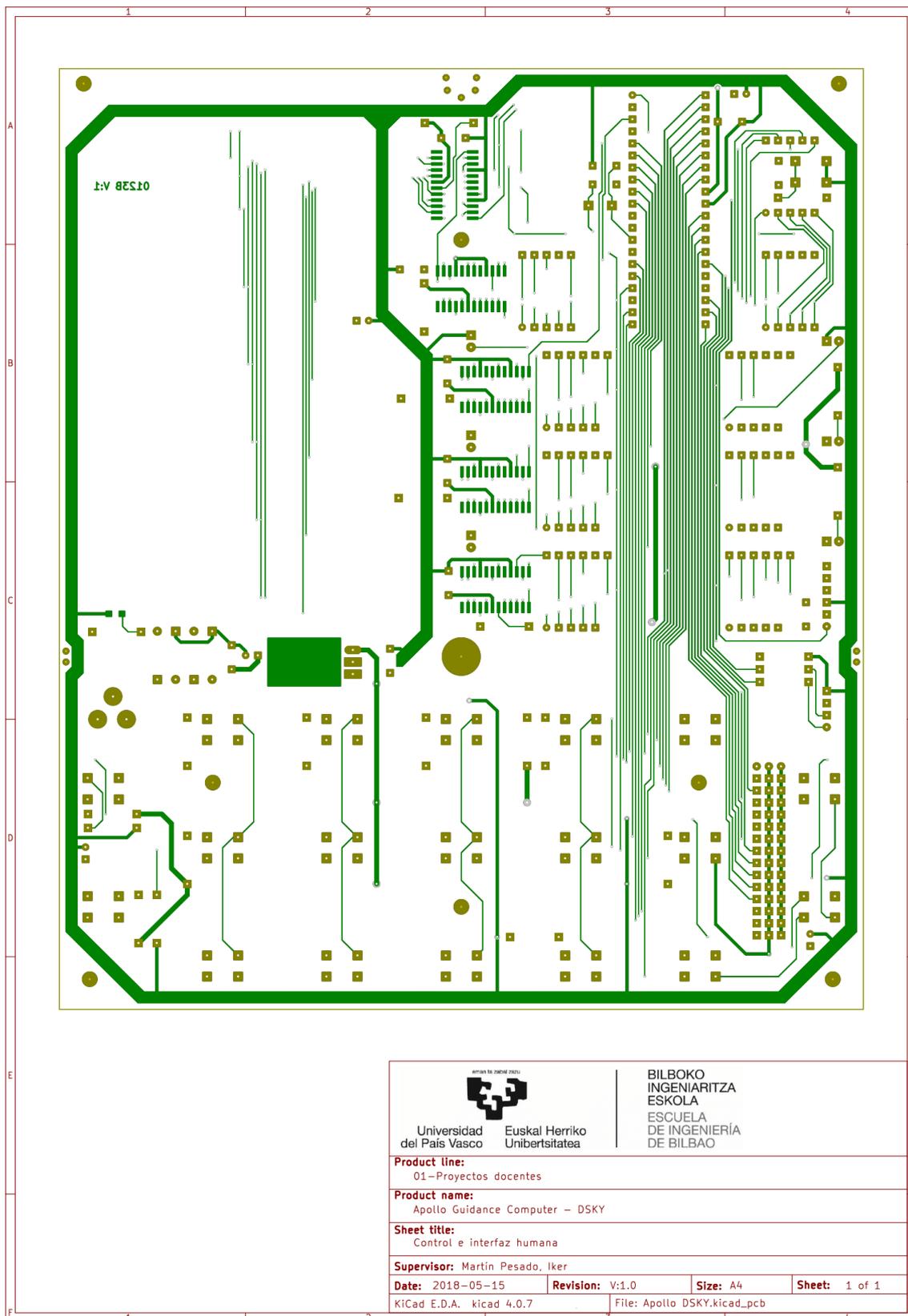


Ilustración 44 - Rutado de la cara frontal, o TOP



		BILBOKO INGENIARITZA ESKOLA ESCUELA DE INGENIERÍA DE BILBAO	
Universidad del País Vasco		Euskal Herriko Unibertsitatea	
Product line: 01 - Proyectos docentes			
Product name: Apollo Guidance Computer - DSKY			
Sheet title: Control e interfaz humana			
Supervisor: Martín Pesado, Iker			
Date: 2018-05-15	Revision: V:1.0	Size: A4	Sheet: 1 of 1
KiCad E.D.A. kicad 4.0.7		File: Apollo DSKY.kicad_pcb	

Ilustración 45 - Rutado en la cara trasera, o *BOTTOM*

eman ta zabal zazu



Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO