

TRABAJO FIN DE MÁSTER

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

ESPECIALIDAD EN TECNOLOGÍA Y PROCESOS INDUSTRIALES

"Desarrollo de una unidad didáctica sobre circuitos y sistemas reversibles para la asignatura de Tecnología Industrial II"

**Curso 2019/ 2020**

**Autor:**

Francisco José Orts Gómez

**Directora:**

Nuria Novas Castellano



MÁSTER EN PROFESORADO



*“Dedicado a todos los profesores y profesoras que a través de su pasión por la enseñanza inculcan a sus estudiantes la pasión por el aprendizaje “*



## Agradecimientos

En primer lugar, quiero mostrar mi agradecimiento a los profesores y profesoras del Máster en Profesorado de Educación Secundaria de la Universidad de Almería por la consideración y el buen trato que conmigo han tenido.

A mi tutora académica y directora de este trabajo, Nuria Novas Castellano, por guiarme sabiamente a lo largo del desarrollo de este trabajo.

A mi tutora profesional, Aída López Túnez, por su esfuerzo en que mis prácticas profesionales fuesen lo más provechosas y agradables posibles. Me han sido de gran utilidad y motivación para el desarrollo del presente trabajo.

A mis compañeros del Máster Javier, Manel, Antonia y Paco. El curso ha sido mucho más agradable y sencillo con vosotros.



## Contenido

<b>Resumen/Abstract</b> .....	3
<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	5
<b>Capítulo 2: Objetivos</b> .....	11
<b>Capítulo 3: Estado del arte</b> .....	13
<b>3.1. Problemática actual en el estudio de circuitos</b> .....	13
<b>3.2. Metodologías, estrategias y herramientas empleadas actualmente</b> .....	15
<b>3.3. Herramientas digitales para el estudio de circuitos reversibles</b> .....	19
<b>3.3.1. QCADesigner</b> .....	20
<b>3.3.2. RevKit</b> .....	22
3.3.3. Testing Tool .....	22
<b>3.3.4. Quirk</b> .....	23
<b>3.3.5. Quest, ProjectQ</b> .....	24
<b>3.3.6. IBM Quantum Experience</b> .....	24
<b>Capítulo 4: Desarrollo de la propuesta</b> .....	27
<b>4.1. Episodio 1: Introducción a las tecnologías reversibles</b> .....	29
<b>4.2. Episodio 2: QCA y Primeras puertas reversibles</b> .....	30
<b>4.3. Episodio 3: Puertas reversibles controladas</b> .....	31
<b>4.4. Episodio 4: Tablas de verdad en circuitos reversibles</b> .....	32
<b>4.5. Episodio 5: Bucles y fan-out en sistemas reversibles</b> .....	33
<b>4.6. Episodio 6: Resto de puertas reversibles</b> .....	34
<b>4.7. Episodio 7: Circuitos clásicos y circuitos reversibles</b> .....	36
<b>4.8. Episodio 8: Puertas reversibles en computación cuántica</b> .....	37
<b>Capítulo 5: Conclusiones</b> .....	39
<b>Bibliografía</b> .....	41
<b>Anexo I: Unidad didáctica: Circuitos y sistemas Reversibles</b> .....	45
1. Objetivos .....	45
a) Objetivos específicos.....	45
b) Estándares de aprendizaje .....	45
c) Objetivos generales .....	46
d) Competencias claves .....	47
2. Contenidos.....	47
a) Contenidos conceptuales .....	47
b) Contenidos procedimentales .....	48

c) Contenidos actitudinales .....	48
3. Actividades de enseñanza y aprendizaje .....	49
4. Evaluación.....	58
a) Criterios de evaluación.....	58
b) Procedimientos de evaluación.....	58
c) Procedimiento de recuperación .....	59
<b>Anexo II: Personalizando Quirk.....</b>	<b>60</b>
Simplificar la interfaz de Quirk.....	60
Añadir nuevas puertas a Quirk.....	61
CNOT.....	62
Toffoli .....	62
Fredkin .....	62
<b>Anexo III: Educación inclusiva.....</b>	<b>63</b>
Recursos económicos .....	63
Necesidades específicas de apoyo educativo derivadas de discapacidad.....	63
Extroversión e Introversión.....	64
Igualdad de género .....	66

## Resumen/Abstract

Aunque el desarrollo de la tecnología relativa a los circuitos y sistemas lógicos están en continuo avance durante las últimas décadas, las bases de dicha tecnología apenas han cambiado durante este tiempo, como puede verse fácilmente al comparar un libro de sistemas digitales de hace 20 años con uno actual. Sin embargo, el auge de nuevas tecnologías reversibles, motivado por causas tan dispares como el ahorro energético -con la vista puesta en el preocupante cambio climático- o el creciente interés de la computación cuántica, amenaza por primera vez este statu quo. De no educar a nuestros estudiantes teniendo en cuenta esta nueva tendencia, corremos el riesgo de que se instauren nuevas tecnologías para las que no se dispone de personal cualificado. En este trabajo, se motiva la necesidad de comenzar a incluir formación especializada en estas nuevas tecnologías, presentando un ejemplo funcional de unidad didáctica sobre circuitos y sistemas reversibles para la asignatura de Tecnología Industrial II de 2º de Bachillerato. La unidad didáctica ha sido realizada poniendo en práctica todos los conocimientos adquiridos en el Máster de Secundaria de la Universidad de Almería.

The development of digital circuits and systems has advanced steadily over the past decades. Nevertheless, the bases of such technology have hardly changed during this time, as can be easily seen by comparing a 20-year-old book on digital systems with a current one. The rise of new reversible technologies, motivated by causes as diverse as energy-saving - with an eye on the worrying climate change - or the growing interest in quantum computing, threatens this status quo for the first time. If we do not educate our students in these technologies, we will not have qualified personnel to work with them in the future. In this work, the need for including specialized training in these new technologies is motivated, presenting a functional example of a didactic unit on reversible circuits and systems for the subject of Industrial Technology II. The didactic unit has been carried out by putting into practice the knowledge acquired in the Master's Degree in Secondary at the University of Almería.



## Capítulo 1: Introducción

La importancia de los circuitos y sistemas lógicos es sobradamente conocida en Ingeniería Informática. Los ordenadores basan su funcionamiento en el uso de transistores, que podemos definir de manera simple como interruptores controlados eléctricamente que se pueden activar o desactivar en función de una señal eléctrica de control aplicada (corriente o tensión). Los transistores fabricados actualmente son extremadamente eficientes, pero si son tan utilizados es debido fundamentalmente a su reducido tamaño y su bajo coste. Estos transistores permiten construir puertas lógicas: circuitos digitales sencillos con una o más entradas binarias que producen una salida también binaria. Combinando estas puertas, se pueden construir circuitos y sistemas de cualquier tamaño y complejidad. La adecuada combinación de estos sistemas definirá la arquitectura del ordenador, consiguiendo finalmente que dicho ordenador pueda ejecutar sus aplicaciones software (Harris & Harris, 2015).

Pese a la importancia de los circuitos y sistemas digitales en los ordenadores, sería un error limitar su importancia al mundo de la informática. Un automóvil normal puede llegar a contener unos 100 microprocesadores (Mikhailiuk & Dahnoun, 2016). Industrias tan diversas como la medicina o la militar tienen investigadores dedicados a la mejora y optimización del uso de dichos microprocesadores (Bekeschus et al., 2019; Sangeetha, Chandrasekaran & Kavithaa, 2020). La industria de los semiconductores aumenta sus beneficios año tras año, por lo que queda claro que los circuitos son técnicamente, económicamente, e incluso socialmente, importantes (Bran, Bodislav & Mitriță, 2020). Se hace evidente que una industria en continuo crecimiento necesita de trabajadores especializados. El sistema educativo español, consciente de esta necesidad, incorpora la enseñanza de circuitos y sistemas lógicos en diversos programas de formación presentes en institutos, centros de formación profesional, y universidades.

Hoy en día, cuatro tecnologías lógicas dominan el mercado de los transistores: TTL (Transistor-Transistor Logic), CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), LVTTTL (Low Voltage TTL Logic), y LVCMOS (Low Voltage CMOS Logic). Por razones más que obvias, los programas educativos en España que cubren la formación relacionada se centran en estas familias. Toda enseñanza de Álgebra de Boole, lógica positiva y negativa, simplificación de funciones booleanas, y un largo etcétera, está enfocada en un nivel digital construido sobre la base analógica proporcionada por los

transistores de estas familias. Sin embargo, hay tres factores que, por primera vez en décadas, están poniendo en peligro el monopolio de estas tecnologías:

- 1. El final de la Ley de Moore.** La llamada Ley de Moore establece que el número de transistores contenidos en un microprocesador se duplica, aproximadamente, cada 2 años. Originalmente este periodo era de 1 año, pero posteriormente se modificó. Hoy en día, la tecnología encuentra dificultades físicas para seguir cumpliendo con la Ley de Moore: los tamaños manejados actualmente (de unos pocos nanómetros) provocan un recalentamiento cada vez mayor del microprocesador, llegando a un punto en el que es prácticamente inviable reducir más su tamaño (Li et al., 2018). Hay investigadores que dan por hecho que estamos viviendo el final de la Ley de Moore justo en estos días. Otros incluso afirman que ya ha dejado de tener validez. En cualquier caso, si se encontrase una tecnología alternativa que permita seguir con lo dicho por la Ley de Moore, está claro que despertaría un interés legítimo para las industrias relacionadas.
- 2. Una conciencia ecológica cada vez mayor.** Si bien es cierto que la evolución de los transistores ha puesto interés en mejorar el consumo energético, no es menos cierto que existen tecnologías alternativas a las actualmente utilizadas que reducen enormemente dicho consumo. Lamentablemente, el mayor coste de estas tecnologías ecológicas no ha llamado la atención de una industria más centrada en producir elementos cada vez más pequeños y económicos. Sin embargo, cada vez son más las voces que se alzan en defensa de priorizar el consumo energético ante el creciente deterioro del medio ambiente. Con el cambio climático amenazando ya no solo a los ecosistemas del planeta, sino al propio bienestar del ser humano, se hace comprensible que en un futuro cercano estas voces no hagan sino aumentar.
- 3. El auge de la computación cuántica.** La computación cuántica surgió de la mano del físico David Deutsch hace décadas, en un intento de imitar los contraintuitivos, pero impresionantes comportamientos estudiados por la mecánica cuántica. Sin embargo, es ahora cuando grandes empresas como IBM y Google están comenzando a estandarizarlas y hacerlas accesibles al público general. Un computador cuántico se basa, al igual que nuestros ordenadores actuales, en circuitos (Alexeev et al., 2019). Sin embargo, estos circuitos tienen unos

requisitos diferentes a los clásicos, siendo el requisito más llamativo la reversibilidad. Ya que la naturaleza cuántica es aparentemente reversible, los circuitos cuánticos también deben serlo. Aunque la reversibilidad es una necesidad para la computación cuántica, también ofrece una ventaja: el consumo de los circuitos reversibles es extremadamente más reducido que el de los clásicos, como se explica justo a continuación.

Los circuitos reversibles se perfilan como una alternativa interesante a los circuitos actuales. Estos circuitos, al igual que los clásicos, proporcionan una salida a partir de una o varias entradas. Sin embargo, tienen una diferencia fundamental: en un circuito reversible, siempre es posible determinar la(s) entrada(s) a partir de la(s) salida(s). Un ejemplo de reversibilidad lo proporciona la puerta NOT: si la salida es 1 sabemos que la entrada es 0, y si la salida es 0 podemos afirmar que la entrada es 1. Un ejemplo de puerta no reversible es la puerta AND: si la salida es 0, no podemos afirmar con seguridad qué valor tenían las entradas: podrían valer ambas 0, solo la primera 0, o solo la segunda 0. Se hace evidente que, pese a que algunas puertas clásicas son reversibles, hay que diseñar alternativas reversibles para muchas otras si se opta por este paradigma de circuitos. El motivo de utilizar la reversibilidad, más allá de que sea una imposición para los computadores cuánticos dada su especial naturaleza, viene del hecho de que, sorprendentemente, la única tarea computacional que consume energía es el borrado de información. Esto significa que, despreciando otros fenómenos físicos, la computación de una tarea puede realizarse en términos físicos sin consumo alguno de energía siempre y cuando las operaciones involucradas sean reversibles y no se pierda información en el proceso (Rauchenecker, Ostermann & Wille, 2017).

Centrándonos de nuevo en los planes de estudio de nuestro país que incluyen la enseñanza de circuitos y sistema lógicos como parte de sus programas, hay un dato alarmante: ninguno de ellos incluye el estudio de circuitos reversibles. De seguir siendo así y no adoptar medidas, se corre el riesgo de llegar a un punto en el que la industria evolucionará hacia un menor consumo energético y el uso cada vez más frecuente de computadores cuánticos o clásicos basados en circuitos reversibles, pero no encontrará (al menos, no en nuestro país) trabajadores o trabajadoras cualificados o cualificadas para trabajar con sistemas basados en circuitos reversibles. Esto incluye no únicamente el diseño de dichos circuitos, sino el uso de plataformas tales como los computadores cuánticos.

En este trabajo se propone la incorporación de los circuitos reversibles en el temario de Bachillerato, concretamente en el segundo curso, en la asignatura “Tecnología Industrial II”. La elección de la introducción de los contenidos en esta asignatura se fundamenta por dos motivos:

En primer lugar, incluir el estudio de circuitos reversibles en un contexto en el que se estén ya estudiando circuitos. Esto da dos posibilidades, ESO o Bachillerato, pues en ambos niveles se estudian las puertas lógicas. En Tecnología de 4º de ESO, el bloque 3 (“Electrónica”) establece como contenidos (Orden de 14 de julio de 2016, ESO):

*“Electrónica analógica. Componentes básicos. Simbología y análisis de circuitos elementales. Montaje de circuitos sencillos. Electrónica digital. Aplicación del álgebra de Boole a problemas tecnológicos básicos. Funciones lógicas. Puertas lógicas. Uso de simuladores para analizar el comportamiento de los circuitos electrónicos. Descripción y análisis de sistemas electrónicos por bloques: entrada, salida y proceso. Circuitos integrados simples”.*

A su vez, establece como criterios de evaluación para dicho bloque los siguientes:

- Analizar y describir el funcionamiento y la aplicación de un circuito electrónico y sus componentes elementales.
- Emplear simuladores que faciliten el diseño y permitan la práctica con la simbología normalizada.
- Experimentar con el montaje de circuitos electrónicos analógicos y digitales elementales, describir su funcionamiento y aplicarlos en el proceso tecnológico.
- Realizar operaciones lógicas empleando el álgebra de Boole en la resolución de problemas tecnológicos sencillos.
- Resolver mediante puertas lógicas problemas tecnológicos sencillos.
- Analizar sistemas automáticos, describir sus componentes. Explicar su funcionamiento, y conocer las aplicaciones más importantes de estos sistemas.
- Montar circuitos sencillos.

En 2º de Bachillerato, en la asignatura de “Tecnología Industrial II”, vuelven a aparecer los circuitos y sistemas lógicos. En particular, se introducen en el bloque 4, precisamente llamado “Circuitos y sistemas lógicos”. En este caso, los contenidos del bloque son (Orden de 14 de julio de 2016, Bachillerato): *“Sistemas de numeración. Álgebra de Boole. Puertas y funciones lógicas. Circuitos lógicos combinatoriales. Aplicaciones.*

*Procedimientos de simplificación de circuitos lógicos*". A su vez, los criterios de evaluación de este bloque son los siguientes:

- Diseñar mediante puertas lógicas, sencillos automatismos de control aplicando procedimientos de simplificación de circuitos lógicos.
- Analizar el funcionamiento de sistemas lógicos secuenciales digitales describiendo las características y aplicaciones de los bloques constitutivos.
- Diseñar e implementar circuitos lógicos combinacionales como respuesta a un problema técnico concreto.
- Simplificar e implementar circuitos lógicos digitales con puertas lógicas y/o simuladores.

En segundo lugar, descartamos la elección de Tecnología de 4º de ESO en favor de Tecnología Industrial II de 2º de bachillerato por el trasfondo matemático que tienen los circuitos reversibles. Para realizar una introducción adecuada a la computación cuántica y el uso de puertas reversibles en dicha computación son necesarios conocimientos básicos de álgebra lineal, fundamentalmente sobre operadores lineales y matrices. Dado que estos conocimientos matemáticos se introducen, precisamente, en bachillerato, consideramos adecuado la introducción de los contenidos sobre circuitos reversibles en este nivel. Por otro lado, podría el lector dudar sobre la necesidad de introducir nociones de computación cuántica para el estudio de las puertas reversibles. Consideramos que la computación cuántica supone una motivación fuerte para el estudiante por dos motivos: primero por ser un tema de total actualidad que está demostrado que atrae y entusiasma a los estudiantes de este nivel (Hughes et al., 2020), y segundo por la gran cantidad de recursos gratuitos disponibles para poder aplicar lo aprendido en clase, que van desde ordenadores cuánticos reales (IBM ofrece acceso libre y gratuito a un surtido variado de pequeños ordenadores cuánticos, ideales para un estudiante o persona novata interesada en la materia) hasta simuladores online del tipo "arrastra y construye" (Economou, Rudolph & Barnes, 2020). En cualquier caso, sí queremos matizar que la introducción a dicho paradigma de computación se realiza como motivación y herramienta auxiliar para el estudio de las puertas reversibles.

En base a lo expuesto, este trabajo presenta una propuesta de unidad didáctica para el aprendizaje de circuitos y sistemas reversibles, especialmente pensada para ser incluida en el bloque 4 de la asignatura "Tecnología industrial II". La unidad didáctica se ha

realizado utilizando los conocimientos adquiridos a lo largo de las diversas asignaturas cursadas en el Máster en Profesorado de Educación Secundaria de la Universidad de Almería. Como no podía ser de otra forma, dicha unidad didáctica presta una especial atención a los objetivos, a los contenidos, y a la evaluación, pero también tiene un fuerte interés en favorecer el proceso de inclusión educativa. Se hace, pues, un esfuerzo orientado al reconocimiento y valoración de todos los estudiantes, reclamando una educación que no deje en ningún caso a nadie fuera.

## Capítulo 2: Objetivos

Este Trabajo Fin de Máster pretende incluir la enseñanza de circuitos y sistemas reversibles en la asignatura “Tecnología Industrial II” de 2º de Bachillerato basándose en los motivos expuestos en la sección anterior. La principal aportación es la presentación de una unidad didáctica que incluya la información relativa a la impartición de dicha enseñanza. Para su desarrollo, se parte de dos hipótesis.

Por un lado, se parte de la hipótesis de que se pueden añadir las horas necesarias para la impartición de la nueva unidad didáctica en la asignatura mencionada. Esta unidad añade contenido nuevo al programa. Aumentar el programa de una asignatura, en este caso Tecnología Industrial II, no es trivial dada la importancia de los contenidos actualmente recogidos. Evidentemente, no podemos hablar de que exista la posibilidad de incluir nuevo contenido en el mismo tiempo sin perjudicar al contenido ya existente. Este problema temporal no es abordado en el presente Trabajo Fin de Máster, puesto que para dar solución a dicho problema se hace necesaria una perspectiva mucho más general de la asignatura, con la participación de profesores expertos en tecnología que puedan determinar la programación adecuada del curso completo.

Por otro lado, en este trabajo se reconoce y analiza la necesidad de estudiar los circuitos que nos ocupan, tal y como se ha expuesto en la sección de introducción. Es decir, se parte de la hipótesis de que la incorporación de estos contenidos se considera una necesidad real y justificada por el avance de la tecnología. Con esta segunda hipótesis, el foco principal del trabajo está en estudiar cómo desarrollar este contenido de forma óptima en esta etapa del aprendizaje utilizando metodologías, estrategias y herramientas de probada eficacia (Parra, Duarte & Fernández, 2014; Molinar, Salas & Guerrero, 2017; Bello, 2013; Becerra, 2014; Bidarte et al., 2004). Quiero mencionar que mi tutora y yo no hemos inventado estas metodologías, estrategias ni herramientas, ni por supuesto las reivindicamos como mérito nuestro. Nosotros solamente nos hemos centrado en identificarlas y organizarlas en forma de unidad didáctica que cumpla con las siguientes características:

1. Debe tener un carácter eminentemente práctico.
2. Debe resultar llamativa y motivante para los estudiantes.
3. Debe fomentar un aprendizaje inclusivo que no deje a nadie sin cubrir.

4. Debe fomentar la cooperación y el trabajo en equipo, objetivos fundamentales para el adecuado desarrollo de nuestra sociedad.
5. Debe fomentar el uso adecuado de las tecnologías de la información y la comunicación para promover un aprovechamiento responsable de los recursos naturales del planeta.
6. Debe utilizar recursos económicamente viables. De hecho, los recursos propuestos, de probada eficacia para fines educativos (Walus et al., 2004; Simulador Quirk; IBM Quantum Experience), son gratuitos.
7. En último lugar, pero no por ello menos importante, debe especificar claramente qué, cómo y cuándo enseñar y evaluar.

Estas características están alineadas con las capacidades que el Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre establece que deban desarrollarse para los estudiantes de ESO y Bachillerato (Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre). Para el desarrollo de la unidad didáctica objetivo, el trabajo se estructura de la siguiente manera:

1. En primer lugar, se analizan los problemas actuales que existen en el estudio de circuitos y sistemas lógicos actualmente, de cara a evitar dicha problemática en el planteamiento de la unidad didáctica.
2. Se hace una búsqueda de metodologías y herramientas que se utilicen en sistemas lógicos, así como en sistemas reversibles, de cara a elegir los más adecuados para la unidad didáctica.
3. Se explican los aspectos más importantes del desarrollo de la unidad didáctica relativos a las características antes mencionadas.

### **Capítulo 3: Estado del arte**

En esta sección se repasan las metodologías, estrategias y herramientas empleadas actualmente para la enseñanza de circuitos lógicos y otros temas relacionados, prestando especial atención a los utilizados en niveles de educación similares al tratado en este trabajo. También se busca y muestra información relativa a métodos de enseñanza sobre circuitos reversibles, aunque puede imaginar al lector/a que dicha información es muy reducida y que está focalizada casi exclusivamente en los niveles universitarios y, especialmente, de investigación especializada.

En esta revisión, que no deja de ser una búsqueda que intenta aprovecharse de los recursos ya existentes y de probada eficacia disponibles en la literatura, también hemos querido incluir (tal y como se indica en la sección anterior) un estudio de los potenciales problemas que existen hoy en día en el estudio de circuitos clásicos, de cara a ofrecer contenidos actualizados que mitiguen, dentro de lo posible, dichos problemas.

#### **3.1. Problemática actual en el estudio de circuitos**

El estudio de sistemas lógicos puede analizarse desde dos perspectivas diferentes: desde el punto de vista de los contenidos, y del punto de vista docente, es decir, de la forma de impartir dichos contenidos.

En primer lugar, sobre los contenidos apenas han variado durante los últimos años. Por ejemplo, el contenido relativo a circuitos presente en un libro de tecnología industrial de 2002 de la editorial Donostiarra (Almaraz, 2002) es totalmente similar a su edición más moderna publicada en 2018 (Gómez, 2018). Por supuesto, este ejemplo no se limita a esta editorial, sino que se puede observar en otros libros del mismo nivel (Ibáñez, Val & González, 2017). De hecho, esta falta de actualización no se limita al nivel de bachillerato: a nivel universitario, si comparamos el libro “Fundamentos de sistemas digitales” de 1997 (Floyd, 1997) utilizado como bibliografía básica de la asignatura “Tecnología de Computadores” de las antiguas Ingenierías Técnicas en Informática, con el libro utilizado actualmente en la asignatura equivalente del grado (Harrys & Harrys, 2015) (centrándonos, por supuesto, en la parte del temario que tienen en común ambos libros, puesto que ambos libros tienen un enfoque diferente), se puede observar que las diferencias entre ambos libros son nulas para los niveles básicos de sistemas lógicos. Se ha establecido una base de contenidos que perdura décadas después y que no se ha

actualizado ni para tener en cuenta los avances acometidos a nivel técnico, ni para incluir la preocupación energética actual (Naseri & Timarchi, 2018; Garg & Gupta, 2018). Siguiendo esta línea de falta de actualización, ninguna de las referencias indicadas hace mención alguna a los sistemas reversibles. Centrándonos de nuevo exclusivamente en el nivel de 2º de bachillerato, se podría argumentar con cierta razón que no es necesaria una actualización de contenido sobre circuitos puesto que las puertas lógicas y los circuitos básicos estudiados en este nivel son, a efectos prácticos, los mismos que hace 20 años. Podríamos aquí argumentar que algunos de estos circuitos sí han cambiado, obteniéndose versiones más eficientes (en diversos sentidos: velocidad, tamaño, etc.) de algunos de ellos, como por ejemplo los circuitos sumadores, que han sido mejorado progresivamente y que incluso a día de hoy siguen siendo objeto de estudio por parte de investigadores interesados en su optimización (Liu et al., 2019). Pero incluso sin entrar en aspectos técnicos, una actualización de contenidos en la que se justifiquen y utilicen los circuitos indicados en el temario dentro de un contexto totalmente actual, con ejemplos de uso modernos, son importantes para motivar al estudiante y para que comprenda la importancia y utilidad de estos (Broc, 2006).

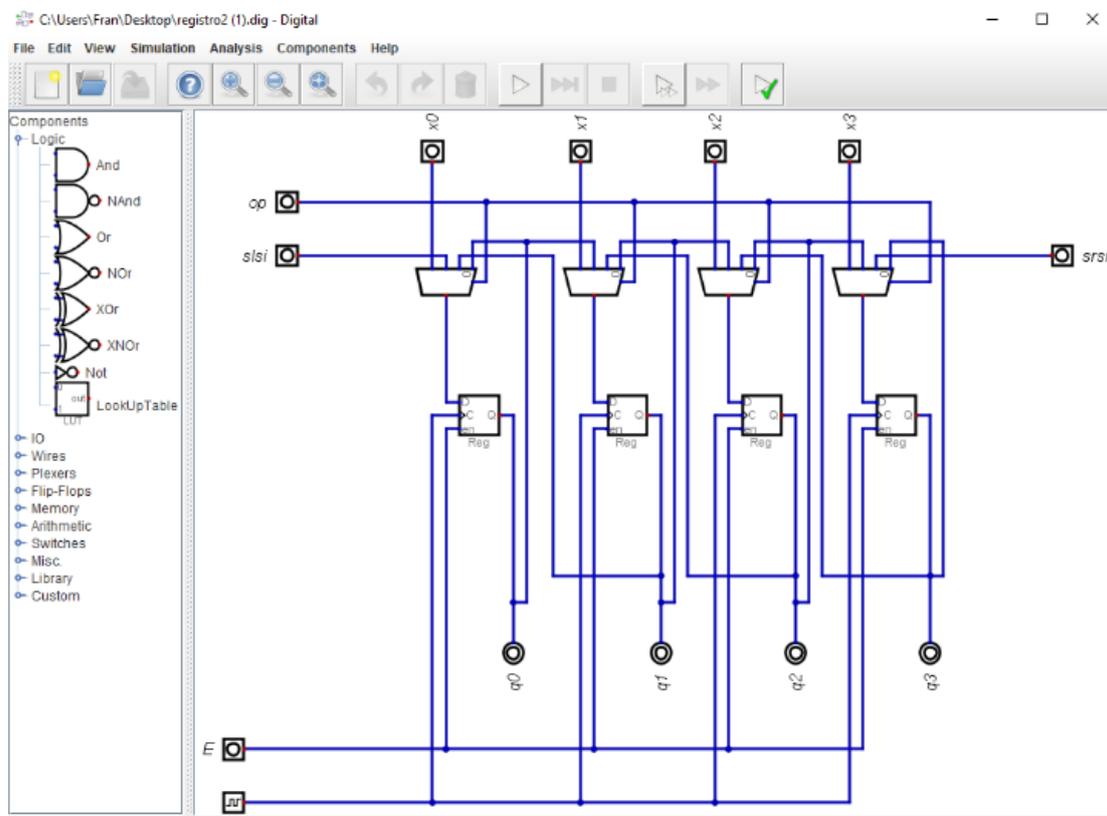


Figura 1: Simulador de circuitos “Digital”.

En segundo lugar, hay que analizar la forma de impartir los contenidos del temario de Tecnología Industrial II relativos a circuitos y sistemas lógicos. No se va a entrar ahora en metodologías ni estrategias, puesto que se analizan en la subsección siguiente, pero sí es importante señalar que tras estudiar la programación de Tecnología Industrial II de tres institutos andaluces: IES Guadalpín, IES Salvador Rueda, e IES Bahía de Almería (las programaciones didácticas de estas asignaturas están indicadas en la bibliografía), se puede observar que el aprendizaje de esta asignatura, en lo que respecta a circuitos, se basa fundamentalmente en el diseño de circuitos en papel y su implementación en entrenadores lógicos utilizando circuitos integrados TTL. No obstante, se puede ver que hay una creciente tendencia a utilizar dispositivos Arduino y Raspberry Pi (en sus diferentes versiones) para realizar montajes de circuitos gracias a su bajo coste y por la probada motivación que aportan al alumno (Córdova, 2017). Sin embargo, pese a que existe una cierta cantidad de simuladores para la construcción de sistemas lógicos tales como Logisim o Digital (imagen de Digital en Fig. 1, web de ambas herramientas indicada en la bibliografía), su uso no está estandarizado en bachillerato, por lo que el aprendizaje de circuitos se basa en el diseño y construcción, dejando de lado la posibilidad de realizar pruebas de calidad y testeo de los circuitos, siendo el único testeo posible la prueba manual de todas las posibilidades del circuito una vez montado, algo poco práctico e incluso impensable en un entorno de producción real. Se considera importante el uso de simuladores porque, lamentablemente, no es posible obtener un circuito integrado reversible con la misma facilidad y con un coste económico comparable a un TTL, por lo que en el caso de los sistemas reversibles resulta fundamental el uso de simuladores.

### **3.2. Metodologías, estrategias y herramientas empleadas actualmente**

Como se ha comentado ya en las secciones previas, el contenido sobre circuitos reversibles está estrechamente relacionado con el contenido actual sobre circuitos, por lo que consideramos inteligente partir desde la experiencia de profesores veteranos en dicha materia. La investigación sobre metodologías y estrategias de aprendizaje de circuitos y sistemas lógicos es extensa (Parra et al., 2014; Molinar et al., 2018; Narváez, 2019; Ramos et al., 2016; Bello, 2013; Rioja, Besora & Vizern, 2017; Becerra, 2014; Bidarte et al., 2004; Ortí, 2015).

En 2013, Bello probó una propuesta pedagógica para un grupo de un máximo de 20 estudiantes (Bello, 2013). En esta propuesta se persigue garantizar que ambos actores, docente y estudiantes, tuviesen un espacio y un tiempo de protagonismo equilibrado. En el caso de los estudiantes, se busca un trabajo autónomo en el que reflexionen y experimenten de forma activa sobre unos contenidos previamente introducidos por el docente. Dicho de otra forma, se busca que los estudiantes reflexionen sobre los conceptos y transformen sus reflexiones en conocimientos sólidos que utilizarán para analizar y resolver problemas de circuitos. En un estudio preliminar, Bello comprobó que los estudiantes opinaban -con desagrado- que el aprendizaje de circuitos es demasiado teórico (si bien, en torno al 55% de los estudiantes no consideraban del todo mala la metodología), justificando de esta manera la necesidad de estudiar una metodología más participativa por parte de los estudiantes.

En 2014, Becerra presentó un trabajo similar al de Bello que acabamos de comentar, pero en esta ocasión se introduce un aprendizaje basado en problemas que envuelve de forma activa a los estudiantes en un proceso continuo en el que desarrollan su conocimiento primero adquiriendo una serie de conceptos por parte del profesor y luego utilizándolo para resolver problemas concretos y definidos de antemano (Becerra, 2014). Un ejemplo de este aprendizaje se puede ver en la Figura 2. Introduce también una fuerte componente de trabajo en grupo, en el que los estudiantes debaten su propuesta y comparten lo aprendido durante todo el proceso. Además, introduce el uso del denominado Wiimote Whiteboard para las presentaciones (Fig. 3) y el uso de software educativo con fines motivadores. Cabe destacar que las consolas Nintendo utilizaban el periférico Wiimote en la época en la que se desarrolló este estudio, por lo que entendemos que Becerra optara por su uso en clase para motivar a los estudiantes y que se tomaran sus exposiciones como un juego, según el estudio, resultando en un interesante aumento de la motivación. Pero se quiere clarificar al lector/a por si no está familiarizado con el mundo de los videojuegos, que este dispositivo no aporta ninguna ventaja en el estudio de circuitos, sino que puede considerarse como un dispositivo de tipo presentador de diapositivas.

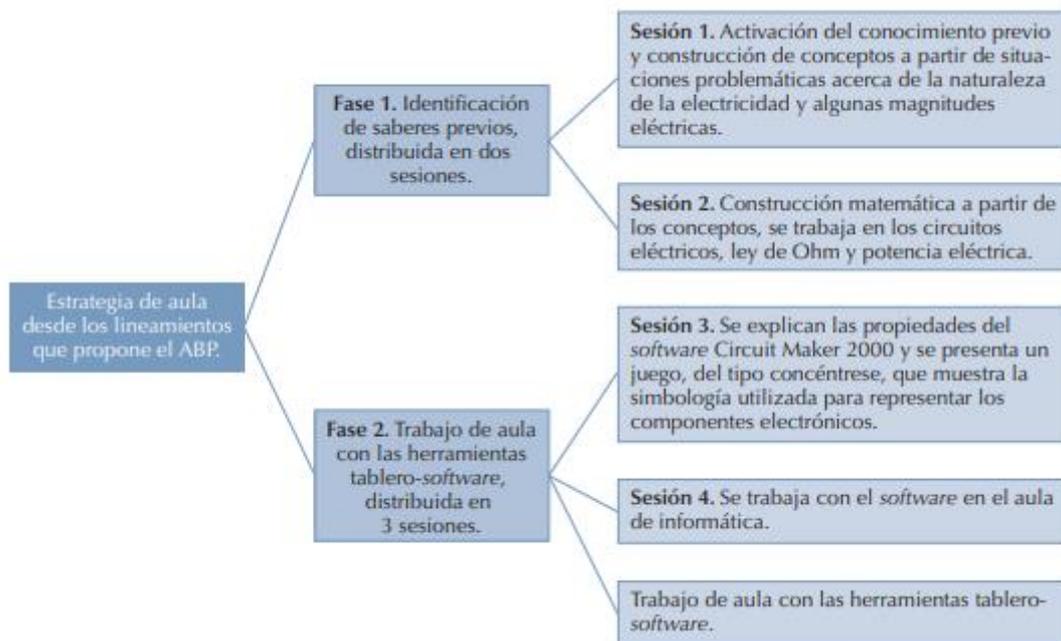


Figura 2. Ejemplo del aprendizaje basado en problemas presentado en (Becerra, 2014).



Figura 3. Wiimote Whiteboard.

Especialmente interesante es el trabajo publicado por Parra et al. también en 2014 (Parra et al., 2014). En dicho trabajo, los autores llevaron a cabo un estudio cuyas conclusiones son que, en contraste al modelo tradicional, se obtienen mejores resultados en los estudiantes utilizando un modelo de aprendizaje activo que tenga en cuenta los conocimientos previos ya adquiridos relacionados con circuitos (en este caso, de las asignaturas del área de física), consiguiendo además que los estudiantes tengan una sensación de continuidad de contenidos, en lugar de verlos como elementos independientes, así como la integración de los conocimientos adquiridos anteriormente. En este trabajo se apuesta además por el uso de un gran número de herramientas para las simulaciones, tales como CircuitLab (Fig. 4) o logicCircuit, lo que contrasta con la

información analizada en la subsección anterior en la que se echa en falta el uso de este tipo de herramientas en las programaciones analizadas.

