



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y AUTOMÁTICA**

**Aplicación académica de software para  
diseño, simulación y fabricación de placas de  
circuito impreso**

**Autor:**

**Santamaría Mateos, Jesús**

**Tutora:**

**Pérez Barreiro, Cristina  
Departamento Tecnología  
Electrónica**

**Valladolid, septiembre 2021.**



## Resumen

El correcto manejo de las herramientas de diseño, simulación y fabricación de circuitos impresos es fundamental en el campo de la ingeniería electrónica. Por este motivo, es necesario que en la formación de profesionales del sector se cuente con programas actualizados, didácticos, estandarizados y accesibles, por lo que es requerida una revisión periódica del software empleado en la formación. Para comprobar que las herramientas son idóneas, se ha realizado una comparativa utilizando unos criterios, que evalúen la capacidad de estas herramientas para su aplicación académica. Estos criterios se han establecido dentro de este trabajo.

La alternativa seleccionada consta de dos programas que permiten solucionar dos partes del diseño de sistemas electrónicos. En primer lugar, la creación y simulación de circuitos y, en segundo lugar, un desarrollo más próximo al prototipado, que permita el diseño de placas de circuito impreso y la generación de la documentación correspondiente para su fabricación.

## Palabras Clave

KiCad, LTspice, Msim8, PCB, Diseño de circuitos, Fabricación de Circuitos, Circuitos impresos.

## Abstract

The correct handling of the tools of design, simulation and manufacture of printed circuits is fundamental in the field of electronic engineering. For this reason, it is necessary for the training of professionals in the sector to have updated, didactic, standardized and accessible programs, which is why a periodic review of the software used in the training is required. To verify that the tools are suitable, a comparison has been made using criteria that assess the capacity of these tools for academic application. These criteria have been established within this work.

The selected alternative consists of two programs that allow solving two parts of the design of electronic systems. In the first place, the creation and simulation of circuits and, secondly, a development closer to prototyping, which allows the design of printed circuit boards and the generation of the corresponding documentation for their manufacture.

## Keywords

KiCad, LTspice, Msim8, PCB, circuit desing, circuit fabrication, printed circuits.

# Índice

|  |    |
|--|----|
| Abstract.....  | 3  |
| Keywords.....  | 3  |
| 1. Introducción y objetivos. ....                                  | 8  |
| 1.1- Introducción.....   | 8  |
| 1.2- Objetivos.....  | 9  |
| 2. Comparación de alternativas:.....                               | 11 |
| 2.1- Alternativa 1: Adquisición de licencias.....                  | 11 |
| 2.2- Alternativa 2: Licencias para estudiantes.....                | 12 |
| 2.3- Alternativa 3: Software libre y Freeware.....                 | 12 |
| 2.4- Alternativa 4: Herramientas online.....                       | 13 |
| 3. Alternativa seleccionada.....                                   | 14 |
| 3.1- KiCad.....  | 14 |
| 3.2- LTspice XVII.....   | 15 |
| 4. Descripción del software empleado actualmente.....              | 16 |
| 4.1- Desarrollo de esquemas.....                                   | 16 |
| 4.2- Funcionamiento de la simulación.....                          | 16 |
| 4.3- Diseño de circuitos impresos.....                             | 18 |
| 5. Evaluación de la alternativa.....                               | 20 |
| 5.1- Criterios de la evaluación.....                               | 20 |
| 5.2- Evaluación.....   | 24 |
| 6. Comprobación de la funcionalidad de los programas.....          | 27 |
| 6.1- Desarrollo de simulaciones.....                               | 27 |
| 6.1-1. Análisis de barrido en continua.....                        | 27 |
| 6.1-1.1. Curva característica de un diodo.....                     | 28 |
| 6.1-1.2. Curvas características de un transistor bipolar.....      | 30 |
| 6.1-2. Análisis transitorio.....                                   | 31 |
| 6.1-2.1. Comportamiento de circuitos alimentados con alterna.....  | 32 |
| 6.1-2.2. Comprobación de fuente de alimentación.....               | 34 |
| 6.1-2.3. Obtención de la curva característica de un comparador.... | 35 |
| 6.1-2.4. Obtención del transitorio de un circuito.....             | 37 |
| 6.1-2.5. Simulación de componentes digitales.....                  | 38 |
| 6.1-3. Análisis de barrido en alterna.....                         | 39 |
| 6.1-3.1. Análisis en frecuencia de un filtro pasa bajo.....        | 39 |

|          |  |    |
|----------|--|----|
| 6.1-3.2. | Análisis en frecuencia de un amplificador. ....            | 41 |
| 6.1-4.   | Análisis en el punto de operación. ....                    | 42 |
| 6.1-4.1. | Obtención del punto de polarización de un amplificador. .. | 42 |
| 6.1-5.   | Análisis paramétrico. ....                                 | 42 |
| 6.1-5.2. | Comparación de la salida del filtro pasa bajo. ....        | 43 |
| 6.1-5.3. | Comprobación del efecto de un condensador de filtrado...   | 44 |
| 6.1-6.   | Otros aspectos de la simulación empleados.....             | 45 |
| 6.1-6.1. | Recta de carga y punto de funcionamiento del circuito..... | 46 |
| 6.1-7.   | Observaciones. ....  | 47 |
| 6.2-     | Desarrollo de un proyecto completo.....                    | 48 |
| 6.2-1.   | Esquema y simulación.....                                  | 48 |
| 6.2-2.   | Asignación de huellas y diseño de PCB.....                 | 52 |
| 6.2-3.   | Comprobación de los ficheros generados.....                | 57 |
| 6.2-4.   | Extras. ....   | 57 |
| 6.2-5.   | Observaciones. ....  | 58 |
| 7.       | Conclusiones.....  | 59 |
|          | Bibliografía .....   | 61 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Msim8, ventana de selección de simulación. ....                    | 17 |
| Figura 2. Diagrama de diseño de PCBs p1.....                                 | 21 |
| Figura 3. Diagrama de diseño de PCBs p2.....                                 | 22 |
| Figura 4. Diagrama de diseño de PCBs p3.....                                 | 23 |
| Figura 5. Circuito para obtener la curva característica del diodo. ....      | 28 |
| Figura 6. Configuración de barrido en continua. ....                         | 29 |
| Figura 7. Curva característica diodo ampliada.....                           | 29 |
| Figura 8. Circuito curvas características transistor. ....                   | 30 |
| Figura 9. Configuración análisis DC anidado.....                             | 30 |
| Figura 10. Curvas características transistor.....                            | 31 |
| Figura 11. Circuito con transformador de alterna. ....                       | 32 |
| Figura 12. Prácticas, configuración análisis transitorio. ....               | 33 |
| Figura 13. Simulación transformador en vacio .....                           | 33 |
| Figura 14. Circuito rectificador con condensador de filtrado.....            | 34 |
| Figura 15. Gráfica del rectificador con condensador de filtrado. ....        | 34 |
| Figura 16. Gráfica del rectificador sin condensador de filtrado.....         | 35 |
| Figura 17. Prácticas, circuito cambio de variable del eje X.....             | 35 |
| Figura 18. Prácticas, gráfica circuito cambio de variable del eje X.....     | 36 |
| Figura 19. Curva característica comparador con histéresis .....              | 36 |
| Figura 20. Circuito simple transitorio .....                                 | 37 |
| Figura 21. Curva de carga y descarga de un condensador.....                  | 37 |
| Figura 22. Circuito puerta AND.....  | 38 |
| Figura 23. Simulación puerta AND .....                                       | 38 |
| Figura 24. Prácticas, circuito análisis en frecuencia.....                   | 39 |
| Figura 25. Prácticas, configuración análisis en frecuencia.....              | 40 |
| Figura 26. Prácticas, diagrama de bode circuito análisis en frecuencia. .... | 40 |
| Figura 27. Amplificador de una etapa .....                                   | 41 |
| Figura 28. Diagrama de bode amplificador de una etapa. ....                  | 41 |
| Figura 29. Resultado simulación de punto de operación. ....                  | 42 |
| Figura 30. Variación curva de diodo con la temperatura. ....                 | 43 |
| Figura 31. Salida del filtro paso bajo para distintas frecuencias.....       | 44 |
| Figura 32. Rectificador con aislamiento galvánico y condensador.....         | 45 |
| Figura 33. Gráfica rectificador análisis paramétrico .....                   | 45 |
| Figura 34. Circuito de recta de carga. ....                                  | 46 |
| Figura 35. Recta de carga circuito con diodo.....                            | 47 |
| Figura 36. Proyecto, alimentación .....                                      | 49 |
| Figura 37. Proyecto, tensión media fuente de alimentación. ....              | 49 |
| Figura 38. Proyecto, circuito de control.....                                | 50 |
| Figura 39. Proyecto, simulación comparador con histéresis. ....              | 50 |
| Figura 40. Proyecto, circuito de potencia.....                               | 51 |
| Figura 41. Proyecto, simulación circuito de potencia. ....                   | 51 |
| Figura 42. Proyecto, circuito interruptor crepuscular completo.....          | 52 |
| Figura 43. Proyecto, icono herramienta de anotación. ....                    | 52 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 44. Proyecto, ventana herramienta de anotación.....                 | 52 |
| Figura 45. Proyecto, ventana de edición de campos de símbolos.....         | 53 |
| Figura 46. Proyecto, icono herramienta de creación de PCBs.....            | 53 |
| Figura 47. Proyecto, distribución de componentes.....                      | 54 |
| Figura 48. Proyecto, calculadora KiCad. ....                               | 54 |
| Figura 49. Proyecto, pistas trazadas. ....                                 | 55 |
| Figura 50. Proyecto, ventana de configuración ficheros de fabricación..... | 56 |
| Figura 51. Proyecto, rutado superior.....                                  | 56 |
| Figura 52. Proyecto, visor de archivos Gerber.....                         | 57 |
| Figura 53. Proyecto, modelo 3D circuito interruptor crepuscular .....      | 58 |

## Índice de Tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Valoración de las herramientas..... | 25 |
|--|----|

# 1. Introducción y objetivos.

## 1.1- Introducción.

Debido al desarrollo tecnológico ha aumentado la necesidad de adquirir conocimiento sobre el manejo de herramientas de software especializadas. Esto se ha vuelto más significativo si cabe en el campo de la ingeniería debido a la rapidez, eficiencia y exactitud que proporcionan este tipo de programas.

En el campo que nos atañe en este caso, la ingeniería electrónica, el software dedicado se presenta como un soporte fundamental en numerosas aplicaciones, destacando entre ellas el desarrollo de placas de circuito impreso (PCBs en adelante).

El diseño de PCBs aún gran parte de los conocimientos que se consideran imprescindibles para un ingeniero electrónico cuya complejidad es muy variada. El hecho de emplear PCBs es una de las formas más cómodas y habituales de disponer de un circuito y hace del software de simulación de circuitos y de diseño de éstos una herramienta cuyo conocimiento es necesario para cualquier estudiante de ingeniería electrónica.

Antes de comenzar con el trabajo es necesario definir qué tipo de herramientas son las que se van a emplear en este caso las herramientas EDA (automatización de diseño electrónico en español).

Las herramientas EDA constituyen la solución más empleada de cara a la resolución de los distintos problemas que aparecen a lo largo del desarrollo de un circuito impreso. Este tipo de aplicaciones se encargan de aumentar en gran medida la eficiencia a la hora de diseñar circuitos y simplificando el tratamiento de PCBs que cada vez requieren de mayor cantidad de componentes.

Las herramientas EDA habitualmente son desarrolladas por iniciativas empresariales y, por ello, buscan obtener beneficio económico, pero, de un tiempo a esta parte, en busca de democratizar este sector y de proporcionar una alternativa gratuita y funcional han surgido las herramientas de software libre que buscan ser lo más cercanas posible al software empleado a nivel industrial. Esto proporciona una mayor variedad de posibilidades a la hora de seleccionar una alternativa.

Como se ha indicado anteriormente, un ingeniero electrónico debería ser capaz de emplear este tipo de software para poder ser competitivo en la industria actual. Además, deberá adquirir competencias en todos los niveles del proceso de desarrollo de circuitos impresos.

Dentro de las herramientas de automatización de diseño electrónico es necesario citar a SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), que constituye la base de la mayor parte de simuladores de circuitos actuales.

SPICE es un programa de propósito general y de código abierto enfocado hacia la simulación de circuitos desarrollado por la facultad de Ingeniería Eléctrica y Ciencias de la Computación de la Universidad de California Berkley. Es una herramienta que permite distintos tipos de simulación:

- Análisis de circuitos no lineales de corriente continua.
- Análisis de transitorios no lineales.
- Análisis de circuitos lineales de corriente alterna.

A lo largo del año 2020 la situación ocasionada por la Covid-19 hizo patente los problemas que supone trabajar con diversos tipos de software al emplear los programas que se proponen usualmente desde las instituciones educativas pero que pueden ser. Un ejemplo de estos problemas fue la falta de licencias para el uso del software.

La propuesta que plantea este TFG busca sustituir un software que se emplea actualmente en la Universidad de Valladolid para la creación de esquemas, la simulación de circuitos y el diseño de placas de circuito impreso.

## **1.2- Objetivos.**

En la actualidad el software EDA es muy empleado con finalidades académicas debido a que supone un modo simple de explicar aspectos abstractos de la respuesta de circuitos eléctricos y electrónicos. Con este trabajo de fin de grado se busca explorar las diversas funcionalidades con las que cuentan los programas LTspice y KiCad y garantizar que éstas permitan observar la mayor parte de los aspectos del diseño de circuitos impresos que se consideran necesarios en la formación de los futuros ingenieros electrónicos.

El segundo objetivo de este proyecto es el establecimiento de unos criterios que permitan evaluar posteriormente la capacidad de adaptación de estas herramientas al objetivo final, su aplicación académica.

Como tercer objetivo se busca determinar si los programas propuestos permiten sustituir el software que se está empleando para estos mismos fines con las mismas garantías que permitan obtener las mismas funcionalidades que el programa original, con herramientas idénticas o sustituyéndolas por otras similares.

El presente documento busca estudiar las dos herramientas planteadas en el trabajo de fin de Grado “Estudio comparativo de software para diseño, simulación y fabricación de placas de circuito impreso” de don Hugo Hernández Luelmo, en el que se compararon las distintas alternativas entre numerosos programas disponibles, para seleccionar aquellos que resultaban más interesantes para las aplicaciones académicas. Este constituye el fin último de este trabajo, determinar si la propuesta realizada sobre el papel en el citado TFG tiene una verdadera aplicación práctica y es lo suficientemente versátil y simple como para poder pasar a emplearlo en entornos académicos.

## 2. Comparación de alternativas:

Como se ha indicado anteriormente, existen distintas alternativas para solucionar el problema del software especializado, que deberán ser analizadas, para posteriormente elegir la más conveniente para el objetivo de la docencia. Las alternativas que se han planteado son:

- Adquisición de licencias de software especializado.
- Solicitud de licencias para estudiantes, que pueden ser de dos tipos:
  - o Licencias temporales (un mes, quince días, ...).
  - o Programas con funcionalidad limitada.
- Software de código abierto y Freeware.
- Herramientas online.

Todas las alternativas planteadas poseen ciertas características ventajosas frente a las demás lo que hace necesario priorizar algunos aspectos a la hora de realizar una selección entre ellas.

### 2.1- Alternativa 1: Adquisición de licencias.

La compra de licencias de software especializado suele ser una de las primeras alternativas que se barajan, ya que suele poseer las mejores funcionalidades y usualmente poseen una atención al cliente más eficaz que el resto de las alternativas. Sus características principales son:

- Amplio desarrollo de sus funcionalidades.
- Software empleado normalmente en la industria especializada.
- Creación de diseños estandarizados, lo que facilita la fabricación.
- Herramientas e interfaces optimizadas.
- Preferencia por determinados sistemas operativos, falta de compatibilidad.
- Precio elevado.
- Funcionalidades sobredimensionadas para determinadas aplicaciones.
- Duración ilimitada.
- Imposibilidad para el alumnado de disponer del software fuera del entorno de la universidad.
- Poca flexibilidad.

Dentro de esta alternativa, encontramos distintos programas que se ajustarían a los objetivos del aprendizaje que se han planteado, estos son:

- Orcad (Versión completa).
- Altium (Licencia Designer y Altium Designer SE).

- NI MultiSim (Versión profesional).

## **2.2- Alternativa 2: Licencias para estudiantes.**

La adquisición de licencias para los estudiantes puede permitir el acceso de éstos a los mismos programas de software especializado y también permite minimizar los problemas del costo y facilitando la accesibilidad para todo el alumnado. Definimos dos tipos de licencias dentro de esta modalidad:

- Licencias temporales: licencias que permiten un uso del software completo, pero con una duración limitada. Características principales:
  - Software completo empleado en industria especializada.
  - Gran cantidad de funcionalidades.
  - Herramientas e interfaces optimizadas.
  - Problemas de compatibilidad con determinados equipos.
  - Gratuitas.
  - Duración limitada.
  - Posibilidad del alumnado de obtener el software independientemente de la universidad.
  - Poca flexibilidad.

Programas que ofrecen este tipo de alternativas:

- OrCAD (Licencia Academic).
  - Altium (Versión académica).
  - NI MultiSim (Versión educativa).
  - DipTrace (Versión académica).
- Programas con funcionalidad limitada: programas sin período de prueba, pero cuyas funcionalidades están limitadas.
    - Software incompleto, determinadas funcionalidades no están disponibles.
    - Herramientas e interfaces optimizadas.
    - Problemas de compatibilidad con determinados equipos.
    - Gratuitas.
    - Duración ilimitada.
    - Posibilidad del alumnado de obtener el software independientemente de la universidad.
    - Poca flexibilidad.

## **2.3- Alternativa 3: Software libre y Freeware.**

El software libre se plantea como una alternativa al software propietario tradicional, aportando herramientas que permiten el libre intercambio de

software entre individuos, así como la posibilidad de mejora de éste por los propios usuarios. Por otra parte, el software freeware es software normalmente propietario, pero que no posee costo para su consumidor final. Sus principales características son:

- Gratuito.
- Actualizaciones habituales.
- Accesible.
- Entornos relativamente flexibles.
- Servicio técnico normalmente inexistente, sustituido por foros de usuarios del programa.
- Recursos de los programas basados en los que aparecen en la industria, los archivos realizados con el programa suelen seguir la estandarización.
- Herramientas e interfaces normalmente poco intuitivas.

Ejemplo de este tipo de software son programas como:

- LTspice.
- KiCad.

## **2.4- Alternativa 4: Herramientas online.**

Las herramientas online se han vuelto una alternativa razonable al software dedicado, principalmente para personas con un acercamiento más enfocado en el diseño como pasatiempo que, como herramienta de trabajo, aun así, es necesario citar alguna de sus características principales:

- Suele tratarse de herramientas gratuitas.
- Herramientas con funcionalidades muy limitadas.
- Alta estandarización de sus archivos de salida, permitiendo la fácil fabricación de los componentes deseados.
- Herramientas muy accesibles.
- Interfaces simples e intuitivas.
- Facilidad de uso para los distintos sistemas operativos.

Ejemplo de este tipo de herramientas es:

- Fritzing.

### **3. Alternativa seleccionada.**

Para seleccionar una alternativa, se ha considerado que esta poseyera unas funcionalidades muy similares a las que posee Microsim 8, añadiendo a esto: la accesibilidad del programa, la similitud de éste a los programas empleados por la industria, así como la existencia de actualizaciones y de servicio técnico ante posibles fallos del programa.

