



**FACULTAD
DE INGENIERIA**

Universidad de Buenos Aires

MAESTRÍA EN SISTEMAS EMBEBIDOS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

Lectura de fiduciales para máquina de control numérico CNC

Autor:
Esp. Ing. Pablo Slavkin

Director:
MEE. Ing. Norberto M. Lerendegui (IEEE)

Jurados:
Ing. Ariel Hernandez (Seeingmachines)
Mg. Ing. Lucio Martinez (CNEA)
Dr. Daniel Minsky (CNEA/CONICET)

*Este trabajo fue realizado en la ciudad de San Carlos de Bariloche,
entre marzo de 2020 y marzo de 2021.*

Resumen

En este trabajo se describe el desarrollo de un sistema electrónico capaz de dotar de visión artificial a una máquina de control numérico de la empresa española Wolfcut. El sistema permite el alineamiento automático de piezas mediante el reconocimiento de marcas de registro.

Se utilizó Linux en una plataforma PocketBeagle y se desarrolló un driver de *kernel* para manejar un controlador Weihong NK105. Sobre la base del driver se implementó una interfaz web con HTML, JavaScript y Python con la posibilidad de transferir archivos remotamente mediante configFS. Finalmente se realizó el procesamiento de vídeo desde una cámara Wi-Fi con la biblioteca PyOpenCv.

Agradecimientos

A Juli, Valen, Maxi y León

Índice general

Resumen	I
1. Introducción general	1
1.1. Historia y principio de funcionamiento	1
1.1.1. Programa de movimientos	2
1.1.2. Controlador de movimientos	4
1.1.3. Máquina de control numérico	7
1.2. Mecanizados de piezas por control numérico	7
1.3. Software para el reconocimiento de marcas	12
1.4. Empresa interesada Wolfcut	13
1.5. Motivación y alcance	13
2. Introducción específica	15
2.1. Tecnologías utilizadas	15
2.2. Plataforma PocketBeagle	15
2.3. Aplicación web	16
2.4. Selección de la cámara de vídeo	19
2.5. Trigonometría de alineación	19
2.6. Detección y tipos de marcas fiduciales	23
3. Diseño e implementación	25
3.1. Diseño general del sistema	25
3.2. Bloque PocketBeagle	28
3.2.1. Teclado virtual	28
3.2.2. Pantalla virtual	30
3.2.3. Sistema virtual completo	32
3.2.4. Conexión USB como dispositivo de almacenamiento	32
3.3. Conexión de la cámara con la PocketBeagle	34
3.4. Software de control	38
3.5. Software de lectura de marcas nkHACK	39
3.6. Calibración de la cámara	40
3.7. Secuencia de pasos para alinear	42
4. Ensayos y resultados	47
4.1. Listado de herramientas	47
4.2. Pruebas funcionales del hardware	47
4.2.1. Acceso concurrente al driver SPI	47
4.2.2. Ensayos con archivos de mecanizado	48
4.3. Pruebas funcionales del software	50
4.3.1. Ensayos de segmentación de marcas	50
4.3.2. Ensayo de discriminación por área	50
4.3.3. Ensayo de marcas rotadas	52
4.3.4. Ensayo de marcas encerradas	53

4.3.5. Ensayos con impresiones escaladas	54
4.3.6. Ensayos con diferentes resoluciones de vídeo	56
5. Conclusiones	59
5.1. Conclusiones generales	59
5.2. Próximos pasos	60
A. Ejemplos del proceso de reconocimiento de marcas	63
B. Capturas en diferentes usos del software nkHACK	65
Bibliografía	69

Índice de figuras

1.1.	John Parsons, el inventor de las máquinas de control numérico junto a una de sus máquinas.	1
1.2.	Los tres bloques básicos de una máquina CNC.	2
1.3.	Secuencia de pasos para operar una máquina NC primigenia.	3
1.4.	Secuencia de pasos para operar una máquina CNC moderna.	4
1.5.	La etapa de control se suele separar en dos: controlador lógico y driver de potencia.	5
1.6.	Esquema general y modelos de máquinas CNC dependiendo del tipo de material a procesar y la tecnología de corte.	7
1.7.	Ejemplos de piezas mecanizadas mediante máquinas CNC.	8
1.8.	Esquema de corte de una letra "A" en una placa de material virgen.	9
1.9.	Corte de la silueta de la letra "A" previamente impresa en el material.	10
1.10.	Corte de la silueta de la letra "A" previamente impresa en el material con lectura de marcas.	11
1.11.	Controlador NK105 de la firma Weihong.	14
2.1.	Diagrama de bloques del sistema implementado.	15
2.2.	Conjunto de herramientas adoptadas.	16
2.3.	Capas de software relacionadas con la aplicación web utilizadas.	17
2.4.	Aplicación IP Webcam que permite utilizar la cámara del teléfono y enviar el vídeo por Wi-Fi.	20
2.5.	Corrección de desplazamiento. A representa el sistema de coordenadas de la máquina y las dimensiones extraídas del archivo de corte, B representa el objeto real desplazado, escalado y rotado respecto del primero.	21
2.6.	Cálculo de rotación de la recta formada entre los puntos 1 y 2 en los planos A y B.	21
2.7.	Corrección de la rotación del plano A respecto del plano B utilizando dos puntos de referencia.	22
2.8.	Corrección de la escala entre los planos A y B utilizando como factor de escala las dimensiones relativas entre los dos planos.	23
2.9.	Ejemplo de diferentes tipos de marcas fiduciales para diversas aplicaciones.	24
3.1.	Comparación entre la conexión original de la máquina CNC y la modificada para el reconocimiento de marcas.	25
3.2.	Comparación entre la conexión del controlador antes y después de ser intervenido por el accesorio desarrollado.	28
3.3.	Diagrama de bloques del software de virtualización de teclado y pantalla.	29
3.4.	Diagrama de bloques implementados en el driver de <i>kernel</i> para la lectura e interpretación de las tramas de datos entre el controlador y el LCD.	31

3.5.	Control de la máquina mediante la PocketBeagle. Se envían datos a una FIFO y un servicio los direcciona al controlador. Los datos del LCD son capturados por el driver y mostrados en la consola. Se puede ver la sincronía entre el mando a distancia y el virtual.	33
3.6.	La PocketBeagle se comporta como un dispositivo de almacenamiento. El controlador accede al sistema de archivos en busca de trabajos a procesar.	34
3.7.	Técnica de doble sistema de archivos para transferir información al controlador.	34
3.8.	Soporte de celular y puntero láser solidarios al eje Z.	36
3.9.	Imagen original, escala de grises y binaria obtenidas mediante un algoritmo en Python como parte del proceso de reconocimiento de marcas.	37
3.10.	Proceso de filtrado y selección de perímetros dentro de la imagen. Como resultado se obtiene el centro y rotación de la marca con el área especificada.	38
3.11.	Página web de control de la máquina. Ejemplos de operación.	39
3.12.	Pantalla principal del software nkHACK. Se visualiza el modelo de la máquina CNC, las coordenadas actuales, la imagen de la cámara y el trabajo a mecanizar.	39
3.13.	Software nkHACK. Menú de configuración de la cámara. Se puede ver la imagen capturada en modo binario en la cuál se ha detectado una marca de 3,3 mm de lado.	40
3.14.	Calibración del tamaño del píxel de un fotograma. Se utiliza una regla para medir el ancho y el alto y el software realiza las cuentas para obtener y almacenar el tamaño del píxel en función de la resolución de vídeo que se este utilizando.	41
3.15.	Revelación del efecto de distorsión de las medidas en función del ángulo de captura de la imagen, distancia al objetivo y tipo de lente.	42
3.16.	Ánalisis de la distorsión en las imágenes tomadas en diferentes escenarios. Se aplican técnicas de recorte para mitigar el defecto.	43
3.17.	Método de iteración de movimientos para el centrado de la marca y la mitigación de los efectos alineales en el fotograma.	43
4.1.	Acceso concurrente al módulo de manejo de SPI desde una conexión SSH. Se puede ver la sincronía entre los cuatro accesos y el registro de cada acceso en los mensajes del <i>kernel</i>	48
4.2.	Plantilla de pruebas diseñada para validar ciertas acciones del software durante los ensayos.	48
4.3.	Placa de madera con la impresión del trabajo de corte pegada. Esto permite ubicar la pieza en diferentes posiciones y probar los resultados del sistema de alineación.	49
4.4.	Secuencia de pasos para los ensayos de corte simulado. Se utiliza el recuadro rojo de 1 mm de lado en el centro de la imagen como testigo del error máximo.	49
4.5.	Ensayo de diferentes marcas en condiciones estratégicas para poder medir ciertos parámetros del funcionamiento del algoritmo de reconocimiento.	51
4.6.	Reconocimiento de una marca dentro de un conjunto. Al modificar en el software la medida de la marca deseada, se reconoce solo la correcta.	51

4.7. Validación de la medición del ángulo de la marca. El software reconoce y mide el ángulo de una misma marca en diferentes rotaciones.	52
4.8. Ensayo de selección de marcas dispuestas en jerarquía. Por decisión en el desarrollo del software no se consideran las marcas que están dentro de otro perímetro cerrado.	53
4.9. Generación de un trabajo de corte perimetral y otro escalado con el objetivo de validar la función de escalado no lineal del software.	54
4.10. Secuencia de pasos para la simulación de corte perimetral con su respectivo archivo de corte GCode sin distorsión.	55
4.11. Secuencia de pasos para la simulación de corte perimetral escalado con el archivo de corte GCode de la versión sin escalar. Se puede notar que las marcas dos y tres aparecen distantes del lugar esperado debido al escalado.	55
A.1. Secuencia de reconocimiento de marcas.	63
A.2. Secuencia de reconocimiento de marcas.	64
B.1. Diferentes configuraciones del software que permiten destacar la característica más relevante en cada operación.	66
B.2. Diferentes configuraciones del software que permiten destacar la característica más relevante en cada operación.	67

Índice de tablas

1.1. Modelos de drivers	5
1.2. Modelos de controladores.	6
1.3. Sistemas de reconocimiento de marcas.	12
2.1. Selección de la cámara	19
3.1. Características de los bloques principales.	26
3.1. Características de los bloques principales. Continuación.	27
3.2. Secuencia de pasos para alinear un trabajo.	44
3.2. Secuencia de pasos para alinear un trabajo. Continuación.	45
3.2. Secuencia de pasos para alinear un trabajo. Continuación.	46
4.1. Ensayos de corte simulado.	50
4.2. Ensayos de discriminación de dimensiones de marcas.	52
4.3. Ensayo de medición de ángulos de marcas.	53
4.4. Ensayos de corte simulado escalado.	54
4.5. Ensayos de resolución de imagen.	56
4.5. Ensayos de resolución de imagen. Continuación.	57
4.5. Ensayos de resolución de imagen. Continuación.	58

Dedicado a Fernando Adrián Sanchez

Capítulo 1

Introducción general

En el presente capítulo se explica el principio de funcionamiento de las máquinas de control numérico y las dificultades que presentan para alinear piezas en la mesa de trabajo. Se exponen algunas soluciones existentes en mercado y finalmente se comenta acerca de la motivación, el alcance y los objetivos de la propia.

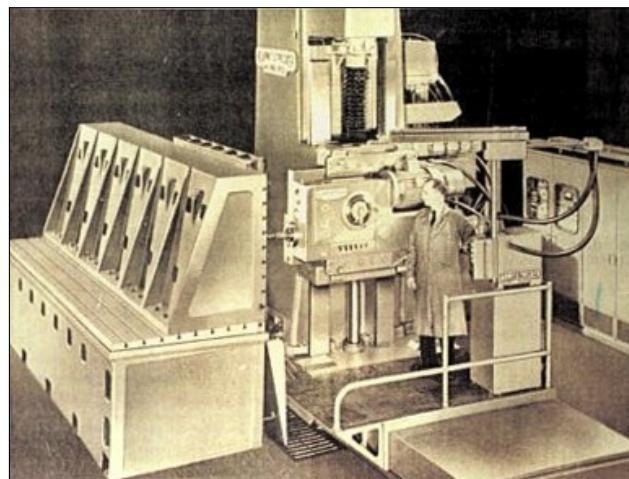
1.1. Historia y principio de funcionamiento

Hacia finales de la década del '40, el mecánico inventor John Parsons¹ retratado en la figura 1.1a, logró motorizar una agujereadora de banco de precisión y la automatizó mediante el uso de una cinta perforada como se muestra en la figura 1.1b.

A este invento se lo considera la primera máquina de control numérico o NC por sus siglas en inglés (*numerical control*).



(A) Fotografia de John T. Parsons, considerado en la industria como el inventor de las máquinas NC.



(B) Una de las primeras máquinas de la industria consideradas de control numérico.

FIGURA 1.1. John Parsons, el inventor de las máquinas de control numérico junto a una de sus máquinas.

Luego de varias décadas, con el surgimiento de las computadoras, se reemplazaron las cintas perforadas por software, dando lugar a las máquinas de control numérico computarizado o CNC[1] (*computer numerical control*) por sus siglas en

¹https://en.wikipedia.org/wiki/John_T._Parsons

inglés.

A pesar del paso del tiempo y los avances tecnológicos, los bloques constitutivos de una máquina CNC siguen siendo los mismos que se muestran en la figura 1.2.



FIGURA 1.2. Los tres bloques básicos de una máquina CNC.

1.1.1. Programa de movimientos

El programa de movimientos consiste en una serie de instrucciones necesarias para obtener una determinada pieza y se escribe en un lenguaje conocido como GCode [2].

Este lenguaje fue creado por el MIT, Instituto Tecnológico de Massachusetts, en la década del '50 y especificado en el documento NIST-RS274-D [3].

Originalmente los ingenieros de mecanizado lo escribían manualmente en una planilla y luego, mediante una máquina de mecanografía, se transcribía a una cinta perforada que era interpretada por el controlador de movimientos.

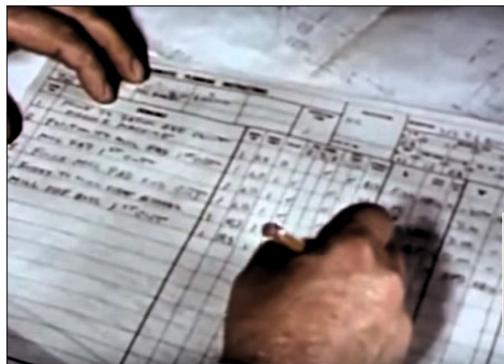
Se pueden ver algunas imágenes de este primigenio proceso en la figura 1.3.

En el presente se diseña la pieza en tres dimensiones con la ayuda de un software de diseño asistido por computadora o CAD (*computer aided design*) por sus siglas en inglés. Algunos de los más reconocidos se listan a continuación:

- FreeCAD
- Blender
- Rhinoceros
- AutoCAD
- SolidWorks

El archivo de salida del CAD se procesa con un software de manufactura asistida por computadora o CAM (*computer aided manufacturing*) por sus siglas en inglés, en donde el diseñador puede configurar los métodos y estrategias de mecanizado. Algunos de los más reconocidos se listan a continuación:

- RhinoCAM
- Blender CAM
- FreeMILL
- Aspire
- Mastercam



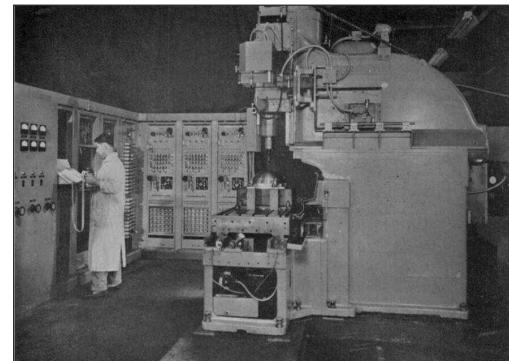
(A) Ingeniero escribiendo en papel la lista de operaciones para mecanizar una pieza en lenguaje GCode.



(B) Operadora transcribiendo la lista de operaciones del formato papel a un rollo de cinta multiperforada.



(C) Lector de cinta multiperforada que controla los movimientos de la máquina.



(D) Operador trabajando con una de las primeras fresadoras por control numérico.

FIGURA 1.3. Secuencia de pasos para operar una máquina NC primigenia.

El resultado final es un archivo de texto en lenguaje GCode que se almacena digitalmente y que será procesado por el controlador. Esta secuencia es conocida como diseño CAD/CAM y se muestra en la figura 1.4.

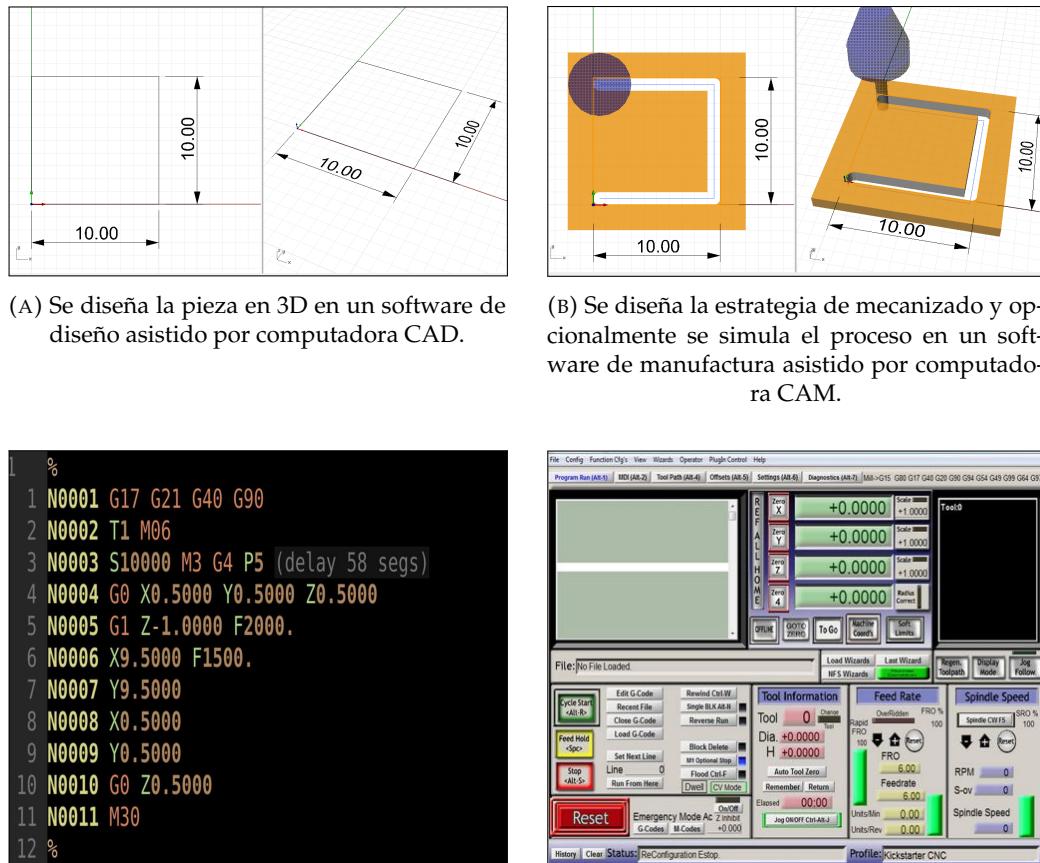


FIGURA 1.4. Secuencia de pasos para operar una máquina CNC moderna.