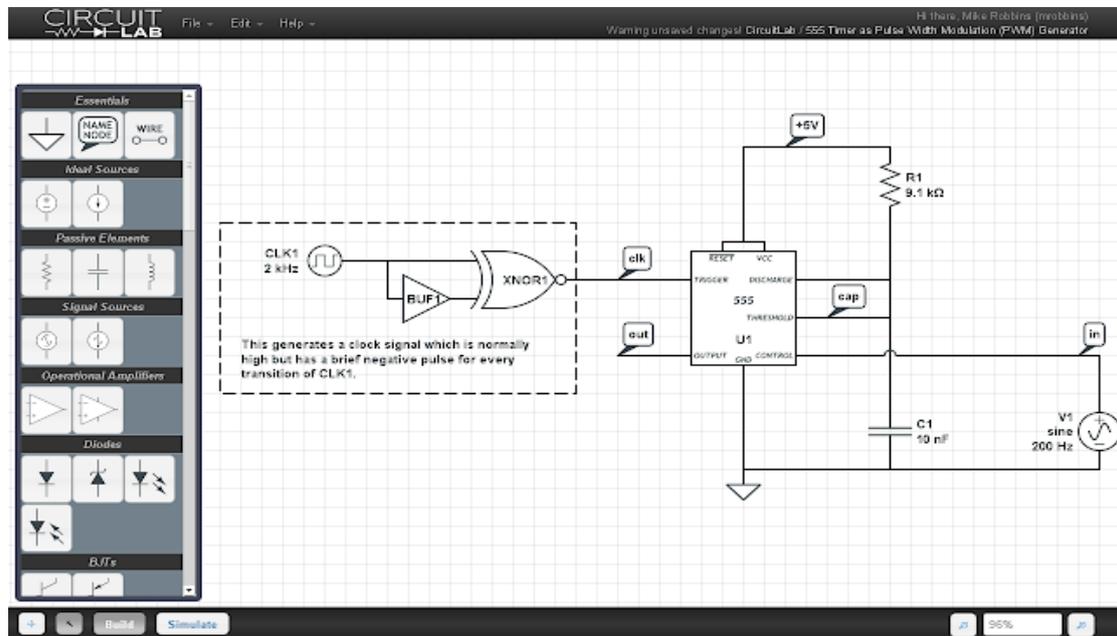


Figura 4. Simulador CircuitLab.

Muy en la línea de la investigación anterior, en el trabajo presentado por Molinar et al. en 2017 también llegaron a la conclusión de la necesidad de no utilizar un modelo convencional docente (Molinar et al., 2017). En este estudio defienden que los estudiantes sean parte de un proceso de aprendizaje significativo que, entre otras ventajas, afecta muy positivamente, en vista a los resultados conseguidos en el estudio, a la autoestima de los estudiantes, a sus habilidades de comunicación, y a su responsabilidad, estando además especialmente motivados al presentar un trabajo que ha sido desarrollado por ellos mismos. También coinciden con el estudio anterior en que el uso de herramientas informáticas para realizar simulaciones es especialmente efectivo, aunque en este trabajo se centran más en sus ventajas motivadoras que en lo que los conocimientos técnicos que puedan adquirir los estudiantes. Los trabajos presentados en (Narváez, 2019; Ramos et al., 2016; Rioja et al., 2017; Ortí, 2015) llegan a resultados similares a los resultados obtenidos por (Molinar et al., 2017), y además presentan una cantidad interesante de material de trabajo para que docentes interesados puedan aplicarlo para mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje en sus aulas.

Finalmente, y pese a su antigüedad, nos parece interesante mencionar el trabajo presentado por Bidarte et al. realizado en el curso 2012-2013 (Bidarte et al., 2014). En

este estudio, realizado a alumnos y alumnas de primer curso de grado, comprobaron que sus conocimientos sobre circuitos estaban limitados a hacer funcionar el circuito de cualquier manera, incluso copiando o memorizándolos parcial o totalmente, sin haber asimilado nada sobre metodologías activas ni aprovechar los beneficios de la elaboración de informes o un análisis previo al circuito. Llevándolo a nuestro terreno, queda patente que el error está en el nivel inmediatamente anterior (nuestro bachillerato), donde según este estudio no se les ha enseñado a relacionar el trabajo teórico con el práctico, viendo la implementación de circuitos como una tarea independiente, difícil, y aburrida.

En lo referente a circuitos reversibles, apenas existe bibliografía educativa sobre ellos, y la poca que hay está enfocada al ámbito de la investigación (Sing, Choudhary & Jain, 2019; Zilic, Radecka & Kazamiphur, 2007). También se puede encontrar información de carácter divulgativo sobre circuitos reversibles en textos enfocados al aprendizaje de computación cuántica, pero en este caso al nivel de conocimiento exigido hay que sumarle las limitaciones propias de la computación cuántica, puesto que la reversibilidad es solo una de las características que tiene un circuito cuántico. Los circuitos cuánticos, pese a ser reversibles, tienen un enfoque propio que no es exportable al resto de tecnologías, salvo en los casos más simples que no aportan ningún beneficio cuántico. El libro “Quantum Information and quantum computation” (Nielsen & Chuang, 2002) está considerado como “la biblia” de la computación cuántica y ofrece una introducción a los circuitos reversibles, pero es un reto demasiado alejado del temario y de los objetivos que se pretenden cubrir con la asignatura de “Tecnología Industrial II”. En cualquier caso, el estudio de la computación cuántica queda fuera del ámbito de este trabajo, aunque sí que nos interesaremos por algunas de sus herramientas, como se describe en la siguiente subsección.

### **3.3. Herramientas digitales para el estudio de circuitos reversibles**

Mientras que se considera interesante, si no fundamental, se aprovecha del estado del arte sobre metodologías y estrategias para la enseñanza de circuitos clásicos de cara a impartir los nuevos contenidos de circuitos reversibles, lamentablemente no ocurre lo mismo con el software sobre circuitos clásicos puesto que no es útil para el caso de los circuitos reversibles. En realidad, podría ser útil con limitaciones puesto que algunas puertas clásicas son reversibles, pero por motivos de identidad se prefiere evitar el uso de este

software, para que el alumno tenga la completa percepción de que está trabajando con un paradigma totalmente diferente. También se puede aludir a motivos prácticos, pues el número de puertas clásicas reversibles es muy limitado y el software clásico apenas serviría para repasar dichas puertas. Es por ello que en esta sección se estudian las diferentes herramientas que permiten trabajar con circuitos reversibles disponibles en la literatura.

### 3.3.1. QCADesigner

QCADesigner (Walus et al., 2004) es un simulador desarrollado en 2004 para diseñar y probar circuitos para la tecnología Quantum-dot cellular automata (QCA). QCA está considerada como el competidor reversible más serio a la tecnología CMOS, ya que permite construir circuitos equivalentes con un tamaño hasta 60% menor respecto a CMOS (Hariprasad & Ijjada, 2019). Como es de esperar al tratarse de una tecnología reversible, también aporta un consumo mucho menor. Es la tecnología más interesante incluida en la unidad didáctica para circuitos reversibles.

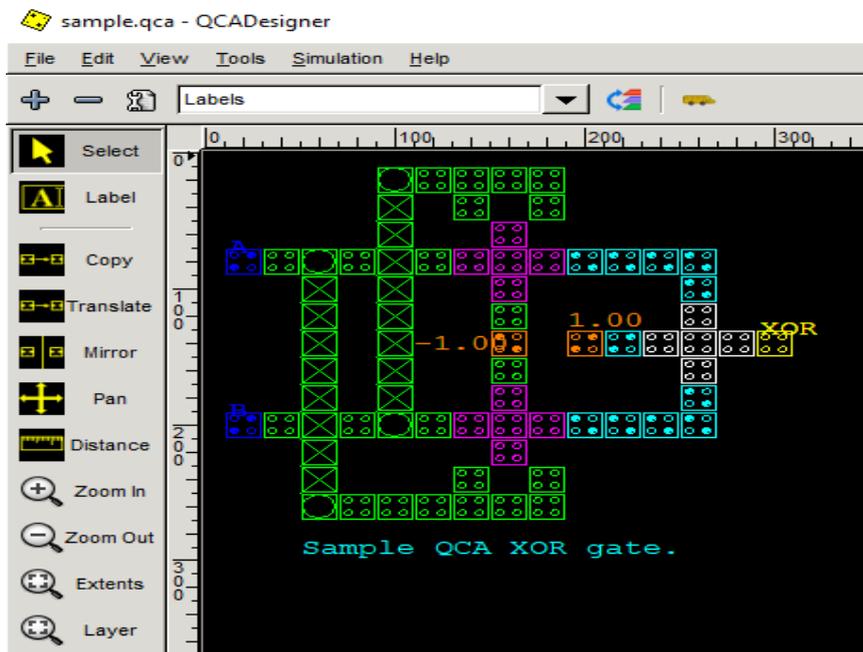


Figura 5: Simulador QCADesigner. Ejemplo de puerta XOR construida con tecnología QCA.

QCADesigner es un recurso gratuito disponible para plataformas Windows y fácil de utilizar, que ha sido utilizado ampliamente por investigadores, profesionales y educadores

en sus respectivos sectores, tal y como reflejan las más de 800 citas que tiene en Google Scholar. El principal problema de QCA Designer es que no ha recibido actualizaciones desde su versión 2.0 (año 2010-2011). No obstante, permite trabajar de forma óptima los contenidos que se quieren incluir en la unidad didáctica, por lo que consideramos que es una opción adecuada para ser utilizado con este fin.

Entre las opciones que incluye, destacan dos. En primer lugar, la posibilidad de crear circuitos propios que pueden ser utilizados como parte de circuitos mayores. Esta característica permite al docente construir las piezas más complicadas y darlas a sus estudiantes, preparando una pequeña biblioteca de puertas lógicas o circuitos que ellos puedan utilizar en sus comienzos, o que deberán analizar. Por ejemplo, en la Figura 5 se muestra la puerta XOR. Aunque dominar QCA es muy sencillo, es posible que el docente decida que algunos casos particulares, como la puerta XOR, sobrepasan la dificultad deseada. En ese caso, el docente puede darles un “elemento” que ya la implemente (este elemento contiene el circuito de la imagen) para que ellos se abstraigan de esta dificultad y se centren en comprender la teoría reversible en QCA. En segundo lugar, la herramienta permite obtener la tabla de verdad y las funciones de onda de los circuitos construidos, aportando esa funcionalidad de testeo de circuitos que tanto echábamos de menos en los programas analizados al comienzo de esta sección. En la Figura 6 se puede observar la función resultado del circuito anterior (amarillo) para los diferentes valores de las dos entradas (azules).

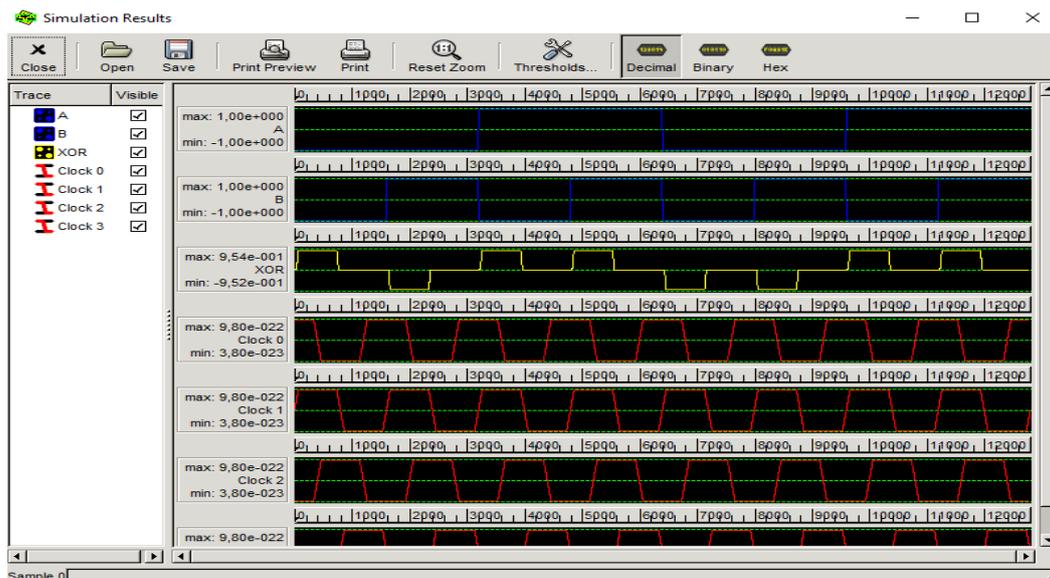


Figura 6: Simulador QCA Designer. Resultado de simular el circuito mostrado en la

Figura 5.

### 3.3.2. RevKit

RevKit (Soeken et al., 2012) es un simulador de circuitos reversibles orientado al mundo de la investigación. Lamentablemente, RevKit no dispone de una interfaz gráfica, sino que se debe ejecutar desde terminal y hacen falta conocimientos de programación (Python) para utilizarlo. Por ello, consideramos que no es un candidato aceptable para ser utilizado en la asignatura.

### 3.3.3. Testing Tool

Testing Tool es una herramienta para simulación de circuitos reversibles propuesta en (Nagamani et al., 2016). Posee una interfaz gráfica sencilla e intuitiva (véase Figura 7), compatibilidad con todas las puertas reversibles incluidas en la unidad didáctica, posibilidad de generar la tabla de verdad, y otras opciones interesantes. Sin embargo, Testing Tool está desarrollado en y para Matlab, por lo que es necesario tener licencia de Matlab (de pago) para poder utilizarlo. Para un centro que disponga de licencias de Matlab para sus estudiantes, podría ser una opción muy interesante para tener en cuenta. Sin embargo, y dado que existen otras alternativas, no recomendamos su uso en caso contrario al tener un coste excesivo para lo que aporta.

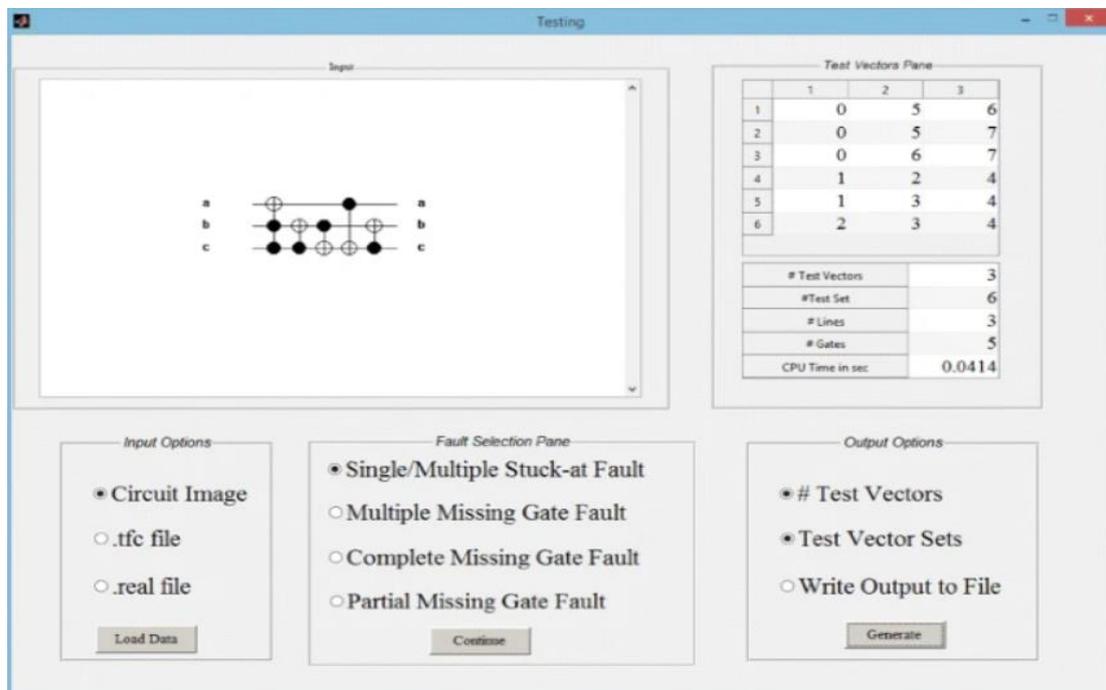


Figura 7. Testing Tool. Imagen obtenida de (Nagamani et al., 2016).

### 3.3.4. Quirk

Quirk (web disponible en la bibliografía) es un simulador de circuitos reversibles enfocado a la computación cuántica. Está disponible de forma online, aunque también se puede descargar (en formato html) para poderse utilizar sin conexión a internet. Es, por lo tanto, un recurso gratuito y de acceso sencillo. Dispone de una interfaz gráfica del tipo “arrastrar y soltar”, como se muestra en la Figura 8 y en la que podemos seleccionar cualquiera de las puertas disponibles y colocarla en la parte del circuito que queramos.

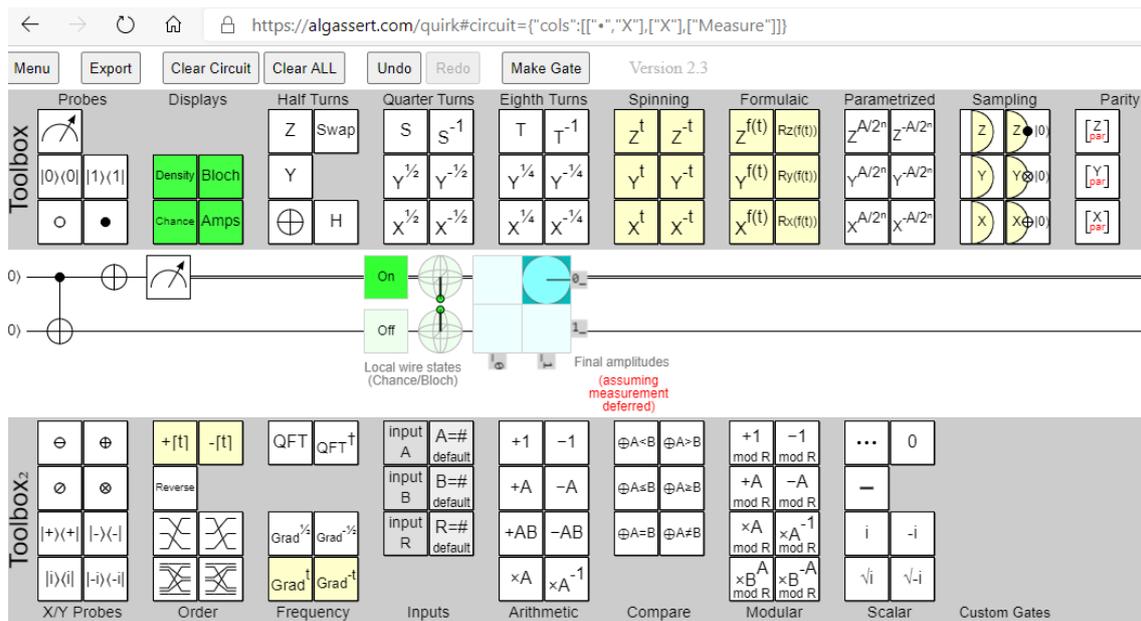


Figura 8. Simulador Quirk.