La alternativa que se ha escogido finalmente está conformada por dos programas distintos que buscan solucionar dos partes del diseño de sistemas electrónicos: en primer lugar, el diseño de los circuitos y la prueba de éstos mediante herramientas de simulación (programas basados en SPICE) y, en segundo lugar, el desarrollo más cercano al prototipado y que, por lo tanto, permita el diseño de placas de circuito impreso (PCB) y generar la documentación necesaria para la fabricación de éstas.

Los programas elegidos se corresponden con la alternativa del Software libre y el Freeware debido a sus múltiples ventajas ya que se trata de aplicaciones que se actualizan con frecuencia, aportan unas comunidades muy amplias y abiertas a la hora de intercambiar conocimiento y ayuda en la solución de los problemas que aparecen en el transcurso del aprendizaje del manejo de este tipo de herramientas, y además son fácilmente accesibles debido a su precio.

Enfocado al diseño de esquemas eléctricos se ha seleccionado LTspice XVII, un programa de freeware, mientras que para el desarrollo de placas de circuito impreso se ha propuesto el programa KiCad, que se halla dentro del campo del software libre.

#### **3.1- KiCad.**

KiCad es una herramienta de software de código abierto que permite el desarrollo de esquemas y diseño de placas de circuito impreso. Se trata de un programa que incluye distintas herramientas para objetivos diversos:

- KiCad: se trata de la herramienta que permite realizar la gestión de los proyectos.
- Eschema: este programa aporta las funcionalidades de edición de esquemas y de componentes. Incluye funciones de simulación mediante NGspice.
- Pcbnew: la herramienta funciona como un editor de los circuitos de las placas de circuito impreso y de footprints de componentes.
- GerbView: proporciona una visión de los archivos de fabricación en general y en particular de los ficheros Gerber y los ficheros de taladrado.

- Bitmap2Component: realiza conversiones entre imágenes de mapa de bits y componentes y footprints.
- Calculadora de PCB: herramienta de cálculo que permite simplificar los cálculos relacionados con el diseño de los circuitos como la anchura de las pistas, el espacio entre pistas, entre otros.
- Editor de PL: permite editar el aspecto formal de la página de diseño.

Como se puede observar por las numerosas herramientas, Kicad busca abarcar todas las etapas del proceso de diseño de PCBs, por lo que en principio parece una solución idónea para la sustitución de Msim8, pero, debido a las carencias que posee en temas relacionados con la simulación, es necesario usar como apoyo otra herramienta: LTspice XVII.

### **3.2- LTspice XVII.**

LTspice XVII es un software freeware de simulador SPICE, que permite el diseño de esquemas y su simulación y que es distribuido por Analog Devices. Este programa busca subsanar los problemas que poseen otros simuladores a la hora de analizar los circuitos que se componen por elementos analógicos.

Si se considera el esquema de desarrollo de PCBs visto anteriormente, LTspice abarca el desarrollo permitiendo la realización de esquemas y la simulación de éstos dejando de lado los apartados relacionados con el diseño de la PCB por lo que, actualmente, aporta las funcionalidades peor implementadas de KiCad.

## **4. Descripción del software empleado actualmente.**

El software que se busca sustituir se denomina Microsim8, éste es un programa que agrupa una serie de herramientas enfocadas en el diseño de circuitos electrónicos.

El principal problema de este programa es su falta de continuidad y, por ello, no se actualiza y carece de servicio técnico, dificultando la labor de alumnos y docentes.

En este apartado se van a explorar las distintas herramientas que proporciona Msim8 para el diseño y la simulación de esquemas y la fabricación de placas de circuito impreso.

### **4.1- Desarrollo de esquemas.**

El programa Microsim Schematics permite el diseño y desarrollo de circuitos haciendo uso de elementos gráficos que hacen legible el circuito que se está realizando y que encontraremos en la extensa librería de símbolos con la que cuenta el programa.

Desde esta herramienta también se permiten modificar determinados valores de los componentes que, posteriormente, serán tenidos en cuenta a la hora de simular el esquema como, por ejemplo, los valores de las resistencias o los de los condensadores.

Esta herramienta nos permite, por otra parte, añadir nuevos símbolos gráficos facilitando que los propios usuarios se encarguen de realizar los símbolos faltantes o que añadan librerías que otros usuarios del programa puedan haber realizado con anterioridad.

Otra de las funcionalidades que presenta es aportar datos resultantes de determinadas simulaciones, en el propio esquema, simplificando el estudio de aquellos circuitos que necesitan de este tipo de análisis.

### **4.2- Funcionamiento de la simulación.**

El programa Microsim8 incluye entre su lista de programas un simulador Spice (Microsim Probe) con gran número de funcionalidades a las que se puede acceder desde las opciones que ofrece el Microsim Schematics.

Existen numerosas opciones de simulación que podemos observar en la figura 1 y que serán tratadas a continuación:

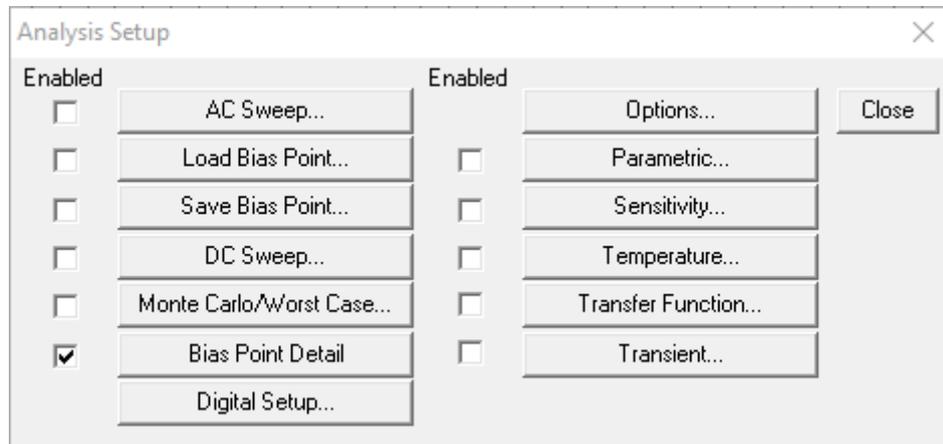


Figura 1. Msim8, ventana de selección de simulación.

- AC Sweep (barrido en frecuencia): permite obtener el análisis de un circuito ante entradas de pequeña señal. Este modo incluye además la posibilidad de un análisis de ruido.
- Load Bias Point: este modo está pensado para recuperar un fichero en el que anteriormente se ha almacenado la información del punto de trabajo del circuito.
- Save Bias Point: este modo es complementario al anterior, permite el almacenamiento de los datos del punto de funcionamiento del circuito permitiendo recuperarlos posteriormente.
- DC Sweep (barrido en continua): un análisis de barrido en continua permite obtener la respuesta del circuito ante el cambio de una variable determinada. Este tipo de análisis permite anidar condiciones, permitiendo variar dos parámetros de manera simultánea.
- Monte Carlo/Worst Case: este tipo de estudio realiza un análisis estadístico que permite estudiar el comportamiento del circuito a partir de los cambios en los valores de los componentes del circuito en función de las tolerancias establecidas del usuario.
- Bias Point Detail: permite realizar un análisis detallado del punto de operación.
- Digital setup: proporciona la posibilidad de configurar los niveles de tensión de diversos componentes digitales, así como ciertas características de una simulación digital.
- Parametric: aporta la funcionalidad de realizar un análisis del circuito ante variaciones en el valor de uno de sus componentes.
- Sensitivity: permite analizar la sensibilidad del circuito en corriente continua.

- Temperature: establece la temperatura con la que se van a realizar los cálculos de la simulación.
- Transfer Function: se encarga de calcular la ganancia, la resistencia de entrada y la resistencia de salida del circuito. Si la función de transferencia es no lineal, halla su linealización a partir del punto de trabajo.
- Transient: calcula la respuesta transitoria de un circuito dado.

Como se puede observar, el simulador es muy potente y ofrece gran cantidad de funcionalidades que habrá que tratar de sustituir mediante los programas propuestos.

El Microsim Probe trabaja a su vez con un editor de estímulos (Microsim Stimulus Editor), esta herramienta es la que permite la simulación de circuitos digitales, ya que aporta la posibilidad de trabajar con entradas con forma de pulsos.

### **4.3- Diseño de circuitos impresos.**

Para el diseño de PCBs trabajan en conjunto varios programas incluyendo entre ellos:

- Microsim Schematics: es el que permite establecer la netlist (lista de redes, establece la relación de los componentes con los nodos del circuito) así como los distintos encapsulados que puede poseer un componente.
- Microsim PCBoards: se trata del programa principal a la hora de llevar a cabo el diseño de la placa de circuito impreso y de la posterior fabricación de ésta. Permite la elaboración del prototipo a partir de la información suministrada por el programa anterior. El programa emplea capas para permitir la correcta gestión de los distintos componentes que se hallan en el circuito permitiendo diferenciar las capas:
  - Capas eléctricas, aquellas que indicarán el recorrido que deberán tener las pistas conductoras de cobre.
  - Capas de serigrafía, aquellas que permiten dibujar sobre la PCB los diseños de los distintos componentes, así como las anotaciones necesarias para el correcto montaje del circuito.
  - Capas de soldadura, que indican sobre qué puntos del circuito impreso no se ha de aplicar la capa antisoldadura para permitir soldar los componentes a las pistas.
  - Capas de taladrado, permite indicar los taladros que deberán realizarse en la baquelita que soporta el circuito.

PCBoards cuenta además con herramientas de auto-rutado, que permiten que el propio programa se encargue de trazar las pistas entre los distintos puntos del circuito siguiendo la información que aparece en el Netlist y simplificando la tarea de trazar las pistas principalmente en circuitos muy complejos.

A pesar de que posee modelos de numerosos componentes, este programa también da la opción de generar serigrafías y encapsulados para circuitos no incorporados en la biblioteca del software.

Se trata del programa que se encarga de generar, además, todos los ficheros necesarios para la fabricación, incluyendo entre estos los ficheros Gerber (necesarios para las máquinas de control numérico que realizarían el procesado de la PCB), los fotolitos, el archivo de taladrado y la lista de materiales.

## 5. Evaluación de la alternativa.

### 5.1- Criterios de la evaluación.

Como se ha indicado, se busca comparar la alternativa que se ha planteado con respecto al programa que se plantea sustituir. Para ello, será necesario crear unos criterios de evaluación que puedan ser aplicados a los tres programas que nos atañen. Los puntos generales (comunes al resto de programas) que habrá que evaluar serán los siguientes:

- Instalación y desinstalación rápida y sencilla.
- Entorno de trabajo intuitivo y cómodo, que permita de un vistazo acceder a las funciones principales que se requieran a lo largo del desempeño de la actividad. Los iconos deberán ser lo más autoexplicativos posible.
- El programa debe poseer una curva de dificultad razonable, ser lo suficientemente simple como para no dificultar el inicio de su manejo, pero con la profundidad suficiente para permitir el desarrollo completo del contenido que se desea impartir.

El resto de los criterios estarán más relacionados con los aspectos de diseño de la PCB.

El proceso de diseño de una PCB implica numerosos pasos. El desarrollo habitual de un proyecto de este tipo viene dado por el diagrama de flujo de las figuras 2, 3 y 4. Este diagrama representaría un proyecto simple muy general, proyectos más grandes pueden implicar algunos apartados extra.

La combinación de ambos programas debe proporcionar, de un modo efectivo, una serie de herramientas que permitan garantizar el desarrollo de cada una de las fases contempladas. Los criterios derivados de esto son los siguientes:

- El entorno de diseño de esquemas debe permitir que su creación sea lo más inteligible y normalizada posible, en busca de que sea sencillo entender el funcionamiento del circuito o su estructura básica de un solo vistazo.
- El programa debe contar con herramientas que permitan añadir nuevos componentes a las librerías con las que cuenta el programa de un modo relativamente simple.
- Debe existir la posibilidad de generar subcircuitos que permitan incorporar circuitos realizados con anterioridad a nuevos circuitos.
- Dentro de la simulación y el análisis de los circuitos, son importantes los siguientes puntos:

- La interfaz debe permitir cierto margen de maniobra como dar la opción de representar más de una gráfica en una sola ventana
- El programa debe permitir que se representen operaciones matemáticas en el entorno gráfico.
- Dentro del prototipado y creación de PCBs habrá que tener en cuenta los siguientes puntos:
  - Se debe contar con alguna herramienta que permita modificar o crear footprints de un modo sencillo para los componentes que no cuenten con ellas.
  - Los archivos generados deben ser estándar para garantizar que posteriormente se puedan fabricar.
  - Las herramientas de trazado de rutas deben contar con elementos que permitan comprobar de un modo simple si se ha cometido algún error.

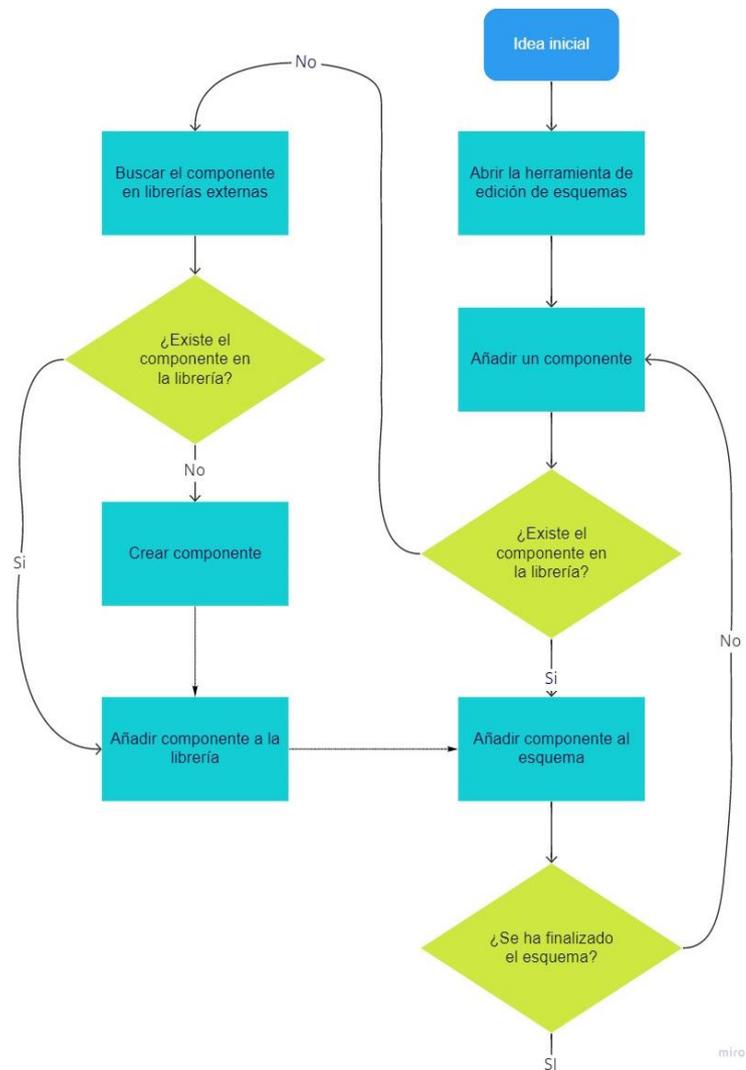


Figura 2. Diagrama de diseño de PCBs p1.

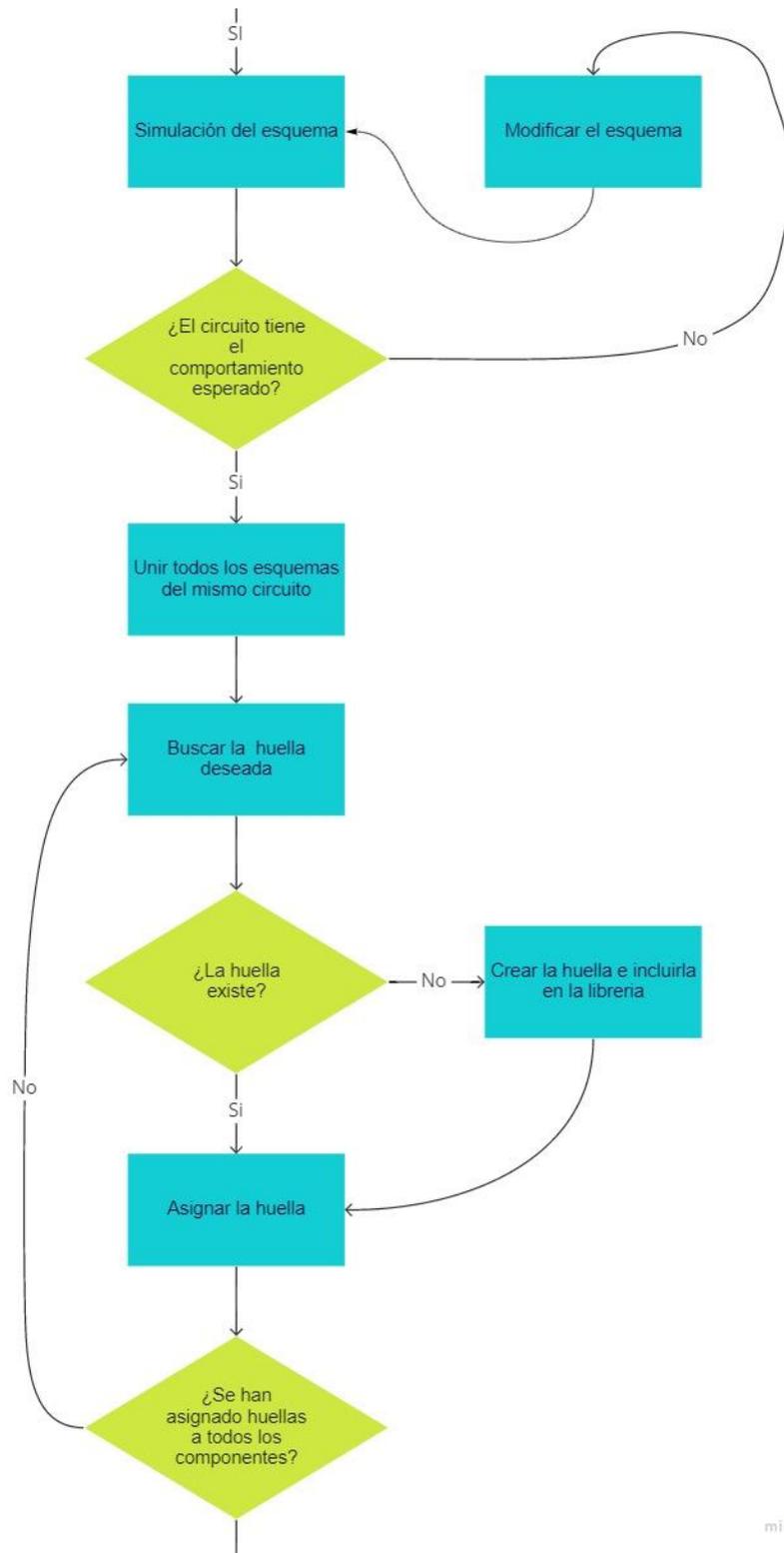


Figura 3. Diagrama de diseño de PCBs p2.