1.1.2. Controlador de movimientos

El controlador de movimientos es un equipo electrónico capaz de leer un programa en lenguaje GCode y proveer las señales eléctricas adecuadas para mover la máquina.

Es usual que a la salida del controlador se conecten amplificadores de señal (*drivers*) que proveen la potencia suficiente para mover los motores y mecanismos montados en la máquina.

De esta manera el controlador se compone de dos etapas, controlador lógico y drivers como se aprecia en la figura 1.5.

En función de la complejidad requerida para la máquina y de los requisitos de potencia para los movimientos se dimensionan el controlador y los drivers.

En las tablas 1.1 y 1.2 se listan algunos modelos de controladores y drivers comerciales detallando las características principales.

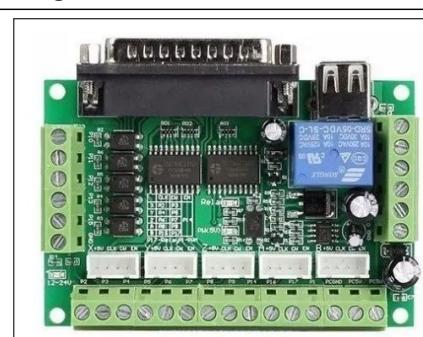
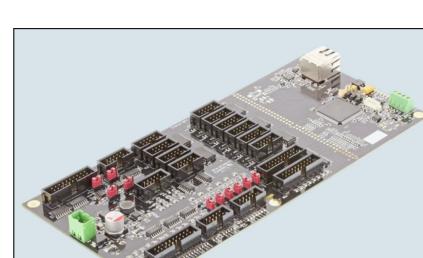


FIGURA 1.5. La etapa de control se suele separar en dos: controlador lógico y driver de potencia.

TABLA 1.1. Modelos de drivers de motores.

Características	Imagen
Driver para motores paso a paso pequeños, económicos, ideales para máquinas simples, impresoras 3D, y hobby.	A small red printed circuit board (PCB) with a central integrated circuit (IC) chip and several gold-plated pins for connection.
Driver para motores paso a paso medianos, ideales para máquinas de media precisión y mecánica ligera.	A black rectangular metal housing with a printed circuit board inside. It has green terminal blocks for power and signal connections.
Driver para motores BLDC (<i>brush less direct current motors</i>), de potencia media, adecuados para máquinas de extrema precisión y escalables en potencia.	A large black industrial-grade metal enclosure with multiple connection ports, including DB9 serial ports and analog/digital input/output (I/O) pins.

TABLA 1.2. Modelos de controladores CNC disponibles en el mercado.

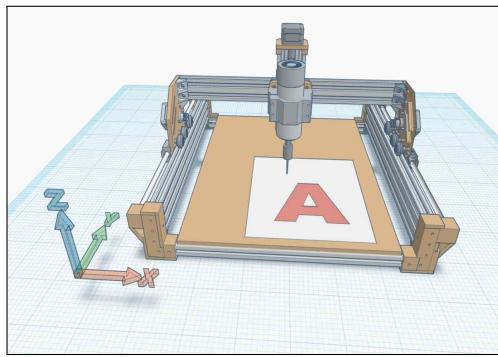
Características	Imagen
Controlador dependiente de una PC y conexión por puerto paralelo. Solución económica para máquinas de baja performance.	
Controlador integrado de media performance, ideal para máquinas profesionales pero de baja complejidad. Este es el controlador que se usará para realizar los ensayos.	
Controlador basado en PC sobre Windows de media performance. Este es el controlador que usa actualmente la empresa Wolf-cut en sus máquinas. Ver sección 1.4.	
Controlador autónomo profesional de gran performance y opciones de operación. Este tipo de controladores se utilizan en centros de mecanizado de altísima complejidad y prestaciones sumamente exigentes. Es inusual ver este tipo de controladores en las máquinas de gama media debido a su alto costo.	

1.1.3. Máquina de control numérico

En términos generales una máquina CNC es un conjunto de piezas electromecánicas que permiten mover el elemento de mecanizado en varias dimensiones. En algunas el elemento de mecanizado permanece fijo y lo que se mueve es la pieza a mecanizar. Suelen ser motorizadas, pero también las hay con actuadores lineales, sistemas hidráulicos o una combinación de todos estos.

Dependiendo del propósito de la máquina se definen los grados de libertad del movimiento. Es usual utilizar tres ejes perpendiculares para mesas de corte planos, seis ejes para centros de mecanizado de piezas complejas, seis para brazos robóticos y solo dos para corte y grabado de piezas planas con láser.

Para el desarrollo de este trabajo se estudian solamente máquinas de dos y tres ejes perpendiculares, dado que la empresa interesada comercializa principalmente este tipo de estructuras. Se esquematiza y se muestran algunos modelos de este tipo de estructuras en la figura 1.6.



(A) Esquema general de una máquina CNC de tres ejes perpendiculares.



(B) Máquina de tres ejes para corte y grabado láser de materiales plásticos, madera, cartón, papel, etc.



(C) Máquina de dos ejes de corte por cuchilla para cartón, tela, etc.



(D) Fresadora de tres ejes para corte y mecanizado de madera, plástico, cartón, aluminio, etc.

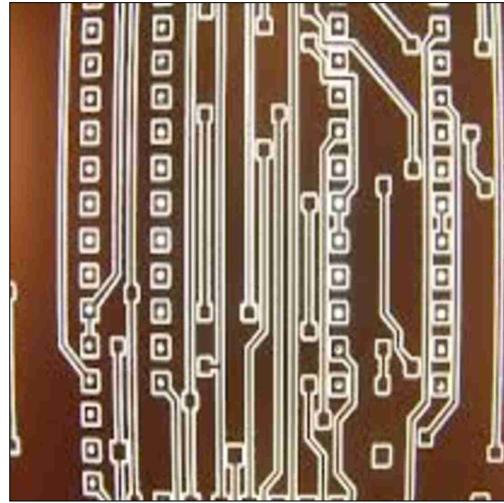
FIGURA 1.6. Esquema general y modelos de máquinas CNC dependiendo del tipo de material a procesar y la tecnología de corte.

1.2. Mecanizados de piezas por control numérico

En la actualidad muchos de los procesos industriales que involucran el mecanizado de piezas como las que se muestran en la figura 1.7 se realizan utilizando máquinas de control numérico computarizado o CNC.



(A) Máquina CNC que ejecuta el corte de piezas en madera para mobiliarios.



(B) Placa de circuito impreso realizado mediante el fresado del contorno de sus pistas.



(C) Corte y fresado en placa de aluminio para obtener un repuesto de una máquina herramienta.

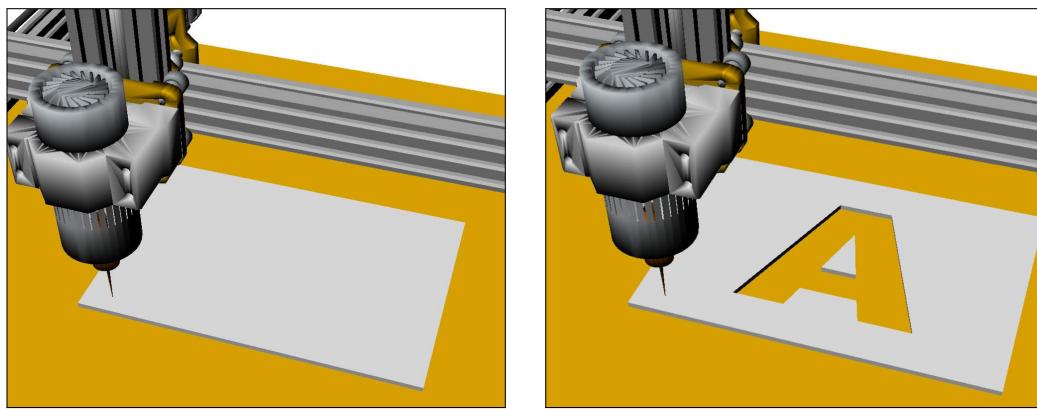


(D) Corte de logos y letras en madera.

FIGURA 1.7. Ejemplos de piezas mecanizadas mediante máquinas CNC.

El proceso de mecanizar piezas utilizando esta tecnología se esquematiza en la figura 1.8 y consiste en una serie de pasos que se enumeran a continuación:

1. Posicionar la placa del material a cortar en la mesa de corte.
2. Posicionar la herramienta de corte en un punto de referencia de la placa.
3. Cargar el archivo que contiene la información de corte.
4. Cortar.



(A) Placa a cortar fijada a la mesa de corte y fresa de corte en posición.
(B) Pieza cortada sin problemas de alineación.

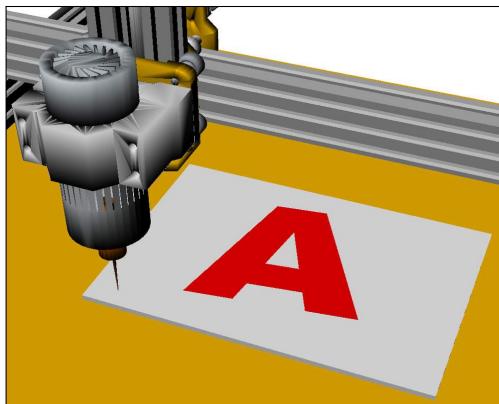
FIGURA 1.8. Esquema de corte de una letra “A” en una placa de material virgen.

Hay casos en los cuales la placa a cortar está previamente impresa y el proceso de corte debe respetar su silueta con exactitud como se esquematiza en la figura 1.9a. Al no haberse aplicado ninguna corrección ni alineamiento entre el sistema de movimientos de la máquina y la pieza, el software de corte no tiene la información de la posición, rotación y escala exacta de la pieza dispuesta en la mesa.

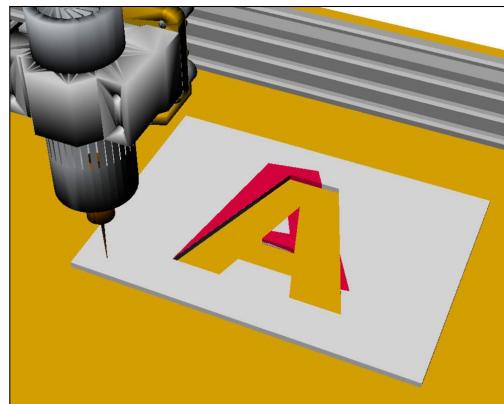
En el ejemplo mostrado en la figura 1.9b, se puede ver que la máquina no puede seguir con exactitud el contorno de la letra “A”.

En la industria se presenta este problema en muchos casos, algunos de los cuales se enumeran a continuación:

- Alineación de placas de circuito impreso de dos caras.
- Necesidad de volver a alinear una pieza que requiere un nuevo proceso de mecanizado.
- Necesidad de volver a alinear luego de abortar un mecanizado ante un corte de energía.
- Errores de escala y escuadra entre las diferentes máquinas involucradas en el proceso.
- Contracción y dilatación del material debido a variaciones de temperatura.
- Deformación de piezas elásticas al momento de fijarlas en la mesa de corte.



(A) Placa a cortar fijada a la mesa de corte y fresa de corte en posición.

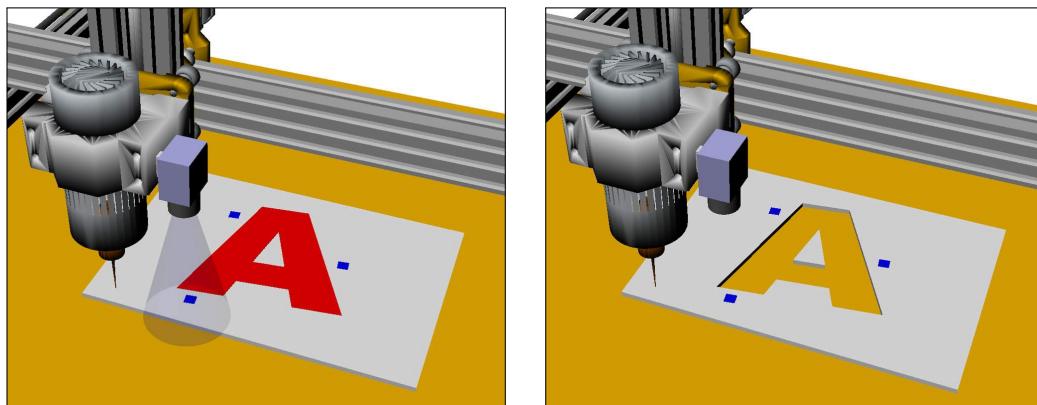


(B) Pieza cortada con una notable desalineación entre la silueta previamente impresa y el corte.

FIGURA 1.9. Corte de la silueta de la letra “A” previamente impresa en el material.

En el presente trabajo se aplican técnicas de visión artificial para reconocer los puntos de referencia que permiten corregir esta desalineación. Estos puntos se incluyen en el proceso de diseño y se imprimen junto con el trabajo a mecanizar.

Mediante el uso de una cámara de vídeo montada en el CNC se puede corregir el desplazamiento, el ángulo y la escala del objeto impreso en relación al sistema de coordenadas de la máquina. El resultado esperado se muestra en la figura 1.10.



(A) Placa a cortar impresa con la letra "A" y tres marcas. Se encuentra fijada a la mesa con la fresa de corte en posición.

(B) Alineación del trabajo de corte según las marcas azules de referencia. La pieza se muestra mecanizada siguiendo el contorno sin errores.

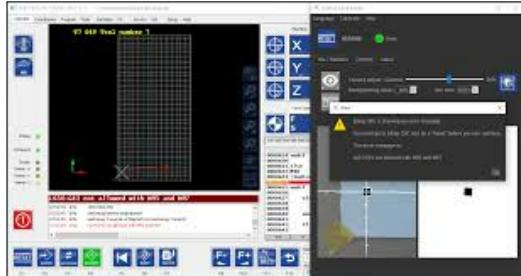
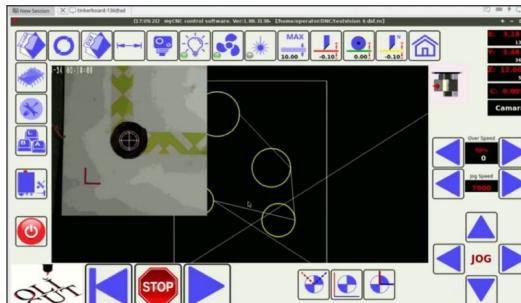
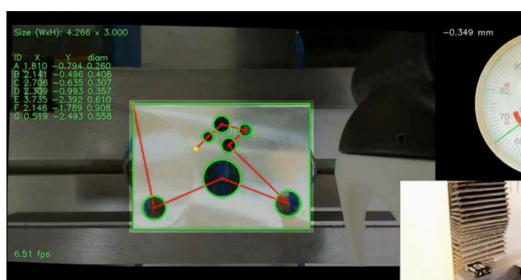
FIGURA 1.10. Corte de la silueta de la letra "A" previamente impresa en el material con lectura de marcas.

1.3. Software para el reconocimiento de marcas

En la tabla 1.3 se destacan algunos desarrollos de software que permiten extenderse o adaptarse para soportar el reconocimiento de marcas.

Se puede ver que la mayoría de las soluciones del mercado están basadas en PC. Esto aumenta el costo general del sistema, disminuye la fiabilidad y limita el acceso desde múltiples dispositivos y plataformas.

TABLA 1.3. Se destacan algunos modelos y marcas de sistemas de reconocimiento de marcas y sus características principales.

Características	Imagen
EddingCNC [4]: software basado en PC sobre Windows al cual varios fabricantes, como GES [5] y Wolfcut [6], lo han extendido para soportar reconocimiento de marcas.	
myCNC [7]: esta aplicación de la empresa pv-automation [8] ofrece un sistema de visión artificial y reconocimiento de marcas basado en una PC industrial y cámaras USB.	
Machinekit [9]: es un software de control que opera sobre Linux al cual se le han hecho algunas intervenciones para el reconocimiento de marcas.	
Summa [10]: es una línea de máquinas de corte de contornos, principalmente en papel, que cuenta con lectura de marcas integrada en sus sistemas embebidos.	

Además del hardware, las licencias y extensiones de software, las cámaras de video compatibles son muy específicas y de muy alto valor, agravando aún más la viabilidad de estas soluciones.

La empresa interesada, Wolfcut², utiliza actualmente uno de estos sistemas con algunos resultados adversos.

No se ha encontrado ningún sistema que utilice una cámara con conexión inalámbrica, y tampoco que aproveche el uso de la cámara de un teléfono celular.

Tampoco se ha encontrado una solución completa de código abierto y colaborativo que facilite el crecimiento del proyecto con la ayuda de la extensa comunidad de usuarios, desarrolladores y entusiastas.

1.4. Empresa interesada Wolfcut

Este trabajo se realiza en el marco de una colaboración con la empresa española Wolfcut, la cual fabrica y comercializa máquinas de control numérico en toda Europa.

Se pueden ver algunos de sus productos en su página web <https://wolfcut.es/>.

Cuenta con más de 20 años de experiencia en el rubro y algunas innovaciones en el área de reconocimiento de marcas.

Sin embargo las soluciones que ha utilizado hasta el momento requieren el uso de una PC con Windows para su funcionamiento y la empresa considera que estas tecnologías no son adecuadas para el ámbito industrial de sus clientes.

Es por ello que se trabajó en conjunto para lograr una solución embebida.

1.5. Motivación y alcance

La principal motivación de este trabajo es lograr extender las capacidades de un controlador embebido de uso profesional y dotarlo de visión artificial para el reconocimiento de marcas fiduciales.

Con los argumentos y la experiencia de la empresa Wolfcut, se determinó que uno de los controladores de uso profesional más popular del mercado es el NK105 de la firma Weihong [11] que se muestra en la figura 1.11.

Este controlador solo cuenta con un comando remoto para todas las operaciones de manejo y configuración.

No provee una API (*application programming interface*) definida por el fabricante ni una canal físico para conectarse y extender sus funciones.

Por otro lado, gracias a su diseño basado en FPGA³ (*field programmable gate array*) y no depender de una PC para funcionar es reconocido por: excelentes resultados de corte, gran estabilidad en trabajos extensos, muy buena fiabilidad y un costo muy accesible.

²<https://wolfcut.es/>

³https://en.wikipedia.org/wiki/Field-programmable_gate_array



FIGURA 1.11. Controlador NK105 de la firma Weihong.

Las capacidades de operación del NK105 son relativamente simples, pero de nivel profesional con un mercado ya consolidado y muy extenso en todo el mundo.

Este modelo, a su vez, pertenece a una familia de soluciones de complejidad creciente que comparten el mismo controlador. Por lo tanto se espera que las extensiones que se desarrollaron se puedan aplicar a toda la familia.

El alcance de este trabajo se limita a intervenir y dotar de lectura de marcas al controlador NK105 y obtener resultados comparables con otras soluciones de mercado.

Capítulo 2

Introducción específica

En el presente capítulo se introducen las tecnologías más relevantes involucradas, se explica el álgebra y la geometría asociada a la alineación de planos y finalmente los criterios y selección de marcas de registro.

2.1. Tecnologías utilizadas

En el diagrama de bloques de la figura 2.1 se muestran las partes que componen el sistema implementado. Para explicar como se relacionan e interactúan entre sí estos bloques, en las próximas secciones de esta memoria se describen las cualidades y funciones más destacadas de cada uno.