La principal desventaja de Quirk (para nuestro propósito) es que está enfocado a su uso en computación cuántica. Eso significa que trabaja con qubits, y que las medidas están enfocadas a reflejar los resultados probabilísticos propios de la computación cuántica. No obstante, ya que no tenemos intención de utilizar ninguna puerta que implique superposición, las características cuánticas se pueden simplificar y trabajar en modo binario trabajando siempre con las bases  $|0\rangle$  y  $|1\rangle$ . De esta forma, dichas bases se pueden interpretar como 0 y 1 binario, respectivamente, por lo que únicamente hay que instruir a los estudiantes para que ignoren la notación Dirac y las esferas de Bloch (utilizadas habitualmente para expresar el valor de un estado cuántico), y utilizar solamente los paneles de ON y OFF para interpretar los resultados.

Otra gran ventaja de Quirk es la alta personalización que tiene. El simulador ofrece un gran número de puertas reversibles, pero además permite construir nuevas puertas y subcircuitos, y guardarlos para utilizarlos en cualquier momento. De esta forma, cualquier

usuario/ a puede definir su propia librería de puertas y guardar una interfaz personalizada con estas puertas disponibles para su inmediato uso. Desde la perspectiva docente, sería muy sencillo para un docente definir una interfaz gráfica con las puertas reversibles que ha definido, de forma que sus estudiantes tengan exactamente las puertas disponibles. Incluso podrían definirse diversas versiones para sucesivas clases, de forma que, por ejemplo, en la primera clase los estudiantes solo tuviesen un conjunto concreto de puertas disponibles, y en la siguiente además tuvieran un módulo para realizar sumas ya implementado, e ir resolviendo los problemas indicados utilizando únicamente los recursos indicados.

### **3.3.5. Quest, ProjectQ**

Hay una gran cantidad de simuladores cuánticos que podrían utilizarse de forma similar al caso anterior. No obstante, están enfocados al ámbito investigador y, tal y como ocurre con RevKit, están disponibles en forma de librería para ser usado desde algún lenguaje de programación, por lo que tampoco tienen interfaz gráfica. Algunos como Quest (Jones et al., 2019) y ProjectQ (Steiger, Häner & Troyer, 2018) son altamente personalizables, pero ya que no disponen de interfaz gráfica y exigen un nivel importante de habilidades de programación, no los consideramos adecuados para nuestros propósitos.

### **3.3.6. IBM Quantum Experience**

La IBM Quantum Experience (web disponible en la bibliografía) es una plataforma que ofrece IBM para cualquier persona interesada en aprender computación cuántica. La plataforma es gratuita (exige, eso sí, registro), y contiene una gran cantidad de recursos formativos, simuladores cuánticos y, especialmente destacable, acceso a un conjunto de computadores cuánticos reales de unos pocos qubits.

Los simuladores y computadores cuánticos son programables desde Python mediante una librería ofrecida por IBM, pero además ofrecen una aplicación web (llamada “Compositor”, se muestra en la Figura 9) que permite construir circuitos cuánticos de forma gráfica como Quirk. En Julio de 2020 han habilitado la construcción de puertas y subcircuitos propios, por lo que (al igual que Quirk) permite un alto grado de personalización. Sin embargo, en este caso no es tan sencillo compartir una interfaz con otras personas. En el caso de Quirk, bastaba con compartir un código html; se puede

copiar un documento, o utilizar unos parámetros mediante la interfaz REST que ofrece. En este caso, como cada persona tiene su cuenta propia dentro de la plataforma, estas acciones no son posible, y es necesario copiar un código en Python. Si bien no es difícil copiar un código, no es comparable a la sencillez que ofrece Quirk. Otra desventaja es que los recursos son comunes a los usuarios y usuarias de todo el mundo, por lo que existe un sistema de colas para la ejecución de los circuitos que provoca un retraso en la obtención de los resultados de la ejecución de un circuito cuando la plataforma tiene a mucha gente trabajando en ella. Por lo demás, esta plataforma es más potente y completa que Quirk, pero ya que no se está interesado en las características cuánticas, para usarlo similar a Quirk, hay que “limitarlo” para solo utilizar puertas reversibles que no añadan comportamientos únicos de la computación cuántica. Toda la potencia de este recurso no es de utilidad para la actividad docente propuesta.

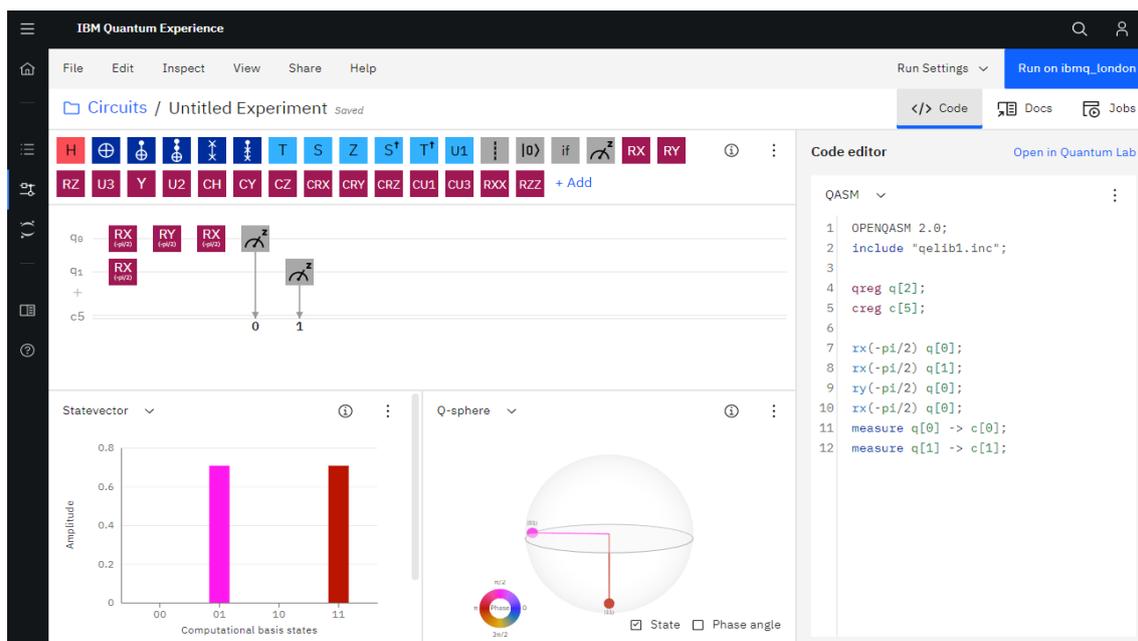


Figura 9. El compositor de circuitos de la IBM Quantum Experience.

No obstante, consideramos que la posibilidad de utilizar un ordenador cuántico real con lo aprendido sobre puertas reversibles puede ser tremendamente motivador para los estudiantes. En la Figura 10 se muestran las características de ibmq\_ourense, uno de los computadores cuánticos disponibles.

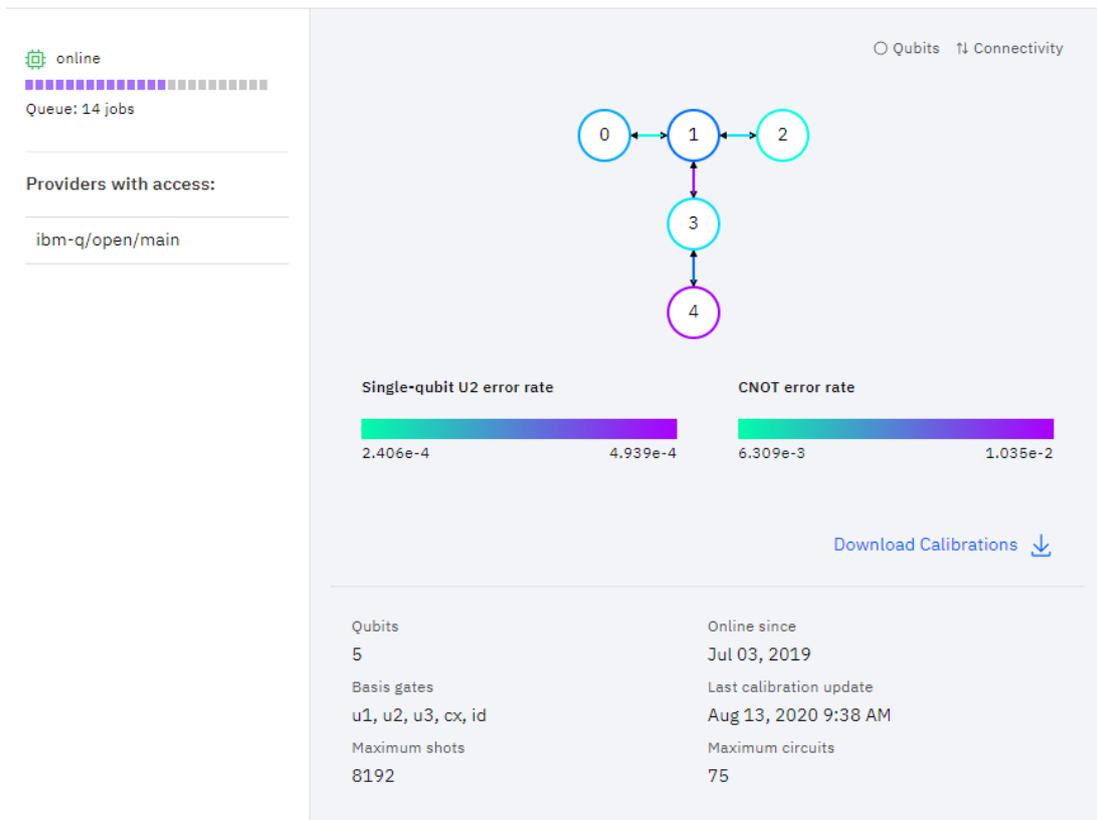


Figura 10. Ibmq\_ourense.

## Capítulo 4: Desarrollo de la propuesta

En base a toda la información recopilada y analizada en las secciones anteriores, la unidad didáctica desarrollada sigue el método de aprendizaje basado en problemas. Tanto docente como estudiantes son actores/ actrices fundamentales, cada uno con sus tiempos y protagonismo. El/La profesor/a instruirá a los estudiantes en unos conocimientos definidos, y posteriormente los estudiantes, de forma autónoma, trabajarán en la resolución de una serie de problemas de dificultad progresiva que les han sido indicados de antemano. De esta forma, se incorporan las propuestas metodológicas de Bello y de Becerra (Bello, 2013; Becerra, 2014). En relación con la propuesta de Becerra, además se incluyen nociones básicas de computación cuántica con el objetivo de introducir un elemento motivador para los estudiantes. Asimismo, se hace hincapié en relacionar el trabajo teórico con el práctico, para que los estudiantes aprendan convenientemente los contenidos como un todo, y no resuelvan los problemas como robots carentes de análisis crítico, tal y como defienden Bidarte et al. (Bidarte et al., 2014).

Por otro lado, la unidad didáctica relaciona los contenidos que ella introduce con los ya vistos en la asignatura de Tecnología Industrial II sobre circuitos y sistemas lógicos. Se asume, pues, que la unidad didáctica no debe impartirse antes de la relativa a dichos conocimientos sobre circuitos y sistemas lógicos, pues la presente propuesta utiliza esos conocimientos ya adquiridos como base para introducir los nuevos. El motivo es que se tiene en cuenta el trabajo de Parra et al. (Parra et al., 2014) que, tal y como se explicó en la sección anterior, concluía con que los estudiantes obtienen mejores resultados utilizando un modelo de aprendizaje activo que tenga en cuenta los conocimientos previos ya adquiridos relacionados con circuitos. Las ventajas de esta forma de trabajo son tres:

1. Se reduce para los estudiantes la carga de trabajo, puesto que el contenido a aprender ya ha sido parcialmente adquirido por ellos/as.
2. Se facilita a los estudiantes la adquisición de los nuevos contenidos, puesto que pueden relacionarlos con los que ya poseen.
3. Facilita la incorporación de los contenidos en la asignatura como un todo, y permite que los estudiantes no vean el contenido como un añadido extra independiente del resto de la asignatura y que tengan una sensación de continuidad a lo largo de toda ella.

Siguiendo la línea anterior, se procura que el protagonismo indicado para los estudiantes no se limite únicamente a la resolución de los problemas. Los estudiantes deberán exponer sus soluciones al grupo, explicando cómo han llegado a esos resultados, y atender a las dudas que les planteen sus compañeros y otras compañeras. También se propiciarán debates entre ellos/as y, en general, cualquier tipo de actividad que implique a los estudiantes aumentar su responsabilidad, habilidades comunicativas y sociales, y la confianza en sí mismos mediante un trabajo motivado y responsable, tal y cómo defendían Molinar et al. en su conclusión sobre la necesidad de utilizar alternativas a un modelo convencional docente que impliquen que los estudiantes participen en un proceso de aprendizaje significativo (Molinar, 2017).

Finalmente, y tanto a la vista de lo expuesto en la subsección sobre la problemática actual como de lo indicado en trabajos tales como (Narváez, 2019; Ramos et al., 2016; Rioja et al., 2017; Ortí, 2015) sobre las ventajas del uso de herramientas informáticas en el aprendizaje, se recurre al uso de algunas de las herramientas presentadas en la sección anterior. Concretamente, se apuesta por el uso de las siguientes herramientas:

- QCADesigner: este software es ideal para el aprendizaje inicial de circuitos reversibles dada su sencillez tanto para instalarlo como para utilizarlo. QCADesigner es utilizado ampliamente por la comunidad científica para realizar complicados diseños y circuitos avanzados, pero no por ello resulta menos apto para los circuitos más simples. QCADesigner es solamente válido para QCA, por lo que será utilizado para estudiar y trabajar con esta tecnología.
- Quirk: Quirk será el principal software para simulaciones en la unidad didáctica. Es sencillo de utilizar, aunque sus numerosas opciones y personalización podrían dificultar demasiado la experiencia a los estudiantes si el docente no actúa con cuidado. Su uso debe limitarse a circuitos sin características cuánticas, para la cual es tarea del docente modificarlo para bloquear dichas opciones y así ofrecer a sus estudiantes una herramienta que solamente disponga de las herramientas que se quieren impartir.
- IBM Quantum Experience: la plataforma cuántica de IBM ofrece acceso a computadores cuánticos reales, donde los estudiantes podrán probar, en las fases finales de la unidad, sus conocimientos sobre circuitos reversibles, además de realizar una breve pero motivadora introducción a la computación cuántica que,

de seguro, les supondrá un efecto revulsivo en su interés por la materia. Esta parte es puramente motivadora, y los contenidos sobre computación cuántica no son el foco de interés de la unidad más allá de su implicación con los circuitos reversibles.

A continuación, se desarrolla el contenido de la unidad en detalle. Para hacer más accesible su lectura, podemos distribuir el desarrollo de la unidad en 8 episodios claramente diferenciados:

- Introducción a las tecnologías reversibles
- QCA y Primeras puertas reversibles
- Puertas reversibles controladas
- Tablas de verdad en sistemas reversibles
- Bucles y fan-out en sistemas reversibles
- Resto de puertas reversibles
- Circuitos clásicos y circuitos reversibles
- Puertas reversibles en computación cuántica

En el Anexo I se adjunta la Unidad Didáctica terminada, detallando los objetivos, los contenidos, las actividades de enseñanza y aprendizaje, y la evaluación sugerida, como conclusión de todo lo expuesto en esta sección.

#### **4.1. Episodio 1: Introducción a las tecnologías reversibles**

En este primer episodio se introducen las puertas y sistemas reversibles y se justifica su aprendizaje, aludiendo a los mencionados motivos: las limitaciones de la tecnología actual, la necesidad de tomarse en serio el cambio climático y hacer un esfuerzo en aumentar el ahorro energético todo lo posible, y al emerger de la computación cuántica. No se requiere ningún tipo especial de material, aunque se recomienda mostrar a los estudiantes las herramientas que se van a utilizar durante la unidad.

Por lo demás, resultaría pretencioso por mi parte decirle a un docente con más experiencia que yo cómo tiene que realizar la introducción. En mi limitada experiencia, yo recomendaría dar una visión general de la industria respecto a este tipo de desarrollos, explicar cómo utilizar los simuladores asegurándose de que los estudiantes tengan la versión adecuada, y atender a las necesidades especiales que cualquiera de los estudiantes

pueda tener de cara a los contenidos que se van a impartir. Un test inicial, escrito u oral, enfocado a refrescar los conocimientos sobre circuitos, también podría ser útil.

#### 4.2. Episodio 2: QCA y Primeras puertas reversibles

En este episodio se explica en qué consiste la tecnología QCA, sus ventajas e inconvenientes, y cómo utilizar el simulador QCADesigner, comenzando por explicar su interfaz gráfica y cómo construir y utilizar las dos primeras puertas reversibles: la puerta NOT, cuyo funcionamiento ya conocerán gracias a lo aprendido anteriormente sobre circuitos y sistemas lógicos, y la puerta mayoritaria. El símbolo utilizado para representar ambas puertas puede verse en la Figura 11.

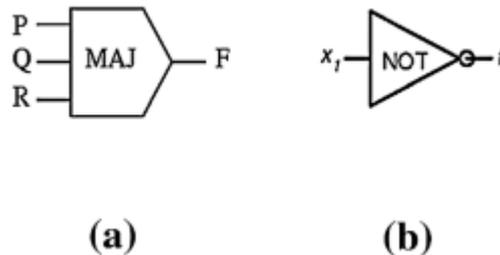


Figura 11. (a) Símbolo de la puerta Mayoritaria. (b) Símbolo de la puerta NOT.