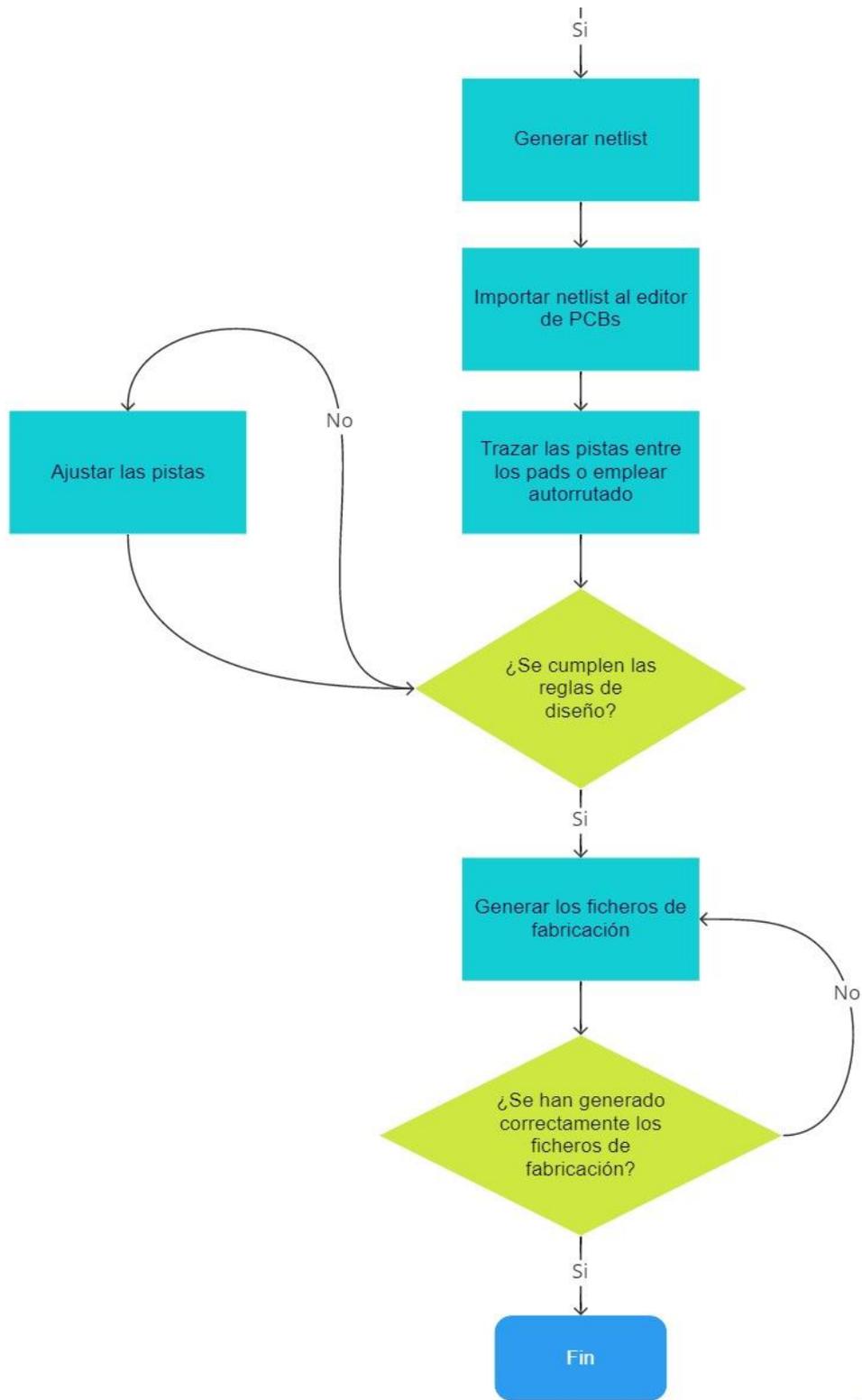


Figura 4. Diagrama de diseño de PCBs p3.

Si consideramos el diagrama de flujo habitual, en lo que se refiere al diseño de circuitos impresos, podemos asignar ciertos puntos del desarrollo a ambos programas. LTspice XVII proporciona soporte para los apartados del diagrama de la figura 2 y la 3 hasta la comprobación del funcionamiento del circuito mientras que KiCad proporciona soporte para los tres diagramas circuitos (figuras 2, 3 y 4) al igual que MSim.

Se puede considerar como óptimo emplear como sustituto para MSim a KiCad debido a que permite abarcar las mismas funciones del desarrollo de placas de circuito impreso, pero actualmente los problemas que posee su simulador son demasiado importantes como para pasarlos por alto.

## 5.2- Evaluación.

Para realizar la valoración se ha tratado de realizar y adaptar el contenido de varias prácticas de la asignatura de Métodos y Herramientas de Diseño Electrónico y un diseño propio buscando comprobar que el funcionamiento es el adecuado. Como resultado de las numerosas pruebas realizadas con los tres programas se puede establecer la evaluación de la tabla 1. En esta tabla se compara Msim8 con Kicad, LTspice XVII y la combinación de ambos. La valoración podrá ser buena, mala o regular en función del desempeño del programa en relación con el aspecto tratado en la primera columna. Si se señala con una X el programa no cuenta con esa funcionalidad en concreto.

|  | Msim8   | Kicad   | LTspice XVII | Propuesta |
|--|---------|---------|--------------|-----------|
| Instalación  | Buena   | Buena   | Buena        | Buena     |
| Interfaz general   | Buena   | Regular | Buena        | Buena     |
| Diseño de esquemas (colocación y conexión de componentes)    | Buena   | Regular | Buena        | Buena     |
| Ajuste de valores de los componentes                         | Buena   | Regular | Buena        | Buena     |
| Librería de componentes                                      | Buena   | Buena   | Regular      | Regular   |
| Librería de modelos de SPICE                                 | Buena   | Mala    | Regular      | Regular   |
| Anotación de componentes (asignación de nombres por defecto) | Buena   | Regular | Buena        | Buena     |
| Identificación de componentes y redes                        | Buena   | Buena   | Buena        | Buena     |
| Edición de símbolos  | Buena   | Buena   | Buena        | Buena     |
| Adición de modelos de SPICE                                  | Regular | Regular | Buena        | Buena     |

|  |       |         |         |         |
|--|-------|---------|---------|---------|
| Vinculación de modelos de SPICE            | Buena | Buena   | Buena   | Buena   |
| Interfaz de simulación                     | Buena | Mala    | Buena   | Buena   |
| Simulación de dispositivos digitales       | Buena | Mala    | Regular | Regular |
| Análisis paramétrico                       | Buena | Regular | Buena   | Buena   |
| Posibilidad de representación de funciones | Buena | Mala    | Buena   | Buena   |
| Asignación de huellas                      | Buena | Buena   | X       | Buena   |
| Creación de huellas                        | Buena | Buena   | X       | Buena   |
| Interfaz de diseño de PCBs                 | Buena | Buena   | X       | Buena   |
| Gestor de capas para el diseño de placas   | Buena | Buena   | X       | Buena   |
| Herramientas de trazado inteligente        | Buena | Buena   | X       | Buena   |
| Autorrutado                                | Buena | X       | X       | X       |
| Comprobador de reglas de diseño            | Buena | Buena   | X       | Buena   |
| Generador de ficheros de fabricación       | Buena | Buena   | X       | Buena   |
| Visor de prototipos en 3D                  | X     | Buena   | X       | Buena   |
| Comprobador de ficheros Gerber             | X     | Buena   | X       | Buena   |
| Calculadora de dimensiones para la PCB     | X     | Buena   | X       | Buena   |

Tabla 1. Valoración de las herramientas.

Como se puede observar, la combinación de ambos programas supone una buena alternativa al uso de Microsim8, debido a que la mayor parte de problemas de KiCad se pueden ignorar si se emplea para la simulación LTspice.

Los problemas más destacables de KiCad están relacionados con su simulador, NGSpice, y nacen del hecho de que el programa no incluye modelos de SPICE, de la mayor parte de componentes y es relativamente complejo añadir estos modelos a la librería del programa.

Otro de los problemas de NGSpice aparece en la representación de gráficas. Esto se debe principalmente a que la ventana de gráficas carece de una interfaz intuitiva y que permita el fácil acceso de usuarios con poco conocimiento en el manejo de herramientas. A pesar de ello, proporciona herramientas interesantes como es la de ajuste, que proporciona la posibilidad de variar el valor de un componente pasivo, mediante una barra

deslizante y observar el cambio de las funciones representadas en la gráfica. Kicad en su estado de desarrollo actual está más enfocado en los aspectos relacionados con el diseño de la propia PCB.

Algo que caracteriza a Kicad es el problema de diseño de la interfaz que se produce debido a la repetición de numerosos iconos. lo que dificulta la comprensión del programa.

KiCad posee un potencial muy grande ya que la base sobre la que se está construyendo es sólida y cuenta con una comunidad importante, esto permite facilitar el acceso a la herramienta y a las distintas funcionalidades de ésta. Por otro lado, se debe decir que todos los problemas que se han citado en este trabajo pueden ser solucionados a lo largo del desarrollo del programa.

LTspice XVII, por otro lado, proporciona una herramienta bastante intuitiva para el diseño de esquemas, se trata de un programa sólido también en los aspectos relacionados con la simulación y posee una interfaz relativamente buena que facilita el aprendizaje del manejo del programa.

Una carencia de LTspice más significativa es la falta de modelos de determinados componentes ya que al tratarse de un programa creado y mantenido por una empresa cuya principal actividad es la venta de semiconductores, sólo cuenta en sus librerías con modelos de sus propios dispositivos. Este problema tiene solución debido a que el programa permite actualizar estas librerías de un modo relativamente simple que además es similar para otras herramientas de este tipo.

## **6. Comprobación de la funcionalidad de los programas.**

Para garantizar que los programas se adaptan a las funcionalidades que posee Msim8 se han realizado dos tipos de pruebas: una que hace uso de LTspice como herramienta de simulación y otra que emplea ambos programas para realizar un proyecto completo.

### **6.1- Desarrollo de simulaciones.**

Para realizar este apartado se ha tratado de realizar las tareas relacionadas con la simulación de circuitos, haciendo uso de LTspice. Con ello se busca garantizar que el programa permita realizar distintos tipos de análisis, proporcionando numerosas herramientas para la comprobación de circuito.

Los análisis que se comprobarán serán los siguientes:

- Análisis de barrido en continua.
- Análisis de barrido en alterna.
- Análisis transitorio.
- Análisis del punto de operación.
- Análisis paramétrico.

Este apartado busca comprobar la funcionalidad de LTspice como herramienta de simulación aplicada para la docencia que permita además el desarrollo de distintos tipos de análisis de un modo simple y accesible y abarque la simulación de circuitos digitales y analógicos.

Otro aspecto que se busca determinar con este apartado es si la interfaz gráfica, con la que cuenta el programa para la representación de variables posee funcionalidades de anotación que permitan al alumnado identificar o marcar puntos de interés, demostrando el aprendizaje obtenido y facilitando la interpretación de las gráficas.

#### **6.1-1. Análisis de barrido en continua.**

El análisis de barrido en continua permite analizar el comportamiento de un circuito, ante el cambio de la tensión o la corriente suministrado por una de las fuentes del circuito. Este tipo de análisis calcula el punto de operación del circuito considerando las bobinas como cortocircuitos y los condensadores como circuitos abiertos. El programa proporciona además la posibilidad de anidar las variaciones de hasta tres fuentes.

Este tipo de análisis proporciona numerosas funcionalidades que se pueden tratar en el ámbito académico. Entre ellas se pueden hallar las siguientes:

- Hallar las curvas características de los componentes:
  - o Curvas características de un diodo.
  - o Curvas características de un transistor.
- Obtener la relación entre la salida de un transductor (en tensión o corriente) y la salida del circuito.

En los siguientes subapartados se van a mostrar algunas de estas aplicaciones.

### 6.1-1.1. Curva característica de un diodo.

Para obtener la función  $I_D = f(V_D)$  siendo  $I_D$  la corriente que pasa por el diodo y  $V_D$  la tensión entre sus extremos se realizará un análisis sobre el circuito de la figura 5.

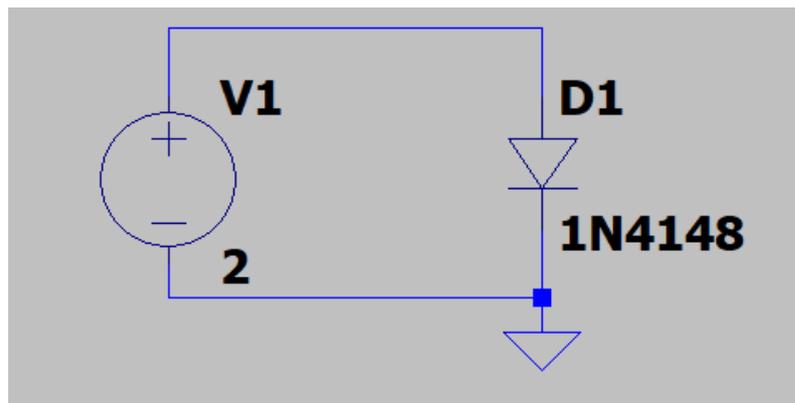


Figura 5. Circuito para obtener la curva característica del diodo.

En este caso, se obtendrá la curva característica del diodo 1N4148. Para realizar el circuito, es necesario emplear una fuente de tensión y el diodo citado anteriormente. Para obtener la representación de la corriente, en función de la tensión entre los dos terminales del componente, es necesario realizar un análisis de barrido.

Mediante la configuración adecuada de las opciones de análisis se debe conseguir cambiar los valores de la fuente de tensión V1, por una fuente cuyo valor puede variar entre 0V y 2.5V con un incremento de 0.01V. La ventana de configuración de este tipo de análisis es la que se puede ver en la figura 6.

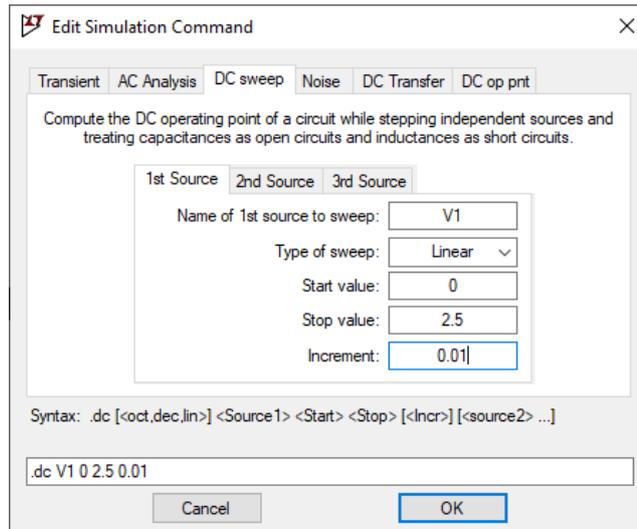


Figura 6. Configuración de barrido en continua.

Cuando haya finalizado la simulación se abre una ventana que permite observar representaciones gráficas. Como lo que se desea obtener es la característica del diodo ( $I_D = f(V_D)$ ) de distintas variables que ha calculado el programa se seleccionará  $I_D$ . El resultado obtenido tendrá el aspecto de la figura 7.

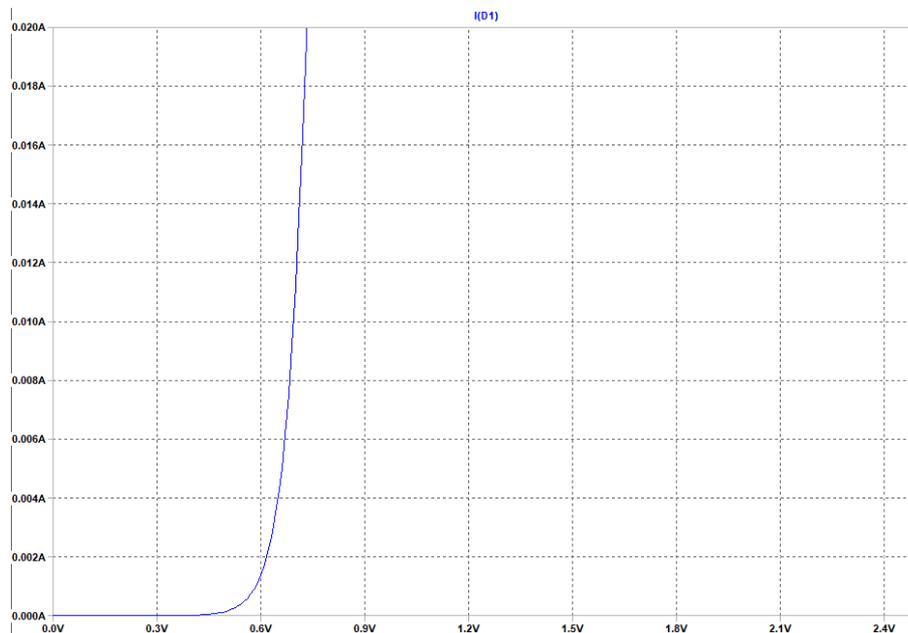


Figura 7. Curva característica diodo ampliada.

### 6.1-1.2. Curvas características de un transistor bipolar.

Para obtener las curvas características de un transistor haciendo uso de LTspice se puede emplear la herramienta de barrido en continua anidado. Para el análisis de un transistor se debe emplear un circuito como el de la figura 8. En este caso el transistor cuya curva característica se desea hallar será el 2N2222.

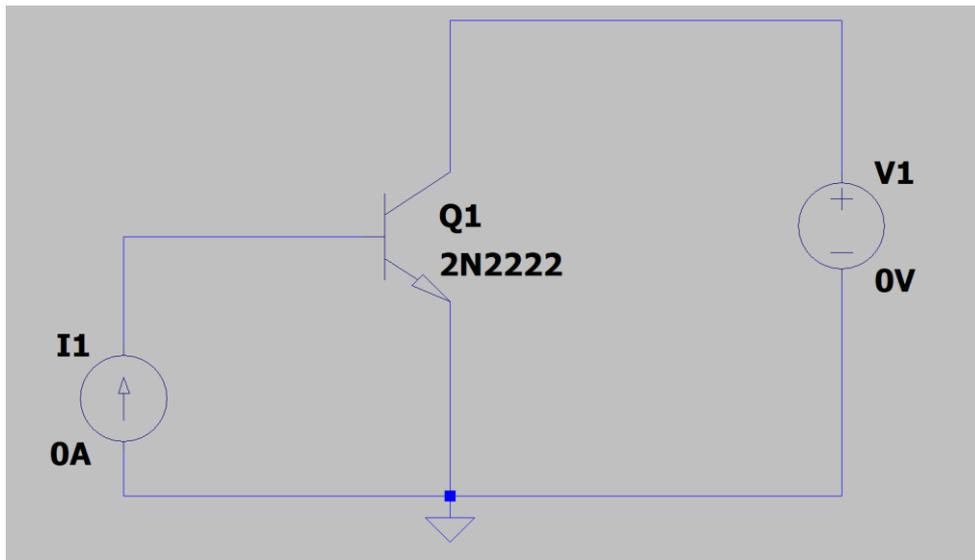


Figura 8. Circuito curvas características transistor.

Para obtener las curvas características del transistor es necesario realizar un barrido en continua tanto de la corriente de la base ( $I_B$ ) como la tensión entre colector y emisor ( $V_{CE}$ ). La simulación deberá configurarse del modo que puede verse en la figura 9.