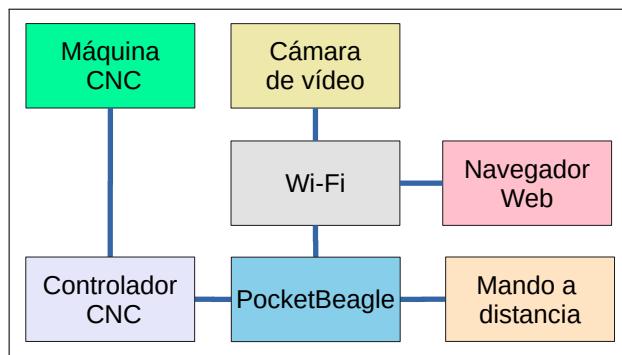


FIGURA 2.1. Diagrama de bloques del sistema implementado.

2.2. Plataforma PocketBeagle

PocketBeagle es un miembro del ecosistema de plataformas de desarrollo BeagleBoard [12]. Las características de esta plataforma, que se muestra en la figura 2.2.A, y que son relevantes para este trabajo son las siguientes:

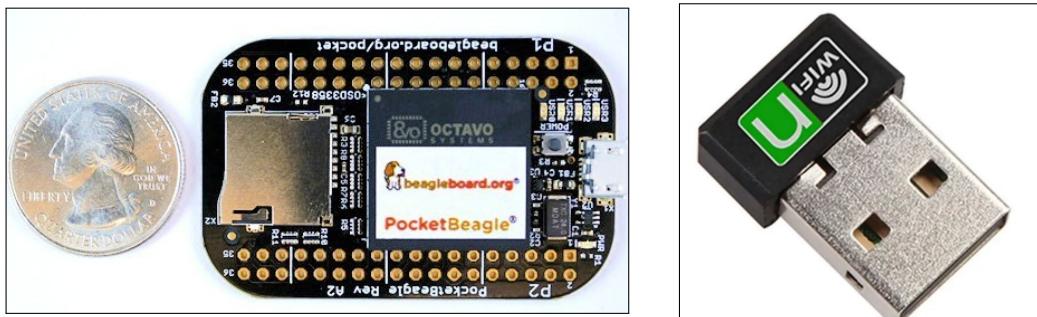
- Controlador integrado SiP (system-in-package) Octavo Systems OSD3358-SM.
- Memoria de 512MB DDR3.
- Unidad de procesamiento de 32b Cortex-A8 @1-GHz.
- 72 pines de expansión, UART, SPI, I2C, entre otras.
- USB de alta velocidad.

Durante la carrera de maestría se obtuvo experiencia en el uso de otra plataforma de la misma familia, la BeagleBoneBlack¹, sobre la cual se corrió un sistema operativo Linux y se desarrollaron drivers para manejar interfaces de comunicación.

Dicha experiencia permitió argumentar que la PocketBeagle cuenta con las interfaces de comunicación necesarias y es capaz de correr el software requerido para este trabajo a una fracción del costo y tamaño.

La única falencia es que no cuenta con una interfaz Wi-Fi ni Ethernet pero se resolvió utilizando un adaptador USB como se destaca en la figura 2.2b.

Se está utilizando una distribución oficial del sistema operativo Debian compilada para esta plataforma que se puede descargar desde el link oficial².



(A) Plataforma PocketBeagle como unidad de procesamiento.
(B) Adaptador USB a Wi-Fi que otorga conectividad.

FIGURA 2.2. Conjunto de herramientas adoptadas.

Se evaluaron plataformas más potentes como la PYNQ-Z1 [13]. Si bien las prestaciones son mayores a la PocketBeagle, también lo es el costo, y dado que este trabajo es solo un accesorio para un controlador de máquinas de segmento medio y bajo, se intentó mantener los costos y la complejidad acotada.

2.3. Aplicación web

La interfaz de usuario se desarrolló utilizando tecnologías web para permitir acceder desde cualquier dispositivo con un navegador web.

Los argumentos a favor de esta tecnología están basados en la falta de aplicaciones para el manejo de máquinas CNC que sean independientes del sistema operativo del ordenador del cliente.

Muchos usuarios utilizan herramientas de diseño sobre el sistema operativo macOS³, y deben contar con un segundo ordenador para poder interactuar con el CNC.

Utilizando la tecnología web, solo basta con abrir un navegador desde el mismo entorno de trabajo para operar el CNC.

Para cumplir con los requisitos planteados se utilizó un arreglo de tecnologías web muy variadas, pero muy ligadas entre sí, que se muestran en la figura 2.3.

¹<https://beagleboard.org/black>

²<https://beagleboard.org/latest-images>

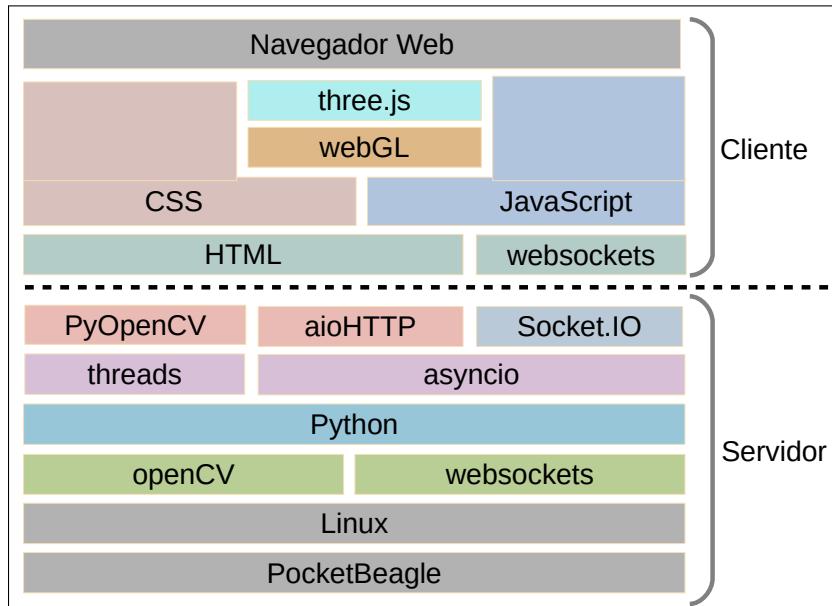


FIGURA 2.3. Capas de software relacionadas con la aplicación web utilizadas.

Para entender la función principal de cada capa se describen algunos detalles en la siguiente lista:

- Python [14]: es un poderoso y popular lenguaje de programación en el cual se corre principalmente el servidor web, y las funciones de procesamiento de imágenes.

La imagen del sistema operativo de la PocketBeagle ya cuenta con Python versión 3 instalado por defecto, lo que asegura compatibilidad.

- asyncio [15]: es una biblioteca para Python que permite correr una única tarea que administra muchas de manera concurrente y cooperativa.

Esto permite que, por ejemplo, una función de Python esté esperando datos de un archivo mientras otra procesa una imagen sin bloquear las funciones del servidor.

- aiohttp [16]: es una biblioteca de Python que permite correr un servidor web utilizando la infraestructura de asyncio para realizar tareas de manera cooperativa y concurrente. Es el motor del servidor web.
- HTML 5.0 [17]: es el lenguaje de marcas utilizado para visualizar contenidos en la web.

Se utiliza para mostrar contenido estático y también para aprovechar un mecanismo nativo de la versión 5.0 que permite la reproducción de vídeo en la página web sin necesidad de otras tecnologías.

- CSS [18]: es un lenguaje que permite definir estilos, colores, formato y modo de presentación en pantalla de una página escrita en HTML.

Es indispensable para crear aplicaciones web atractivas y apropiadas para cada uso.

- JavaScript [19]: es un lenguaje de programación intrínsecamente relacionado con HTML que permite la creación de páginas web dinámicas.

La mayoría de los navegadores modernos soportan este lenguaje y esto permite que la aplicación que se desarrolla pueda correr en cualquier plataforma que cuente con un navegador web.

Más del 90 % de la aplicación web desarrollada está codificada en lenguaje JavaScript: los cálculos de alineación, la interacción con el usuario, etc.

También se utilizan bibliotecas de terceros para diferentes usos, escritas en este lenguaje, lo que permite reutilizar código.

- WebGL [20]: es una biblioteca gráfica (*Web graphics library*) escrita en JavaScript, que permite definir y visualizar objetos en tres dimensiones en una página web.

Esta íntimamente ligada con el desarrollo web y es por ello que puede aprovechar las tarjetas gráficas del ordenador del cliente para acelerar las tareas de visualización y procesamiento.

De esta manera logra eficiencias similares a las aplicaciones nativas del sistema operativo.

- Three.js [21]: es una biblioteca escrita en JavaScript, que utiliza la tecnología WebGL y facilita la creación de objetos, cuenta con muchos ejemplos y casos de uso, abstrae al programador de los detalles de implementación y mejora el mantenimiento del código.

Se utiliza en la aplicación para visualizar el movimiento de la máquina en 3D, los trazos de corte, las correcciones de rotación, etc.

- Websockets [22]: es un protocolo de comunicaciones que opera sobre el protocolo TCP/IP, similar a HTTP, pero diseñado con la premisa de lograr una comunicación bidireccional de baja latencia.

Es de gran importancia en la aplicación para lograr una rápida respuesta de operación.

- socket.IO [23]: Es una biblioteca de JavaScript que utiliza Websockets para permitir la comunicación bidireccional entre el servidor web y el o los clientes.

Toda la comunicación entre los scripts de JavaScript que corren en el cliente y el servidor en Python que corre en la PocketBeagle se comunican utilizando esta biblioteca.

- OpenCV [24]: es una biblioteca muy popular escrita en C++ para procesamiento de imágenes asistido por computadora. Además de contar con potentes algoritmos de procesamiento muy útiles para este trabajo, es soportada por muchas plataformas asegurando la compatibilidad entre dispositivos. En particular la PocketBeagle utiliza la biblioteca libopencv-dev extraída de los repositorios oficiales de Debian.

- PyOpenCV [25]: es una biblioteca de Python que permite utilizar las funciones de OpenCV. Dado que este trabajo está escrito en Python, se utiliza esta biblioteca para el procesamiento de marcas que internamente utiliza libopencv-dev del sistema operativo.

2.4. Selección de la cámara de vídeo

Los criterios para la selección de la cámara de vídeo se basaron principalmente en la interfaz de comunicación, los costos, la calidad de imagen y la facilidad de adquisición en mercado local. Con dichos criterios se confeccionó la tabla 2.1 con las opciones más destacadas y se las calificó de 0 a 5.

TABLA 2.1. Tabla comparativa entre diferentes cámaras calificadas de 0 a 5.

Tipo	Interfaz	Calidad de imagen [0-5]	Disponibilidad [0-5]	Costo [0-5]
Celular	Wi-Fi	4	5	2
Microscopio	USB	5	5	5
web-cam	USB	3	5	3
Industrial	Ethernet	5	1	1

Según esta tabla, la mejor opción es el microscopio USB, son económicos y fáciles de conseguir en el mercado local. Permiten ajustar el área de visualización al tamaño de las marcas.

Sin embargo la distancia entre el controlador de la máquina y la cámara es mayor a la que soporta el canal USB. Para poder utilizarlo de manera confiable se requiere de un amplificador que permita extender su alcance. Esto aumenta el costo total de la solución y agrega elementos susceptibles de fallas.

Por lo tanto para el alcance de este trabajo se optó por usar la cámara de un teléfono celular en conjunto con la aplicación IP Webcam [26] para la transmisión de vídeo como se muestra en la figura 2.4b.

Esta opción resuelve el problema de la longitud del cable dado que transmite de manera inalámbrica, pero también permite utilizar varios modelos de teléfonos simultáneamente sin cambiar el software y poder tomar imágenes desde diferentes ángulos.

Esta aplicación cuenta además con una interfaz web desde donde se pueden ajustar los parámetros de la cámara más importantes: zoom, brillo, desplazamiento, resolución y calidad de imagen. Se muestra una captura parcial de esta página en la figura 2.4a

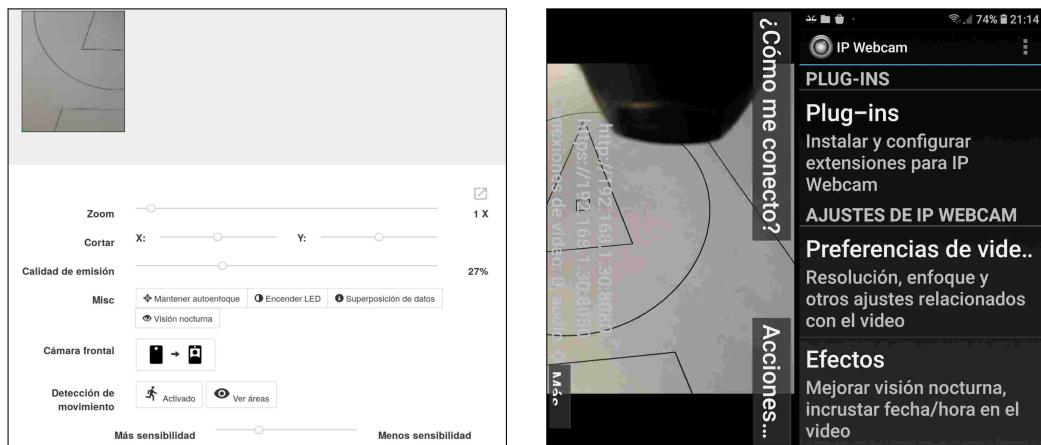
2.5. Trigonometría de alineación

El objetivo del método es poder conocer la dimensión, la posición y la rotación de un objeto relativo a la máquina.

Como la pieza que se desea mecanizar y también la propia mecánica de la máquina podrían estar distorsionadas, lo que importa es solo su relación.

Como se trata de una alineación en dos dimensiones, en geometría implica posicionar, escalar y rotar un plano respecto de otro.

Dado dos planos A y B superpuestos como se muestra en la figura 2.5a, se define al plano A, en rojo, como el sistema de coordenadas de la máquina y sus dimensiones las establecidas en el archivo de corte. Mientras que B, en azul, como el



(A) Captura parcial de la página web que permite el control de los parámetros de la cámara.

(B) Captura parcial la aplicación en el teléfono. Se puede ver la misma imagen que en la web de administración

FIGURA 2.4. Aplicación IP Webcam que permite utilizar la cámara del teléfono y enviar el vídeo por Wi-Fi.

objeto real a mecanizar que se encuentra desplazado, rotado y escalado respecto al primero.

Conociendo las coordenadas de un solo punto en los dos sistemas de referencia, se puede establecer el desplazamiento y corregirlo como se realiza en la figura 2.5b.

El punto 1 en el sistema A es el (2, 1) mientras que en el sistema B es el (0, 0).

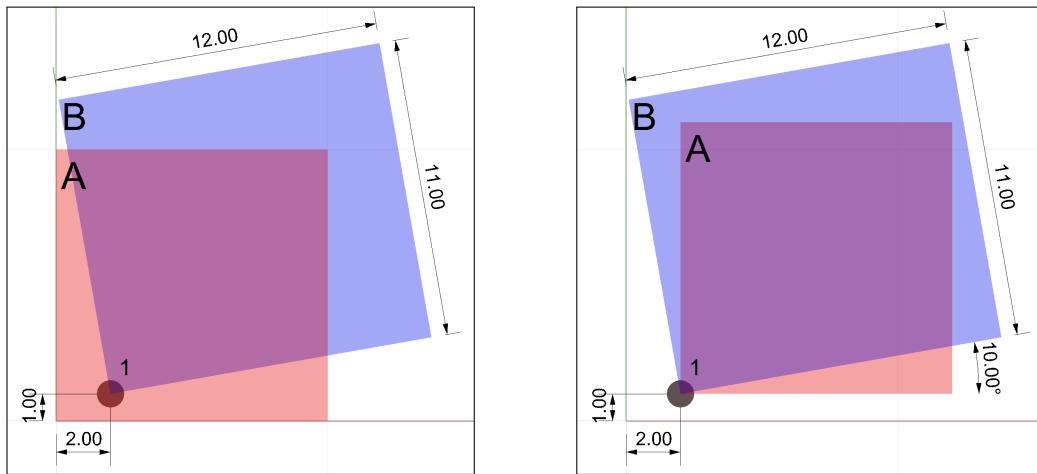
La ecuación que corrige la posición del plano A es la 2.1

$$\begin{aligned} A_x(x) &= x + x_{1B} \\ A_y(y) &= y + y_{1B} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Ahora, si se considera el punto 2, como se muestra en la figura 2.6, se puede calcular la rotación relativa entre B y A.

Como primer paso, aplicando trigonometría se calcula el ángulo que forma el punto 2 con el punto 1 en el plano A, luego el ángulo del punto 2 con el punto 1 pero en coordenadas del plano B. Su diferencia es la rotación del plano A respecto al plano B.

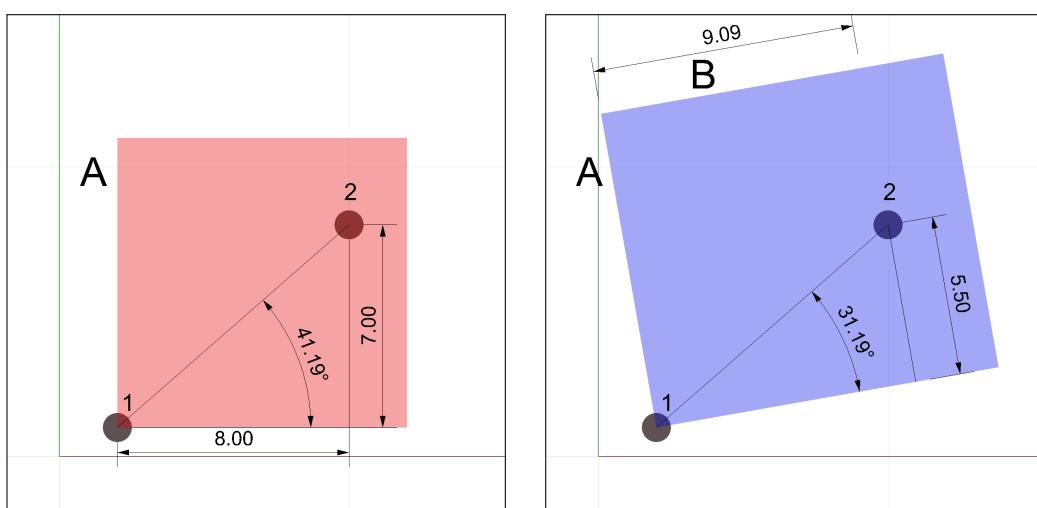
Se puede ver gráficamente en las figuras 2.6a y 2.6b y se expresa en las ecuaciones 2.2.



(A) El plano B se encuentra desplazado 2 unidades en el eje x y 1 unidad en el eje Y.

(B) El plano A se desplaza y corrige su posición.

FIGURA 2.5. Corrección de desplazamiento. A representa el sistema de coordenadas de la máquina y las dimensiones extraídas del archivo de corte, B representa el objeto real desplazado, escalado y rotado respecto del primero.



(A) Se calcula el ángulo de la recta formada por los puntos 1 y 2 en el plano A.

(B) Se calcula el ángulo de la recta formada por los puntos 1 y 2 en el plano B.