Si bien la puerta NOT no necesita presentación, la puerta mayoritaria puede ser desafiante y es tarea del docente presentarla adecuada para facilitar su asimilación. Se recomienda presentarla como una alternativa reversible a las puertas clásicas AND y OR, de forma que manejando adecuadamente sus entradas P, Q y R (Figura 11(a)) podemos simular estas dos puertas:

- Estableciendo  $P = 0$ , podemos imitar el comportamiento de una puerta AND, de forma que F será igual a Q AND R.
- Estableciendo  $P = 1$ , podemos imitar el comportamiento de una puerta OR, de forma que F será igual a Q OR R.

Solo con estas dos puertas, los estudiantes ya serán capaces de resolver problemas que involucren la construcción de circuitos reversibles sencillos utilizando sus conocimientos sobre circuitos clásicos. No obstante, se recomienda que los primeros problemas sean aplicaciones casi directas de las puertas NOT y Mayoritaria para que los estudiantes se familiaricen con su uso y con el manejo del simulador. De forma adicional, se pueden

proponer ejercicios opcionales algo más complejos para aquellos estudiantes más avanzados, para que puedan tener un reto más adecuado y no se aburran con la simplicidad de esta parte.

### 4.3. Episodio 3: Puertas reversibles controladas

En este episodio se introducen las puertas reversibles controladas, su utilidad, su simbología, y cómo se utilizan para establecer condiciones en un circuito. Las puertas controladas serán un reto mayor para el docente, puesto que los estudiantes no han visto ninguna puerta usando este enfoque cuando estudiaron los circuitos y sistemas lógicos, aunque comprobarán que su funcionamiento es prácticamente idéntico a la clásica XOR. Se introducirán teóricamente las puertas reversibles como concepto, pero a efectos prácticos los esfuerzos se centrarán en la llamada puerta NOT-Controlada (CNOT), ver Figura 12b. En la Figura 12a se ha representado el símbolo habitual para una puerta NOT reversible. Se debe enseñar a los estudiantes a que a partir de este punto utilicen esta simbología para el caso de circuitos reversibles.

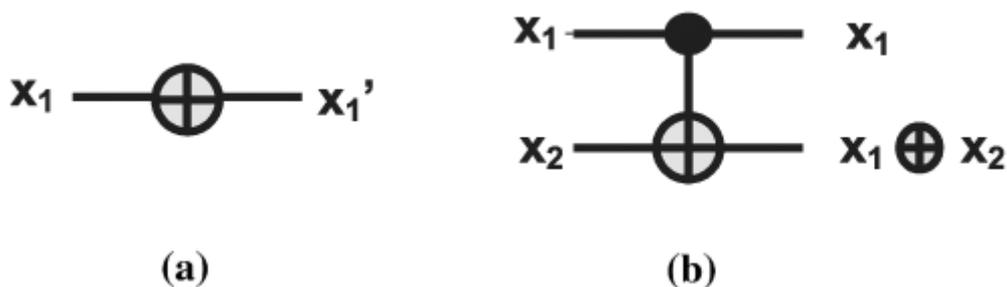


Figura 12. (a) Símbolo para representar a la puerta NOT reversible. (b) Símbolo de la puerta CNOT.

También en este episodio se comenzará a utilizar Quirk, utilizando una muy simplificada versión personalizada del simulador para evitar complicaciones innecesarias a los estudiantes. En la Figura 13 se puede ver la interfaz normal de Quirk, y en la Figura 14 la interfaz de la versión propuesta (personalizada a partir de Quirk) para este episodio. En esta versión propuesta sólo se dispone de la puerta NOT, la posibilidad de construir una CNOT mediante un bit de control (el punto negro en la imagen), así como las posibilidades de incluir nuevos cables con un valor inicial de 0 o 1 y la de poner medidores (displays) en cualquier punto del circuito para estudiar el valor en ese punto en tiempo

real. El valor inicial de un cable puede modificarse entre 0 y 1 haciendo clic en dicho valor.

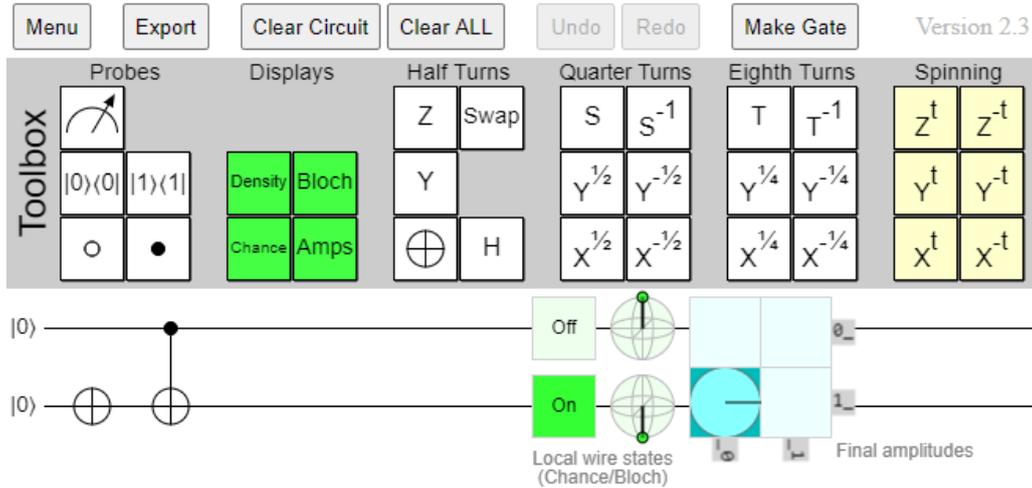


Figura 13. Interfaz normal de Quirk.

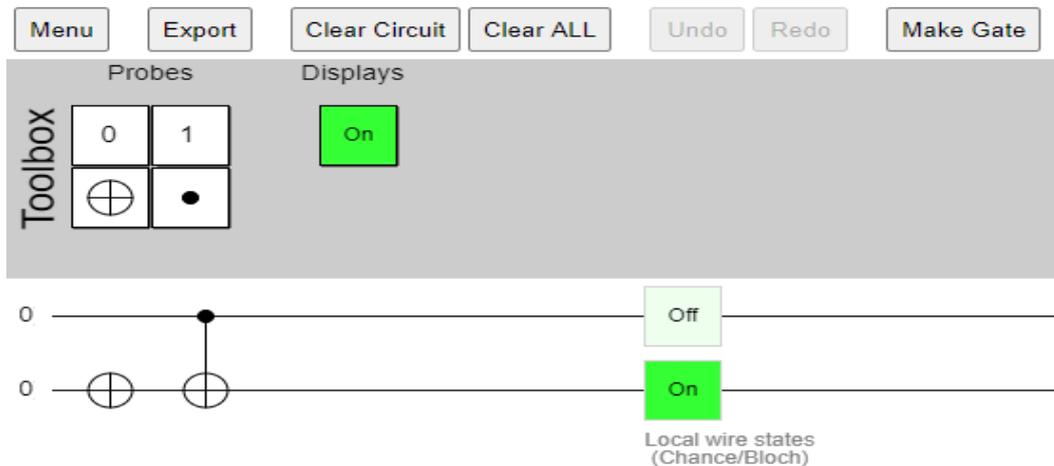


Figura 14. Quirk personalizado para este episodio.

#### 4.4. Episodio 4: Tablas de verdad en circuitos reversibles

En este cuarto episodio se explica cómo funcionan las tablas de verdad en los circuitos reversibles. El objetivo es comenzar a marcar diferencias entre circuitos reversibles y clásicos de forma práctica. Se mostrará mediante las tablas de verdad cómo los circuitos clásicos cuentan con las entradas estrictamente necesarias y con la salida o salidas deseadas. Por su parte, se mostrará en referencia a los circuitos reversibles:

- Siempre tienen el mismo número de entradas que de salidas.

- Necesitan entradas y salidas auxiliares para mantener la reversibilidad, puesto que a partir de una o varias salidas deben poderse siempre volver, de forma inequívoca, a la entrada o entradas que las han originado.

Un ejemplo muy ilustrativo es comparar la puerta CNOT con la XOR. Ambas puertas realizan la misma acción, pero la XOR implica tiene una salida menos (Figura 15). Esto supone que a partir de la salida no se puedan obtener las entradas. Por ejemplo, si la salida es 0, no se puede afirmar si  $x$  e  $y$  valían 0,0 o 1,1. Esto sí es posible en el caso de la CNOT.

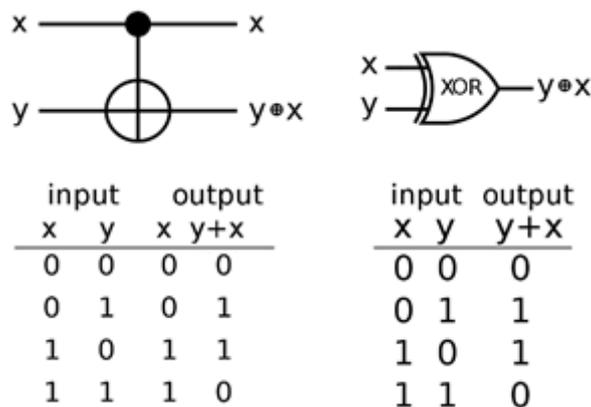


Figura 15. Comparación de las tablas de verdad de la puerta CNOT con la XOR clásica. Por supuesto, otro objetivo importante es la simple familiarización por parte de los estudiantes con la tarea de utilizar tablas de verdad cuando trabajen con circuitos reversibles. Deben ser capaces de obtener la tabla de verdad de un circuito reversible, obtener el circuito a partir de una tabla de verdad, y comprobar que un circuito hace lo que se supone que debe hacer recreando dicha tabla de verdad. Los problemas para resolver deben ir enfocados a estos objetivos.

#### 4.5. Episodio 5: Bucles y fan-out en sistemas reversibles

En el episodio 4 se aprovecha el trabajo con las tablas de verdad para comenzar a matizar las diferencias entre circuitos clásicos y circuitos reversibles. En el episodio 5 se continúa la explicación práctica sobre estas diferencias. En concreto, este episodio se centra en explicar por qué no es posible realizar bucles ni fan-out en circuitos reversibles. En este punto de la unidad aún no es necesario introducir qué alternativas reversibles existen para sortear estos obstáculos, sino que el foco debe estar en identificar y entender los problemas que tienen los circuitos reversibles. Más adelante se introducirá la metodología

adecuada para convertir un circuito clásico con bucles y fan-out a su homólogo reversible que implemente la misma función, también teniendo en cuenta que posiblemente requiera más entradas y salidas en base a lo explicado en el episodio 4.

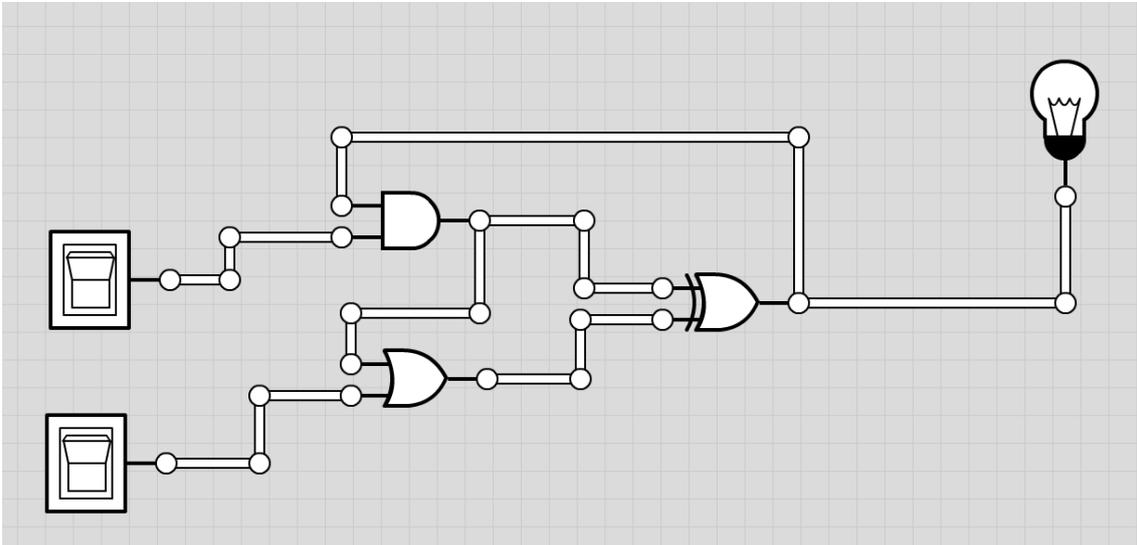


Figura 16: Ejemplo de circuito que presenta retroalimentación (bucle) y fan-out. Imagen obtenida de la web Stack Exchange Network (consultar URL en la bibliografía).

En la Figura 16 se representa un ejemplo de un ejercicio propuesto para que los estudiantes identifiquen qué partes del circuito presentan bucles o fan-out, y que expliquen motivadamente el por qué no sería posible su implementación directa mediante circuitos reversibles pese a que, en este momento de la unidad, saben implementar alternativas reversibles a las puertas AND, OR y XOR.

#### 4.6. Episodio 6: Resto de puertas reversibles

En este episodio se presentan las restantes puertas reversibles que se van a enseñar en la unidad didáctica, ver Figura 17:

- Toffoli.
- Peres.
- Swap.
- Fredkin.

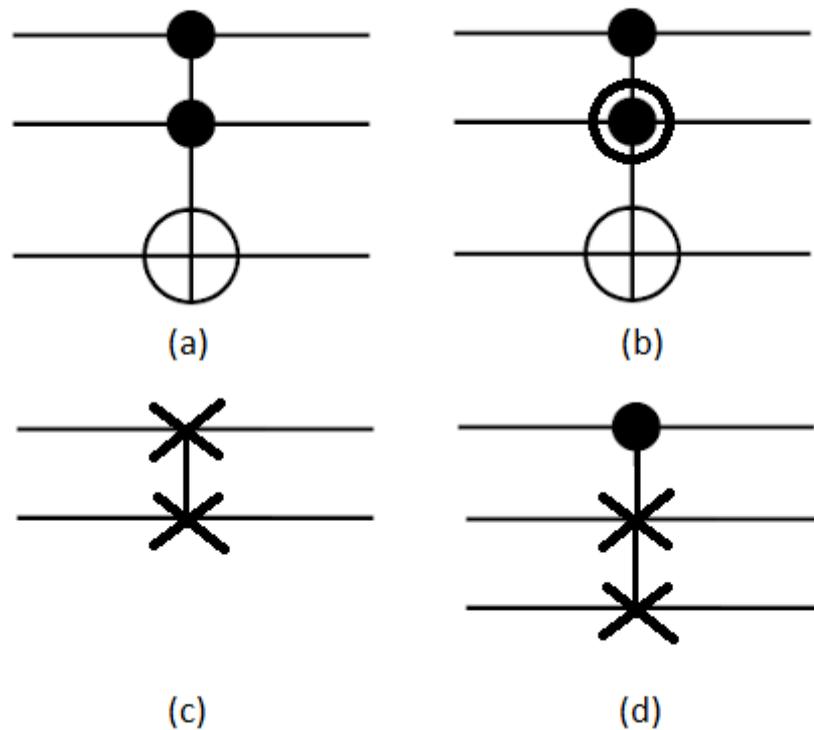


Figura 17. Símbolos de la puerta Toffoli, también llamada CCNOT (a), puerta Peres (b), puerta swap (c), y puerta Fredkin, también llamada Cswap (d).

De la misma forma que se hizo en el episodio 3, se recomienda presentar al docente presentar una interfaz personalizada de Quirk que disponga únicamente de los elementos que los estudiantes deben dominar. En este caso, el simulador debe tener disponible todas las puertas estudiadas en la unidad didáctica, la posibilidad de añadir los cables que sean necesarios, y la posibilidad de medir cualquier punto del circuito. A efectos prácticos, respecto a la interfaz construida en el episodio 3 esto supone únicamente añadir las puertas Peres, Swap y Mayoritaria (que no se puso inicialmente). Las puertas Toffoli y Fredkin se pueden construir usando bits de control a partir de las puertas NOT y Swap respectivamente. La interfaz resultante se muestra en la Figura 18, donde están todas las puertas disponibles. La puerta CNOT y la Toffoli se construyen estableciendo bits de control a partir de la puerta NOT. Por su parte, la puerta Fredkin se construye estableciendo un bit de control a la puerta swap.

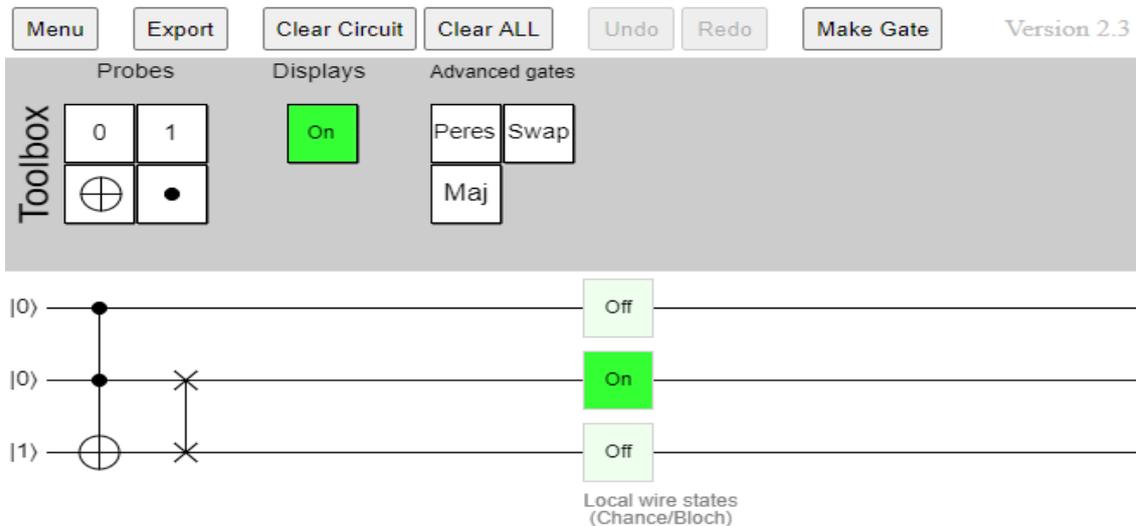


Figura 18. Interfaz de Quirk personalizada para este episodio.