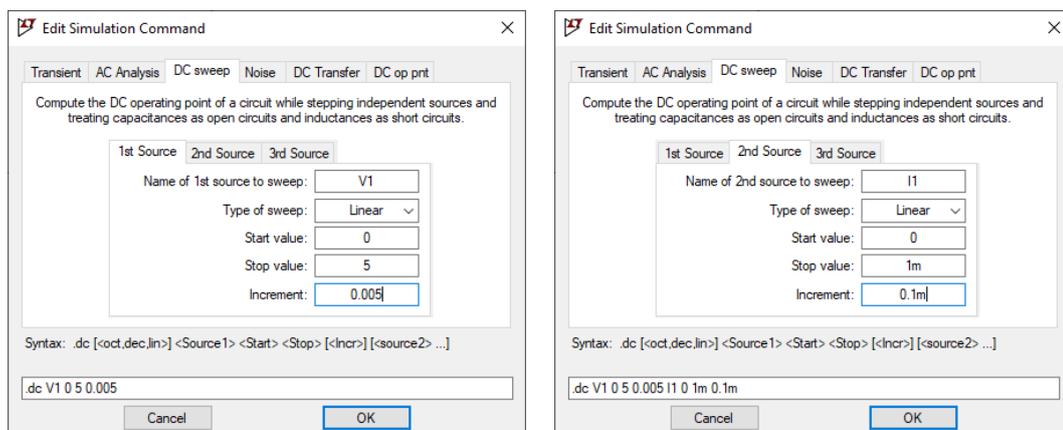


Figura 9. Configuración análisis DC anidado.

El resultado obtenido a partir de la simulación es el que se puede ver en la figura 10.

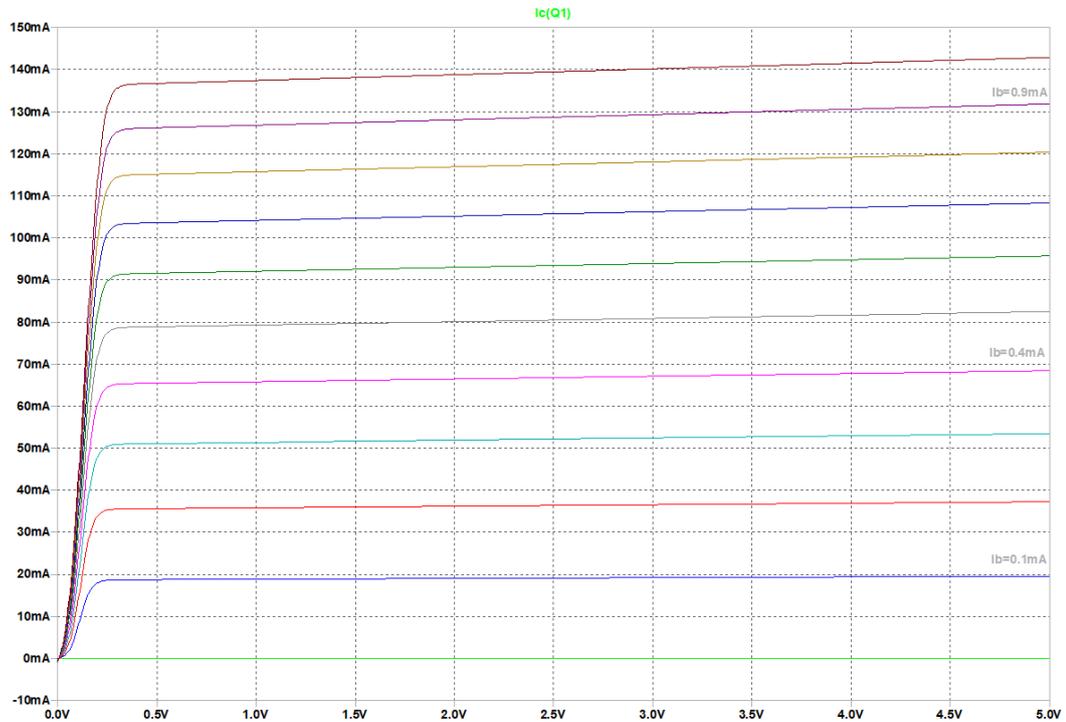


Figura 10. Curvas características transistor.

### 6.1-2. Análisis transitorio.

El análisis transitorio realiza una simulación no lineal del circuito que además depende del tiempo. Este tipo de análisis permite el estudio de la evolución de un circuito en función del tiempo.

Este análisis es uno de los que permite una mayor variedad de simulaciones. Entre estas se puede encontrar los ejemplos que se ven a continuación:

- Análisis de transitorios en continua.
- Respuesta de circuitos ante señales dependientes del tiempo.
- Comportamiento de circuitos alimentados con corriente alterna.
- Simulación de circuitos digitales.
- Estudio de circuitos amplificadores y filtros.

La configuración de este análisis permite seleccionar distintos parámetros que pueden resultar de interés para la posterior interpretación de las gráficas obtenidas. Los parámetros que se desea destacar son los que se pueden ver a continuación:

- Tiempo de parada (instante en el que se detiene el cálculo).
- Tiempo para comenzar a almacenar datos (permite evitar que se almacenen datos de la respuesta transitoria si la información de interés se halla en la parte estacionaria de esta).
- Máximo intervalo temporal entre los distintos cálculos (permite obtener mayor número de datos a cambio de tiempo de simulación).
- Iniciar las fuentes de tensión externas en cero (permite tener en cuenta la carga de condensadores y el efecto transitorio de las inductancias).
- Detener la simulación si se detecta un estacionario.

Ejemplos de este tipo de análisis que se han considerado de interés se pueden ver en los apartados siguientes.

### 6.1-2.1. Comportamiento de circuitos alimentados con alterna.

En este caso, se va a emplear el análisis transitorio para comprobar el funcionamiento de un transformador. El circuito que se va a simular se puede observar en la figura 11. En la figura 12 se puede ver la configuración del análisis.

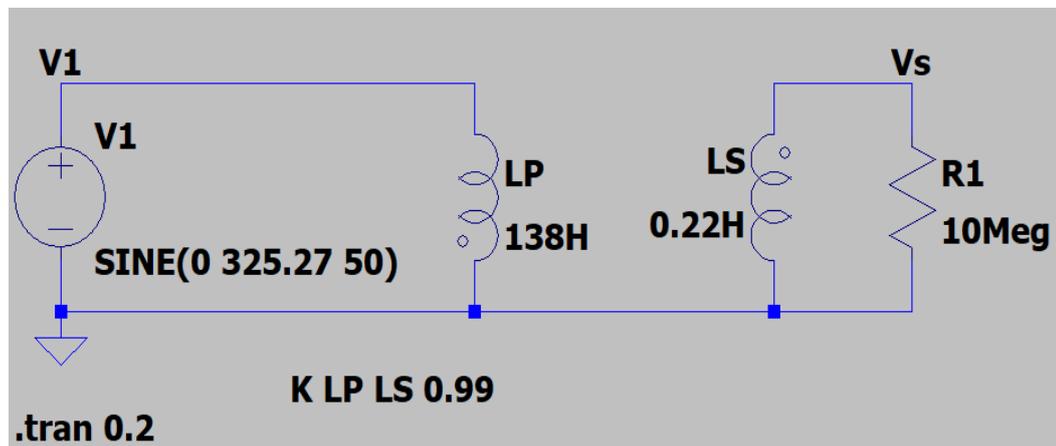


Figura 11. Circuito con transformador de alterna.

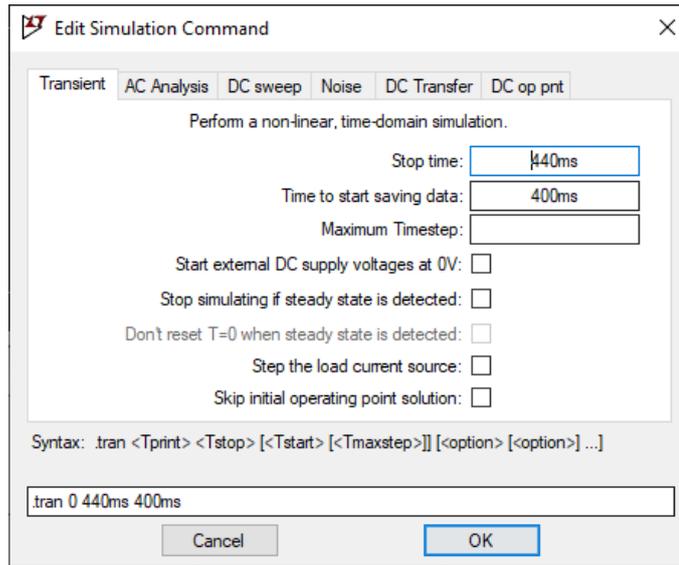


Figura 12. Prácticas, configuración análisis transitorio.

En la simulación se representa la tensión del primario ( $V_{red}$ ) y la tensión del secundario ( $V_{i+}$ ). El resultado de la simulación es el que se puede observar en la figura 13. Como se puede ver, se obtiene como resultado la salida del circuito dependiente del tiempo cuyo comportamiento depende del valor instantáneo de la fuente de tensión de alterna.

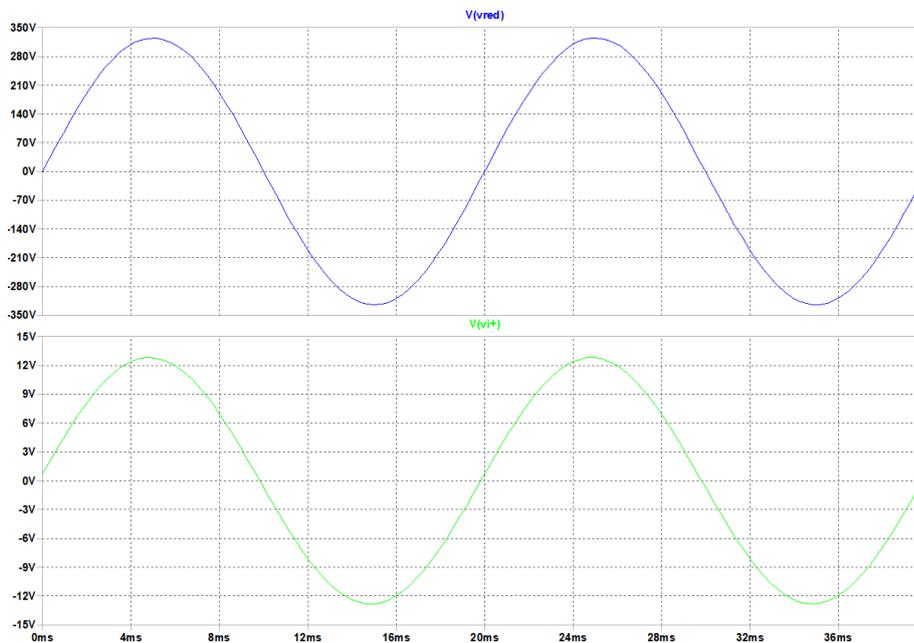


Figura 13. Simulación transformador en vacío

### 6.1-2.2. Comprobación de fuente de alimentación.

Otro ejemplo de la utilidad de este análisis es, por ejemplo, el estudio de fuentes de alimentación. En este caso la fuente de alimentación consiste en un rectificador que hace uso de un condensador para filtrar la señal rectificada. El circuito es el que se puede ver en la figura 14.

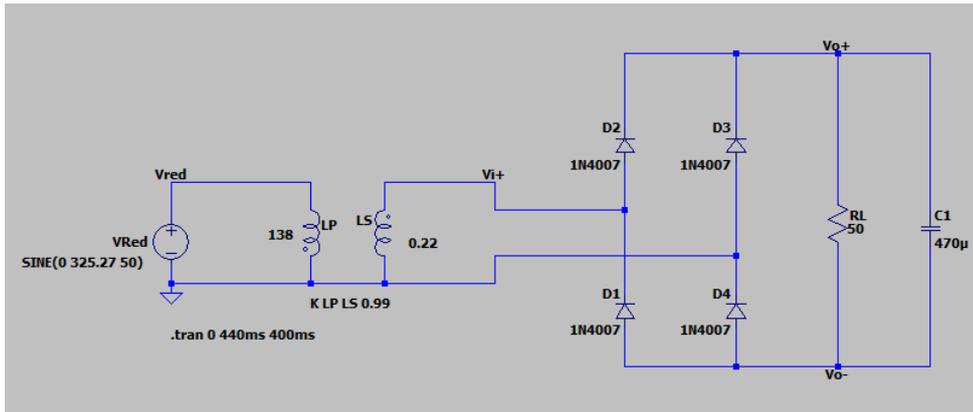


Figura 14. Circuito rectificador con condensador de filtrado.

El resultado obtenido de la simulación (figura 15) permite ver cómo afecta el condensador a la tensión de salida  $V(V_o+, V_o-)$  y, compararlo con la salida del rectificador si se considera la salida del circuito sin este condensador (figura 16).

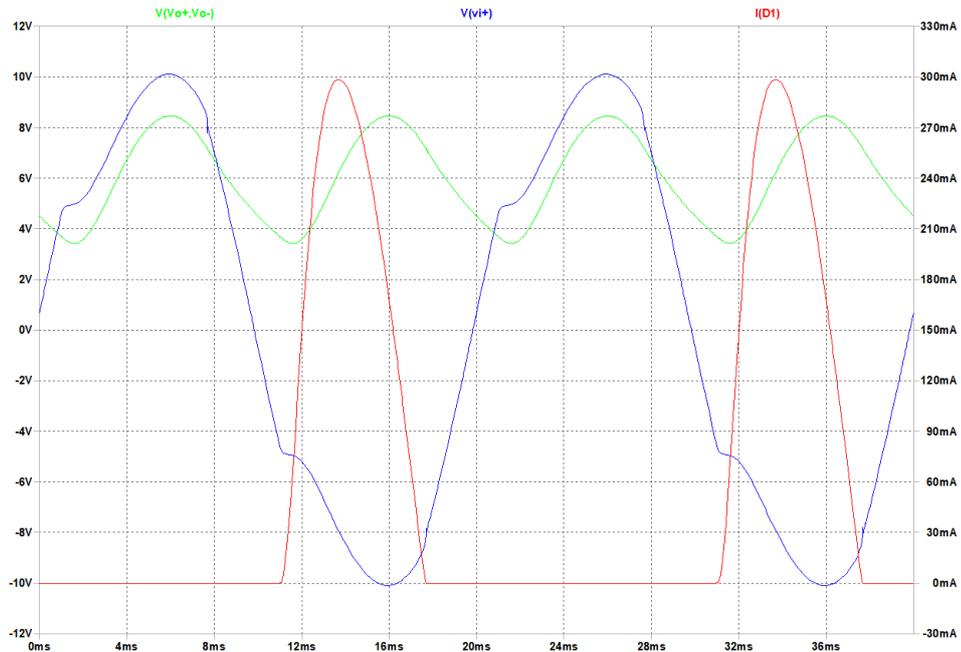


Figura 15. Gráfica del rectificador con condensador de filtrado.

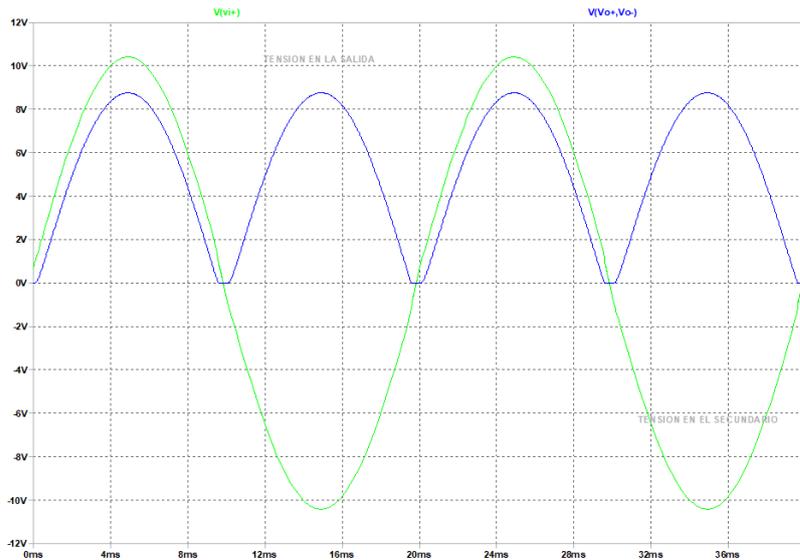


Figura 16. Gráfica del rectificador sin condensador de filtrado.

### 6.1-2.3. Obtención de la curva característica de un comparador.

Para este ejemplo se va a emplear el circuito de la figura 17 que consiste en un comparador con histéresis. En este caso, el comportamiento del circuito sólo es dependiente del tiempo debido a una tensión senoidal aplicada en la entrada negativa del amplificador operacional. Esto permite obtener la gráfica de la figura 18.

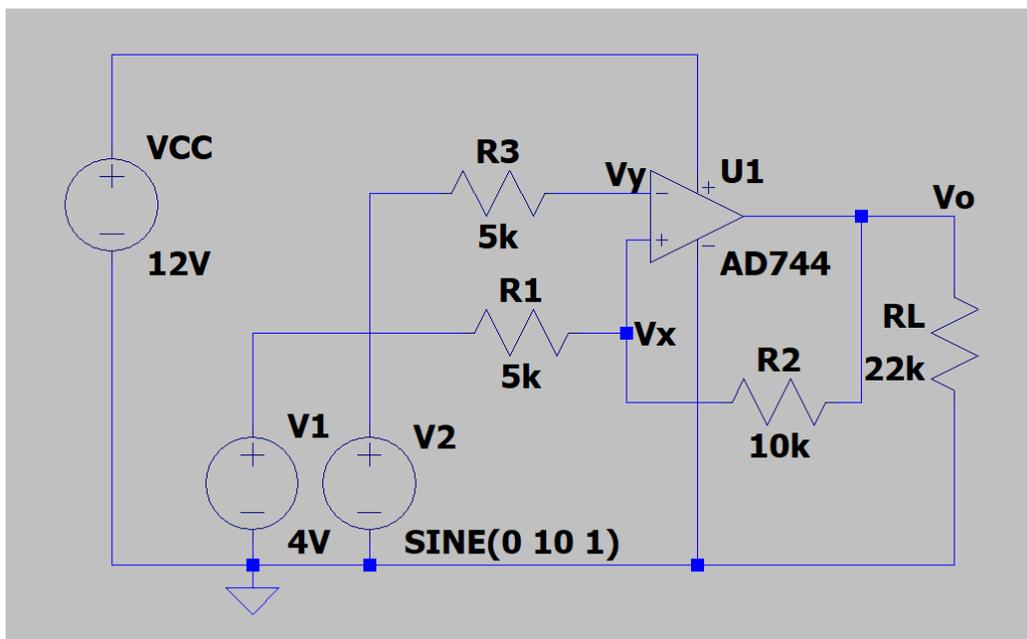


Figura 17. Prácticas, circuito cambio de variable del eje X

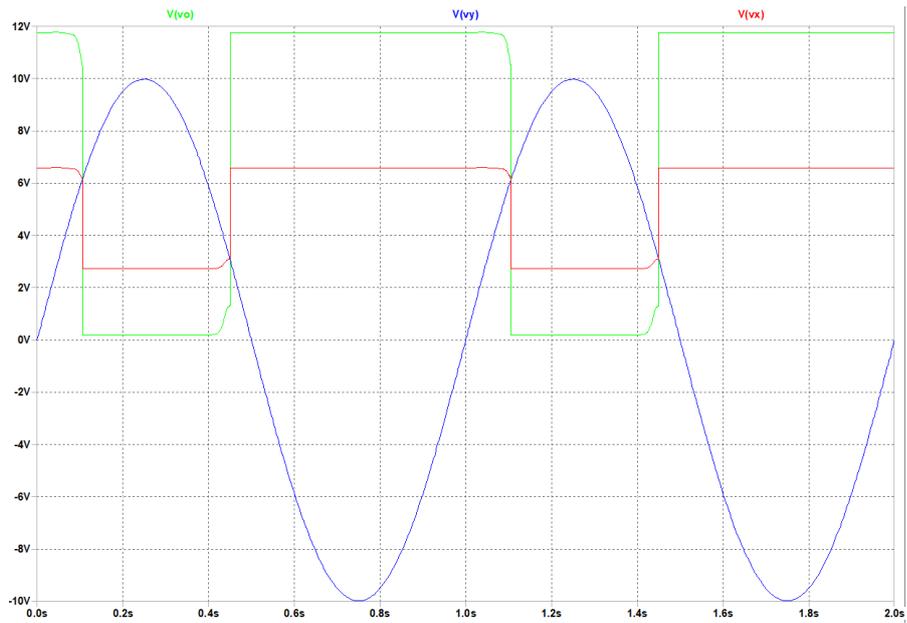


Figura 18. Prácticas, gráfica circuito cambio de variable del eje X

Como se puede ver en la gráfica, se obtiene una señal de salida ( $V(V_o)$ ) dependiente del tiempo. Como se desea obtener la curva característica del circuito, será necesario representar la variación de la salida con respecto a la variable de entrada. Si se establece como variable del eje X la tensión variable en la entrada se consigue la figura 19 que se corresponde con la curva característica del comparador.