FIGURA 2.6. Cálculo de rotación de la recta formada entre los puntos 1 y 2 en los planos A y B.

$$\begin{aligned}
 R_A &= \arctan\left(\frac{x_{2A}}{y_{2A}}\right) \\
 &= \arctan\left(\frac{7}{8}\right) \\
 &= 41.18^\circ \\
 R_B &= \arctan\left(\frac{x_{2B}}{y_{2B}}\right) \\
 &= \arctan\left(\frac{5,5}{9,09}\right) \\
 &= 31.18^\circ \\
 R_{AB} &= R_A - R_B \\
 &= 10^\circ
 \end{aligned} \tag{2.2}$$

Una vez obtenida la diferencia de ángulos se corrige rotando el plano A respecto del B como se muestra en la figura 2.7.

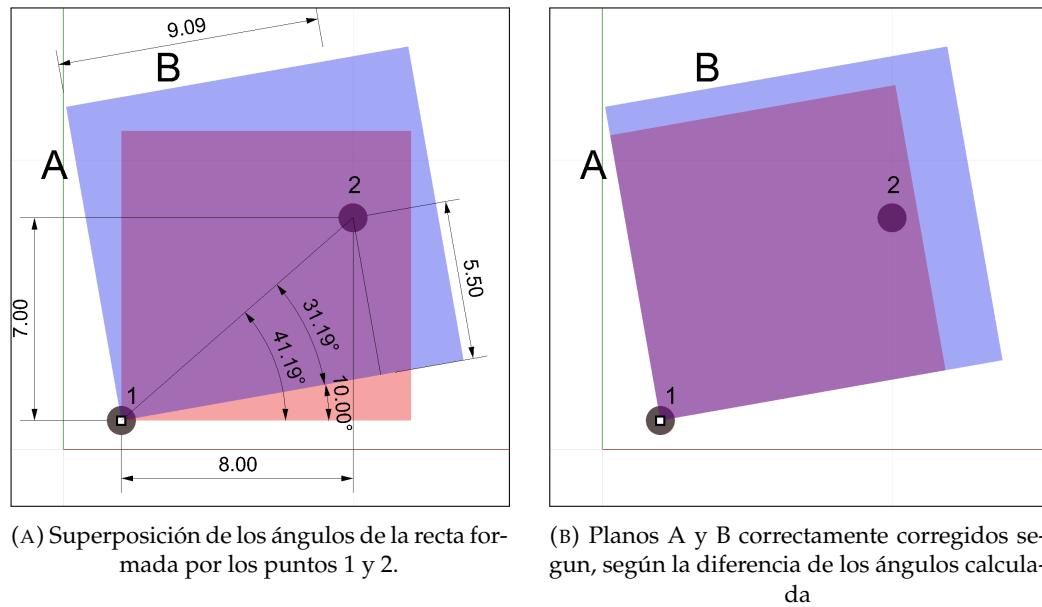


FIGURA 2.7. Corrección de la rotación del plano A respecto del plano B utilizando dos puntos de referencia.

Para completar el proceso y conseguir la alineación final resta escalar el plano A relacionando las dimensiones con el plano B.

Se muestra gráficamente esta corrección en la figura 2.8 y se expresa en las ecuaciones 2.3.

$$\begin{aligned}
 S_{Ax} &= \frac{x_B}{x_A} \\
 &= \frac{12}{10} \\
 &= 1,2 \\
 S_{Ay} &= \frac{y_B}{y_A} = \frac{11}{10} \\
 &= 1,1
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

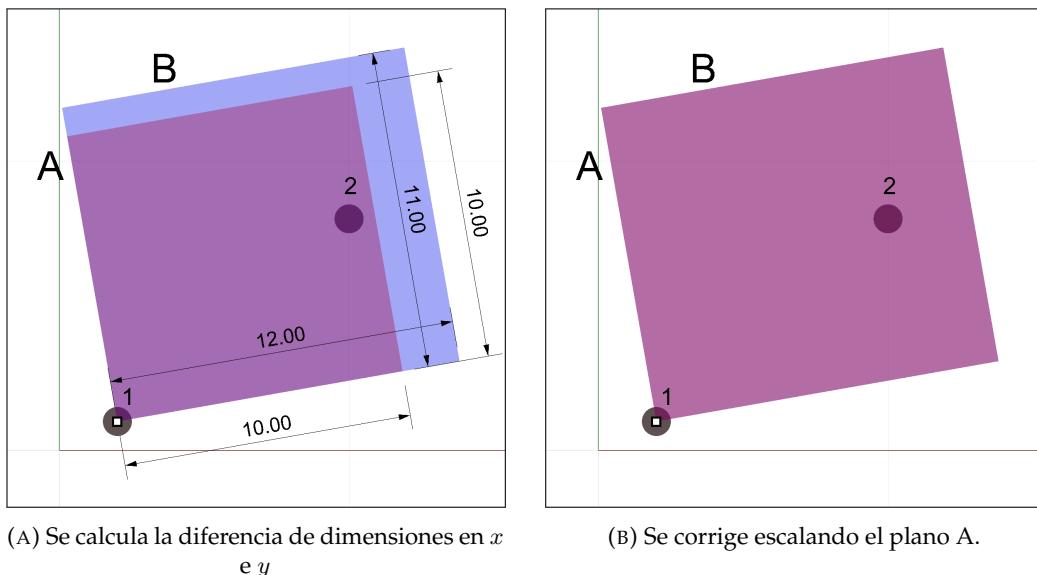


FIGURA 2.8. Corrección de la escala entre los planos A y B utilizando como factor de escala las dimensiones relativas entre los dos planos.

2.6. Detección y tipos de marcas fiduciales

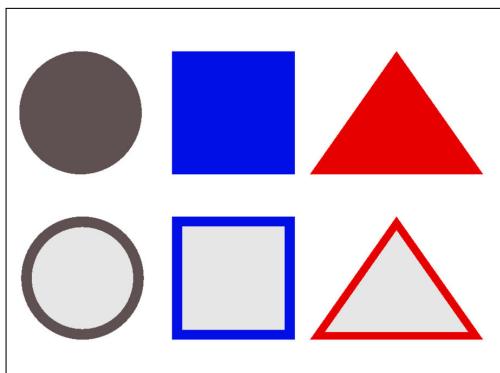
Es posible utilizar diversas figuras geométricas e incluso colores para identificar la posición de una marca, sin embargo en el mercado gráfico y de mecanizado lo más usual son círculos o cuadrados de entre 1 mm y 10 mm de diámetro o de lado.

Para un efectivo reconocimiento de una marca utilizando una cámara de vídeo algunas consideraciones deben tenerse en cuenta como ser:

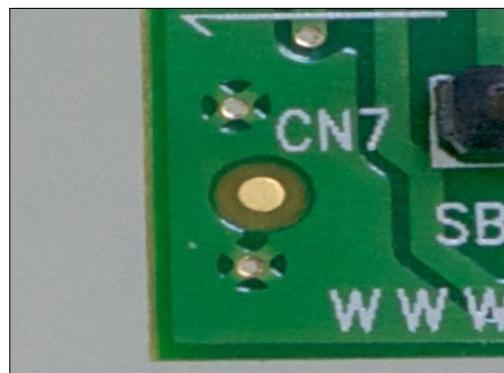
- Maximizar el contraste entre el fondo del objeto y la marca.
- Evitar irregularidades en el trazado del contorno.
- De ser posible, que la marca esté llena con un color que contraste con el material impreso.
- Que esté alejada de bordes y otras figuras de la pieza.
- En el caso de marcas cuadradas es posible calcular el centro y también una aproximación del ángulo.
- En el caso de marcas circulares se logra mejor precisión en la detección del centro pero dado su simetría radial no se cuenta con la información de rotación.

Algunos ejemplos de marcas fiduciales se muestran en la figura 2.9.

Para el alcance de este trabajo solo se utilizarán marcas geométricas llenas o contornos.



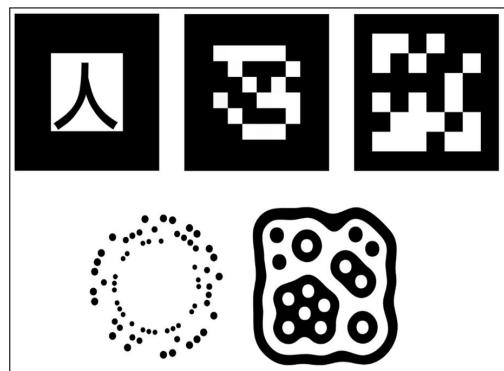
(A) Figuras geométricas llenas o solo su contorno.



(B) Ejemplo de marcas fiduciales en una placa de circuito impreso PCB.



(C) Reconocimiento de un contorno cuadrado utilizando el software desarrollado nkHACK.
Ver más detalles en la sección 3.5.



(D) Marcas fiduciales codificadas. Se pueden utilizar para reconocer la posición y un código para diversos usos.

FIGURA 2.9. Ejemplo de diferentes tipos de marcas fiduciales para diversas aplicaciones.

Capítulo 3

Diseño e implementación

En este capítulo se desglosan los bloques principales del sistema, se explica su interconexión, se exponen los criterios de diseño y se destacan los aspectos más relevantes de cada implementación.

3.1. Diseño general del sistema

En los diagramas de bloques de la figura 3.1 se realiza la comparación entre la topología original de conexión del controlador NK105, que se muestra en la figura 3.1a y la modificada para el reconocimiento de marcas, representado en la figura 3.1b.

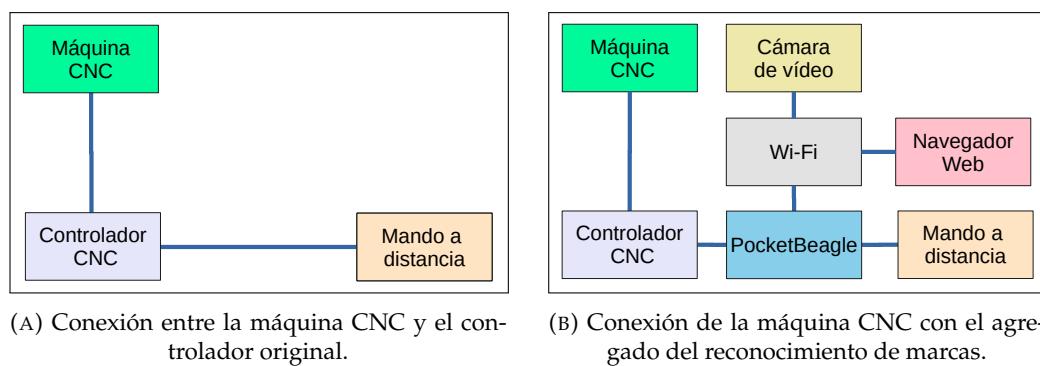


FIGURA 3.1. Comparación entre la conexión original de la máquina CNC y la modificada para el reconocimiento de marcas.

En la tabla 3.1 se detallan las principales características de cada bloque junto a una imagen representativa:

TABLA 3.1. Descripción e imagen representativa de los bloques principales del sistema.

Características del bloque	Imagen
<p>Bloque Wi-Fi: representa una red inalámbrica compartida entre los bloques “PocketBeagle”, “cámara de vídeo” y “navegador web”. Si además contara con acceso a internet, permitiría acceder remotamente.</p>	
<p>Bloque navegador web: representa un dispositivo que puede correr un navegador web: ordenador personal, teléfono celular, tableta, etc. Sin embargo para el alcance de este desarrollo se sugieren pantallas mayores a 10”.</p>	
<p>Bloque PocketBeagle: representa la plataforma de desarrollo elegida con el agregado de una circuitería que permite intercalarse entre los bloques “controlador CNC” y “mando a distancia”.</p>	
<p>Bloque máquina CNC: representa el conjunto de piezas electromecánicas motorizadas para realizar el mecanizado de piezas.</p>	

TABLA 3.1. Descripción e imagen representativa de los bloques principales del sistema. Continuación.

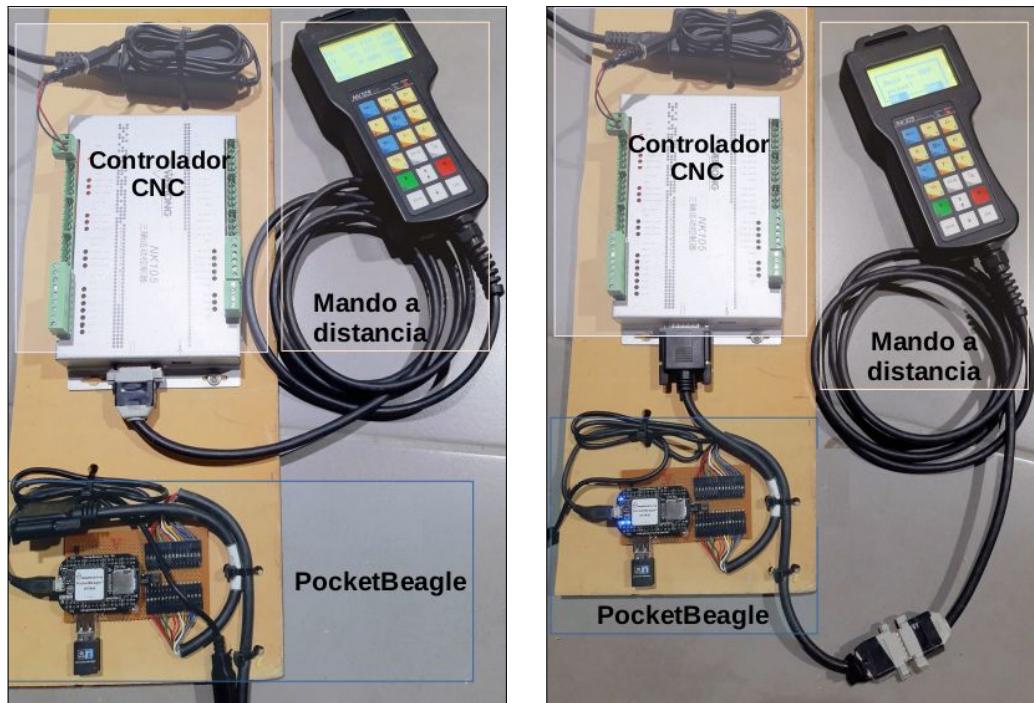
Características del bloque	Imagen
Bloque controlador CNC: representa el dispositivo electrónico encargado de comandar los motores de la máquina para generar los movimientos de corte.	
Bloque mando a distancia: representa el dispositivo electrónico que se conecta al controlador. Cuenta con una pantalla para visualización y un teclado para el ingreso de datos.	
Bloque cámara de vídeo: representa el dispositivo que se monta en la máquina CNC y permite capturar las imágenes que se utilizarán para el reconocimiento de marcas. En esta implementación se utiliza la cámara de un teléfono celular.	

3.2. Bloque PocketBeagle

Una de las funciones de este bloque es interceptar las señales entre el controlador y el mando para poder intervenirlas. Se estudió en detalle el cable que los interconecta y se determinó que conduce dos canales de comunicación que se detallan en la siguiente lista:

- UART: *universal asynchronous receiver-transmitter* es una comunicación serial que comunica periódicamente el estado del teclado al controlador.
- SPI: *synchronous peripheral interface* es una interfaz sobre la cual se envían los datos desde el controlador a la pantalla de cristal líquido o LCD (*liquid crystal display*).

Para poder interactuar con estas interfaces se intercaló una tarjeta electrónica que las conecta a la plataforma PocketBeagle. En la figura 3.2 se muestra esta conexión en comparación con la original.



(A) Controlador CNC conectado con el mando.

(B) Controlador CNC conectado con el mando pero intervenido por el bloque "PocketBeagle".

FIGURA 3.2. Comparación entre la conexión del controlador antes y después de ser intervenido por el accesoario desarrollado.

Como la conexión entre el mando a distancia y el controlador se realiza con un conector, el proceso de intercalar el bloque "PocketBeagle" es un proceso reversible, no modifica la funcionalidad original del sistema y permite instalarse sin dificultades.

3.2.1. Teclado virtual

Para lograr enviar datos desde la PocketBeagle al controlador se desarrolló una aplicación en lenguaje C que corre como servicio. En la figura 3.3 se muestra el diagrama de bloques del software.

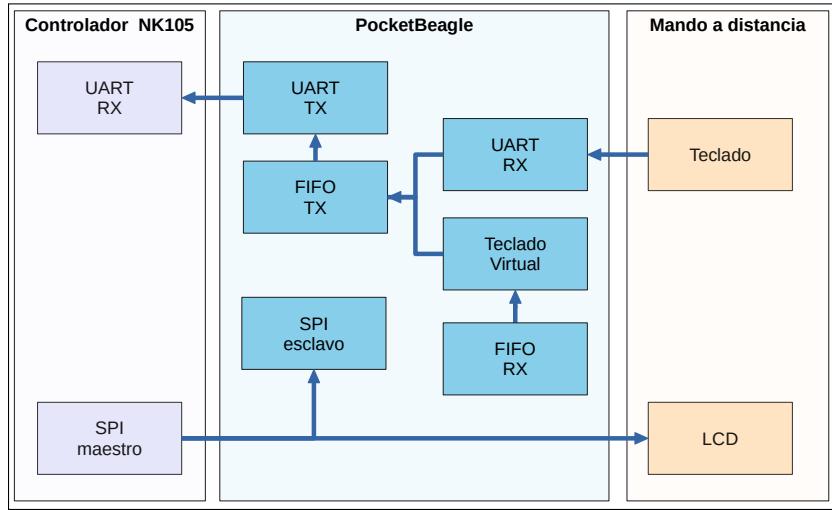


FIGURA 3.3. Diagrama de bloques del software de virtualización de teclado y pantalla.

En los fragmentos de código 3.1, 3.2 y 3.3 se pueden ver tres tareas o *threads* que implementan: la lectura del teclado físico, la lectura de una cola virtual y el envío de los datos al controlador respectivamente.

```

1 void* rcvFunc(void* niyto)
2 {
3     char frame[FRAME_SIZE];
4     while(true) {
5         while ( Get_Byt(PORT_NUMBER, frame )<1 || frame[0] != FRAME_HEADER)
6             ;
7         PollComport(PORT_NUMBER, frame+1, FRAME_SIZE-1);
8         if(memcmp(frame, FRAME_DEFAULT, FRAME_SIZE))
9             mq_send(msgQueue, frame, FRAME_SIZE, 1);
10    }
11 }
12 }
```

CÓDIGO 3.1. Tarea encargada de procesar los datos del teclado físico y reenviarlos a la cola de multiplexado.

Se aprovecharon los mecanismos de colas o FIFO's *first in first out* que ofrece Linux para multiplexar los datos del "teclado" con un nuevo bloque: "teclado virtual".

Con esta técnica, si se envían datos al bloque "FIFO Rx" los datos se reenvían al controlador emulando el presionado de un botón y al mismo tiempo se atiende de la comunicación del teclado original. De esta manera el controlador se puede manejar virtual o físicamente.