#### 4.7. Episodio 7: Circuitos clásicos y circuitos reversibles

En los episodios 4 y 5 se estudiaban las diferencias fundamentales entre circuitos clásicos y circuitos reversibles, pero con el objetivo de simplificar su aprendizaje no se abordaba la metodología adecuada para construir un circuito reversible a partir de uno clásico. El episodio 7 pone su interés en dicha metodología, contando ya con todo el contenido teórico sobre puertas reversibles y la pequeña experiencia que habrán adquirido los estudiantes en esta unidad didáctica. Se debe enseñar cómo conseguir equivalencias entre ambos tipos de circuitos, siempre teniendo en cuenta las características propias de cada tipo. Este episodio debe ser eminentemente práctico, apostando por una resolución reflexiva de los problemas planteados. Como en el resto de los episodios, los estudiantes deberán exponer y motivar sus resultados y conclusiones, evitando que la mencionada resolución se haga de forma mecánica. En la Figura 19 se muestra un ejemplo sencillo.

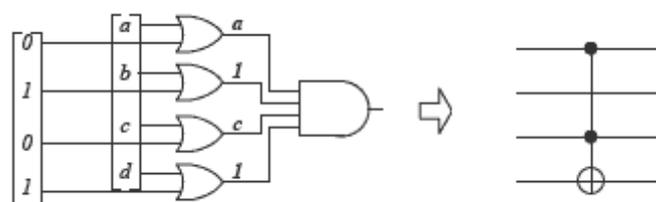


Figura 19. Ejemplo de circuito reversible equivalente a uno clásico. Circuito obtenido de (Duarte-Sánchez & Velasco-Media, 2014).

## 4.8. Episodio 8: Puertas reversibles en computación cuántica

El último episodio tiene un carácter eminentemente motivador. Los estudiantes podrán probar sus conocimientos aprendidos sobre puertas reversibles a lo largo de esta unidad didáctica en un computador cuántico real. Al margen de que los estudiantes puedan probar sus circuitos realizados en el resto de los episodios, se recomienda que el/ la docente muestre algunos circuitos eminentemente cuánticos a sus estudiantes, sin mayor objetivo que el de motivarles y despertar su interés por la materia. La propia plataforma de IBM ya contiene algunos circuitos hechos para ilustrar conceptos tan fascinantes como los que se enumeran a continuación, que se seguro entusiasmarán a los estudiantes:

- Teleportación cuántica.
- Entrelazamiento cuántico.
- Algoritmo de Shor (utilizado para romper claves criptográficas en un tiempo imposible de concebir para los ordenadores actuales más potentes).
- Paralelismo cuántico.
- Algoritmo de Grover (permite encontrar elementos en una base de datos de forma más eficiente que los algoritmos convencionales de búsqueda... si se cumplen ciertas condiciones).

En la Figura 20 puede observarse un circuito cuántico construido con puertas reversibles perfectamente reconocibles para los estudiantes.

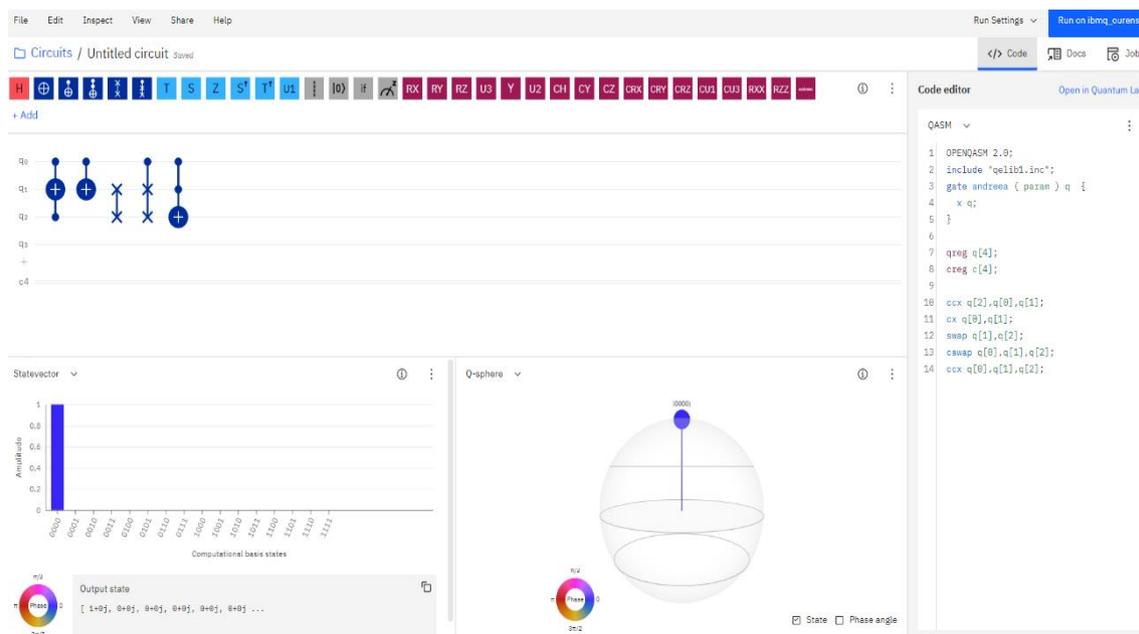


Figura 20. Interfaz de programación del computador cuántico ibmq\_ourense.



## Capítulo 5: Conclusiones

En este trabajo se ha desarrollado una unidad didáctica sobre circuitos y sistemas reversibles para la asignatura de Tecnología Industrial II, impartida en 2º de Bachillerato enmarcado en un análisis crítico y propuesta fundamentada sobre temas de interés que pueden presentarse como relevantes para el plan de mejora en los centros educativos.

En primer lugar, se ha motivado la necesidad de impartir estos conocimientos y la elección de hacerlo en la asignatura y curso mencionados. En segundo lugar, se ha realizado una revisión del estado del arte sobre educación de circuitos y herramientas disponibles para elegir la forma adecuada de impartir estos contenidos. En tercer lugar, se han explicado los contenidos que se consideran adecuados para cubrir las necesidades básicas sobre la materia estudiada. Finalmente, se ha aportado la unidad didáctica completa y funcional, con todos los apartados habitualmente requeridos. Como complemento, se ha personalizado una herramienta a partir de un simulador cuántico - Quirk- que cubre todas las necesidades de la unidad. También se incluye un anexo motivando la necesidad de una educación inclusiva y cómo se ha tenido en cuenta a la hora de diseñar la unidad.

Al tratarse de un Trabajo Fin de Máster, que si tiene la adecuada aceptación por parte del Tribunal evaluador me habilitará para el ejercicio de la enseñanza en la Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato, Formación Profesional y Escuelas oficiales de Idiomas, se hace obligatorio hacer una reflexión sobre mi papel en este trabajo. Algo que he observado y aprendido con este trabajo es la importancia del trabajo colaborativo. No entre estudiantes, sino entre docentes. En lugar de realizar una propuesta aislada, en este trabajo he hecho un estudio del estado del arte sobre una disciplina concreta. De esta forma, me he podido beneficiar de los valiosos conocimientos que otras personas han descubiertos, accediendo a experiencias y realidades que de otra forma me habrían sido totalmente desconocidas. Lo que es innegable que al construirse sobre aprendizajes y conclusiones que otras personas han demostrado útiles, su valor es mayor de lo que sería en caso de haber partido únicamente de mis experiencias personales. No sólo porque me orienta sino porque me enriquece las perspectivas en mi labor como docente.

Continuando con esta reflexión, este trabajo también me ha aportado los conocimientos necesarios para realizar mi propio material didáctico de una forma crítica, seria y contrastada con la comunidad. Me ha enseñado a construir mentalmente un modelo

adecuado para elaborar unidades didácticas y, en general, para abordar la educación de un tema concreto mediante el estudio de unas necesidades prácticas y reales, de lo que otras personas han realizado antes que yo para aprovechar su trabajo, conocimiento y experiencias, y para unir todo ello en una herramienta didáctica.

El hecho en sí de estar reflexionando sobre esta mejora personal ya es una mejora en sí misma: este trabajo me ha hecho y me está haciendo pensar sobre mi práctica docente. Algo que, debo reconocer, pocas veces he hecho. Me ha servido para darme cuenta de las fortalezas que tengo como docente, y también de mis puntos débiles. Como punto débil señalaría que antes no tenía en cuenta el trabajo de otros y otras, sino que me basaba en mi experiencia personal como Ingeniero y en conocimientos adquiridos de clases y libros, pero no de “experiencias reales” de otras personas. Como punto fuerte, señalaría que siempre tengo presente la necesidad de motivar al estudiantado y que no me limito a realizar contenido educativo, sino que tengo especial cuidado en hacerlo dinámico, asequible, motivante para los estudiantes y plantearme sus necesidades en competencias y habilidades presentes y futuras.

Finalmente, este trabajo me ha permitido hacer algo muy importante para mí. Me ha permitido sistematizar una idea de la que yo estaba especialmente convencido desde hace tiempo: la necesidad de incorporar el aprendizaje sobre puertas reversibles en la educación de tecnología. Si bien es cierto que mis ideas iniciales eran ambiguas y no tenían la profundidad que tienen ahora, con este trabajo he encontrado una forma interesante de llevarlo a cabo, utilizando estrategias y metodologías de reconocido éxito, así como buscando y encontrando el punto adecuado para el comienzo de esta enseñanza. He tratado de utilizar todo lo aprendido en el máster para mejorar la calidad de la unidad, desde toda la parte burocrática, la necesidad de motivar a los estudiantes, todas las técnicas sobre creación de unidades didácticas, las metodologías pedagógicas estudiadas en clase, la importancia del trabajo colaborativo, etc. Si me tengo que quedar con un conocimiento en concreto al que he procurado dar especial importancia, diría que a que los estudiantes no se limiten a memorizar contenidos, sino a construir conocimiento.

## Bibliografía

- Alexeev, Y., Bacon, D., Brown, K. R., Calderbank, R., Carr, L. D., Chong, F. T., et al. (2019). Quantum computer systems for scientific discovery. arXiv preprint arXiv:1912.07577.
- Almaraz, A. (2002). Tecnología Industrial II (Bachillerato). Editorial Donostiarra.
- Becerra Rodríguez, D. F. (2014). Estrategia de aprendizaje basado en problemas para aprender circuitos eléctricos. *Innovación educativa (México, DF)*, 14(64), 73-99.
- Bekeschus, S., Favia, P., Robert, E., von Woedtke, T. (2019). White paper on plasma for medicine and hygiene: Future in plasma health sciences. *Plasma Processes and Polymers*, 16(1), 1800033.
- Bello, A. G. (2013, September). Aplicación de criterios pedagógicos y estrategias didácticas para la aprehensión significativa de los conceptos de la asignatura de circuitos eléctricos I. In WEEF 2013 Cartagena.
- Bidarte, U., Lázaro, J., Cuadrado, C., Jiménez, J. (2014). Luces y sombras en las metodologías activas para aprender Electrónica digital.
- Bran, F., Bodislav, D. A., Mitriță, M. A. (2020). The Age of Automatization and the Evolution of Globalization. In SHS Web of Conferences (Vol. 74, p. 02002). EDP Sciences.
- Broc Cavero, M. Á. (2006). Motivación y rendimiento académico en alumnos de Educación Secundaria Obligatoria y Bachillerato LOGSE. *Revista de educación*.
- Cain, S. (2020). El poder de los introvertidos. RBA Libros.
- Córdova Toro, L. A. (2017). Elaboración de prácticas de aprendizaje de programación con software libre aplicado a la plataforma Raspberry Pi 3, orientado a estudiantes de bachillerato.
- Digital, recurso interactivo. <https://github.com/hneemann/Digital>.
- Duarte-Sánchez, J. E., Velasco-Media, J. (2014). Emulación en hardware de circuitos cuánticos basados en compuertas Toffoli. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (71), 25-36.
- Economou, S. E., Rudolph, T., Barnes, E. (2020). Teaching quantum information science to high-school and early undergraduate students. arXiv preprint arXiv:2005.07874.
- Floyd, T. (1997). Fundamentos de sistemas digitales. Prentice Hall.

- Garg, S., Gupta, T. K. (2018). Low power domino logic circuits in deep-submicron technology using CMOS. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(4), 625-638.
- Gómez, A. (2018). *Tecnología Industrial II (Bachillerato)*. Editorial Donostiarra.
- Hariprasad, A., Ijjada, S.R. Quantum-Dot Cellular Automata Technology for High-Speed High-Data-Rate Networks. *Circuits Syst Signal Process* 38, 5236–5252 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00034-019-01119-9>.
- Harris, S., Harris, D. (2015). *Digital design and computer architecture: ARM edition*. Morgan Kaufmann.
- Hughes, C., Isaacson, J., Perry, A., Sun, R., Turner, J. (2020). Teaching Quantum Computing to High School Students. arXiv preprint arXiv:2004.07206.
- Ibáñez, J., Val, S., González, J. A. (2017). *Tecnología Industrial 2º Bachillerato*, 5ª edición. McGraw-Hill Interamericana de España.
- IBM Quantum Experience, recurso interactivo. <https://quantum-computing.ibm.com/>.
- Jones, T., Brown, A., Bush, I., Benjamin, S. C. (2019). Quest and high performance simulation of quantum computers. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.
- Li, H., Tie, J., Li, J., Ye, M., Zhang, H., Zhang, X., et al. (2018). High-performance sub-10-nm monolayer black phosphorene tunneling transistors. *Nano Research*, 11(5), 2658-2668.
- Liu, G., Zheng, L., Wang, G., Shen, Y., Liang, Y. (2019). A carry lookahead adder based on hybrid CMOS-memristor logic circuit. *IEEE Access*, 7, 43691-43696.
- Logisim, recurso interactivo. <http://www.cburch.com/logisim/>.
- Mikhailiuk, A., Dahnoun, N. (2016, October). Real-time pothole detection on TMS320C6678 DSP. In *2016 IEEE International Conference on Imaging Systems and Techniques (IST)* (pp. 123-128). IEEE.
- Molinar, R. I. H., Salas, J. A. Á., Guerrero, M. A. G. (2017). Implementación de estrategias didácticas basadas en aprendizaje significativo en un curso de circuitos eléctricos. *Anfei Digital*, (6).
- Nagamani, A. N., Ashwin, S., Abhishek, B., Agrawal, V. K. (2016). An exact approach for complete test set generation of Toffoli-Fredkin-Peres based reversible circuits. *Journal of Electronic Testing*, 32(2), 175-196.

- Narváez Navarro, P. V. (2019). Uso de material didáctico en el estudio de circuitos eléctricos en los estudiantes de primer año de bachillerato general unificado del Colegio Universitario “UTN”, periodo académico 2018-2019 (Bachelor's thesis).
- Naseri, H., Timarchi, S. (2018). Low-power and fast full adder by exploring new XOR and XNOR gates. IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems, 26(8), 1481-1493.
- Nielsen, M. A., Chuang, I. (2002). Quantum computation and quantum information. Cambridge.
- Orden de 14 de julio de 2016, por la que se desarrolla el currículo correspondiente al Bachillerato en la Comunidad Autónoma de Andalucía, se regulan determinados aspectos de la atención a la diversidad y se establece la ordenación de la evaluación del proceso de aprendizaje del alumnado.
- Orden de 14 de julio de 2016, por la que se desarrolla el currículo correspondiente a la Educación Secundaria Obligatoria en la Comunidad Autónoma de Andalucía, se regulan determinados aspectos de la atención a la diversidad y se establece la ordenación de la evaluación del proceso de aprendizaje del alumnado.
- Ortí Amela, M. (2015). Diseño de mobiliario escolar mediante el aprendizaje basado en proyectos programación trimestral para la materia de tecnología industrial para 1º Bachillerato.
- Parra, L. F, Duarte, J. E., Fernández, F. H. (2014). Propuesta didáctica para la enseñanza de circuitos eléctricos básicos. Rev. investig. desarro. innov. 4(2), 138-147.
- Programación didáctica de Tecnología Industrial II del instituto IES Bahía de Almería, de Almería. <http://www.iesbahiadealmeria.com/images/documentos/DTecnologia/covid19%20tecno/PROGR.%20BACHILL.%20COVID19%201%20Y%202%20CURSO.pdf>.
- Programación didáctica de Tecnología Industrial II del instituto IES Guadalín, de Málaga. [http://www.guadalupe.es/images/stories/JefaturaEstudios/Programaciones\\_2017\\_2018/Tecnologia/Programacion\\_Tec\\_Ind\\_II.pdf](http://www.guadalupe.es/images/stories/JefaturaEstudios/Programaciones_2017_2018/Tecnologia/Programacion_Tec_Ind_II.pdf).
- Programación didáctica de Tecnología Industrial II del instituto IES Salvador Rueda, de Málaga. <http://www.iessalvadorrueda.es/app/download/31094813/6.+PROG+2%20C2%BABACH+TEC+IND+2019-2020.pdf>.

- Ramos, L. V. C., Artunduaga, K. J., Suarez, Y. A., Peña, J. A. M. (2016). Experiencia de aula: modelo del funcionamiento del corazón. Herramienta didáctica del aprendizaje de circuitos eléctricos. *Amazonia Investiga*, 5(8), 41-50.
- Rauchenecker, A., Ostermann, T., Wille, R. (2017, June). Exploiting reversible logic design for implementing adiabatic circuits. In 2017 MIXDES-24th International Conference "Mixed Design of Integrated Circuits and Systems (pp. 264-270). IEEE.
- Real Decreto 1105/2014, de 26 de diciembre, por el que se establece el currículo básico de la Educación Secundaria Obligatoria y del Bachillerato.
- Rioja, J. C. D., Besora, D. B., Vizern, M. S. (2017). Experiencia de gamificación en Secundaria en el Aprendizaje de Sistemas Digitales. *Education in the Knowledge Society*, 18(2), 85-105.
- Sangeetha, A., Chandrasekaran, M., Kavithaa, G. (2020). Time situate recurrence estimation technique for efficient data collection in war field sensor network. *Microprocessors and Microsystems*, 73, 102988.
- Simulador cuántico Quirk, recurso interactivo. <https://algassert.com/quirk>.
- Singh, S., Choudhary, A., Jain, M. K. (2019). A Brief Overview of Reversible Logic gate and Reversible Circuits. *International journal of Electronics Engineering*, 11(2), 86-104.
- Soeken, M., Frehse, S., Wille, R., Drechsler, R. (2012). RevKit: A Toolkit for Reversible Circuit Design. *J. Multiple Valued Log. Soft Comput.*, 18(1), 55-65.
- Stack Exchange Network, recurso interactivo. <https://math.stackexchange.com/questions/1940302/representing-digital-logic-loops>.
- Steiger, D. S., Häner, T., Troyer, M. (2018). ProjectQ: an open source software framework for quantum computing. *Quantum*, 2, 49.
- Walus, K., Dysart, T. J., Jullien, G. A., Budiman, R. A., "QCADesigner: a rapid design and Simulation tool for quantum-dot cellular automata," in *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 3, no. 1, pp. 26-31, March 2004, doi: 10.1109/TNANO.2003.820815.
- Zilic, Z., Radecka, K., Kazamiphur, A. (2007, April). Reversible circuit technology mapping from non-reversible specifications. In 2007 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (pp. 1-6). IEEE.