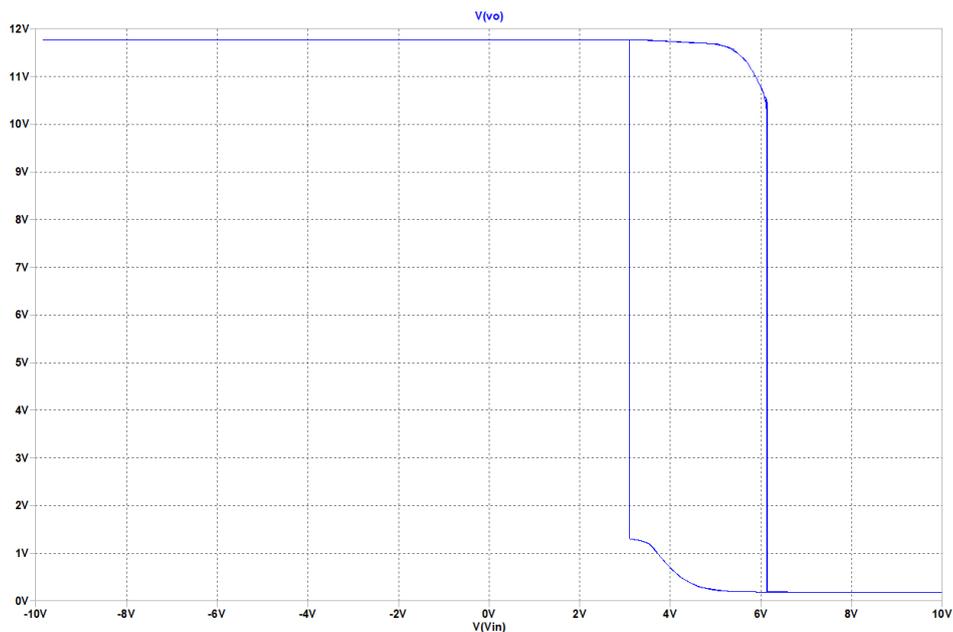


Figura 19. Curva característica comparador con histéresis

#### 6.1-2.4. Obtención del transitorio de un circuito.

Para comprobar que se puede simular un transitorio se ha empleado un circuito muy simple que se puede ver en la figura 20.

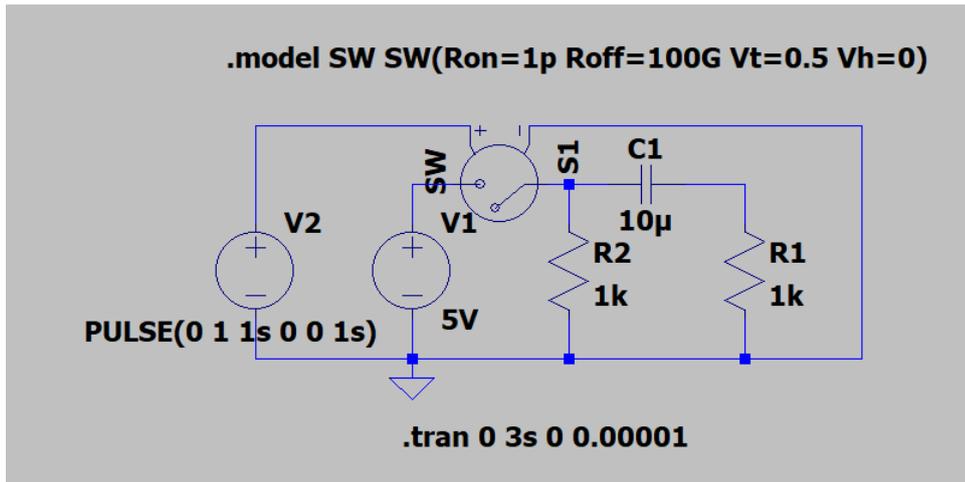


Figura 20. Circuito simple transitorio

A partir de este circuito se tratará de observar la carga y la descarga del condensador C1. Si se mide la tensión entre los dos terminales del condensador se obtiene la gráfica de la figura 21.

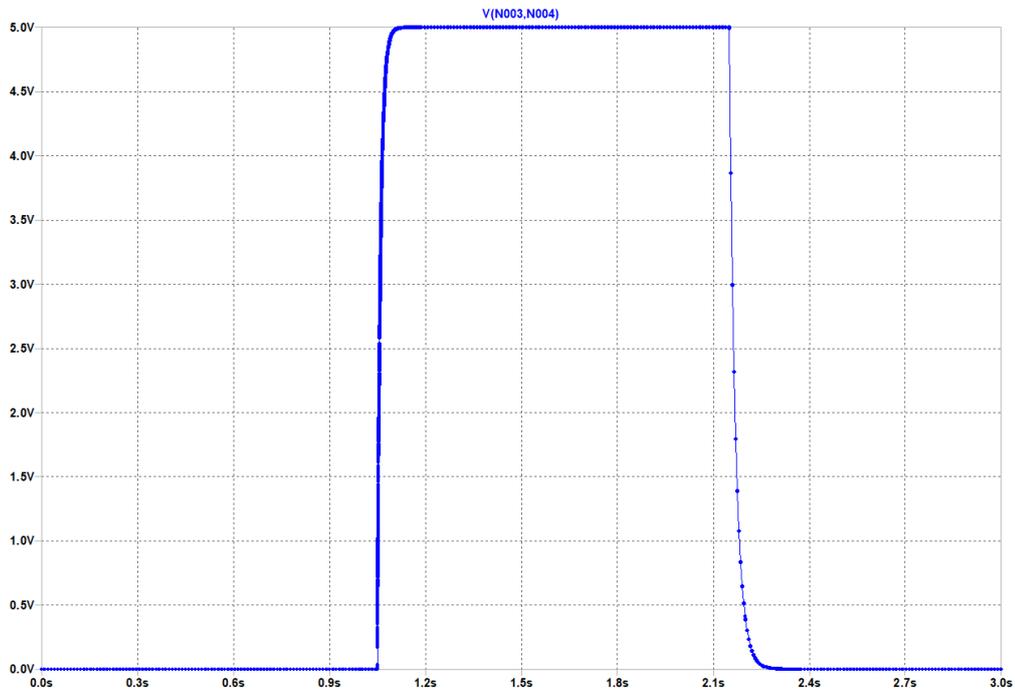


Figura 21. Curva de carga y descarga de un condensador.

6.1-2.5. Simulación de componentes digitales.

Otro tipo de simulación que permite el análisis transitorio es el análisis de circuitos digitales. El circuito simulado consiste únicamente en una puerta AND con dos entradas. Este circuito se puede observar en el esquema de la figura 22.

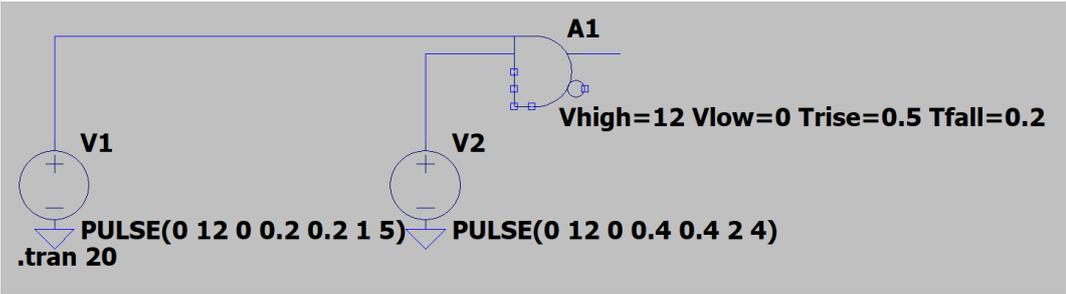


Figura 22. Circuito puerta AND

El resultado de esta simulación se puede ver en la figura 23, con esta gráfica se puede ver que el comportamiento de la puerta AND es el esperado.

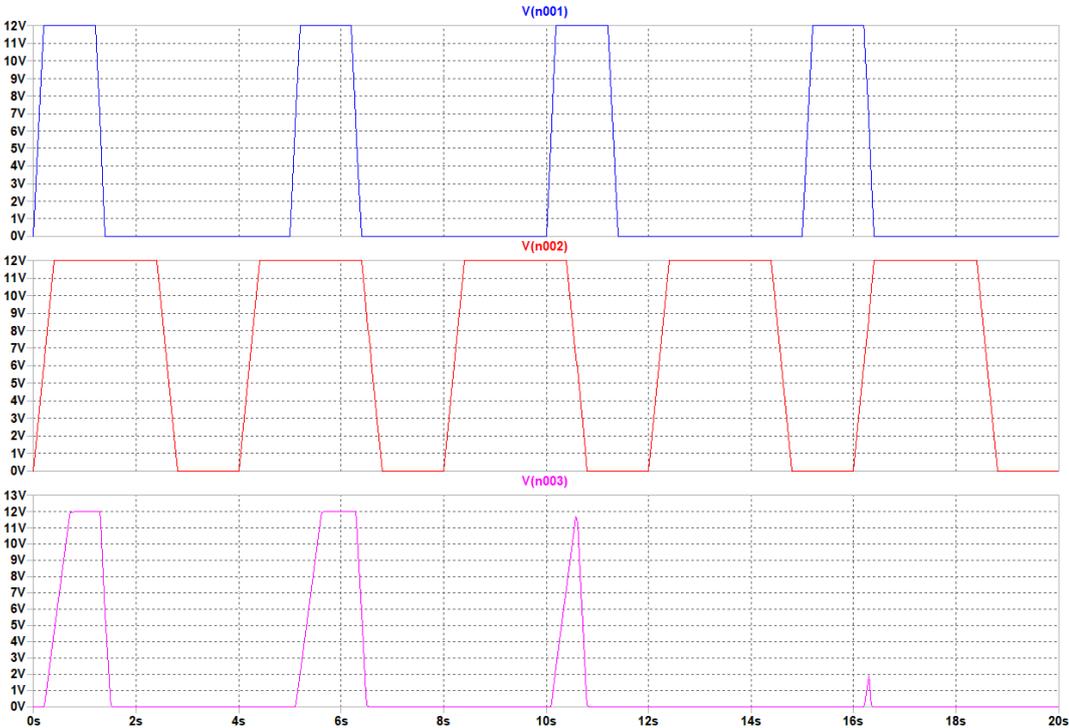


Figura 23. Simulación puerta AND

### 6.1-3. Análisis de barrido en alterna.

El análisis de barrido en alterna permite realizar un análisis en corriente alterna de pequeña señal. Este análisis se realiza en torno al punto de trabajo y linealizando el circuito. Sus aplicaciones se enfocan en obtener los diagramas de fase y de bode. Algunas de sus aplicaciones son las siguientes:

- Obtención de los diagramas de fase y de bode de circuitos amplificadores.
- Obtención de los diagramas de fase y de bode de filtros.

En los apartados siguientes se pueden ver ejemplos aplicados de este tipo de análisis.

#### 6.1-3.1. *Análisis en frecuencia de un filtro pasa bajo.*

El circuito simulado en este caso se corresponde con un filtro de paso bajo que hace uso de un amplificador operacional (figura 24). La señal que se desea filtrar se obtiene mediante la fuente de tensión de “VS”.

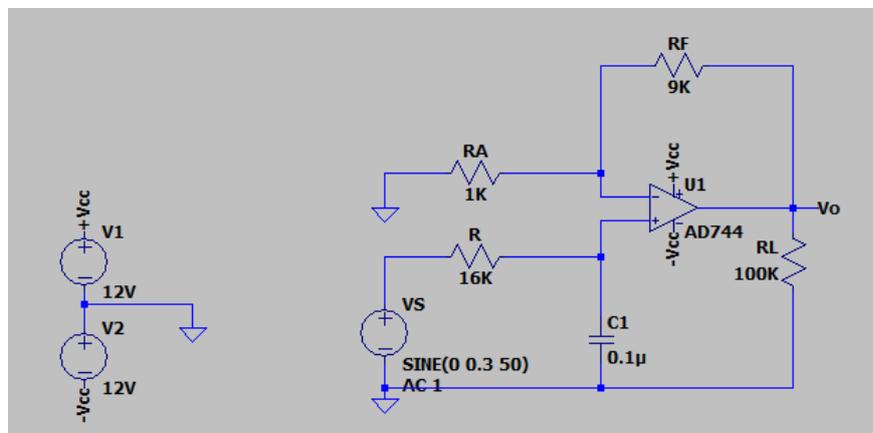


Figura 24. Prácticas, circuito análisis en frecuencia.

Con el circuito realizado se debe configurar específicamente la fuente cuya frecuencia se desea variar, estableciendo que se va a emplear para análisis de alterna en pequeña señal. Tras ello será necesario configurar el análisis. Esta simulación solo permite establecer el tipo de barrido que se desea realizar, los puntos que se desean tomar dentro de cada intervalo y las frecuencias de inicio y finalización de la simulación. La configuración de este análisis se puede ver en la figura 25.

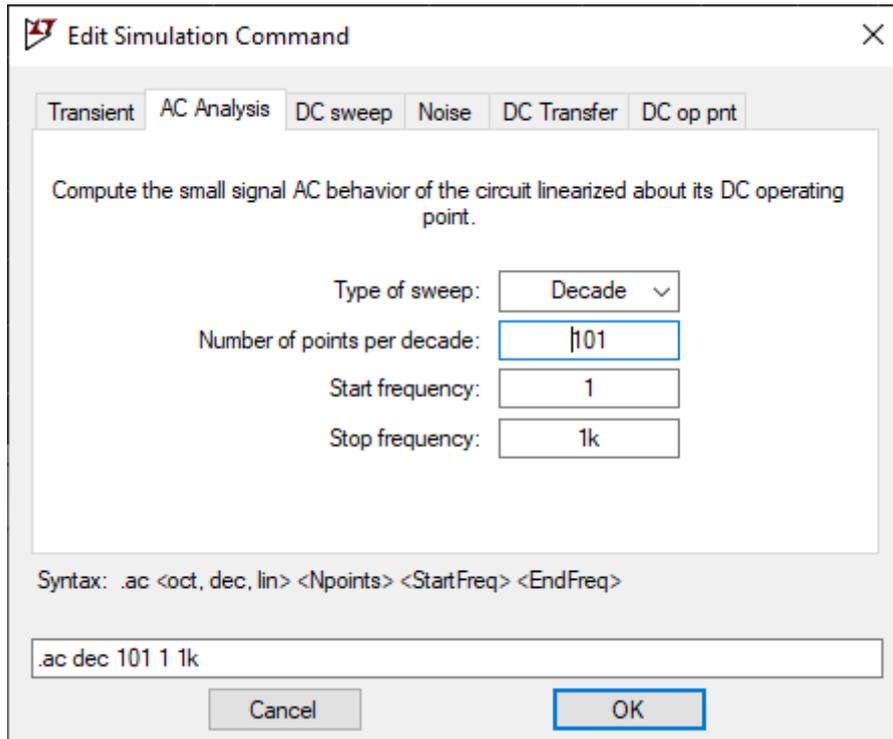


Figura 25. Prácticas, configuración análisis en frecuencia

Una vez realizada la simulación si se representa el diagrama de bode de la salida de la señal de salida ( $V_o$ ) se obtiene la gráfica de la figura 26 en la que se puede ver cómo el filtro atenúa las frecuencias a partir de los 100 Hz. (El diagrama de bode está representado con la línea más gruesa, mientras que el de fase con la línea más estrecha).

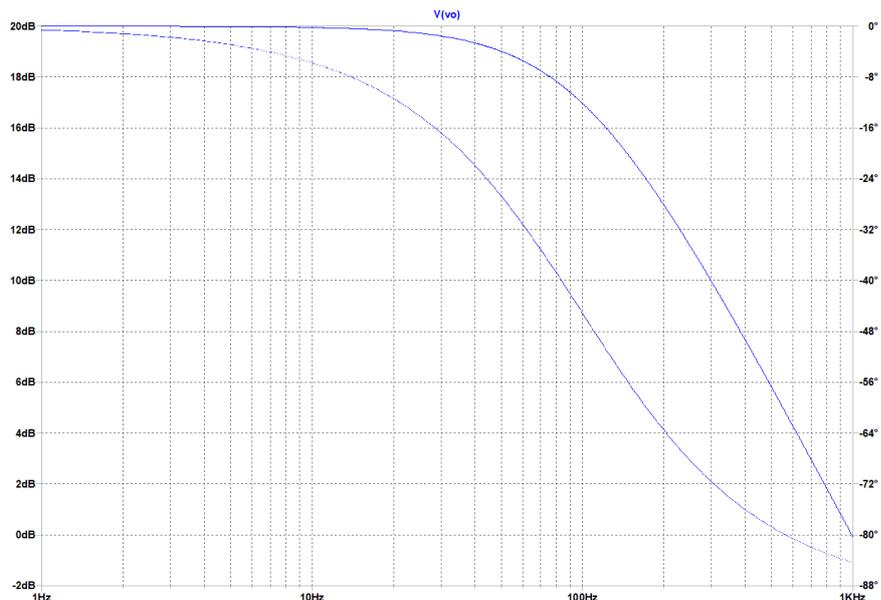


Figura 26. Prácticas, diagrama de bode circuito análisis en frecuencia.

### 6.1-3.2. Análisis en frecuencia de un amplificador.

Otra de las aplicaciones de este tipo de análisis es la obtención de la característica de ganancia de un amplificador. En este caso el circuito que se va a simular es un amplificador de una sola etapa con salida en colector común (figura 27).

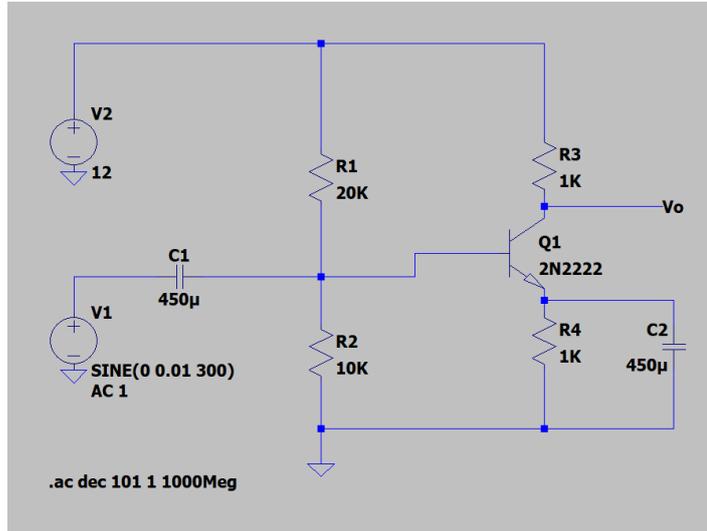


Figura 27. Amplificador de una etapa

Como se puede ver en la figura 28 este tipo de análisis permite obtener el diagrama de bode del amplificador.