Dado que la recepción es a través de una FIFO, es posible instanciar más de un teclado virtual con accesos concurrentes [27].

```

1 void* recvVirtual(void* niyto)
2 {
3     char buf [ MAX_VIRTUAL_CMD_LENGTH ];
4     char frame[ FRAME_SIZE ];
5     FILE* pipeVi;
6     while(pipeVi=fopen(PIPE_VI,"r")) {
7         while(fgets(buf,MAX_VIRTUAL_CMD_LENGTH,pipeVi)>0) {
8             memcpy(frame,FRAME_DEFAULT,FRAME_SIZE);
9             mapBtn2Bits(atoi(buf),frame);
10            crc(frame);
11            if(memcmp(frame,FRAME_DEFAULT,FRAME_SIZE)) {
12                mq_send(msgQueue,frame,FRAME_SIZE,1);
13            }
14        }
15        fclose(pipeVi);
16    }
17 }
18

```

CÓDIGO 3.2. Tarea que recibe datos del teclado virtual y los reenvía a la cola de multiplexado.

```

1 void* sendFunc(void* niyto)
2 {
3     struct timespec tm;
4     char frame[ FRAME_SIZE ];
5     while ( true ) {
6         clock_gettime(CLOCK_REALTIME, &tm);
7         tm=timespec_add (tm,(struct timespec){0, QUEUE_SND_TOUT});
8         mq_timedreceive( msgQueue,frame,FRAME_SIZE,NULL,&tm);
9         sendBuf      ( PORT_NUMBER ,ans?frame:FRAME_DEFAULT ,
10           FRAME_SIZE );
11     }
12 }
13

```

CÓDIGO 3.3. Tarea de multiplexado de los datos del teclado físico y virtual.

3.2.2. Pantalla virtual

Para poder conocer el estado del controlador es necesario contar con la información que se muestra en la pantalla LCD.

Se estudiaron en detalle las especificaciones del controlador de esta pantalla con el objetivo de emular una pantalla virtual.

Debido a la alta velocidad de los datos y que las tramas no tienen un largo definido, no fue posible utilizar los drivers de SPI del *kernel* y realizar esta emulación en espacio de usuario.

Para poder capturar correctamente estas tramas se implementó un driver SPI en modo esclavo o *SPI slave*, como un nuevo módulo del sistema operativo [28]. Este driver, a diferencia del original, permite recibir cualquier longitud de trama, en cualquier momento y almacenarla en un espacio de memoria contigua. Esto se logró utilizando las siguientes técnicas:

- Interrupciones: se utilizó una interrupción conectada a la señal de selección de chip *CS chip select*. Esto permite reaccionar rápidamente cuando se inicia una transacción.
- Acceso directo a memoria: se utilizó el subsistema DMA *direct access memory* para que las operaciones de copia de los datos que se reciben por SPI a memoria se realicen sin la intervención del procesador. Esto permite conservar los recursos del procesador para otras tareas.
- Comunicación interprocesos: se utilizaron diversos métodos de IPC's [29] (*interprocess communications*) que ofrece Linux para lograr un sistema reactivo con mínimo retardo.
- Operaciones de archivo: para transferir las tramas decodificadas del espacio de *kernel* al de usuario, se implementó un acceso al módulo emulando un archivo. De esta manera se aprovechan las herramientas de lectura y escritura del sistema operativo y se facilita el desarrollo del software.
- Multitarea en espacio de *kernel*: dentro del módulo se utilizaron varias tareas *kthreads* para evitar bloqueos entre operaciones de escritura de datos al espacio de usuario con la recepción de nuevos datos por SPI.
- Indexado de memoria contigua: debido a que la escritura por DMA no permite escribir en colas circulares, se implementó un sistema de una cola lineal indexada. Esto permite leer y escribir sin solapamientos. Cuando está cerca del límite de utilización se reinician los índices.

En los fragmentos de código 3.4, 3.5 y 3.6 se destacan algunas de estas técnicas.

En el diagrama de bloques de la figura 3.4 se muestra la secuencia de pasos implementada en el módulo.

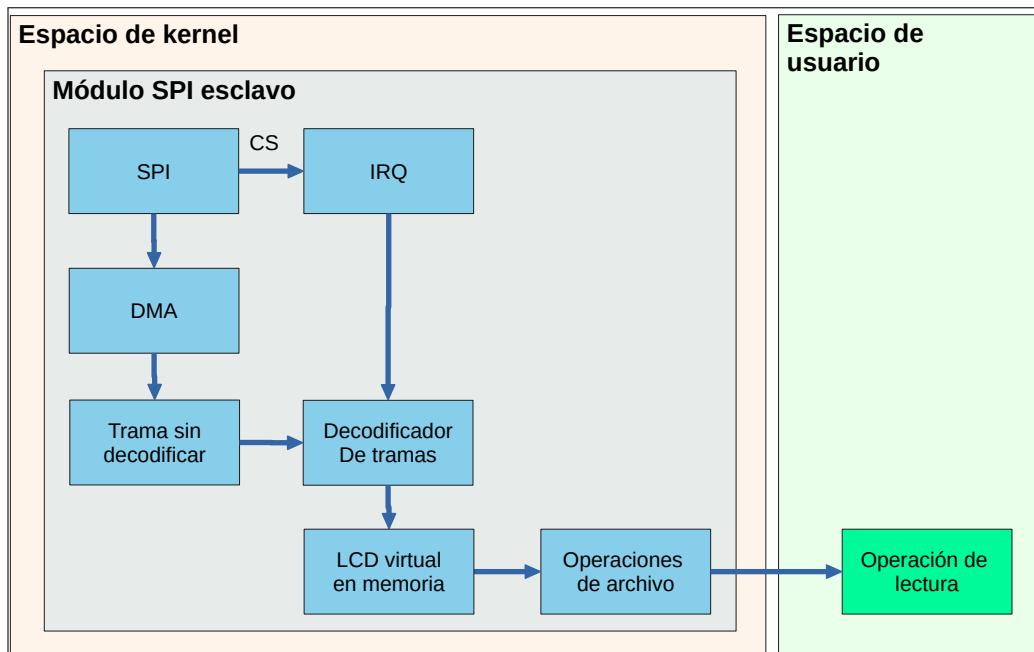


FIGURA 3.4. Diagrama de bloques implementados en el driver de *kernel* para la lectura e interpretación de las tramas de datos entre el controlador y el LCD.

```

1 static irq_handler_t csIrqHandler(unsigned int irq, void *dev_id,
2                                 struct pt_regs *regs)
3 {
4     complete(getNewDataReady());
5     return (irq_handler_t) IRQ_HANDLED;
6 }
```

CÓDIGO 3.4. Manejador de la interrupción asociada a una transacción SPI. Cuando es llamada, activa toda la cadena de eventos que culmina con la actualización del estado de la pantalla.

```

1 static int newDataFunc(void *nol)
2 {
3     int ans;
4     while(1) {
5         ans=wait_for_completion_interruptible_timeout(&newData.ready,
6             msecs_to_jiffies(param_newDataTout));
7         reinit_completion(&newData.ready);
8         newData.actualIndex = findSpiFifoLen(newData.actualIndex);
9         newData.lastIndex = parse ( newData.actualIndex );
10        if(ans==0)
11            wakeUpFileOp();
12    }
13    return 0;
14 }
```

CÓDIGO 3.5. Tarea que espera en modo bloqueante una nueva trama de datos. Utiliza uno de los métodos de comunicación interprocesos del *kernel* de Linux.

3.2.3. Sistema virtual completo

Trabajando en conjunto, el teclado y la pantalla virtual son todo lo necesario para tomar control de la máquina desde la PocketBeagle.

El teclado virtual corre como servicio del sistema operativo y se encarga de la comunicación UART. La pantalla virtual corre como módulo del *kernel* y atiende la interfaz SPI.

En el ejemplo de la figura 3.5 se puede ver en la pantalla LCD el ingreso de los números “1234” sin presionar los botones del teclado físico. Estos son enviados desde una consola de comandos de la PocketBeagle.

Dada la complejidad y la falta de información oficial, el desarrollo y puesta a punto de estos dos subsistemas representaron aproximadamente el 50 % del total del trabajo.

3.2.4. Conexión USB como dispositivo de almacenamiento

La única opción para transferir archivos al controlador es a través un dispositivo de almacenamiento USB o *pendrive*.

```

1 static ssize_t lcd_read( struct file *filp, char __user *buf, size_t
2 count, loff_t *f_pos )
3 {
4     size_t len=0;
5     size_t miss=0;
6     char localBuf[FRAME_LEN];
7
8     int i=(int)filp->private_data;
9     wait_event_interruptible(fileOp.queue[i].ready, fileOp.queue[i].
10 flag);
11     fileOp.queue[i].flag=false;
12     len = ((FRAME_LEN-1)<count)?(FRAME_LEN-1):count;
13     memcpy(localBuf, (char*)getLcd()->cram, LCD_LEN);
14     sprintf(localBuf+LCD_LEN,TRAILER_LEN,"%05u\r\n",fileOp.queue[i].
15 frameNumber++);
16     miss= copy_to_user(buf,localBuf,FRAME_LEN-1);
17     len=len-miss;
18     decWakeUpCounter();
19     return len;
20 };

```

CÓDIGO 3.6. Función que bloquea a la espera de una operación de lectura desde el espacio de usuario. Cuando es llamada, copia la nueva información de la pantalla.

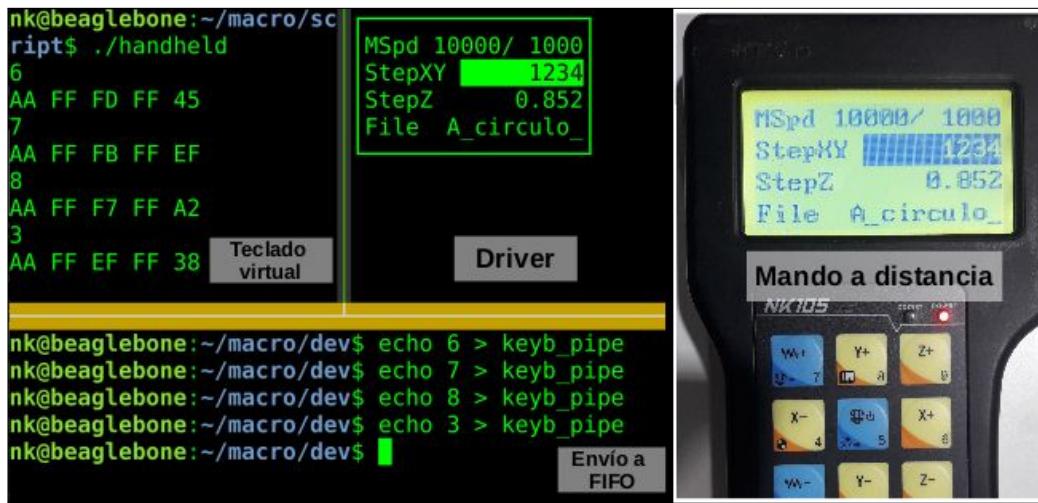


FIGURA 3.5. Control de la máquina mediante la PocketBeagle. Se envían datos a una FIFO y un servicio los direcciona al controlador. Los datos del LCD son capturados por el driver y mostrados en la consola. Se puede ver la sincronía entre el mando a distancia y el virtual.

La PocketBeagle cuenta con una conexión USB cliente que puede actuar como un dispositivo de almacenamiento virtual. Sobre esta tecnología se desarrolló una técnica para intercambiar archivos con el controlador de manera remota a través de Wi-Fi.

En la figura 3.6 se puede ver el conexionado físico entre la PocketBeagle actuando como USB cliente y el controlador actuando como USB anfitrión o *host*.

La tecnología involucrada en Linux para permitir este funcionamiento es *configFS* [30].

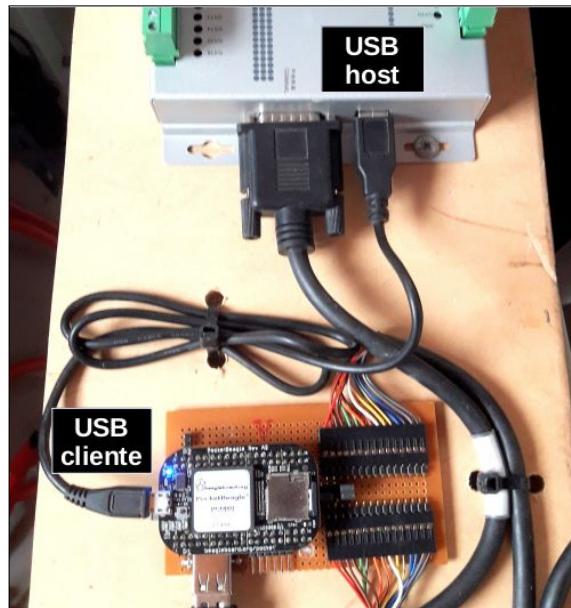


FIGURA 3.6. La PocketBeagle se comporta como un dispositivo de almacenamiento. El controlador accede al sistema de archivos en busca de trabajos a procesar.

Se implementó un sistema de intercambio de doble sistema de archivos como el que se muestra en la figura 3.7. Con este método mientras el controlador accede a un sistema de archivos con trabajos a procesar, la PocketBeagle puede escribir en otro.

Cuando se desea transferir un nuevo archivo al controlador, simplemente se invierten estos dos sistemas: el de lectura pasa a ser escritura y viceversa.

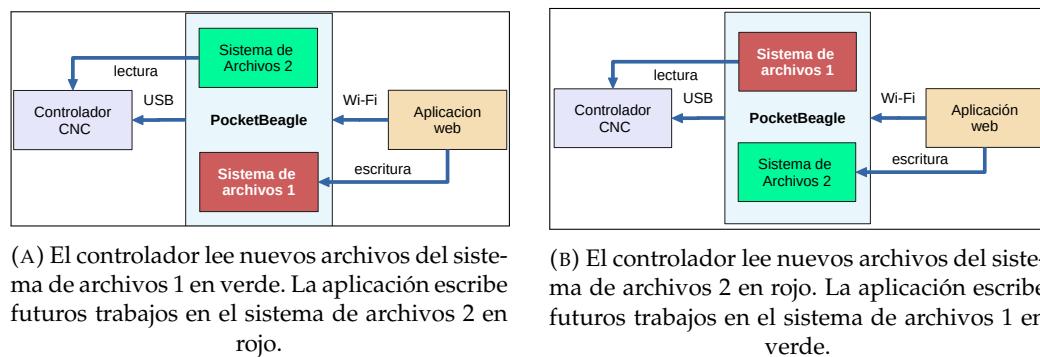


FIGURA 3.7. Técnica de doble sistema de archivos para transferir información al controlador.

En el script mostrado en el listado 3.7 se aprovecha el lenguaje *bash* para implementar este sistema dual en muy pocas líneas y corre como servicio en la PocketBeagle.

3.3. Conexión de la cámara con la PocketBeagle

Como se comentó en la sección 2.4, en el alcance de este trabajo se optó por usar la cámara de un teléfono celular montado en la máquina CNC y transmitir vídeo

```

1 pipe=./mass_pipe
2 mnt_point=./mnt_point
3 lun_file=/sys/kernel/config/usb_gadget/g_multi/functions/mass_storage
4 .usb0/lun.0/file
5 fs0=./fs0.img
6 fs1=./fs1.img
7
8 while true
9 do
10   if read line <$pipe; then
11     if test $fs = $fs0
12     then
13       fs=$fs1
14     else
15       fs=$fs0
16     fi
17     mount $fs $mnt_point
18     cp $line $mnt_point
19     umount $mnt_point
20     echo $fs > $lun_file
21   fi
22 done

```

CÓDIGO 3.7. Implementación de doble sistema de archivos conectado con la tecnología configFS. Se aprovecha la potencia de *bash* y se corre como servicio.

por Wi-Fi con una aplicación.

En la figura 3.8 se muestra un soporte desarrollado para sujetar el teléfono al eje Z de la máquina.

Además se agregó un soporte para un puntero láser que sirve para ajustar las posiciones relativas del teléfono y el motor de corte.

El dispositivo de sujeción permite ajustar la altura y rotación de manera precisa.

Para recibir las tramas de vídeo desde el celular y procesarlas en la PocketBeagle, se implementó una serie de funciones en lenguaje Python sobre la base de la biblioteca PyOpenCV¹

En el fragmento de código 3.8 se lista el procedimiento para acceder a la cámara y tomar un fotograma de vídeo.

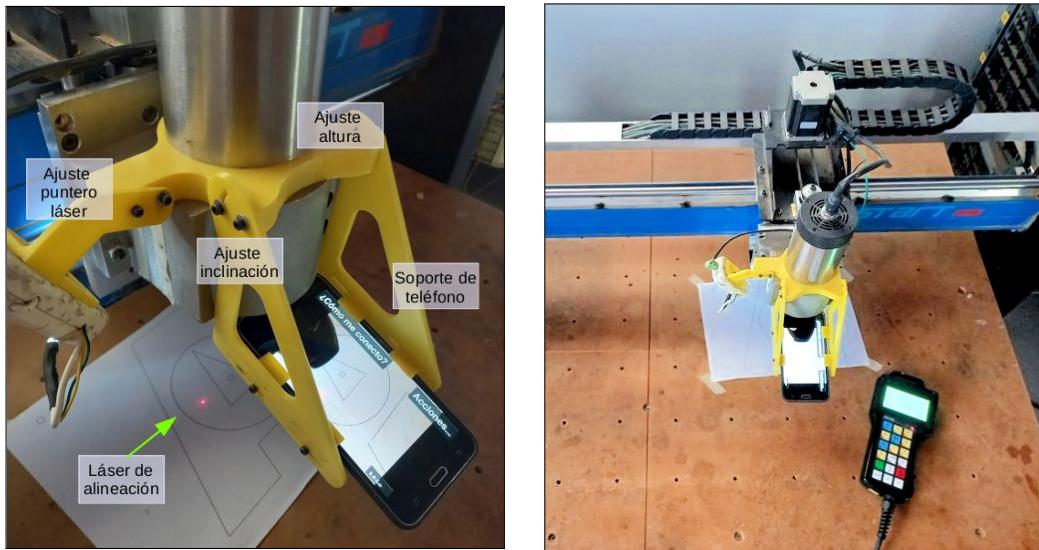
Una vez capturado el fotograma se lo procesa con una secuencia de operaciones que se muestran en el fragmento de código 3.9.

El fotograma “img” está formado por tres canales: azul, verde y rojo o BGR *blue*, *green*, *red*. A su vez cada píxel de cada canal está representado por 8 bits de datos.

En la línea 2 del algoritmo se convierte el formato de “img” a escala de grises según la ecuación 3.1:

$$\text{RGB}[A] \text{ to Gray: } Y \leftarrow 0,299 \cdot R + 0,587 \cdot G + 0,114 \cdot B \quad (3.1)$$

¹<https://pypi.org/project/pyopencv/>



(A) Soporte de teléfono implementado, con posibilidad de ajustar la altura, rotación e inclinación
 (B) Vista superior de la máquina CNC con el soporte del celular y láser instalados.

FIGURA 3.8. Soporte de celular y puntero láser solidarios al eje Z.

```

1 def capture():
2     vcap      = cv.VideoCapture("192.168.1.30:/video", cv.CAP_FFMPEG);
3     ret       = vcap.grab()
4     ret,frame = vcap.retrieve()
5     vcap.release()
6     return frame
7

```

CÓDIGO 3.8. Conexión a la cámara del teléfono por Wi-Fi y captura de un fotograma para su posterior procesamiento.

Luego en la línea 3 se convierte el formato de escala de grises a binaria de 8 bits, en donde el criterio de selección por 0 o 255 lo decide la variable “grayThresh”.

Un ejemplo de esta secuencia de procesamiento se puede ver en la figura 3.9.