## Anexo I: Unidad didáctica: Circuitos y sistemas Reversibles

### 1. Objetivos

#### a) Objetivos específicos

En concordancia a los objetivos establecidos para la asignatura “Tecnología Industrial II” en la Orden de 14 de julio de 2016, se establecen como objetivos específicos de esta unidad los siguientes:

1. Adquirir los conocimientos necesarios y emplear éstos y los adquiridos en sistemas lógicos clásicos para la comprensión y análisis de sistemas reversibles.
2. Analizar y resolver problemas planteados utilizando sistemas reversibles, implementando soluciones a los mismos.
3. Analizar de forma sistemática circuitos reversibles para explicar su funcionamiento y evaluar su calidad en comparación a otros circuitos similares.
4. Transmitir con precisión conocimientos e ideas sobre procesamiento reversible de la información de forma oral y escrita, utilizando vocabulario, símbolos y formas de expresión apropiadas.
5. Conocer y manejar aplicaciones informáticas para programar y simular circuitos y sistemas reversibles.
6. Valorar la importancia de la eficiencia energética para contribuir a la construcción de un mundo sostenible.
7. Comprender los factores económicos, sociales y medioambientales que afectan tanto a los circuitos y sistemas lógicos clásicos como a los reversibles.

#### b) Estándares de aprendizaje

Los estándares de aprendizaje del bloque 4: “Circuitos y sistemas lógicos” con los que está relacionada la presente unidad didáctica son:

- 1.1.** Realiza tablas de verdad de sistemas combinatoriales identificando las condiciones de entrada y su relación con las salidas solicitadas.

**1.4.** Diseña circuitos combinacionales con puertas reversibles a partir de especificaciones concretas, aplicando técnicas de simplificación de funciones y proponiendo el posible esquema del circuito.

**1.5.** Diseña circuitos combinacionales reversibles con bloques integrados partiendo de especificaciones concretas y proponiendo el posible esquema del circuito.

**2.3.** Analiza el funcionamiento de circuitos secuenciales típicos realizando gráficas de las señales que proporcionan a partir de simuladores.

Por otro lado, también está relacionada con los siguientes estándares de aprendizaje del bloque 5: “Control y programación de sistemas automáticos”:

**1.1.** Obtiene señales de circuitos secuenciales típicos utilizando software de simulación.

**1.2.** Dibuja cronogramas de circuitos secuenciales partiendo de los esquemas de los mismos y de las características de los elementos que lo componen.

**2.2.** Utiliza programas de simulación para comprobar el funcionamiento de circuitos secuenciales que resuelvan problemas de automatización.

#### c) Objetivos generales

Los objetivos generales de la etapa con los que se relaciona la unidad didáctica son los siguientes:

- c) Fomentar la igualdad efectiva de derechos y oportunidades entre hombres y mujeres, analizar y valorar críticamente las desigualdades existentes e impulsar la igualdad real y la no discriminación de las personas con discapacidad.
- d) Afianzar los hábitos de lectura, estudio y disciplina, como condiciones necesarias para el eficaz aprovechamiento del aprendizaje, y como medio de desarrollo personal.
- e) Dominar, tanto en su expresión oral como escrita, la lengua castellana y, en su caso, la lengua cooficial de su comunidad autónoma.

- g) Utilizar con solvencia y responsabilidad las tecnologías de la información y la comunicación.
- h) Conocer y valorar críticamente las realidades del mundo contemporáneo, sus antecedentes históricos y los principales factores de su evolución. Participar de forma solidaria en el desarrollo y la mejora de su entorno social.
- i) Acceder a los conocimientos científicos y tecnológicos fundamentales y dominar las habilidades básicas propias de la modalidad elegida.
- j) Comprender los elementos y los procedimientos fundamentales de la investigación y de los métodos científicos. Conocer y valorar de forma crítica la contribución de la ciencia y la tecnología en el cambio de las condiciones de vida, así como afianzar la sensibilidad y el respeto hacia el medio ambiente.
- k) Afianzar el espíritu emprendedor con actitudes de creatividad, flexibilidad, iniciativa, trabajo en equipo, confianza en uno mismo y sentido crítico.

#### d) Competencias claves

Los objetivos de la etapa y la relación que existe con las competencias clave:

- Competencia de sentido de iniciativa y espíritu emprendedor. (SIEP)
- Competencia digital. (CD)
- Competencia en comunicación lingüística. (CCL)
- Competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología. (CMCT)
- Competencia para aprender a aprender. (CAA)
- Competencia social y ciudadana. (CSC)
- Conciencia y expresiones culturales. (CEC)

## 2. Contenidos

Se desglosan los contenidos de la unidad en conceptuales, procedimentales y actitudinales:

#### a) Contenidos conceptuales

- Tecnologías reversibles y no reversibles.
- Sistemas reversibles

- Reversibilidad física. Conservación de la energía.
  - Reversibilidad lógica.
  - Fundamentos matemáticos de la reversibilidad.
  - Computación cuántica.
  - Puertas reversibles
    - NOT.
    - Controlled-NOT (CNOT).
    - Toffoli.
    - Peres.
    - Swap.
    - Fredkin.
    - Mayoritaria.
  - Herramientas para implementar circuitos reversibles.
- b) Contenidos procedimentales
- Implementar y simular circuitos reversibles sencillos que utilicen las diferentes puertas reversibles, comprendiendo que no se pueden utilizar:
    - Bucles.
    - Fan-out (sacar, de una única conexión, varias simultáneamente; o unir varias conexiones en una sola).
  - Comprender las diferencias entre un circuito reversible y uno clásico.
  - Diseñar una tabla de verdad para una función reversible y construir el circuito adecuado para llevarla a cabo.
  - Probar y depurar circuitos reversibles mediante un simulador gráfico.
  - Crear circuitos cuánticos sencillos en un computador cuántico real.
- c) Contenidos actitudinales
- Planificación metódica de las tareas a implementar para el desarrollo de un sistema reversible.
  - Buena predisposición ante la cuestión medioambiental y el ahorro energético.
  - Autonomía en la búsqueda de información y de soluciones.
  - Iniciativa aportando ideas y llevándolas a cabo.
  - Respeto a los demás, a la comunicación y al trabajo en grupo.

- Creatividad en el diseño e implementación de los circuitos.
- Valoración de la fase de análisis y diseño de los circuitos.

### 3. Actividades de enseñanza y aprendizaje

Se indican a continuación las actividades de enseñanza y aprendizaje propuestas para la presente unidad didáctica. Para cada actividad expuesta se especifica la siguiente información:

- Qué es lo que se va a hacer.
- Los objetivos específicos con los que está relacionada.
- El tiempo recomendado<sup>1</sup> para realizar la actividad.
- Si la actividad la desarrolla el profesor (P), o el/la alumno/a (A).
- Cómo se va a realizar la actividad.
- Recursos disponibles para realizar la actividad.

---

<sup>1</sup> Tal y como se especifica en la sección “Objetivos” del TFM, el tiempo no es el objetivo de este trabajo, sino que se recomienda una valoración temporal a nivel de asignatura que permita incorporar el estudio de estos contenidos, pero sin restar valor al resto de contenidos actuales de la asignatura. Los tiempos aquí indicados son solo orientativos, por favor consulte dicha sección para más información.

UNIDAD DIDÁCTICA 5: ESTRUCTURAS DE CONTROL						Duración: 14 horas	
ACTIVIDAD				METODOLOGÍA		RECURSOS	
QUÉ voy a hacer	Objetivos implicados	Tiempo	QUIÉ N		CÓMO se va a hacer	PARA QUÉ se va a hacer	CON QUÉ se va a hacer
			P	A			
Presentación de la unidad didáctica.		15 minutos	X		El profesor presentará los objetivos y contenidos de la unidad didáctica.	Para que los alumnos conozcan de qué va a tratar la unidad didáctica y motivarles al respecto.	Apuntes.
Evaluación inicial de los conocimientos en relación con la unidad didáctica		15 minutos	X	X	El profesor propondrá varias cuestiones a los alumnos que podrán responder de manera oral para conocer sus conocimientos previos en relación con la unidad didáctica, especialmente en relación con las puertas lógicas clásicas.	Para que el profesor pueda conocer cuál es el punto de partida del alumnado y pueda adaptar los objetivos y contenidos en caso de que se considere necesario.	Preguntas preparadas de antemano por el profesor.
Exposición relativa a la necesidad de	1, 2, 5, 6, 7	30 minutos	X		El profesor transmitirá al alumnado las ventajas de utilizar este tipo de circuitos, dando especial importancia	Para que los alumnos se concienten de la importancia de un consumo	Apuntes, proyector,

utilizar sistemas reversibles					al ahorro energético y al emerger de la computación cuántica.	energético responsable, así como de la creciente importancia de la computación cuántica.	QCADesigner, Qiskit, Quirk.
Introducción a la tecnología QCA como alternativa ecológica a la tecnología CMOS	1, 2, 5, 6, 7	30 minutos	X		Explicación de la tecnología QCA para la implementación de circuitos reversibles energéticamente eficientes.	Para que los alumnos aprendan la diferencia entre una tecnología y otra, entendiendo que QCA es una alternativa existente y funcional que apuesta por la reducción del consumo energético.	Apuntes, proyector, QCADesigner.
Exposición del uso y sintaxis de las puertas reversibles NOT y Mayoritaria utilizando QCADesigner.	1, 2, 5	30 minutos	X		Explicación de las dos primeras puertas reversibles, NOT y Mayoritaria, a través del simulador QCADesigner. Se explicarán varios ejemplos sencillos en los que el profesor implementará algunas funciones triviales mediante estas puertas en dicho simulador.	Para que los alumnos aprendan el funcionamiento de estas dos puertas reversibles básicas, la NOT y la Mayoritaria, así como el funcionamiento del simulador de circuitos	Apuntes, proyector, QCADesigner.

						QCADesigner para simular circuitos utilizando tecnología QCA.	
Realización de varios circuitos en los que se usen una o varias puertas reversibles.	1, 2, 4, 5	30 minutos		X	Se proporciona por medio de los apuntes los enunciados a partir de los cuales los alumnos/as crearán los circuitos reversibles con la ayuda del simulador QCADesigner, con el apoyo del profesor, si es necesario. Al final, el profesor solucionará los ejercicios con ayuda del proyector.	Para que los alumnos aprendan cómo usar las puertas NOT y mayoritaria, así como el uso del simulador de circuitos QCADesigner para simular circuitos utilizando tecnología QCA.	Apuntes, proyector, QCADesigner, Moodle.
Exposición del uso y sintaxis de la puerta CNOT como ejemplo de puerta controlada.	1, 2, 5	30 minutos		X	Explicación de las puertas controladas, y de la CNOT en particular como ejemplo práctico, a través del simulador cuántico Quirk. El profesor/a explicará las abstracciones necesarias para que los estudiantes utilicen el simulador sin considerar las características cuánticas.	Para que los alumnos aprendan a utilizar puertas controladas tales como la CNOT, así como el funcionamiento del simulador Quirk.	Apuntes, Quirk, Moodle.

Realización de varios circuitos sencillos en los que se use la puerta CNOT.	1, 2, 4, 5	30 minutos		X	Se proporciona por medio de los apuntes los enunciados a partir de los cuales los alumnos crearán los circuitos con la ayuda del simulador Quirk. Al final, el profesor solucionará los ejercicios con ayuda del proyector.	Para que los alumnos aprendan a crear circuitos sencillos en los que se usen puertas controladas.	Apuntes, Quirk, Moodle.
Exposición del uso y sintaxis de las tablas de verdad en el caso de las puertas y circuitos reversibles.	1, 2, 3, 5	30 minutos		X	Explicación de los apuntes proporcionados con varios ejemplos de cómo difieren las tablas de verdad de los circuitos reversibles a los circuitos clásicos, considerando qué aspectos son necesarios para mantener la reversibilidad.	Para que los alumnos entiendan cómo funcionan las tablas de verdad en los circuitos reversibles.	Apuntes, Quirk, proyector.
Realización de varios programas en los que se usen tablas de verdad.	1, 2, 3, 4, 5	1 hora		X	Se proporciona por medio de los apuntes los enunciados a partir de los cuales los alumnos crearán las tablas de verdad teniendo en cuenta las peculiaridades de los circuitos reversibles. Asimismo,	Para que los alumnos aprendan a construir tablas de verdad siguiendo las especificaciones de los circuitos reversibles.	Apuntes, Quirk, Moodle.

					implementarán los circuitos correspondientes. Al final, el profesor solucionará los ejercicios con ayuda del proyector.		
Exposición de la problemática sobre bucles y fan-out en circuitos reversibles.	1, 2, 5	30 minutos	X		Explicación de los apuntes proporcionados en los que se explican las limitaciones de los circuitos reversibles en referencia a los bucles convencionales y al fan-out, así como las alternativas a dichas técnicas.	Para que los alumnos aprendan las limitaciones de los circuitos reversibles.	Apuntes, Quirk, proyector.
Realización de varios programas en los que se usan alternativas a los bucles tradicionales y al fan-out.	1, 2, 4, 5	30 minutos		X	Se proporciona por medio de los apuntes los enunciados a partir de los cuales los alumnos resolverán un problema que tradicionalmente usaba bucles o fan-out, utilizando alternativas reversibles válidas e implementando el circuito correspondiente.	Para que los alumnos aprendan a crear circuitos reversibles sencillos en los que se usen técnicas alternativas a los bucles o al fan-out.	Apuntes, Quirk, Moodle.
Exposición del uso y sintaxis del resto	1, 2, 5	1 hora	X		Explicación de los apuntes proporcionados con varios ejemplos	Para que los alumnos aprendan a utilizar el resto	Apuntes, Quirk, proyector.

de puertas reversibles.					de uso del resto de puertas reversible incluidas en el temario.	de las puertas reversibles incluidas en el temario: Toffoli, Peres, Swap y Fredkin.	
Realización de varios circuitos en los que se utilicen las nuevas puertas reversibles.	1, 2, 4, 5	1 hora y 30 minutos		X	Se proporciona por medio de los apuntes los enunciados a partir de los cuales los alumnos crearán los circuitos con la ayuda del simulador Quirk, con el apoyo del profesor, si es necesario. Al final, el profesor solucionará los ejercicios con ayuda del proyector.	Para que los alumnos aprendan a crear circuitos sencillos en los que se usen el resto de las puertas reversibles incluidas en el temario.	Apuntes, Quirk, Moodle.
Utilización de circuitos reversibles para solucionar problemas ya resueltos con circuitos clásicos.	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	1 hora		X	Explicación de los apuntes proporcionados con varios ejemplos de la metodología de conversión para obtener un circuito reversible a partir de un circuito clásico.	Para que los alumnos aprendan a obtener circuitos reversibles a partir de las especificaciones de un circuito clásico.	Apuntes, Quirk, proyector.

Realización de varios circuitos reversibles que sean equivalente a circuitos clásicos ya implementados.	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	1 hora		X	Se proporciona por medio de los apuntes los enunciados a partir de los cuales los alumnos crearán circuitos reversibles a partir de circuitos clásicos, con el apoyo del profesor si es necesario. Al final, el profesor solucionará los ejercicios con ayuda del proyector.	Para que los alumnos aprendan a crear circuitos reversibles a partir de las especificaciones de un circuito clásico.	Apuntes, Quirk, Moodle.
Exposición de la computación cuántica y de su paradigma basado en circuitos reversibles.	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	1 hora		X	Explicación de los apuntes proporcionados con varios ejemplos sobre computación cuántica. Los ejemplos se llevarán a cabo en un computador cuántico real de la IBM Quantum Experience.	Para que los alumnos aprendan los conceptos fundamentales de la computación cuántica y a utilizar sus conocimientos sobre circuitos reversibles en esta computación.	Apuntes, computador cuántico de libre acceso (IBM Quantum Experience), proyector.
Realización de varios circuitos cuánticos sencillos utilizando los conocimientos	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	1 hora		X	Se proporciona por medio de los apuntes los enunciados a partir de los cuales los alumnos crearán los circuitos reversibles en el computador cuántico, con el apoyo del profesor, si	Para que los alumnos aprendan a crear circuitos en un computador cuántico utilizando sus	Apuntes, computador cuántico de libre acceso (IBM Quantum

adquiridos en esta unidad.					es necesario. Al final, el profesor solucionará los ejercicios con ayuda del proyector.	conocimientos sobre sistemas reversible.	Experience), Moodle.
Prueba conceptual de test sobre los contenidos del tema. ACTIVIDAD DE EVALUACIÓN	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	30 minutos		X	Se proporcionarán por medio de Moodle varias preguntas de test sobre la unidad didáctica, que los alumnos responderán individualmente.	Para obtener parte de la calificación correspondiente a los contenidos conceptuales de la evaluación.	Moodle
Prueba procedimental sobre los contenidos del tema. ACTIVIDAD DE EVALUACIÓN	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	1 hora		X	Se proporcionarán los enunciados de varios ejercicios que involucren la construcción de sistemas reversibles por parte de los alumnos utilizando un simulador.	Para obtener parte de la calificación correspondiente a los contenidos procedimentales de la evaluación.	Enunciados en papel, entorno de desarrollo, Moodle.

#### 4. Evaluación

##### a) Criterios de evaluación

Utilizaremos los siguientes criterios para evaluar la asimilación de los contenidos:

- 1) Diseña circuitos reversibles sencillos.
- 2) Reconoce y utiliza adecuadamente las puertas reversibles.
- 3) Entiende las ventajas y desventajas que ofrecen los circuitos reversibles.
- 4) Implementa circuitos reversibles a partir de las especificaciones dadas.
- 5) Combina circuitos diferentes obteniendo un sistema reversible mayor.
- 6) Prueba y depura circuitos en un simulador.
- 7) Interpreta adecuadamente las entradas y salidas de un circuito reversible.