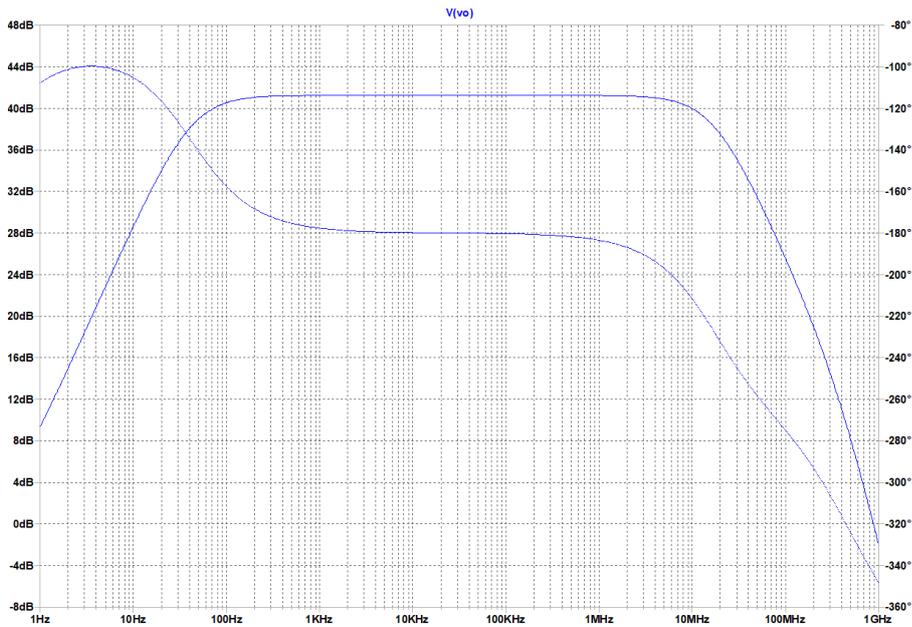


Figura 28. Diagrama de bode amplificador de una etapa.

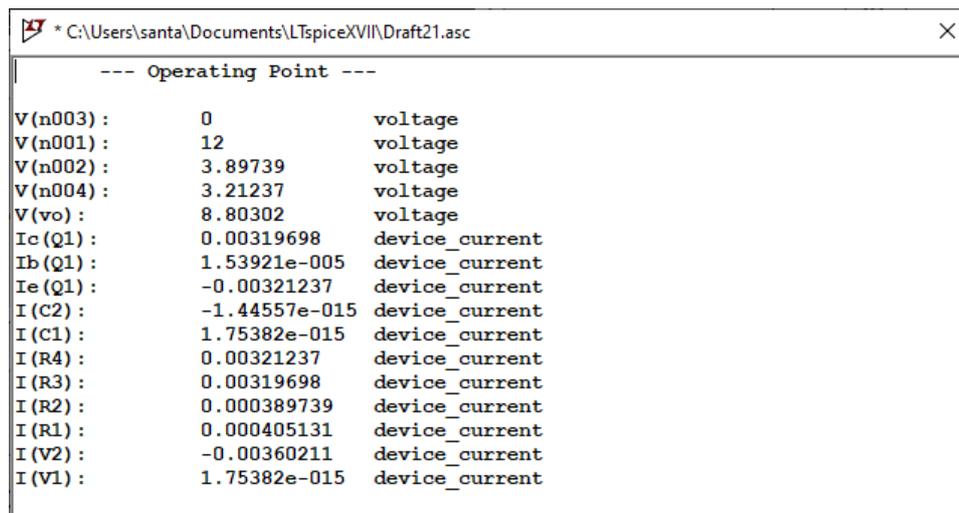
#### 6.1-4. Análisis en el punto de operación.

El análisis de punto de operación es uno de los más simples que proporciona LTspice, se encarga de calcular las tensiones en todos los nodos del circuito y la corriente a través de todos los componentes del circuito tomando los condensadores como circuitos abiertos y las inductancias como cortocircuitos.

Este tipo de análisis no es muy versátil, pero se puede emplear por ejemplo para obtener el punto de polarización de un circuito como por ejemplo el de un amplificador.

##### 6.1-4.1. *Obtención del punto de polarización de un amplificador.*

Si se emplea el circuito de la figura 27 y se realiza un análisis de este tipo se obtiene como punto de trabajo el que se puede ver en la figura 29.



```
--- Operating Point ---
V(n003):      0          voltage
V(n001):     12          voltage
V(n002):    3.89739     voltage
V(n004):    3.21237     voltage
V(vo):       8.80302     voltage
Ic(Q1):      0.00319698  device_current
Ib(Q1):      1.53921e-005 device_current
Ie(Q1):     -0.00321237  device_current
I(C2):      -1.44557e-015 device_current
I(C1):      1.75382e-015  device_current
I(R4):       0.00321237   device_current
I(R3):       0.00319698   device_current
I(R2):       0.000389739  device_current
I(R1):       0.000405131  device_current
I(V2):      -0.00360211   device_current
I(V1):       1.75382e-015  device_current
```

Figura 29. Resultado simulación de punto de operación.

#### 6.1-5. Análisis paramétrico.

Este tipo de análisis permite comprobar cómo afecta la variación del valor de un parámetro de un componente del circuito a una simulación concreta.

Se trata de un tipo de análisis que resulta muy útil pero su configuración es algo más compleja ya que se debe hacer uso de directivas de Spice. Algunas de sus aplicaciones son las siguientes:

- Seleccionar el componente ideal a partir de una serie de valores.

- Realizar análisis a diferentes temperaturas.
- Obtener la respuesta del circuito ante distintas frecuencias.

Algunos ejemplos de aplicación de este tipo de análisis se pueden ver en los subapartados siguientes.

### 6.1-5.1. Variación del punto de funcionamiento de un diodo en función de la temperatura.

Empleando el circuito de la figura 5 y combinando el análisis de barrido en continua y el análisis paramétrico es posible obtener la curva característica del diodo para determinadas temperaturas. Para ello, el programa requiere que se le indique la variación que deberá tener el parámetro interno “Temp” que por defecto se halla a 27°C. Esta variación se deberá realizar haciendo uso de directivas de Spice como la siguiente: **“.step temp list 0 25 50 75 100”** (Se indica en una lista los valores que debe tomar la temperatura).

Al efectuar la simulación e incluyendo la recta de carga del circuito se obtiene la gráfica de la figura 30. En la que se puede ver el desplazamiento de la curva característica del diodo al variar la temperatura.

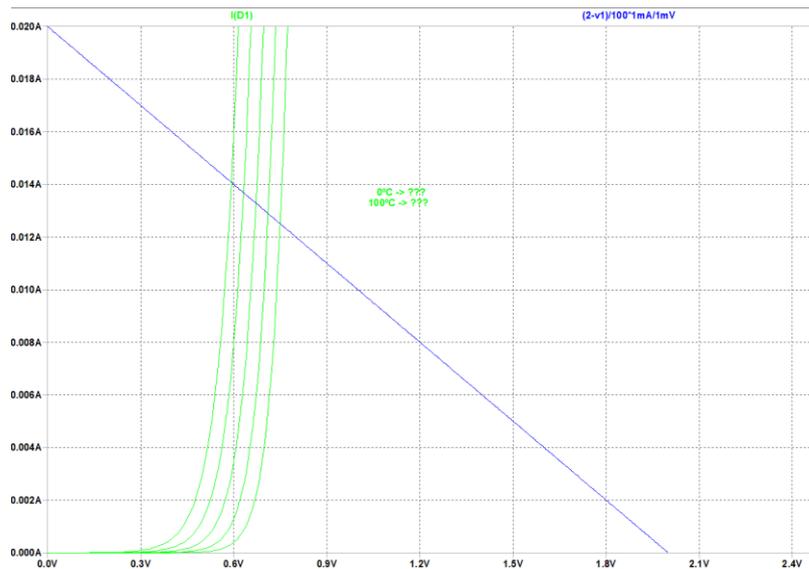


Figura 30. Variación curva de diodo con la temperatura.

### 6.1-5.2. Comparación de la salida del filtro pasa bajo.

Para realizar esta simulación se ha empleado el circuito de la figura 24. A partir de éste se ha realizado un análisis transitorio y simultáneamente un análisis paramétrico variando las frecuencias de la fuente “Vs” estableciendo el valor de ésta en los siguientes valores: 50, 100, 200, 500 y 1000Hz.

El resultado obtenido se puede ver en la figura 31. Podemos observar cómo se van atenuando las señales de salida a medida que aumenta la frecuencia. También puede apreciarse la variación de la fase.

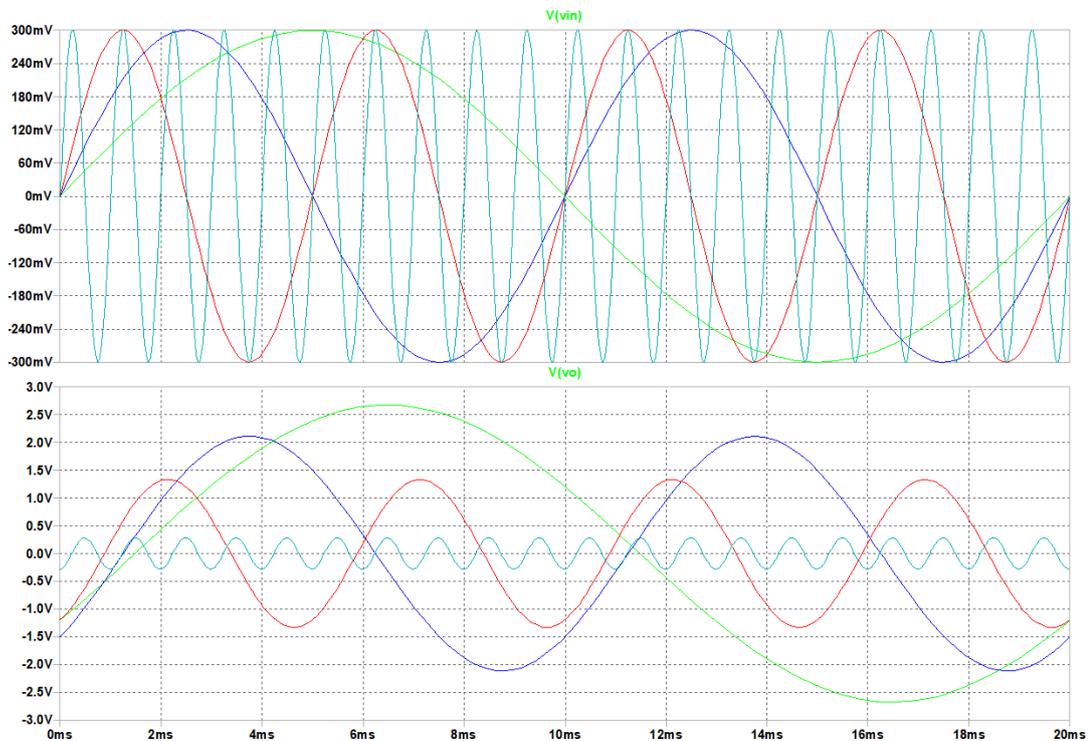


Figura 31. Salida del filtro paso bajo para distintas frecuencias.

### 6.1-5.3. Comprobación del efecto de un condensador de filtrado.

Otra de las aplicaciones que puede tener el uso del análisis paramétrico es el ajuste de los valores de alguno de los componentes del circuito, en este caso, de un condensador.

Para este caso, veremos cómo afecta la variación de la capacidad del condensador de filtrado, cuanto mayor sea la capacidad  $C$ , la descarga se efectuará más lentamente y el valor medio de la onda se acerca más al valor máximo posible. A cambio de esto aumentará la corriente máxima a través de los diodos. El esquema para la simulación queda como en la figura 32.

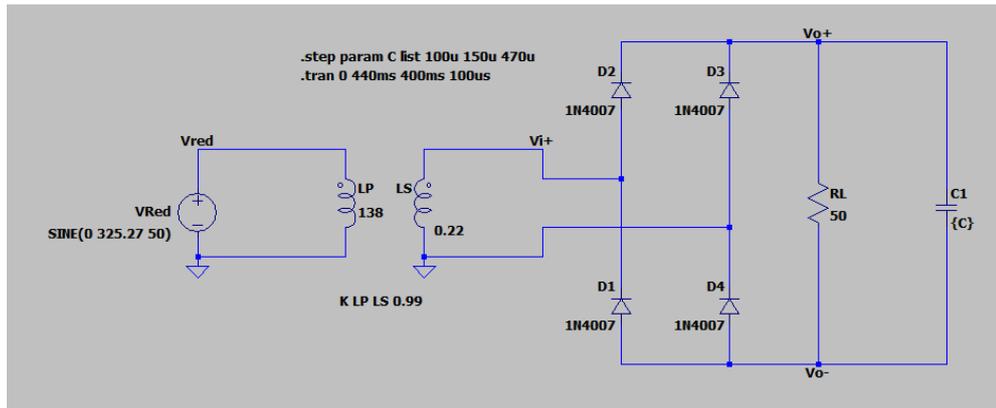


Figura 32. Rectificador con aislamiento galvánico y condensador

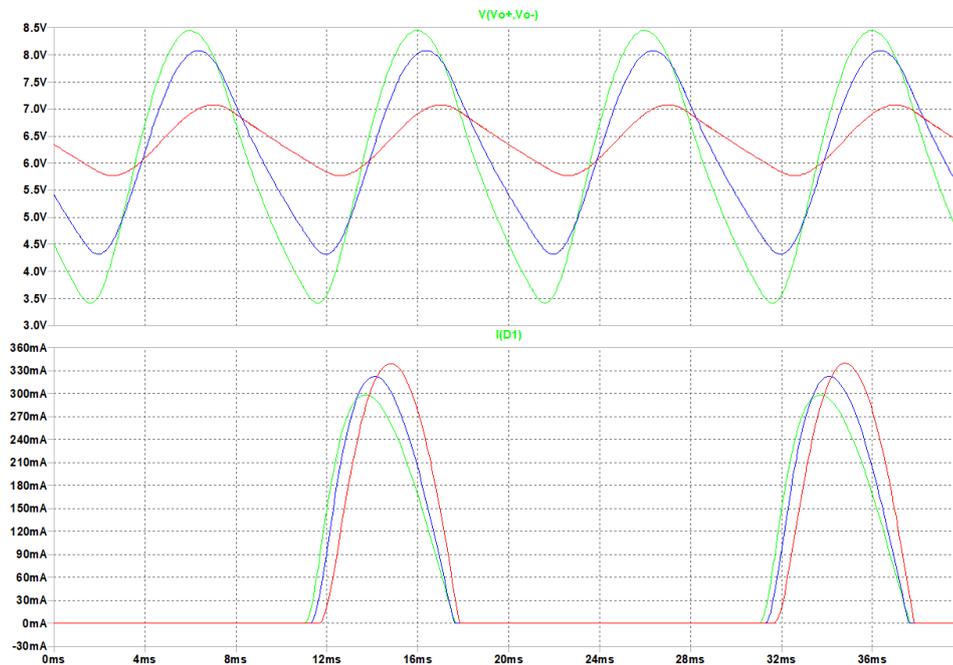


Figura 33. Gráfica rectificador análisis paramétrico

Como se puede ver en la figura 33, el rizado se reduce a medida que aumenta la capacidad del condensador, a cambio, aumenta la corriente máxima que circula por el diodo.

#### 6.1-6. Otros aspectos de la simulación empleados.

Algunos de los aspectos extra que se han tratado de usar han sido las siguientes:

- Representación de funciones dependientes de variables de simulación.

- Obtención de valores medios en simulaciones transitorias.
- Indicación de valores sobre las gráficas.
- Marcadores dentro de la gráfica para obtener el valor del punto de la gráfica.

Estas funcionalidades buscan facilitar la comprensión posterior de las gráficas y la redacción de informes que demuestren el conocimiento adquirido en la comprensión de este tipo de análisis.

### 6.1-6.1. Recta de carga y punto de funcionamiento del circuito.

Si se representa la característica del diodo 1N4148 (figura 5) junto con la recta de carga del circuito de la figura 34 se puede hallar el punto de funcionamiento del circuito empleando para ello el punto en el que se cortan ambas gráficas. Para obtenerlo, por lo tanto, será necesario poder representar funciones en la gráfica.

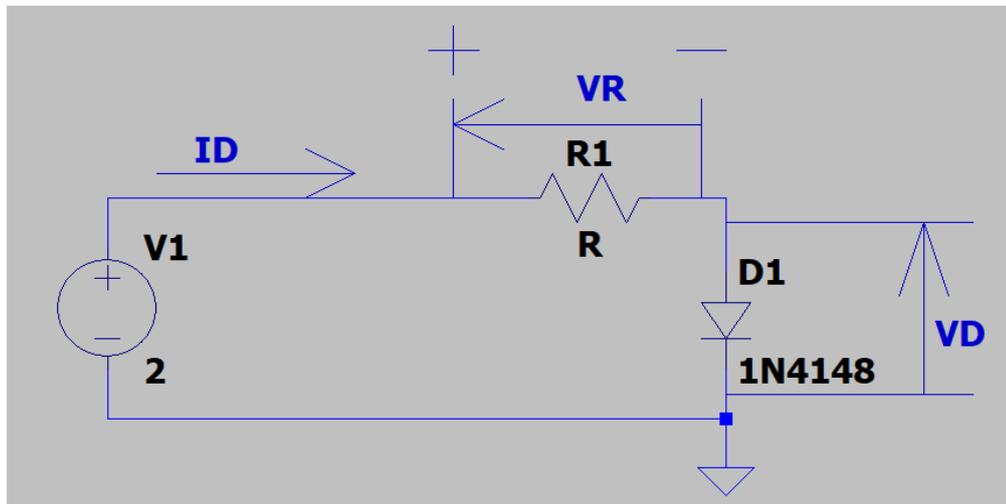


Figura 34. Circuito de recta de carga.

La ecuación de la recta de carga es:

$$V_{CC} = V_R + V_D = I_D * R + V_D \text{ y, por tanto, } I_D = \frac{V_{CC} - V_D}{R}$$

$$I_D = f(V_D) \text{ con } V_{CC} = 2V \text{ y } R = 100 \text{ ohm.}$$

Para obtener la representación de esta recta de carga, en la misma gráfica que la curva característica del diodo, se seleccionará la opción “Add trace” y se escribirá:

$$(2-v1)/100*1\text{mA}/1\text{mV}$$

La intersección de la recta de carga con la curva característica del diodo es el punto de funcionamiento del circuito (figura 35). Este punto de funcionamiento se puede indicar haciendo uso de la herramienta “marcadores” que posee la interfaz de gráficas. Esta herramienta se puede ver en la imagen. Para obtener la herramienta de marcadores sólo es necesario pulsar sobre el nombre de la variable representada y posteriormente arrastrarlo al punto deseado de la gráfica.