La imagen binaria es procesada en la línea 4 por la función “findContours”² que busca todos los posibles contornos.

Sin embargo se configura para que devuelva solo aquellos que no están encerrados por un contorno mayor.

En el ejemplo de la figura 3.10b se puede ver este efecto en los cuadrados sin relleno que son detectados solo por su contorno externo. En la subsection 4.3.4 se aborda este tema con todo detalle.

En la siguiente parte del algoritmo se recorren todos los contornos encontrados y se le aplica una función que aproxima cada contorno a uno más suave.

Este algoritmo pretende filtrar irregularidades de la marca o de la captura de vídeo y se configura para que devuelva siempre un perímetro cerrado.

²https://docs.opencv.org/3.4/d4/d73/tutorial_py_contours_begin.html

```

1 def recognition(self,img):
2     imgray = cv.cvtColor(img, cv.COLOR_BGR2GRAY)
3     ret, thresh = cv.threshold(imgray, int(self.grayThresh), 0
4     , cv.THRESH_BINARY_INV)
5     contours, hierarchy = cv.findContours(thresh, cv.RETR_EXTERNAL, cv
6     .CHAIN_APPROX_SIMPLE)
7
8     validContours = 0
9     maxArea = 0
10    maxAreaIndex = 0
11    maxHull = 0
12    maxRect = 0
13    height,width,channels = img.shape
14
15    for i in range ( min(len(contours),10) ):
16        hull = cv.approxPolyDP(contours[i],0,True)
17        rect = cv.minAreaRect ( hull )
18        area = rect[1][0]*rect[1][1]
19        if ( area<targetArea*1.5 and area>targetArea*0.5 ) :
20            if ( area>=maxArea ) :
21                maxArea = area;
22                maxAreaIndex = i;
23                maxHull = hull
24                maxRect = rect
25                center = maxRect[0]
26                self.angle = maxRect[2]

```

CÓDIGO 3.9. Algoritmo principal de reconocimiento de marcas en un fotograma

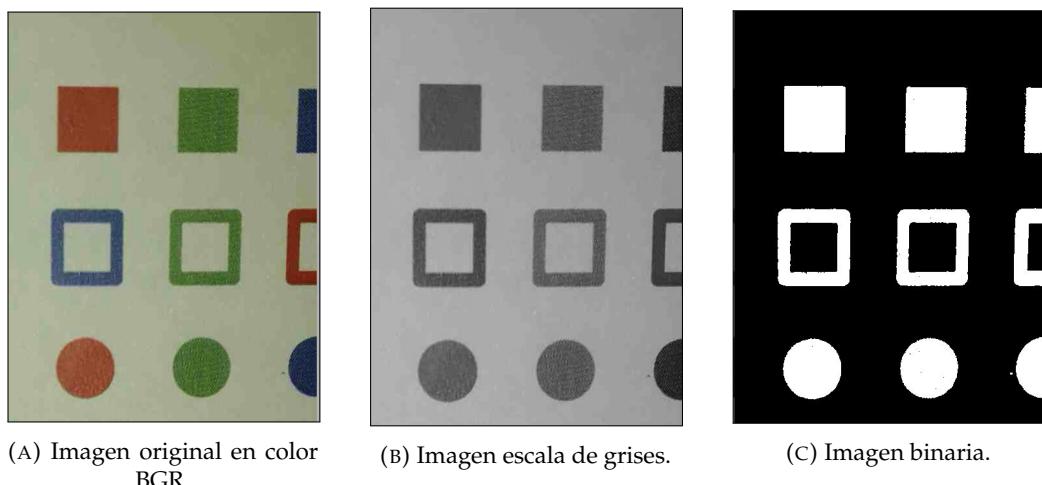


FIGURA 3.9. Imagen original, escala de grises y binaria obtenidas mediante un algoritmo en Python como parte del proceso de reconocimiento de marcas.

Se utiliza la función `minAreaRect`, en la línea 15, para encontrar un rectángulo de área mínima que encierre completamente al perímetro. Esto permite estimar el área y el ángulo de la marca.

Finalmente se selecciona solamente la marca que tenga una área cercana a la especificada por el parámetro “`targetArea`” y le permite al usuario discriminar una

marca por sobre otras.

A la marca resultante se le calcula el desplazamiento en X e Y y su rotación respecto a la cámara.

Estos son los datos que se ingresan en las ecuaciones trigonométricas vistas en la sección 2.5 y es lo que permite realizar la alineación de la pieza.

La secuencia de pasos mencionada se puede ver en la figura 3.10.

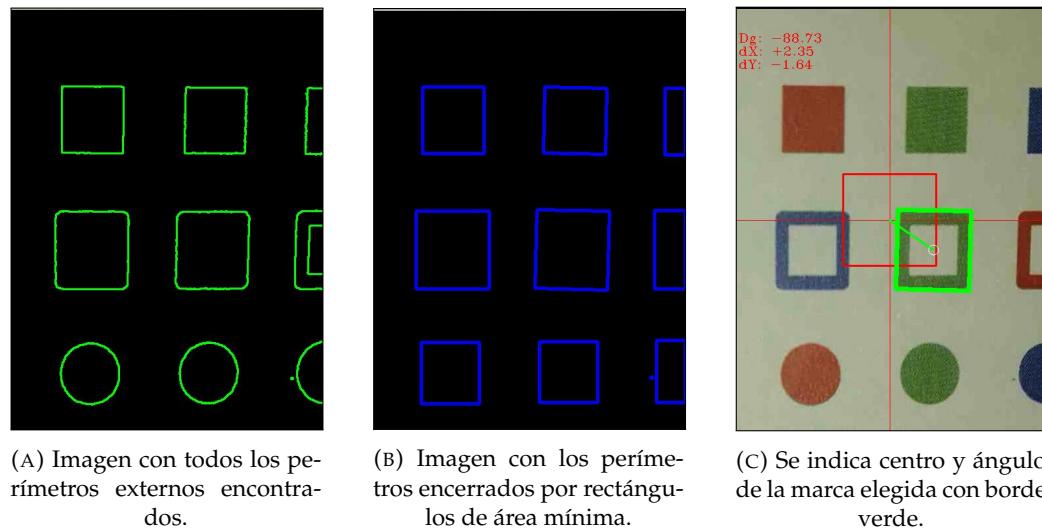


FIGURA 3.10. Proceso de filtrado y selección de perímetros dentro de la imagen. Como resultado se obtiene el centro y rotación de la marca con el área especificada.

En el apéndice A se presentan más ejemplos de capturas de marcas más complejas en donde se visualizan todos los pasos del algoritmo.

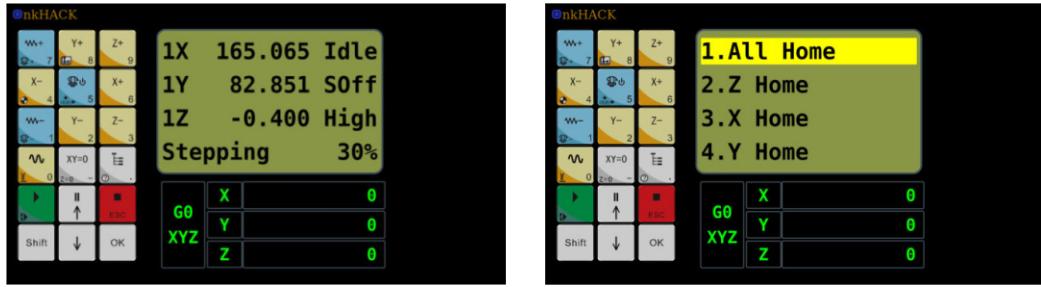
3.4. Software de control

El software de control facilita el uso de los servicios de teclado y pantalla virtual en una cómoda página web y permite el control total de la máquina como si se tratara del mando a distancia original del equipo.

Se utilizaron las tecnologías descritas en la sección 2.1 y se pueden ver algunas imágenes de esta interfaz en la figura 3.11.

A diferencia del mando a distancia cableado, el control a través de esta página web se puede hacer desde cualquier dispositivo con acceso a la red Wi-Fi compartida con la PocketBeagle.

Por otra parte se agregó una funcionalidad adicional al controlador original, con la cual es posible ubicar la máquina en coordenadas precisas. Esta función es un ejemplo de las posibilidades de automatización que permite este accesorio.



(A) Pantalla de coordenadas del equipo monitoreada desde la página web.
 (B) Operación de puesta a cero de las coordenadas de la máquina desde la página web.

FIGURA 3.11. Página web de control de la máquina. Ejemplos de operación.

3.5. Software de lectura de marcas nkHACK

Sobre la base del desarrollo de la página web de control, se extendió la aplicación y se implementó el sistema de alineación por lectura de marcas. En las figuras 3.12 y 3.13 se pueden ver aspectos destacados de esta página. En el apéndice B se pueden ver más imágenes en distintos escenarios de uso.

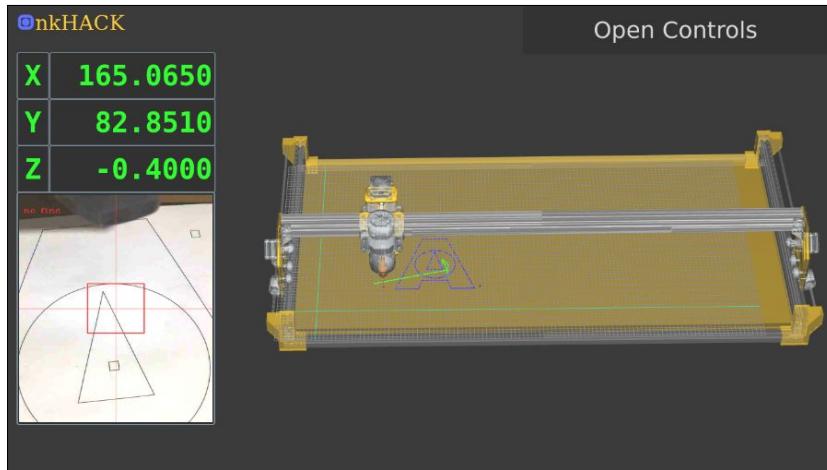


FIGURA 3.12. Pantalla principal del software nkHACK. Se visualiza el modelo de la máquina CNC, las coordenadas actuales, la imagen de la cámara y el trabajo a mecanizar.

Algunas de las funcionalidades de esta página se detallan en la siguiente lista:

- Carga del modelo en 3D de la máquina directamente en formato del programa de CAD.
- Movimiento en tiempo real de la máquina simulada según el recorrido del trabajo.
- Carga de los archivos GCode para visualizar y alinear.
- Las marcas de registro son leídas directamente desde el archivo GCode, ingresadas manualmente, o una combinación de ambas.
- Posibilidad de desplazar, rotar y escalar manualmente un trabajo de corte.
- Configuración del ancho y alto del píxel de la imagen.

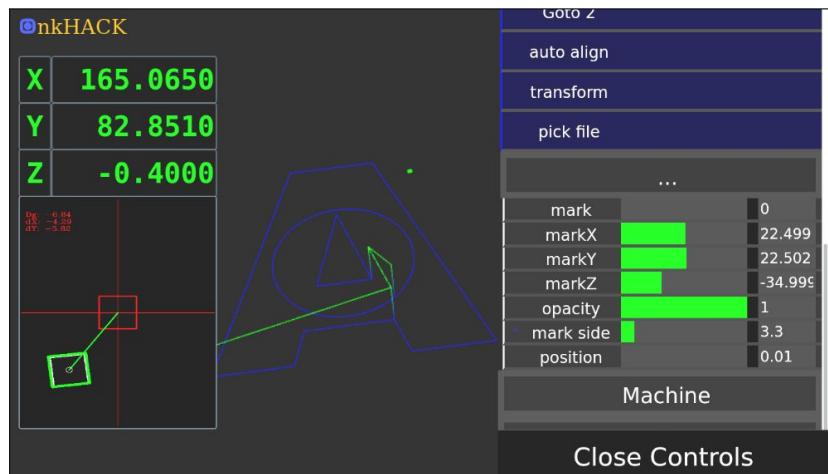


FIGURA 3.13. Software nkHACK. Menú de configuración de la cámara. Se puede ver la imagen capturada en modo binario en la cuál se ha detectado una marca de 3, 3 mm de lado.

- Ingreso de las dimensiones de las marcas.
- Ingreso de la dirección web de la cámara de vídeo.
- Intercambio entre vídeo a color o imagen binaria.
- Calibración del nivel de sensibilidad de la imagen binaria.
- Zoom digital de la imagen capturada en tiempo real para segmentar el área de análisis.
- Transferencia del archivo de corte al controlador.
- Ejecución del archivo de corte cargado en el controlador.
- Alineación del trabajo de corte en modo manual o automático.
- Un solo botón asignado para las tareas de: corregir la alineación según las marcas, transferir el archivo y solicitar el corte.
- Opciones de ajuste de la interfaz visual que permiten ocultar: menús, imagen de la cámara, coordenadas, trazos, modelo de la máquina, etc.
- Grilla de la mesa de trabajo ajustable.
- Acceso a la página de control manual del dispositivo sin cerrar la simulación.

3.6. Calibración de la cámara

Para extraer de un fotograma de vídeo el desplazamiento de una marca al centro de la imagen, es necesario conocer la distancia que representa cada píxel.

Para obtenerlo se aplican las ecuaciones lineales 3.2:

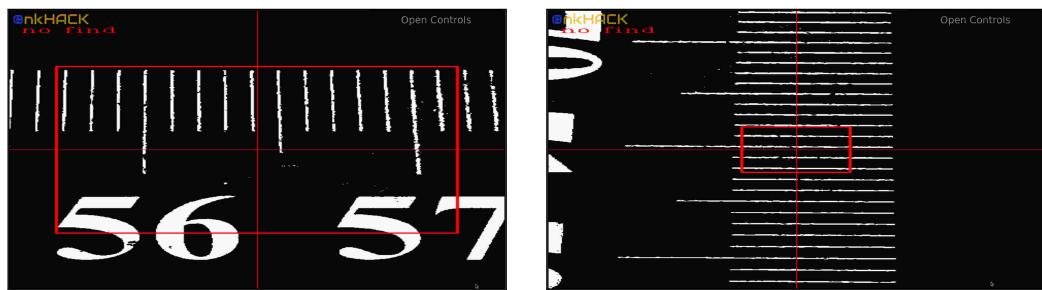
$$\begin{aligned} pixel_x &= \frac{dim_x}{pixeles_x} \\ pixel_y &= \frac{dim_y}{pixeles_y} \end{aligned} \tag{3.2}$$

donde:

- $pixel_x, pixel_y$: dimensión en mm de cada píxel en dirección X e Y.
- $pixels_x, pixels_y$: número de píxeles de cada fotograma en dirección X e Y.
- dim_x, dim_y : medida en mm del fotograma en dirección X e Y.

Para estimar la medida de un píxel se ingresan las dimensiones de ancho y alto de un fotograma.

Estas medidas se pueden tomar con la ayuda de una regla como se muestra en la figura 3.14. Con el dato de la resolución de vídeo y las medidas ingresadas por el usuario, el software realiza el resto de los cálculos como se muestra en figura 3.14c



(A) Medición del ancho del fotograma con la ayuda de una regla. Se puede ver una medición de aproximadamente 18,2 mm

(B) Medición del alto del fotograma con la ayuda de una regla. Se puede ver una medición de aproximadamente 25,5 mm

pixelX		0.038
pixelY		0.04
Shape X [px]		480
Shape Y [px]		640
Size X [mm]		18.2
Size Y [mm]		25.5

(C) Con las dimensiones de ancho, alto y la resolución del vídeo el software calcula las dimensiones del píxel. En este ejemplo se obtuvo 0,039 mm de ancho y 0,04 mm de alto.

FIGURA 3.14. Calibración del tamaño del píxel de un fotograma. Se utiliza una regla para medir el ancho y el alto y el software realiza las cuentas para obtener y almacenar el tamaño del píxel en función de la resolución de vídeo que se esté utilizando.

Sin embargo, si la cámara no está perfectamente perpendicular a la mesa de trabajo, la dimensión de los píxeles cambia según su posición.

Otro efecto no deseado ocurre según el tipo de lente de la cámara y la distancia al objetivo.

En la figura 3.15a se puede ver la imagen de una regla capturada con una cámara perpendicular y en la 3.15b otra capturada a cierto ángulo. Se puede apreciar que en el último caso se distorsionan las medidas notablemente.

Estas alteraciones afectan la dimensión de cada píxel e impactan directamente en el error de alineación.

Para mitigar este problema se desarrollaron dos técnicas:

- Zoom: para minimizar el efecto de la curvatura de la imagen en los bordes, se posiciona la cámara a cierta distancia tal que permita recortar y descartar los bordes.

En la figura 3.16 se aplica esta corrección a las imágenes de la figura 3.15 y se puede apreciar que en la zona reducida ahora la distorsión es menos apreciable.



(A) Toma perpendicular. Se puede ver cierta linealidad en toda la imagen.



(B) Toma en ángulo. Se puede ver la distorsión de las medidas de la regla en función de la posición en la imagen.



(C) Fotografía tomada por una lente de gran angular que resalta el efecto de distorsión.

FIGURA 3.15. Revelación del efecto de distorsión de las medidas en función del ángulo de captura de la imagen, distancia al objetivo y tipo de lente.

- Centrado: se utiliza la dimensión del píxel como una aproximación, pero luego se itera el movimiento de la máquina hasta que la marca se posiciona justo en el centro de la imagen.

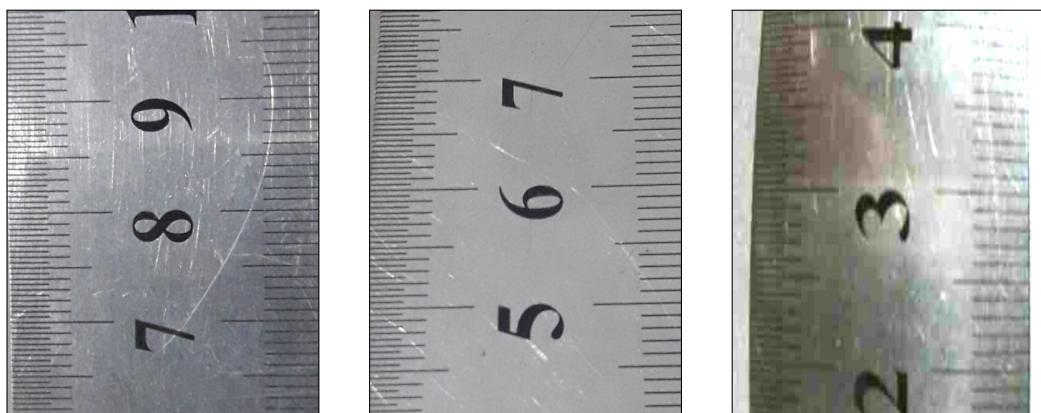
Este procedimiento aletarga el proceso de alineación, pero minimiza los efectos de error mencionados, debido a que la distancia entre el centro de la imagen y la marca tiende a cero píxeles.

En la figura 3.17 se muestra una marca a cierta distancia del centro de la imagen. Luego de varias iteraciones, se posiciona la marca justo en el centro donde los errores son despreciables.

3.7. Secuencia de pasos para alinear

En el software nkHACK se implementaron dos métodos de alineación: manual y automático.