##### b) Procedimientos de evaluación

Esta unidad didáctica no ha sido diseñada como parte de una programación didáctica concreta, sino que persigue fines orientativos y enfocados a los contenidos a impartir. La evaluación de la unidad didáctica debe hacerse, pues, en consonancia a lo establecido en la programación didáctica a al que se desea incorporar. No obstante, aquí se dan unas recomendaciones para dicha evaluación.

La calificación correspondiente a cada evaluación se llevará a cabo teniendo en cuenta la nota que el estudiante obtenga en los contenidos conceptuales y procedimentales de las actividades correspondientes a la evaluación (75% de la calificación), así como de la nota resultante de las pruebas y trabajos realizados a lo largo de la evaluación (25% de la calificación). Así pues, las actividades de evaluación contendrán contenidos conceptuales y procedimentales correspondientes a lo indicado en los apartados anteriores.

Para calcular la nota que corresponde a ese 25% de los contenidos conceptuales de la evaluación, se realizará en relación con la presente unidad didáctica una prueba de test con la ayuda de la herramienta Moodle. Esta prueba incluirá preguntas tipo test de forma que una respuesta incorrecta no penalizará, pero para sacar un 5 será necesario responder correctamente a dos tercios de las preguntas.

Por su parte, para el cálculo de la nota correspondiente al 25% de los contenidos procedimentales se realizará al finalizar la unidad didáctica una prueba en ordenador

utilizando un simulador gráfico (QCADesigner, Quirk, Qiskit) en la que los alumnos deberán crear varios circuitos reversibles en los que se empleen las puertas reversibles aprendidas, a partir del enunciado proporcionado por el profesor.

c) Procedimiento de recuperación

No se realizarán recuperaciones a nivel de unidad didáctica, sino a nivel de evaluación. Si un alumno o alumna suspende una evaluación, deberá realizar como parte de la evaluación final una recuperación de la evaluación correspondiente en la que se incluirán contenidos conceptuales y procedimentales correspondientes a todas las unidades didácticas incluidas en dicha evaluación. La ponderación de los contenidos conceptuales y procedimentales es el 20% para los contenidos conceptuales, y el 80% restante para los procedimentales.

Por otro lado, a todos los alumnos/as que no aprueben una evaluación se les proporcionarán ejercicios adicionales para que preparen la recuperación correspondiente.

Los estudiantes que no superen la recuperación correspondiente en la evaluación final deberán presentarse a una segunda evaluación, en la que se examinarán de todo el contenido de la asignatura. Nuevamente, el 20% de la nota de este examen dependerá de una parte conceptual, y el 80% restante de una parte procedimental, siguiéndose la misma línea que en el caso anterior.

## Anexo II: Personalizando Quirk

Quirk es una herramienta altamente personalizable debido principalmente a dos motivos:

- El código fuente de la herramienta está disponible.
- La propia herramienta ofrece la posibilidad de añadir y guardar puertas personalizadas, que serán mostradas en la interfaz gráfica de igual forma que las puertas que ya trae Quirk implementadas.

### Simplificar la interfaz de Quirk

Por defecto, Quirk muestra una gran cantidad de herramientas y puertas reversibles enfocadas para la computación cuántica. Quirk está construido utilizando HTML5, CSS3, y Javascript. Es una aplicación web que solo consta de parte cliente (frontend), por lo que su apariencia y funcionalidad son totalmente personalizables. Con nociones básicas de programación web (en las tecnologías mencionadas), se pueden hacer grandes aplicaciones. Pero si solo se quiere simplificar la interfaz, esto es, quitar de la vista todas aquellas herramientas y elementos visuales que no se quieren usar, ya sea por su relación con la computación cuántica o porque su dificultad queda fuera del ámbito de la unidad didáctica aquí expuesta, es posible conseguirlo sin dichas nociones de programación.

Los diversos navegadores disponen de herramientas para desarrolladores que permiten modificar levemente una página incluso sin tener conocimientos sobre programación web. Mediante estas herramientas, podemos seleccionar manualmente los botones y demás elementos de la web que queremos “eliminar”, y simplemente quitando el código de la web, desaparecerán. En la Figura 21 se muestra un ejemplo. Nótese que el botón para seleccionar elementos de la página está seleccionado (arriba-izquierda).

Esta técnica normalmente debe aplicarse con cuidado, pero en Quirk no es especialmente peligroso puesto que la interfaz y la funcionalidad están perfectamente separadas. Incluso si, por error, se borra cualquier parte del código, actualizando la página el código volverá a su estado original. Por supuesto, una vez modificada la página para que visualmente sea tal y como se quiere, se debe guardar en el ordenador local. Esta copia se puede colocar en un repositorio o directamente en los ordenadores de los estudiantes, para que puedan usar nuestra versión personalizada.

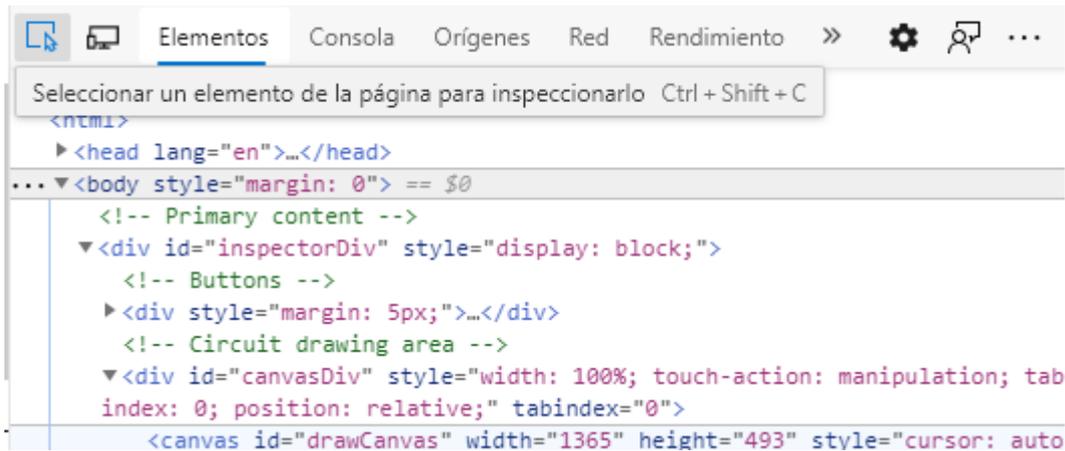


Figura 21: Anexo II. Herramientas para desarrolladores del navegador Edge.

### Añadir nuevas puertas a Quirk

En la unidad didáctica se incluye el estudio de estas puertas:

- NOT.
- Controlled-NOT (CNOT).
- Toffoli.
- Peres.
- Swap.
- Fredkin.
- Mayoritaria.

De estas puertas, están disponibles en Quirk la puerta NOT, la CNOT, la Toffoli, la Swap y la Fredkin. No obstante, las puertas CNOT, toffoli y Fredkin no están disponibles de forma directa, sino que deben construirse usando una NOT y utilizando bits de control mediante la herramienta punto (ver Figura 22).

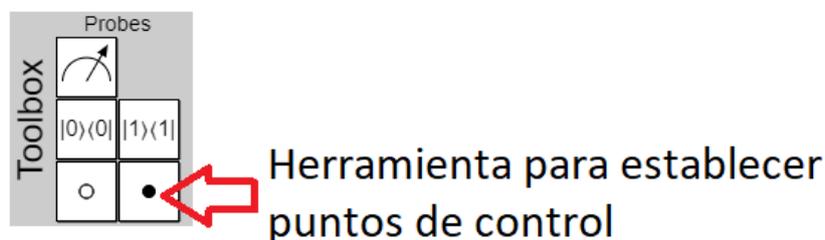


Figura 22: Anexo II. Herramienta para crear puertas controladas.

De esta manera, las puertas Mayoritaria y Peres no están disponibles. Sin embargo, se pueden crear fácilmente mediante la herramienta “Make Gate” de Quirk. Simplemente se

debe indicar la matriz relativa a dicha puerta. Las matrices correspondientes a estas puertas, así como para las puertas CNOT, Toffoli y Fredkin por si se quieren tener directamente en lugar de tener que construirlas manualmente, se pueden consultar de forma sencilla en la literatura. A modo de ejemplo, se muestra la matriz para las puertas CNOT, Toffoli y Fredkin:

#### CNOT

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

#### Toffoli

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

#### Fredkin

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

## Anexo III: Educación inclusiva

Esta unidad didáctica se ha desarrollado procurando ser una herramienta que, al margen de sus objetivos de contenido, contribuya a eliminar o al menos debilitar las barreras que dificultan la participación y el adecuado aprendizaje de los estudiantes en esta asignatura. Por ello, se ha procurado hacer su contenido más accesible a todos los estudiantes que conforman la comunidad educativa, siguiendo las pautas establecidas en la Guía de Buenas Prácticas en Educación Inclusiva desarrollada por “Save the Children” y financiada por el Ministerio de Asuntos Exteriores y de Cooperación (actual Ministerio de asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación), y la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID).

### Recursos económicos

Para desarrollar esta unidad didáctica se ha apostado por utilizar herramientas software gratuitas y de libre distribución. Además, salvo el caso excepcional de QCADesigner, el resto de las herramientas están disponibles para cualquier dispositivo. QCADesigner solo funciona en Windows, pero solo se usa en una pequeña parte de la unidad y se da por hecho que los estudiantes dispondrán de este software en clase. La herramienta principal por la que se ha apostado, Quirk, puede ejecutarse en prácticamente cualquier dispositivo: ordenadores de sobremesa, portátiles, teléfonos móviles, tablets, ... Como ya se ha comentado, Quirk puede ejecutarse sin necesidad de conexión a internet, por lo que los estudiantes que por cualquier motivo no posean conectividad en casa pueden pedir en clase una copia e introducirla en sus dispositivos para utilizarlo en cualquier momento de forma online.

### Necesidades específicas de apoyo educativo derivadas de discapacidad

Se ha optado por una metodología de trabajo que permita facilitar la inclusión de estudiantes con discapacidad. No se va a entrar en la adecuada colocación de los estudiantes (personas con problemas auditivos y visuales en primera fila, etc.), puesto que este tipo de acciones se deben realizar a nivel de la asignatura, y no es algo exclusivo de esta unidad didáctica. El aula también debería contar con los recursos necesarios y su correcto mantenimiento para facilitar la inclusión.

En primer lugar, el estilo de trabajo en grupos favorece su integración con el resto de la clase, preparándolos (a todos los estudiantes) para su vida en una sociedad plural en la que todas las personas son valiosas y aceptadas. El trabajo en grupo también tiene la ventaja de que permite respetar el ritmo de cada individuo y adaptar la participación de cada miembro a sus necesidades particulares.

Por otro lado, el sistema de trabajo “por turnos” en la que el profesor da la explicación y/o instrucciones adecuadas para que, a continuación, los estudiantes puedan trabajar en la resolución de los problemas, facilita que el/ la docente pueda atender con más atención a los requerimientos particular que puedan tener los estudiantes durante esa segunda parte. Además, al ser poco el tiempo que el/ la docente está hablando de forma magistral, es más sencillo que se mantenga el silencio en clase durante este tiempo, ayudando a las personas con dificultades auditivas en su atención. Otra ventaja para ellos es que como los estudiantes disponen de antemano de los ejercicios que tienen que resolver, ya conocen el vocabulario del que se va a hablar, ayudándoles esto en su escucha.

Finalmente, cabe mencionar que la principal herramienta de la unidad, Quirk, se ejecuta desde un navegador web. Esto significa que cualquier persona pueda aprovecharse de la gran cantidad de funciones que los navegadores ofrecen en cuanto a accesibilidad. Por ejemplo, el navegador web de Google, Chrome, ofrece las siguientes herramientas de accesibilidad:

- Announcify: traduce automáticamente una página al idioma deseado.
- Bubble cursor: herramienta que aumenta el rango del cursor, facilitando la selección de elementos con el ratón.
- Visor: permite ajustar la tonalidad de una sección concreta de la pantalla.
- OpenDyslexic: modifica el tipo de letra de la página a uno diseñado específicamente para facilitar la concentración y la lectura.
- Diccionario: permite consultar la definición de una palabra.

### Extroversión e Introversión

Los términos extrovertido e introvertido fueron acuñados por Carl Gustav Jung en su escrito “Tipos psicológicos”. La Figura 23 (obtenida de la web [www.psicología-online.com](http://www.psicología-online.com)) resume de forma informal las características de cada tipo de personalidad.

	<b>INTROVERSIÓN</b>	<b>EXTROVERSIÓN</b>
<b>Anatomía cerebral</b>	Más materia gris y desarrollo de la corteza pre-frontal	Lado derecho de la amígdala y corteza cingulada mayores
<b>Actitud</b>	Planificación	Vivir el momento
<b>Enfocados hacia</b>	Estímulos internos	Estímulos externos
<b>Relaciones sociales</b>	Baja motivación Círculo íntimo	Alta motivación Grandes grupos
<b>Toma de decisiones</b>	Reflexiva	Impulsiva
<b>Ante los castigos</b>	Sensibilidad Respetan las normas	Poca sensibilidad Asumen riesgos
<b>Memoria</b>	Mayor memoria episódica	Mayor memoria visual
<b>Valoración social</b>	Negativa	Positiva

Figura 23: Anexo III. Características de introvertidos y extrovertidos.

Continuando esta clasificación, en el libro “El poder de los introvertidos” (Cain, 2020), la escritora Susan Cain muestra los resultados de su estudio en el que detalla que cerca de un 50% de la población mundial posee rasgos introvertidos. Las personas introvertidas se diferencian de las extrovertidas fundamentalmente en que son mucho más sensibles a la dopamina: con una pequeña cantidad de ella tienen suficiente para sentirse bien. La connotación negativa que tiene esta sensibilidad es que, ante una gran cantidad de estímulos, se sienten saturados y no pueden responder con la misma rapidez y habilidad que un extrovertido. Dicho con otras palabras, una persona introvertida no necesita mucho más que su propia imaginación para tener una vida rica, pero necesitan tiempo y tranquilidad para poner en orden sus ideas antes de expresarlas.

En esta unidad didáctica se ha querido favorecer de igual forma a introvertidos y extrovertidos. Los extrovertidos disfrutan con los debates y la interacción social, por lo que el hecho de que tengan que exponer sus conclusiones en clase tras haberlas realizado es positivo para ellos. Por otro lado, estas actividades no son espontáneas, sino que los estudiantes tienen un tiempo adecuado para prepararse y poner en orden sus ideas en su pequeño grupo, algo que los estudiantes introvertidos sabrán valorar. Incluso en el propio trabajo en grupo, introvertidos y extrovertidos serán capaces de repartirse las tareas en función de sus necesidades personales: las actividades más reflexivas pueden ser llevadas a cabo por los miembros introvertidos, mientras que las impliquen mayor interacción social pueden ser llevadas a cabo por los miembros extrovertidos.

## Igualdad de género

La Universidad de Almería, en un intento de promover que las alumnas de 2º de Bachillerato se interesen por los estudios de Ingeniería, convoca anualmente un taller denominado “Talleres para jóvenes programadoras” ([https://w3.ual.es/eventos/jornadasinformatica/taller\\_programadoras.shtml](https://w3.ual.es/eventos/jornadasinformatica/taller_programadoras.shtml)). Actualmente, estos talleres implican dos actividades fundamentales:

- Programación de un robot con Arduino: la programación del robot implica “jugar” con el montaje de circuitos utilizando la famosa placa Arduino.
- Programación con Scrum.
- Creación de un videojuego interactivo: en esta actividad, las alumnas utilizan Scratch para programar un videojuego.
- Introducción al Internet de las cosas a través de un laboratorio “inteligente” que cuenta con dispositivos cotidianos tales como neveras, televisores o ventanas con capacidad para ser programadas, responder a eventos y enviar información.

La primera actividad está muy relacionada con la asignatura de Tecnología Industrial II, y ya solamente por ello es importante fomentar este taller entre las alumnas de dicha asignatura. Sin embargo, promover una actividad similar enfocado a la programación de computadores cuánticos utilizando puertas reversibles mediante la ya mencionada IBM Quantum Experience sería altamente recomendable para fomentar este tipo de programación entre las mujeres.

## Resumen/Abstract

Aunque el desarrollo de la tecnología relativa a los circuitos y sistemas lógicos están en continuo avance durante las últimas décadas, las bases de dicha tecnología apenas han cambiado durante este tiempo, como puede verse fácilmente al comparar un libro de sistemas digitales de hace 20 años con uno actual. Sin embargo, el auge de nuevas tecnologías reversibles, motivado por causas tan dispares como el ahorro energético -con la vista puesta en el preocupante cambio climático- o el creciente interés de la computación cuántica, amenaza por primera vez este *statu quo*. De no educar a nuestros estudiantes teniendo en cuenta esta nueva tendencia, corremos el riesgo de que se instauren nuevas tecnologías para las que no se dispone de personal cualificado. En este trabajo, se motiva la necesidad de comenzar a incluir formación especializada en estas nuevas tecnologías, presentando un ejemplo funcional de unidad didáctica sobre circuitos y sistemas reversibles para la asignatura de Tecnología Industrial II de 2º de Bachillerato. La unidad didáctica ha sido realizada poniendo en práctica todos los conocimientos adquiridos en el Máster de Secundaria de la Universidad de Almería.

The development of digital circuits and systems has advanced steadily over the past decades. Nevertheless, the bases of such technology have hardly changed during this time, as can be easily seen by comparing a 20-year-old book on digital systems with a current one. The rise of new reversible technologies, motivated by causes as diverse as energy-saving - with an eye on the worrying climate change - or the growing interest in quantum computing, threatens this *status quo* for the first time. If we do not educate our students in these technologies, we will not have qualified personnel to work with them in the future. In this work, the need for including specialized training in these new technologies is motivated, presenting a functional example of a didactic unit on reversible circuits and systems for the subject of Industrial Technology II. The didactic unit has been carried out by putting into practice the knowledge acquired in the Master's Degree in Secondary at the University of Almería.