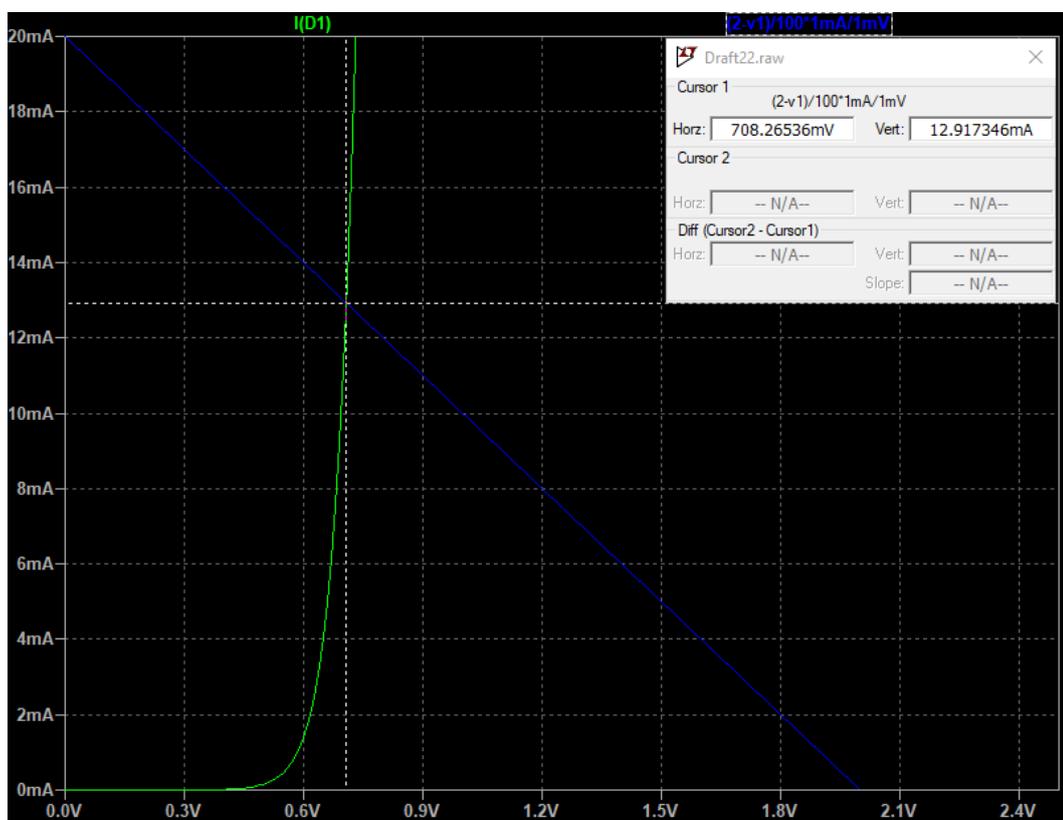


Figura 35. Recta de carga circuito con diodo.

### 6.1-7. Observaciones.

Como se ha podido observar a lo largo de este apartado la versatilidad de las simulaciones de LTspice es amplia, permitiendo numerosos tipos de análisis que, además, pueden tener amplia utilidad para labores académicas.

A la hora de la realización de las simulaciones se han podido observar algunos problemas, el más destacable, la falta de modelos de simulación. A

pesar de ello, se ha podido conseguir incrementar la cantidad de estos modelos aumentando el tamaño de las librerías que posee el programa.

Las herramientas de anotación e indicación que se pueden emplear tanto en el esquema como en las gráficas aportan, además, una mayor facilidad de lectura y de obtención de resultados permitiendo como resultado extra un sistema para evaluar el aprendizaje por parte de los alumnos.

## **6.2- Desarrollo de un proyecto completo.**

En este apartado se va a tratar de realizar un proyecto completo haciendo uso de las herramientas que proporcionan ambos programas y que trate de emular aquellos que podría realizar el alumnado. El proyecto que se va a realizar es un interruptor crepuscular.

Para esto habrá que tener en cuenta que los programas proporcionen información suficiente que permita comprobar el funcionamiento del circuito, requiriendo distintos tipos de simulaciones y que, una vez comprobado el funcionamiento del circuito, permita crear la PCB y generar todos los ficheros de fabricación requeridos (fotolitos, lista de materiales, ...).

Normalmente, para un circuito de este tipo sería necesario que el alumnado creara una memoria. Ésta contendría los cálculos realizados para el dimensionamiento de éste, posteriormente se crearía el esquema y se simularía el circuito para comprobar que los valores se han calculado correctamente y, tras ello, se pasaría al apartado de la fabricación.

Se puede dividir el proceso de diseño en dos partes en función de los programas empleados y las labores realizadas en cada uno de ellos: diseño de esquemas y simulación por un lado y, por otro lado, la asignación de huellas y la creación de la PCB. No se entrará en los aspectos más relacionados con la simulación ya que han sido tratados en el apartado anterior. En este caso resulta más interesante centrarnos en los aspectos relacionados con la fabricación.

### **6.2-1. Esquema y simulación.**

En primer lugar, habrá que comenzar dividiendo el circuito en distintas partes para simularlo por partes y simplificar el problema. En este caso será recomendable dividirlo en tres partes: alimentación, control y carga.

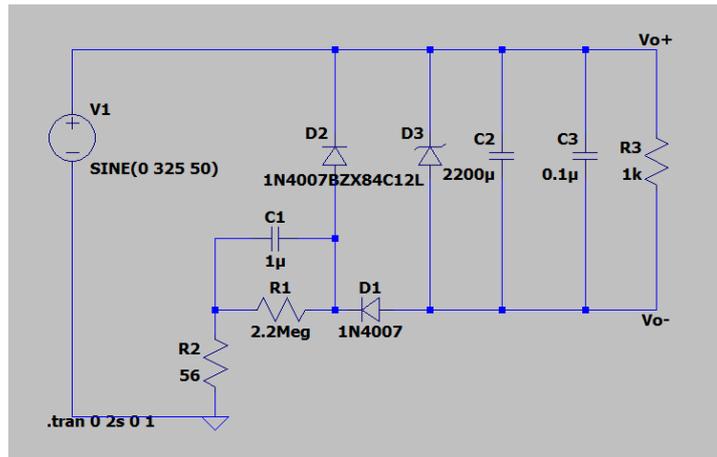


Figura 36. Proyecto, alimentación

Comenzaremos viendo el circuito de alimentación, que se encargará de rectificar la tensión que aporta la red para poder obtener 12V para alimentar el resto del circuito. Se puede ver el circuito simulado en la figura 36.

Con el esquema realizado habrá que comprobar cómo se comporta el circuito para la situación de carga prevista haciendo uso de simulaciones. Para este caso, realizando un análisis transitorio se obtiene la gráfica de la figura 37.

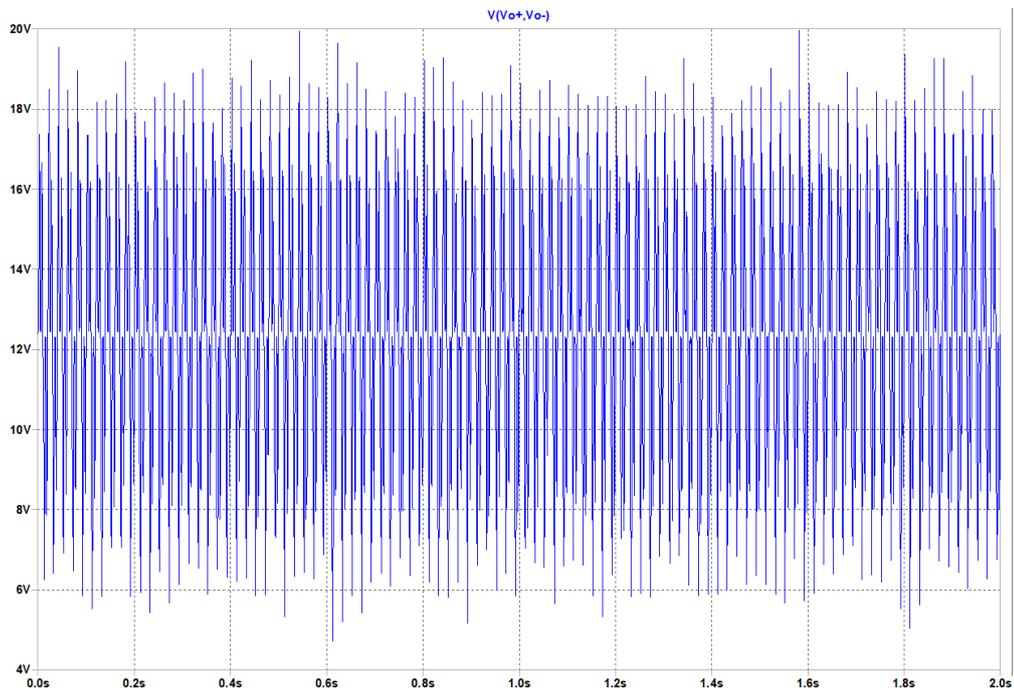


Figura 37. Proyecto, tensión media fuente de alimentación.

Normalmente, se realizarían más simulaciones para que la salida se acerque al comportamiento deseado, en este caso se obtiene una tensión más o menos rectificadora en torno al valor de 12 voltios por lo que sólo habría que

reducir el ruido. Una vez comprobado el funcionamiento del circuito habrá que pasar a otra parte del circuito, en este caso, se tratará el circuito de control.

El circuito de control está formado por un sensor (en este caso una LDR) y un comparador con histéresis. En este caso, se puede comprobar como varía la salida del amplificador operacional variando la LDR simulada a partir de dos resistencias. Se puede observar este circuito en la figura 38.

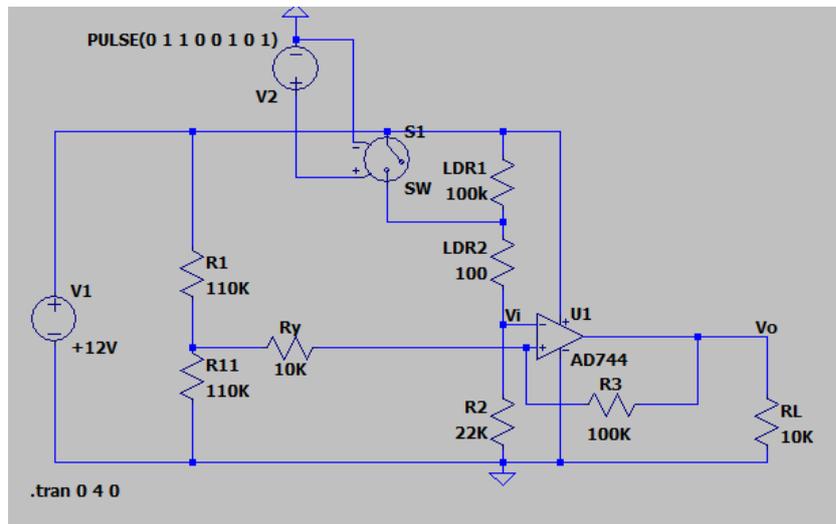


Figura 38. Proyecto, circuito de control.

Al igual que en el caso del circuito de alimentación habrá que comprobar si su funcionamiento se corresponde con el deseado. En este caso se buscará que, ante un descenso de la resistencia de la LDR se obtengan 12V en la salida del circuito, resultado que se puede observar en la figura 39.

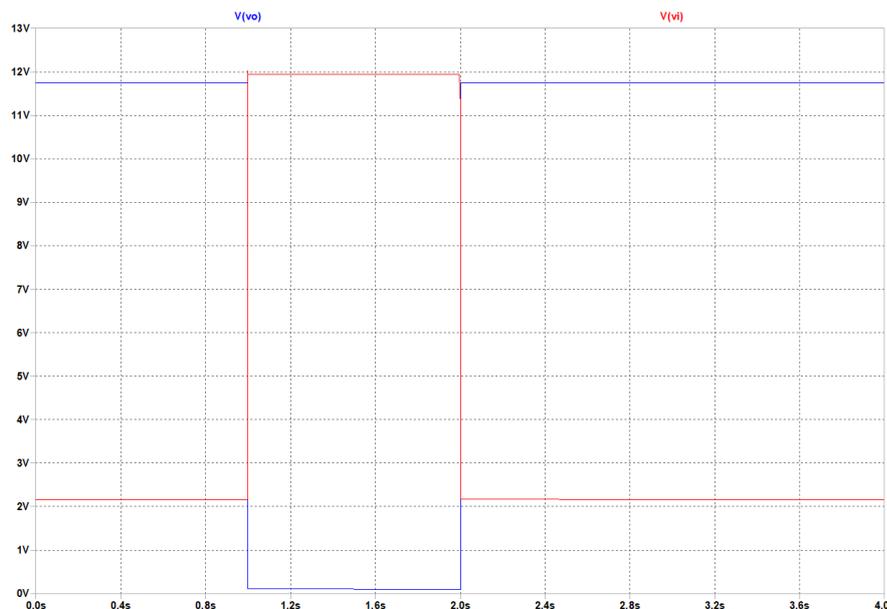


Figura 39. Proyecto, simulación comparador con histéresis.

Una vez comprobado el comportamiento de los dos circuitos anteriores, sólo faltará comprobar el funcionamiento de la parte de potencia del circuito completo. Esta parte se puede ver en la figura 40.

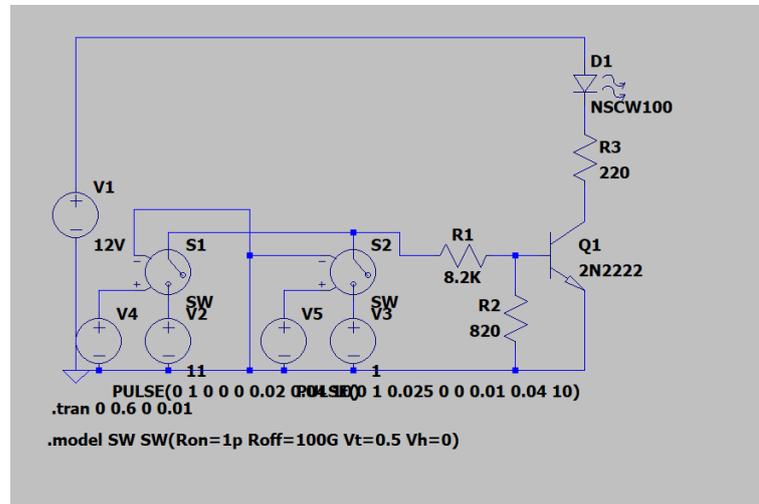


Figura 40. Proyecto, circuito de potencia.

Para comprobar el correcto funcionamiento se añaden una serie de componentes que permiten realizar las simulaciones pertinentes imitando la salida del circuito de control anterior. El resultado de la simulación del circuito en este estado se puede ver en la figura 41.

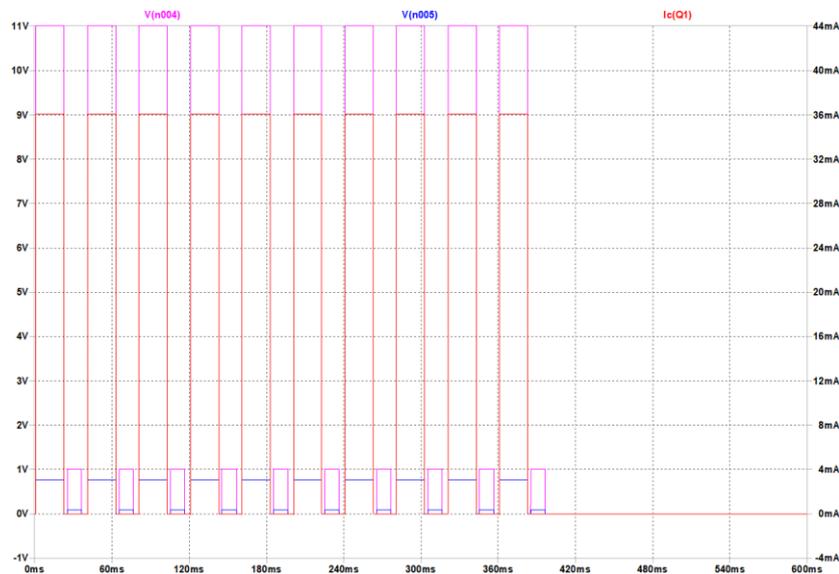


Figura 41. Proyecto, simulación circuito de potencia.

Una vez comprobado que el funcionamiento del circuito es el deseado haciendo uso de las simulaciones de LTspice se podrá pasar a fases más relacionadas con la fabricación, para lo que se empleará KiCad.



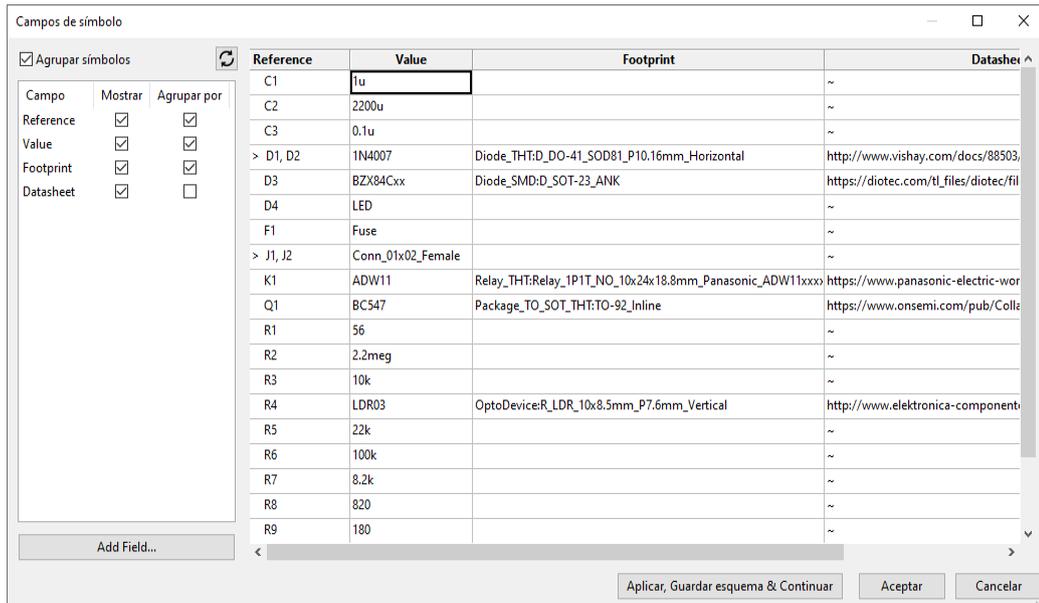


Figura 45. Proyecto, ventana de edición de campos de símbolos.

En este caso se han seleccionado footprints que no tienen porqué coincidir con aquellas que tienen los componentes en realidad. Una vez asignadas estas footprints habrá que abrir la herramienta de trazado de PCBs haciendo clic sobre el icono de la figura 46.

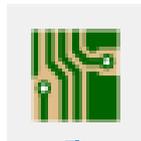


Figura 46. Proyecto, icono herramienta de creación de PCBs.

Una vez hecho esto habrá que importar la netlist y la lista de huellas del esquema. Tras ello habrá que colocar los componentes en algún punto del entorno de diseño de PCBs procediendo posteriormente a realizar el trazado de rutas. En este caso la distribución de las huellas se puede ver en la figura 47.