En la tabla 3.2 se detalla el método manual con una imagen representativa de las acciones ejecutadas en cada paso.

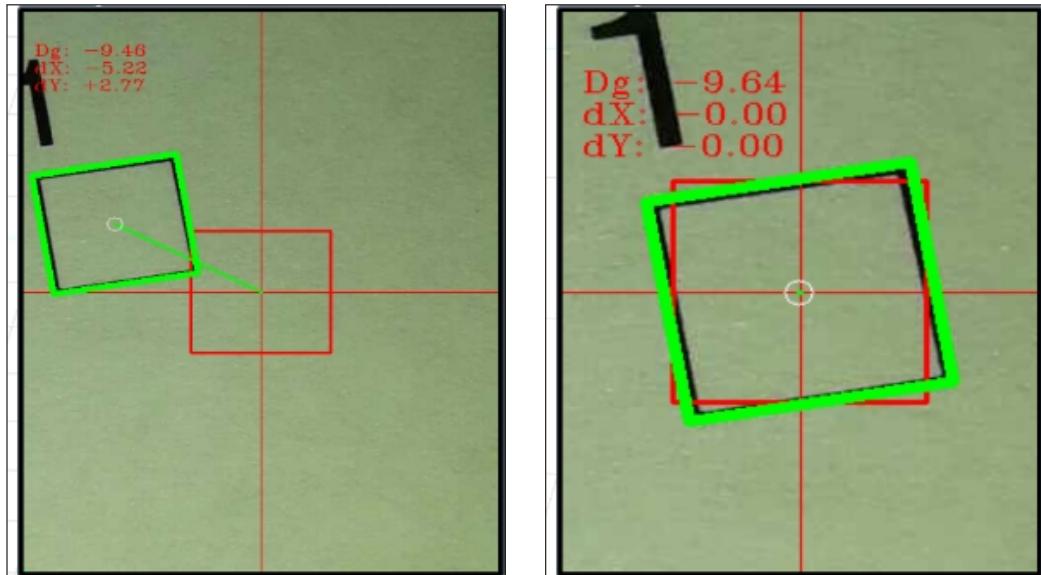


(A) Recorte de imagen perpendicular. La imagen original y la recortada presentan una linealidad similar.

(B) Recorte de una imagen tomada en ángulo. Aún con la distorsión generada, el recorte permite tomar una zona local sensiblemente más lineal que la imagen completa.

(C) Recorte de una imagen tomada con una lente gran angular. Aún se puede apreciar algo de distorsión pero menor que la imagen original.

FIGURA 3.16. Análisis de la distorsión en las imágenes tomadas en diferentes escenarios. Se aplican técnicas de recorte para mitigar el defecto.



(A) Marca desplazada $-5,22\text{ mm}$ en X y $2,77\text{ mm}$ en Y respecto del centro de la imagen. El desplazamiento real depende de la medida de cada píxel y de la linealidad de la imagen.

(B) Interacción de movimientos que ubica la marca en el centro de la imagen. El desplazamiento es prácticamente nulo, y por lo tanto no depende de la dimensión de los píxeles ni de la linealidad de la imagen.

FIGURA 3.17. Método de iteración de movimientos para el centro de la marca y la mitigación de los efectos alineales en el fotograma.

TABLA 3.2. Detalle paso a paso de la secuencia necesaria para alinear y cortar un trabajo.

Procedimiento	Imagen
Referencia: se mueve la máquina hasta que el punto (0, 0) de la pieza esté en zona de visión. En esa posición se resetea las coordenadas de la máquina a la posición (0, 0). De esta manera ambos sistemas de coordenadas son prácticamente coincidentes.	
Marca 1: al presionar el botón “Goto 1” la máquina se posiciona en zona de visión de la primera marca.	
Centrado 1: al presionar el botón “align one” el software itera hasta que logra ubicar la primera marca en el centro de la imagen. Luego se calcula el desplazamiento en X e Y y el ángulo de la marca como estimación de la rotación de la pieza.	
Marca 2: al presionar “Goto 2”, el software utiliza los datos de posición y ángulo estimados en la primera marca para posicionarse sobre la segunda.	
Centrado 2: al presionar el botón “align one” el software itera hasta que logra ubicar la segunda marca en el centro de la imagen. Luego se aplica un factor de escala en X e Y y se calcula el ángulo definitivo de la pieza.	

TABLA 3.2. Detalle paso a paso de las secuencia necesaria para alinear y cortar un trabajo. Continuación.

Procedimiento	Imagen
Marca 3: al presionar “Goto 3”, el software ubica la tercera marca.	
Centrado 3: al presionar el botón “align one” el software itera hasta ubicar la tercera marca en el centro de la imagen. Luego se aplica un factor de escala en Y.	
Transformación: con las estimaciones de escalas en X e Y y el ángulo de rotación de la pieza, se convierte el archivo GCode original y se eliminan las marcas.	
Se envía el nuevo archivo al controlador.	
Toma de archivos: se carga el archivo desde el USB virtual al controlador.	

TABLA 3.2. Detalle paso a paso de las secuencia necesaria para alinear y cortar un trabajo. Continuación.

Procedimiento	Imagen
Corte: el controlador ejecuta el trabajo de corte independientemente del software nkHACK. Este último solo monitorea el avance y permite visualizar el proceso a través de la cámara en tiempo real.	

El método de alineación automático por su parte, ejecuta todos estos pasos en secuencia sin asistencia tras de presionar el botón “*Align all*”.

Capítulo 4

Ensayos y resultados

En el presente capítulo se describen los ensayos más relevantes, los procedimientos llevados a cabo en cada caso, las herramientas y los materiales utilizados.

4.1. Listado de herramientas

Durante los ensayos, además de las herramientas convencionales para el desarrollo de sistemas embebidos, se utilizaron otras específicas que se listan a continuación:

- Máquina de control numérico modelo Start126 de la firma BGMA industrial.¹
- Teléfono móvil Samsung J7.
- Impresora HP LaserJet 1025nw.
- Regla de 1m metálica.
- Plataforma de desarrollo PocketBeagle.
- Controlador NK105 de la firma Weihong.
- Drivers de motores paso a paso M542 de la firma Leadshine².

4.2. Pruebas funcionales del hardware

4.2.1. Acceso concurrente al driver SPI

El acceso al módulo del *kernel* que maneja el SPI, se realiza mediante operaciones de entrada y salida del sistema operativo.

Cuando se recibe una petición de abrir archivo, se registra en una lista un descriptor de esta operación y se lo mantiene hasta que se recibe la operación de cierre de archivo.

Esta lista permite mantener accesos múltiples al *driver* y es muy útil para monitorear la máquina remotamente sin la capa de software.

Se realizaron pruebas con cuatro accesos concurrentes al mismo driver y se verificó la integridad y la sincronía de la información de cada cliente.

¹<https://www.bgma-industrial.com.ar/>

²<http://www.leadshine.com/>

En la figura 4.1 se muestra una captura de estos accesos desde una conexión remota por SSH (*secure shell*)³ desde un ordenador a la PocketBeagle.

```

1.Local Files
2.USB Files
3.Operations
4.Oper Param
[587319.902765] fops open menor=101 opened=1
[587321.561188] fops open menor=101 opened=2
[587323.016204] fops open menor=101 opened=3
[587324.103299] fops open menor=101 opened=4
debian@beaglebone:~$ 

```

FIGURA 4.1. Acceso concurrente al módulo de manejo de SPI desde una conexión SSH. Se puede ver la sincronía entre los cuatro accesos y el registro de cada acceso en los mensajes del *kernel*.

4.2.2. Ensayos con archivos de mecanizado

Se diseñó un archivo de mecanizado de una letra “A” con un círculo central como plantilla de pruebas. Se muestra una impresión en la figura 4.2.

Este archivo cuenta con líneas rectas, anguladas y curvas que lo hace especialmente útil para encontrar los límites de la técnica de alineación.

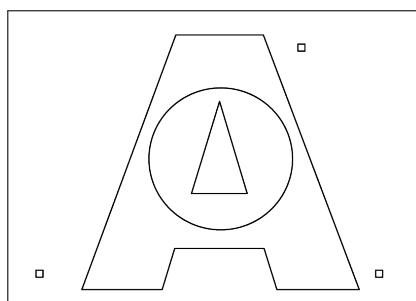


FIGURA 4.2. Plantilla de pruebas diseñada para validar ciertas acciones del software durante los ensayos.

Para las pruebas se imprimió el trazado con una impresora láser en hoja A4, y se sujetó a una base de madera para asegurar la planitud. Con esto se simula una

³<https://www.ucl.ac.uk/isd/what-ssh-and-how-do-i-use-it>

pieza previamente impresa que se desea mecanizar como se muestra en la figura 4.3.

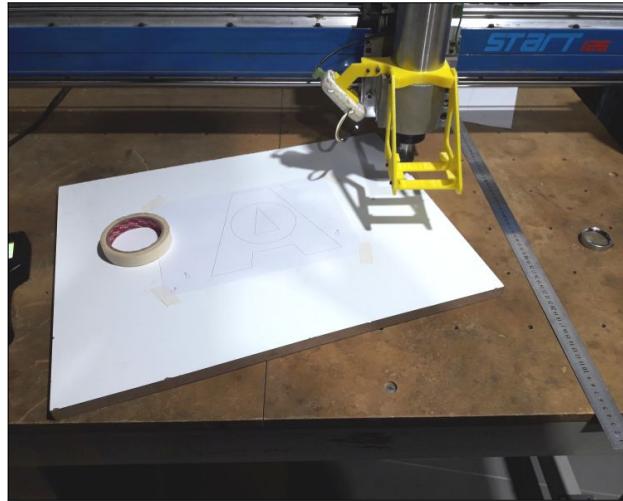


FIGURA 4.3. Placa de madera con la impresión del trabajo de corte pegada. Esto permite ubicar la pieza en diferentes posiciones y probar los resultados del sistema de alineación.

Se realizaron cinco operaciones con diferentes rotaciones y desplazamientos y se recolectaron los datos que se detallan en la tabla 4.1.

Durante una de las simulaciones de corte se tomó una secuencia de imágenes que se muestran en la figura 4.4.

Se puede ver el recuadro rojo de 1 mm de lado en el centro de la imagen que se usó para registrar el error.

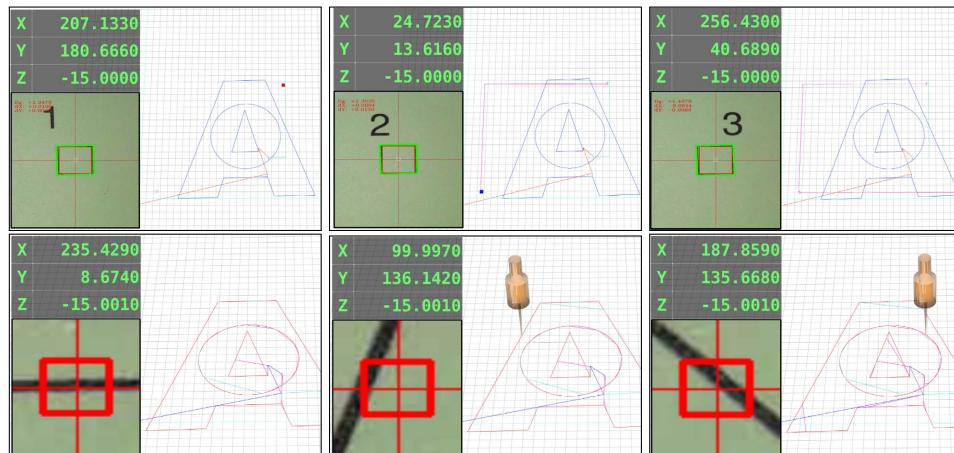


FIGURA 4.4. Secuencia de pasos para los ensayos de corte simulando. Se utiliza el recuadro rojo de 1 mm de lado en el centro de la imagen como testigo del error máximo.

Se encontró que el error sigue cierta relación con el ángulo de posicionamiento y desplazamiento.

Sin embargo durante el análisis se determinó que tanto la mesa de corte utilizada como la impresora láser tienen distorsiones no lineales.

TABLA 4.1. Información recolectada durante repetidos ensayos a un mismo diseño de corte pero posicionado en diferentes ángulos y desplazamientos.

Ángulo [grados]	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Escala X [mm]	Escala Y [mm]	Error máximo [mm]
15,46	0	0	1	1	0,4
-17,7	-2,54	-5,46	1	1	0,6
28,07	-3,76	6,83	1	1	0,65
-25,2	-0,54	-6,79	1	1	0,4
1,71	-0,01	-0,01	1	1	0,35

Por ejemplo, la mesa de corte no respeta las medidas a lo largo de todo el eje X. Hay ciertas zonas con mayor error que otras.

También se encontró que el sistema es muy susceptible a variaciones de altura del objeto a cortar. Es más notable cuando se trata de una simulación, dado que en la cámara estos efectos se ven amplificados.

Se presume que para lograr reducir los errores de corte se requiere de elementos de mayor precisión para las mediciones, un ajuste fino tanto a la mesa de corte y la calibración de la impresora láser.

Con dichas herramientas se espera poder desacoplar el error de la trigonometría de alineación, si lo tuviera, de los problemas mecánicos.

4.3. Pruebas funcionales del software

4.3.1. Ensayos de segmentación de marcas

Para poder medir el correcto funcionamiento del algoritmo de reconocimiento de marcas se imprimieron algunas marcas de diferentes tamaños, ángulos y en posiciones estratégicas.

En la figura 4.5 se pueden ver tres ensayos.

4.3.2. Ensayo de discriminación por área

Se utilizó la plantilla de la figura 4.5a y se incrementó el tamaño del lado de la marca desde 1 mm a 8 mm para verificar la correcta selección. Se muestran los resultados en la figura 4.6.

Para comparar el rendimiento del algoritmo se fijó una precisión del error de detección en $\pm 0,05\%$ y solamente ajustando en el software la dimensión de la marca se registraron los valores obtenidos en la tabla 4.2.

Se encontró que en las marcas más pequeñas, el error aumenta. Una explicación a este efecto es que el ancho del trazo de la impresión, que ronda 0,18 mm, introduce un pequeño incremento en el área total de la marca. Es un dato importante para considerar al momento de imprimir las marcas.

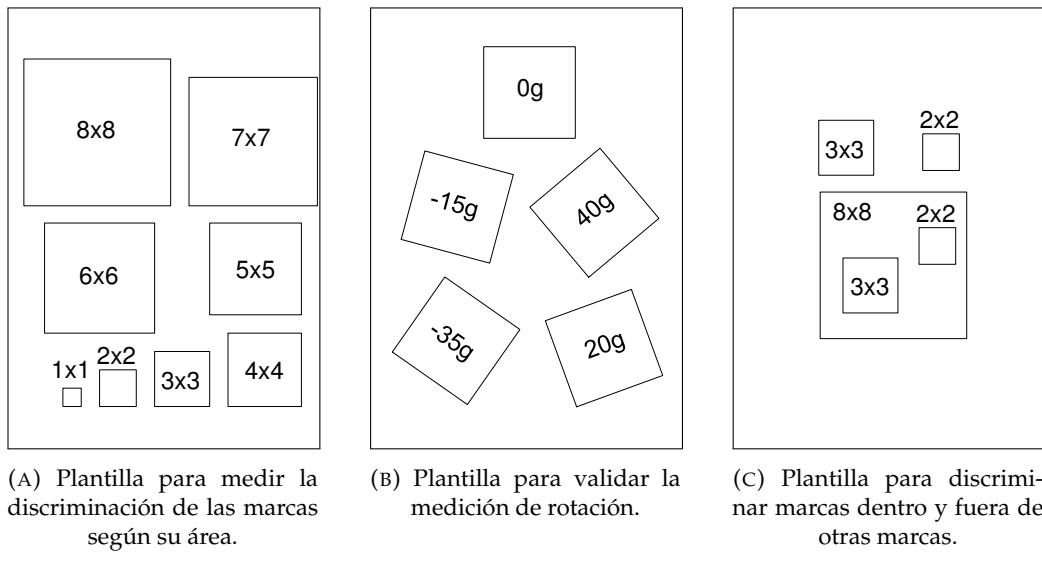


FIGURA 4.5. Ensayo de diferentes marcas en condiciones estratégicas para poder medir ciertos parámetros del funcionamiento del algoritmo de reconocimiento.

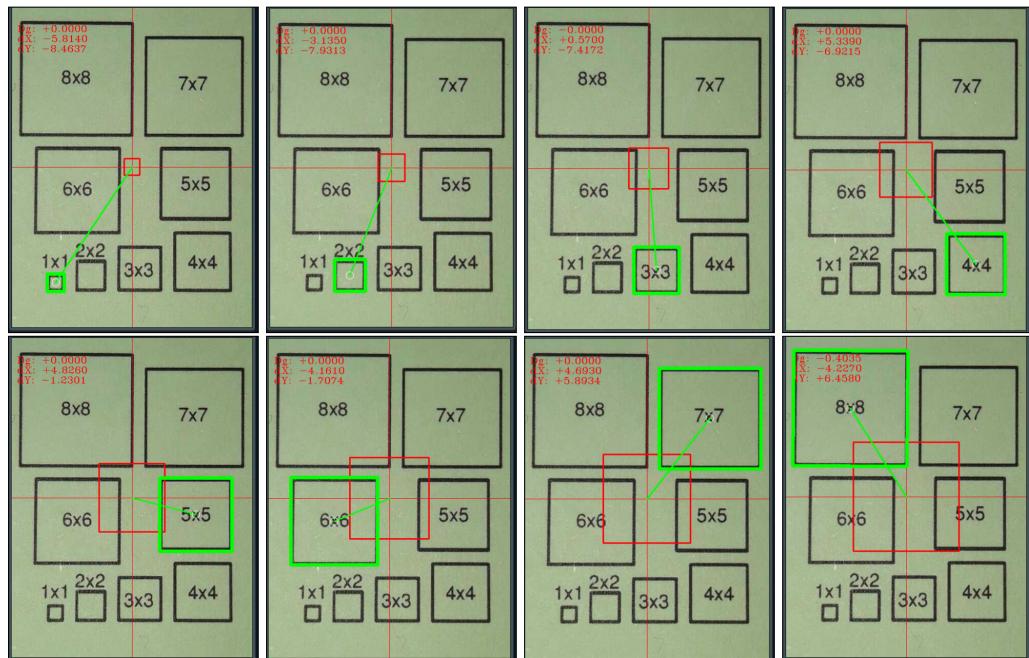


FIGURA 4.6. Reconocimiento de una marca dentro de un conjunto. Al modificar en el software la medida de la marca deseada, se reconoce solo la correcta.

TABLA 4.2. Ensayo de discriminación de dimensiones de marcas.
Se mide el error en la detección de marcas de entre 1 mm y 8 mm
de lado, para una precisión constante de $\pm 0,05\%$.

Lado [mm]	Selección [mm]	Error [mm]	Precisión [%]
1	1,2	0,2	$\pm 0,05$
2	2,1	0,2	$\pm 0,05$
3	3,1	0,2	$\pm 0,05$
4	4,0	0,0	$\pm 0,05$
5	5,0	0,0	$\pm 0,05$
6	6,0	0,0	$\pm 0,05$
7	7,0	0,0	$\pm 0,05$
8	8,0	0,0	$\pm 0,05$

4.3.3. Ensayo de marcas rotadas

Para validar la correcta medición de los ángulos, se imprimió una plantilla como la mostrada en la figura 4.5b y se tomó una captura del software durante el reconocimiento y medición del ángulo para cada una. Se pueden ver los resultados en la figura 4.7.