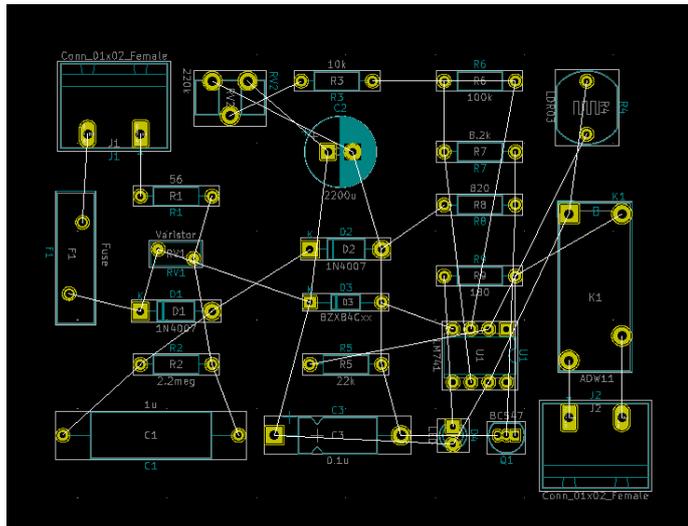


Figura 47. Proyecto, distribución de componentes.

Con los componentes colocados se pueden trazar pistas para unir sus pads. Para calcular la anchura de las trazas, KiCad cuenta con una calculadora cuyo aspecto se puede ver en la figura 48.

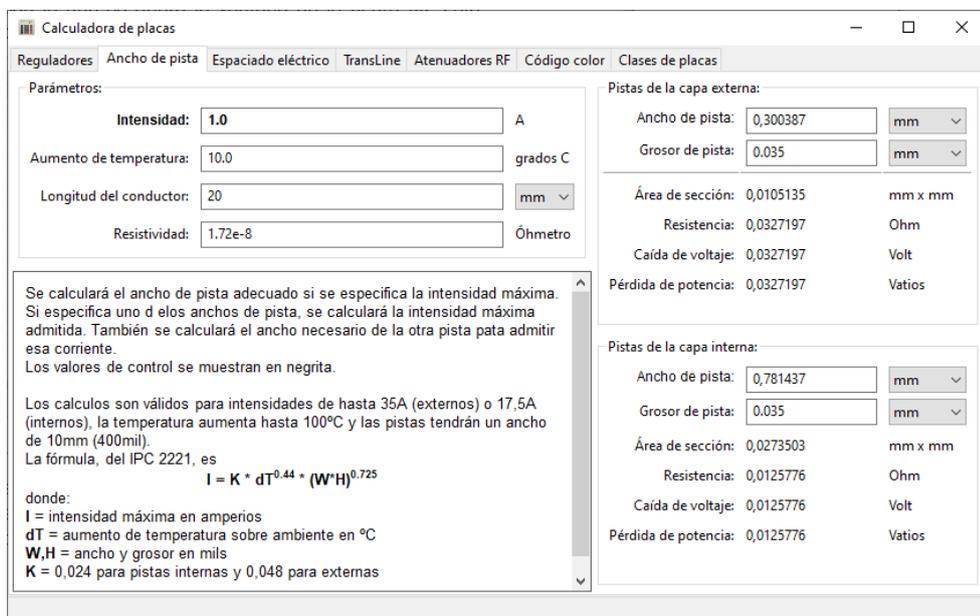


Figura 48. Proyecto, calculadora KiCad.

Una vez calculada la anchura de las pistas habrá que asignarla a su respectiva red dentro de la configuración de la placa. Dentro de ésta se



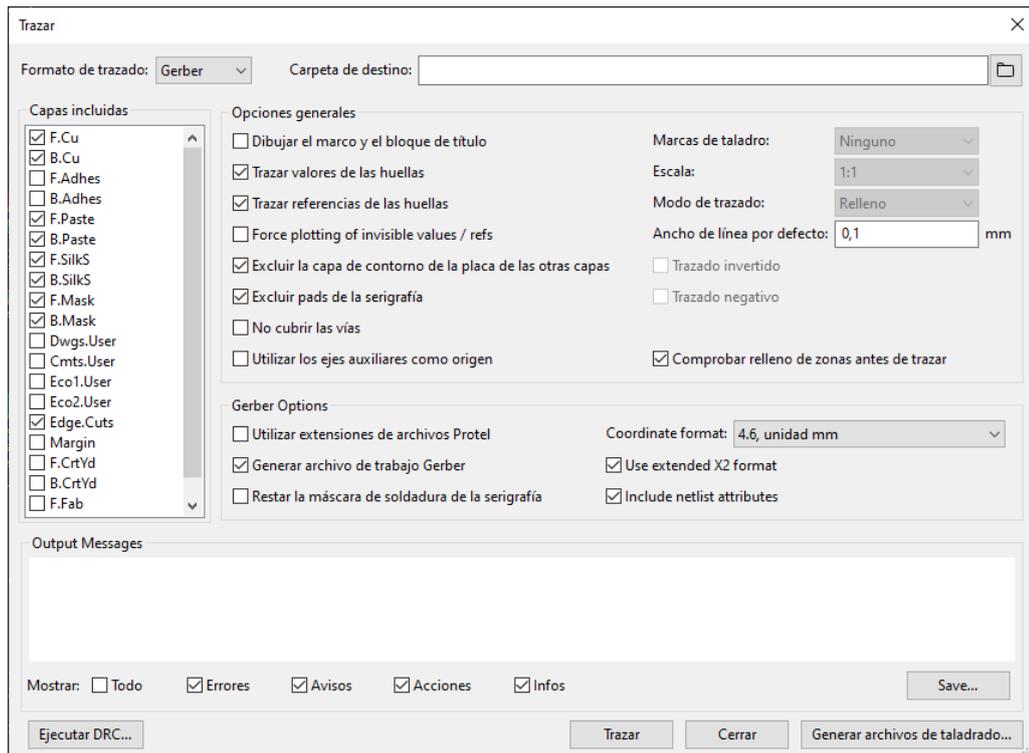


Figura 50. Proyecto, ventana de configuración ficheros de fabricación.

Tras crear los fotolitos (para lo que hay que guardar el archivo en formato PDF) de este circuito se obtiene el rutado de la figura 51 para la capa de cobre superior.

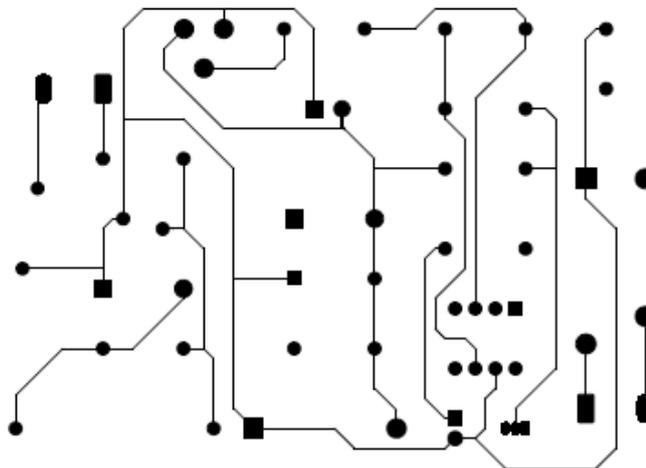


Figura 51. Proyecto, rutado superior.

### 6.2-3. Comprobación de los ficheros generados.

Para comprobar los archivos en el caso que se hayan creado los ficheros de fabricación en formato Gerber, el programa cuenta con un visor enfocado en este tipo de archivos. El aspecto del rutado superior observado mediante el “Visor Gerber” se puede apreciar en la figura 52.

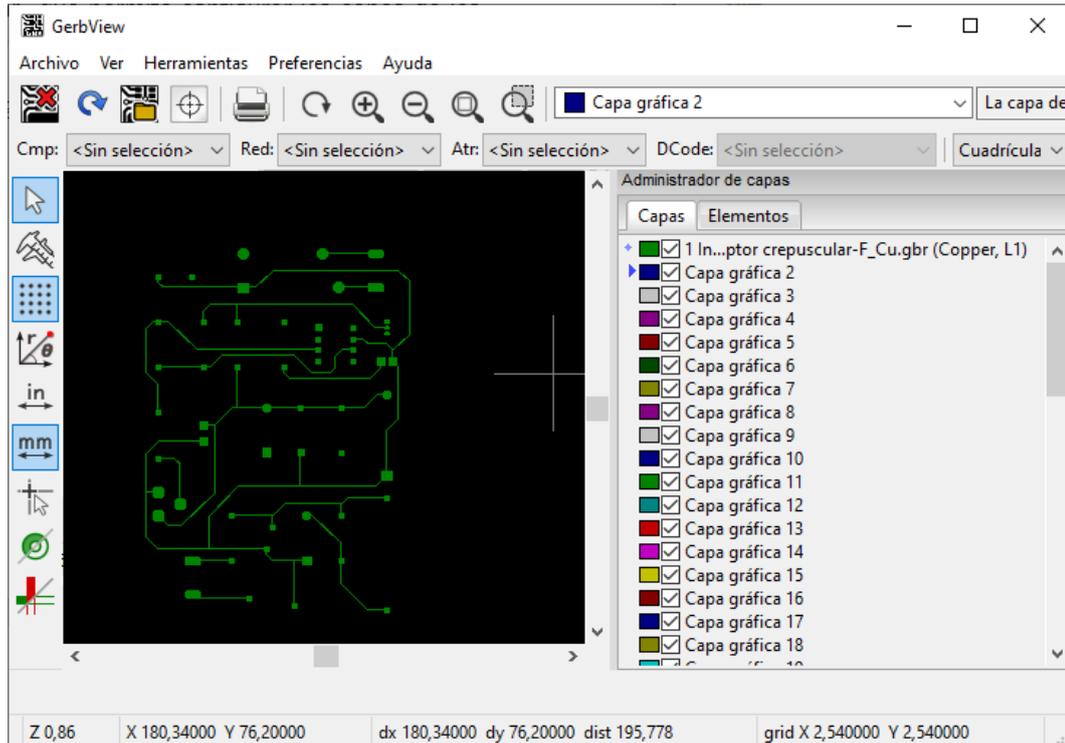


Figura 52. Proyecto, visor de archivos Gerber.

### 6.2-4. Extras.

Una herramienta extra con la que cuenta el programa de edición de PCBs es el visor 3D, que permite observar el aspecto aproximado que tendrá la placa una vez que esté fabricada. Esta aplicación también permite obtener una estimación del volumen con el que contará el circuito una vez fabricado. El aspecto del circuito diseñado en este caso se puede ver en la figura 53.

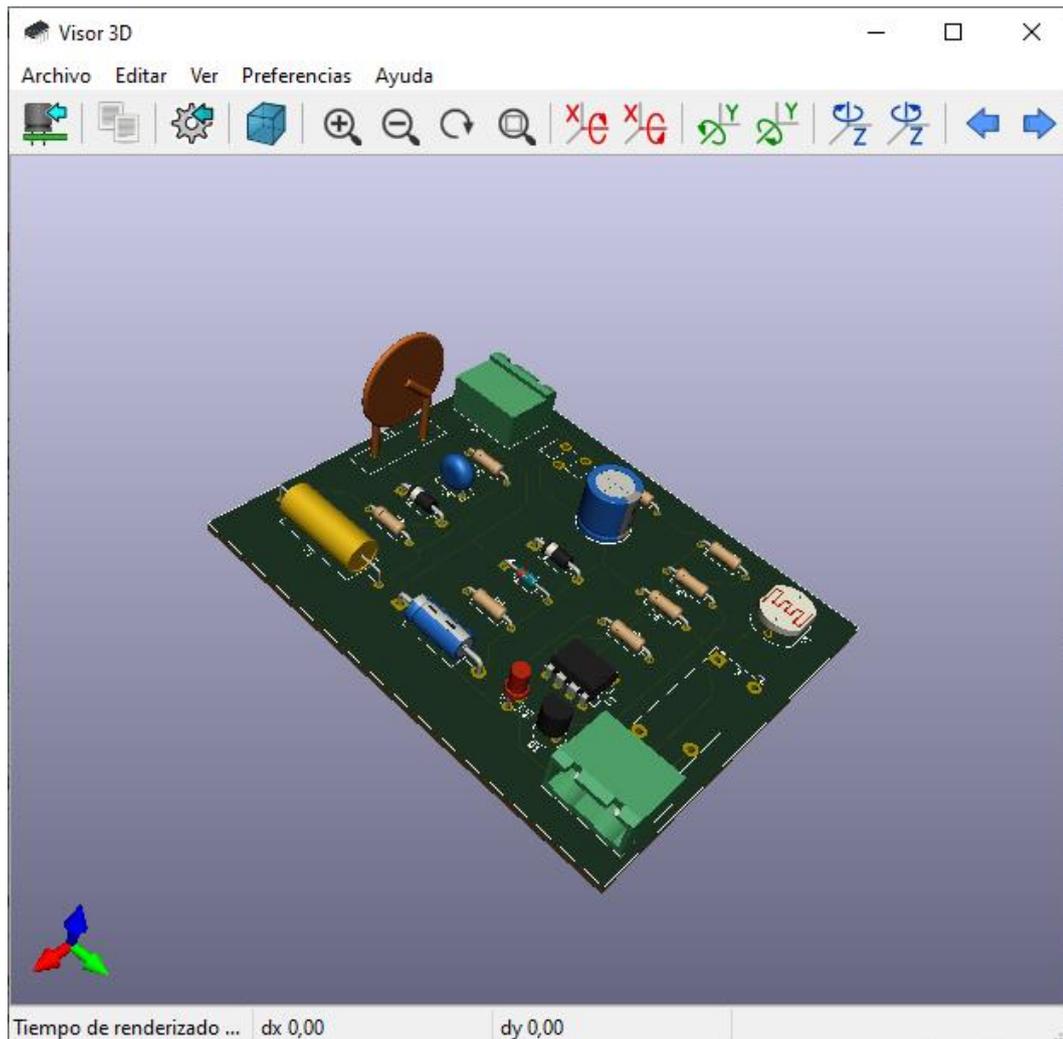


Figura 53. Proyecto, modelo 3D circuito interruptor crepuscular

Esta información dimensional es importante para la fabricación de prototipos en el aspecto de la selección de envoltentes.

#### 6.2-5. Observaciones.

Como se puede ver, KiCad ofrece una experiencia bastante completa de cara a la fabricación, proporcionando numerosas herramientas muy interesantes destacando el visor de archivos Gerber y la calculadora para los componentes y las pistas del circuito.

Si bien las funcionalidades del programa son muy completas carece de una herramienta que si posee Msim8, está es el autorrutado. A pesar de esto, el trazado de rutas busca el mejor camino que permita evitar la conexión con una red indebida. Esto facilita el rutado manual.

## 7. Conclusiones

El presente trabajo buscaba comprobar si las herramientas KiCad y LTspice permitían explorar todos los aspectos relacionados con la fabricación de PCB. Además, se ha buscado establecer un sistema de evaluación de los aspectos de los citados programas para poder compararlos con el programa empleado para estos mismos fines.

Para dar cierto contexto, se ha incluido una comparativa entre las distintas alternativas con las que se cuenta en el mercado actual para el diseño de PCBs, distinguiendo entre la adquisición de licencias especializadas, el uso de licencias para estudiantes, el empleo de herramientas web y el uso de software libre, indicando las características de cada uno de ellos.

Posteriormente se ha justificado el motivo por el que se ha seleccionado la combinación de programas cuyas funcionalidades se desea comprobar. Además, se ha realizado un pequeño resumen de las funcionalidades básicas de ambos programas.

Se han descrito también las funcionalidades en cada uno de los campos del diseño electrónico del programa a sustituir para, posteriormente, compararlas con aquellas que poseen KiCad y LTspice.

Se han establecido una serie de criterios básicos que se consideran imprescindibles en toda herramienta de diseño de PCBs a partir de los cuales se han obtenido los puntos a estudiar haciendo posteriormente una evaluación de éstos.

Para la comprobación de la compatibilidad de las herramientas propuestas con las actividades realizadas con la ayuda de Msim8, se ha procedido a realizar numerosas pruebas tanto de simulación como de desarrollo de un proyecto. El resultado de esto ha sido favorable a la decisión de emplear LTspice en los aspectos relacionados con la simulación de circuitos. LTspice es bastante sólido en aquello que ofrece, al poseer funcionalidades relacionadas con la creación y simulación de esquemas es muy completo en estos aspectos. A pesar de ello posee algún problema derivado de poseer una librería de modelos algo escasa.

Después de realizar este trabajo puedo establecer que KiCad constituye una herramienta muy sólida para el diseño de placas de circuito impreso, pero necesita desarrollo en los aspectos relacionados con la simulación de circuitos y en temas relacionados con la interfaz. Pese a ello posee el potencial necesario para sustituir completamente a Msim8 en futuras versiones sin necesidad de hacer uso de otro software.

A partir del estudio realizado considero que la combinación de KiCad y LTspice constituye una alternativa realista a Msim8 en el estado actual de ambos programas, además, supone una buena toma de contacto con las herramientas de automatización de diseño electrónico. Se puede concluir que la combinación de estos programas contiene todos los aspectos necesarios para ser utilizado en el ámbito académico e introducir a los futuros ingenieros en el diseño electrónico. Esta conclusión se obtiene de la evaluación realizada en este trabajo y teniendo en cuenta la experiencia adquirida en el uso de ambos programas para la realización de simulaciones y del proyecto de fabricación.

El presente trabajo me ha permitido emplear los conocimientos adquiridos en relación con las herramientas de automatización de diseño electrónico, conociendo mejor su funcionamiento para poder concluir que, las herramientas alternativas ofrecen una utilidad para su aplicación académica equiparable a las empleadas actualmente.

## Bibliografía

Debido a la naturaleza de este texto algunas fuentes han partido de foros, videos, etc. Pese a ello, toda la información incluida en este trabajo ha sido contrastada. También se ha hecho uso de la información aportada por las organizaciones que gestionan los programas citados en el texto.

- Lakhan, S. E., & Jhunjhunwala, K. (2008, 5 mayo). Open Source Software in Education. EDUCAUSE. <https://er.educause.edu/articles/2008/5/open-source-software-in-education>
- LTspice. (2021). Recuperado 1 de julio de 2021, de Analog Devices Inc, LTspice website: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html> .
- KiCad. (2021). Recuperado 10 de junio de 2021, de KiCad website: <https://www.kicad.org/>
- Most frequently asked questions for beginners. (n.d.). Ltwiki.Org. Recuperado 15 de julio de 2021 de LTwiki [http://ltwiki.org/index.php?title=Main\\_Page](http://ltwiki.org/index.php?title=Main_Page)
- González, M. L. (2018). LTspice: análisis de circuitos y dispositivos electrónicos (1.a ed.). Edulp.
- Medrano Alberto, Serra Ángel, Soto Carlos (2017). KiCad, herramienta de software libre de modelado de circuitos impresos para el desarrollo de hardware. Proyecto de investigación. Universidad de los Andes.
- Vogt, H. (s. f.). KiCad Eeschema as GUI for ngspice, tutorial for setting up the simulation. ngspice. Recuperado 7 de julio de 2021, de <http://ngspice.sourceforge.net/ngspice-eeschema.html>
- Kaleb\_Kohlhase. (2021, 21 mayo). Adding All Logic Gates to LTSpice [Publicación en foro]. Engineering and Component Solution Forum - TechForum | Digi-Key. <https://forum.digikey.com/t/adding-all-logic-gates-to-ltspice/14301>
- Quarles, T., Pederson, D., Sangiovanni-Vincentelli, A., & Wayne, C. (s. f.). The Spice Home Page. Berkeley Wireless Research Center SPICE. Recuperado 3 de junio de 2021, de <https://web.archive.org/web/20090131154504/http://bwrc.eecs.berkeley.edu/classes/ICbook/spice/>
- F.Z. [FesZ Electronics]. (2019, 18 mayo). LTspice tutorial - Digital circuits and logic gates [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=JttE2NObDPM&feature=youtu.be>