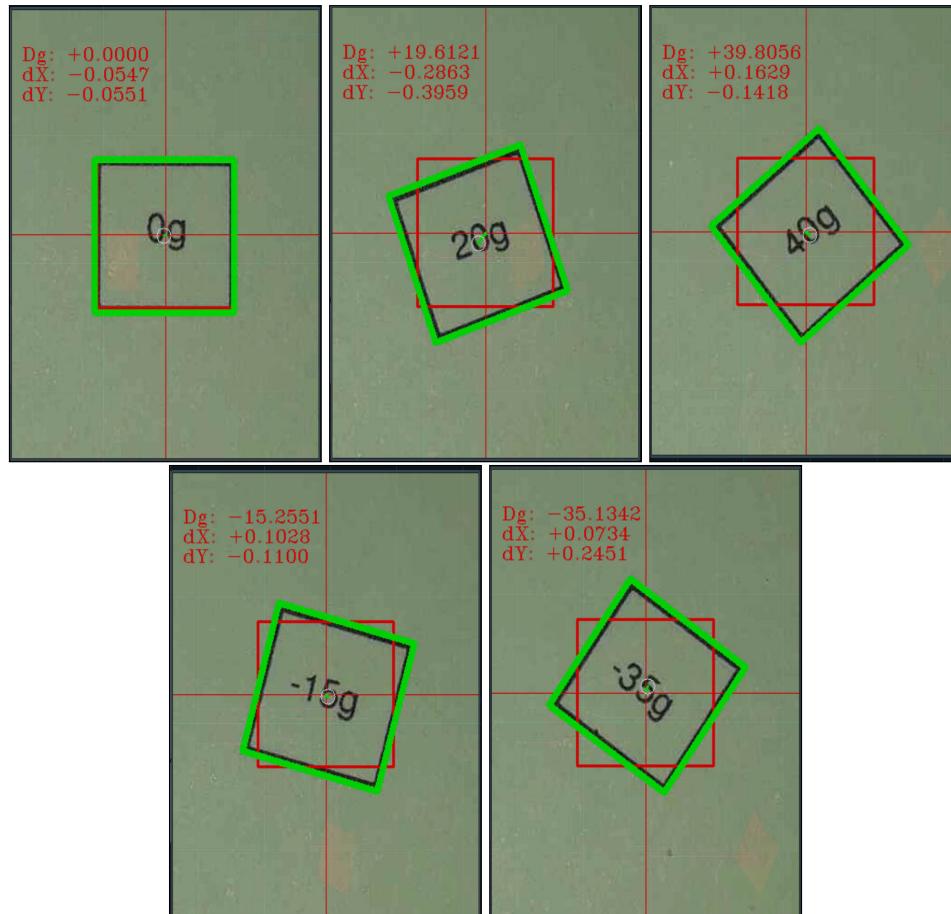


FIGURA 4.7. Validación de la medición del ángulo de la marca.
El software reconoce y mide el ángulo de una misma marca en
diferentes rotaciones.

Se confeccionó la tabla 4.3 en donde se registró el ángulo real de la marca, el ángulo medido y el error cometido por software.

TABLA 4.3. Validación de la medición del ángulo medido por el software en una misma marca con diferentes rotaciones.

Ángulo real [grados]	Ángulo medido [grados]	Error [%]
0	0	0
20	19,6	0,02
40	39,8	0,005
-15	-15,3	0,02
-35	-35,1	0,002

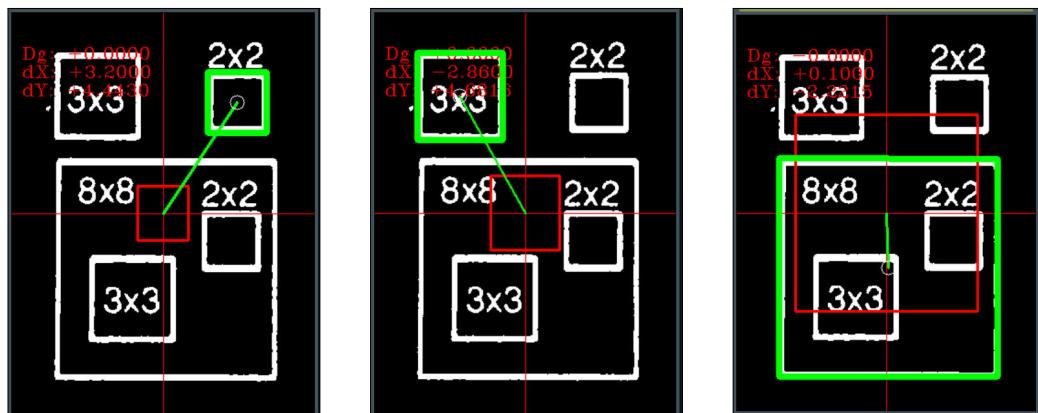
4.3.4. Ensayo de marcas encerradas

Hay casos que una marca podría tener alguna inscripción de texto dentro de su perímetro. También podría ocurrir que dentro de la marca se detecten perímetros cerrados espúreos a causa de imperfecciones en el material.

En estos y otros casos similares, además de segmentar según el área del perímetro, solo se consideran válidas aquellas marcas que no están encerradas por otro perímetro.

Se diseñó una hoja de ensayos como se muestra en la figura 4.5c que obliga al software a seleccionar entre dos marcas de igual área pero una de las cuales está dentro de otro perímetro.

Se capturaron los resultados en la figura 4.8.



(A) Se detectan dos marcas de 2 mm de lado, pero solo se selecciona la marca que está fuera de cualquier otro perímetro cerrado.

(B) Se detectan dos marcas de 3 mm de lado, pero solo se selecciona la marca que está fuera de cualquier otro perímetro cerrado.

(C) Se detecta solo una marca de 8 mm de lado, se reconoce correctamente.

FIGURA 4.8. Ensayo de selección de marcas dispuestas en jerarquía. Por decisión en el desarrollo del software no se consideran las marcas que están dentro de otro perímetro cerrado.

4.3.5. Ensayos con impresiones escaladas

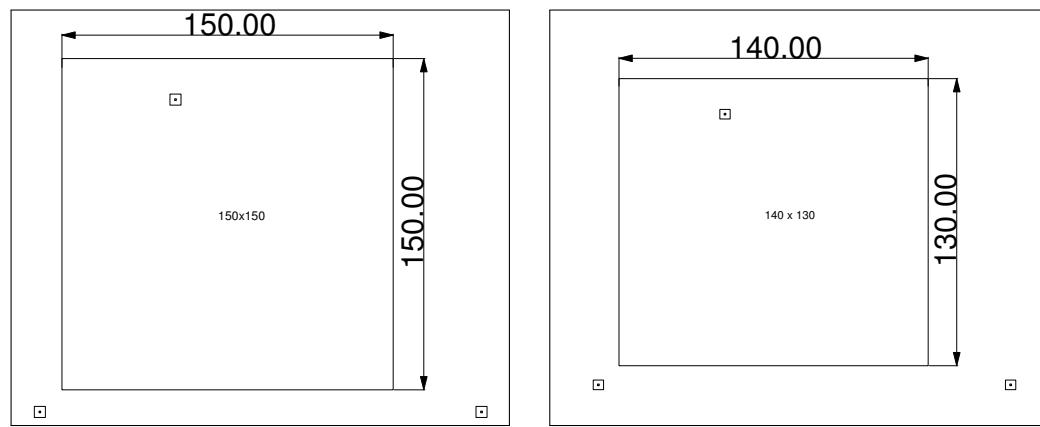
Para validar la característica de escalado del software se generó un trabajo de corte que consiste en una figura de $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ como se muestra en la figura 4.9a y una versión a escala cuyas medidas son $140\text{ mm} \times 130\text{ mm}$, como se muestra en la figura 4.9b.

En el primer ensayo se procede a cortar el archivo original con el archivo GCode correcto.

En el segundo ensayo se mantiene el archivo GCode, pero se intenta cortar el perímetro impreso en escala reducida. Notar que en este caso habrá una discrepancia de escalas entre el trazo impreso que se desea cortar y los datos del archivo GCode.

En la figura 4.10 se puede ver parte del proceso de reconocimiento y simulación para el trazo original y en la figura 4.11 para el trazo escalado.

En este caso se aprecia que las marcas están mucho más distantes que lo que deberían debido a la escala, pero aun así, son reconocidas y el software lo corrige.



(A) Trabajo de corte perimetral sin distorsión.

(B) Trabajo de corte perimetral escalado.

FIGURA 4.9. Generación de un trabajo de corte perimetral y otro escalado con el objetivo de validar la función de escalado no lineal del software.

En la tabla 4.4 se comparan los resultados del proceso de corte para el cuadrado sin distorsión y su contraparte escalado.

Se puede ver que los resultados son prácticamente equivalentes aún cuando las escalas reflejan la diferencia.

TABLA 4.4. Información recolectada durante dos ensayos de corte de un perímetro sin distorsión y otro escalado.

Ángulo [grados]	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Escala X [mm]	Escala Y [mm]	Error máximo [mm]
-4,00	-0.18	0,2	1	1	0,3
-4,00	-2,51	-6,59	0.93	0.87	0,3



FIGURA 4.10. Secuencia de pasos para la simulación de corte perimetral con su respectivo archivo de corte GCode sin distorsión.

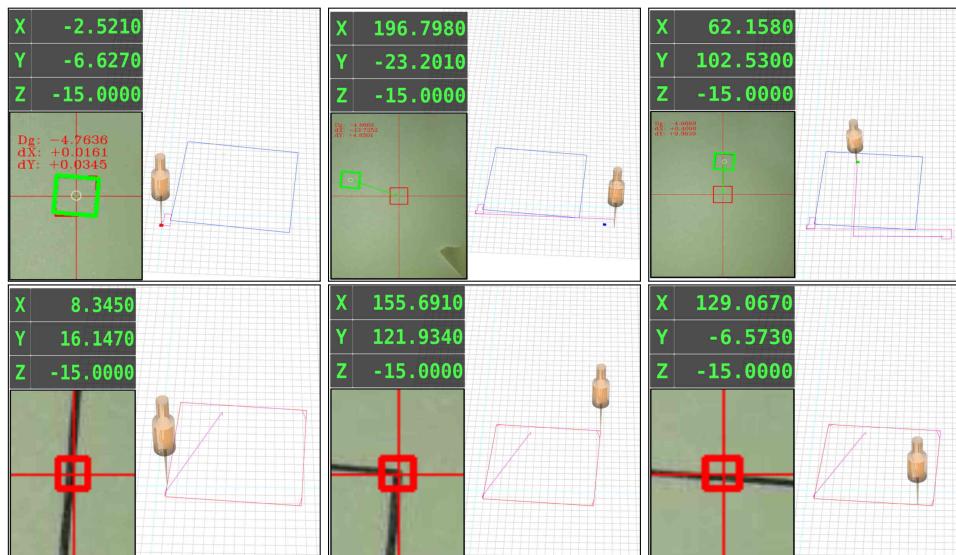


FIGURA 4.11. Secuencia de pasos para la simulación de corte perimetral escalado con el archivo de corte GCode de la versión sin escalar. Se puede notar que las marcas dos y tres aparecen distantes del lugar esperado debido al escalado.

4.3.6. Ensayos con diferentes resoluciones de vídeo

Si bien cuanto más resolución tenga la cámara más pequeño será el tamaño del píxel, esta mejora parece no trasladarse linealmente a los resultados para las dimensiones de marcas utilizadas.

Por el contrario, una mayor resolución en la imagen implica mayor tiempo de procesamiento. Como la PocketBeagle no es especialmente eficiente para procesar imágenes, se buscó lograr un punto óptimo para la resolución de las imágenes.

En la tabla 4.5 se muestra una comparativa de tres resoluciones típicas de vídeo y para cada caso se probaron dos niveles de compresión.

TABLA 4.5. Comparación de diferentes resoluciones de imágenes y sus resultados para la identificación de marcas.

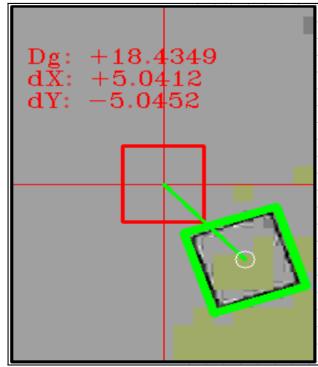
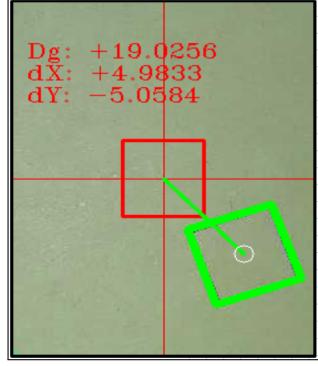
Ancho x alto [pixe- les]	Calidad [%]	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Ángulo [gra- dos]	Imagen
240x320	1	5,04	-5,04	18,43	
240x320	50	4,98	-5,05	19,02	

TABLA 4.5. Comparación de diferentes resoluciones de imágenes y sus resultados para la identificación de marcas. Continuación.

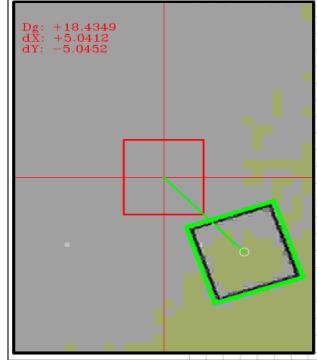
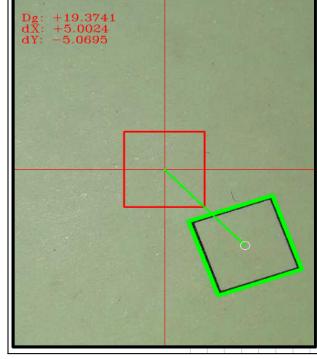
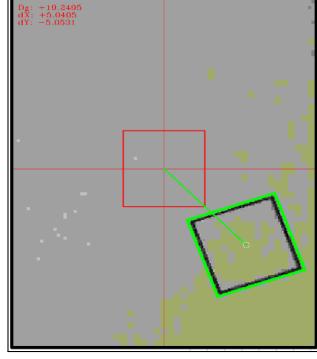
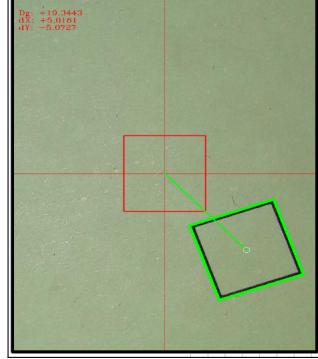
Ancho x [pixe- les]	Calidad alto [%]	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Ángulo [gra- dos]	Imagen
640x480	1	5,04	-5,04	18,43	
640x480	50	5,00	-5,06	19,37	
960x720	1	5,04	-5,05	19,24	

TABLA 4.5. Comparación de diferentes resoluciones de imágenes y sus resultados para la identificación de marcas. Continuación.

Ancho x alto [pixeles]	Calidad [%]	Delta X [mm]	Delta Y [mm]	Ángulo [grados]	Imagen
960x720	50	5,01	-5,07	19,34	

Se puede concluir que no es tan relevante la resolución de la imagen como la calidad de compresión. Es preferible una calidad media con una resolución baja a una resolución alta con una compresión baja.

Para la mayoría de los ensayos de este trabajo se utilizó una resolución de 640x480 con una calidad del 20 % al 30 %. Estos valores permiten una buena calidad de inspección sin ralentizar el procesamiento.

Capítulo 5

Conclusiones

En el presente capítulo se presentan las conclusiones generales del trabajo, algunas consideraciones sobre las herramientas utilizadas y los próximos pasos.

5.1. Conclusiones generales

En la siguiente lista se detallan los objetivos cumplidos más destacados y se comentan algunas dificultades, desafíos y técnicas aplicadas en cada punto:

- Se logró el objetivo de reconocer marcas no solo con una cámara de vídeo sino también con el uso de un celular. Esto amplía el mercado de usuarios posibles y facilita la integración en máquinas existentes con mínimo costo y esfuerzo.
- Se implementó un software de control que no solo permite alinear el trabajo a cortar sino que también simula la máquina en tiempo real. Esto es de gran valor dado que permite visualizar posibles problemas en el corte y analizar la disposición del material en la mesa de trabajo con antelación.
- Se utilizó una de las plataformas más pequeñas y económicas del mercado, y aun así queda margen para actualizaciones y mejoras.
- Si bien el equipo elegido no cuenta con una interfaz de acceso para manejarlo, la técnica utilizada, permite mantener el equipo original intacto, y compartir el mando a distancia junto con el acceso web. Esta característica permite probar el equipo en una máquina funcionando en solo unos minutos y sin modificaciones.
- Se logró el objetivo de poder acceder a la máquina remotamente, tanto desde la web como desde una conexión segura *SSH*.
- Se logró realizar el desarrollo del software con tecnología web para facilitar su uso desde cualquier sistema operativo y dispositivo, incluso desde una tableta o móvil.
- Se lograron precisiones de corrección alineación promedio por debajo de 0,5 mm. Si bien es un punto a mejorar, se considera aceptable considerando las calidades de las herramientas utilizadas.
- Se encontró una dificultad importante en el desarrollo del driver SPI que tomó considerablemente más tiempo del esperado. Pero dado que todo el trabajo se basa en la eficiencia de dicho software fue necesario realizar uno a medida y afrontar el retraso. A excepción de este driver, el resto de las tareas se alcanzaron en los plazos esperados.

- Se aprovechó la tecnología configFS de Linux para cumplir con el requisito de realizar la transferencia de archivos remoto. Este punto por si solo resuelve un problema recurrente de intercambiar archivos desde una PC con el uso de una unidad de almacenamiento externa.
- Se logró montar el prototipo de pruebas en una máquina CNC real y validar todas las funcionalidades del sistema.
- Se logró un algoritmo de reconocimiento muy potente capaz de distinguir marcas con cierta distorsión pero sin consumir todos los recursos del procesador. Para lograrlo se aplicaron técnicas como: limitar los cuadros por segundo a procesar, bajar las resoluciones de imagen, aprovechar la capacidad multitarea del sistema operativo y limitar la cantidad de contornos permitidos por cuadro.
- Además de reconocer las marcas y alinear la pieza, se cumplió con el objetivo de escalar el archivo de corte de manera no proporcional en X e Y. Esta es una característica muy poco frecuente en soluciones similares.
- El software permite al usuario visualizar el modelo 3D de su propia máquina, y mover independientemente cada eje. Esto no era un requisito, pero se lo identificó como de mucho valor y muy factible para el tiempo disponible.
- Una de las técnicas más útiles en la segunda mitad del trabajo fue haber logrado desarrollar la aplicación web en una PC e interactuar con la Pocket-Beagle remotamente para el acceso a los drivers. Esto permitió acelerar el desarrollo notablemente.

5.2. Próximos pasos

Si bien el proyecto cumplió con los objetivos planteados, se detectaron ciertos aspectos técnicos y funcionales que pueden mejorarse.

A la vez, durante el desarrollo se adquirió más información que permite considerar nuevos objetivos y requisitos y se espera que en una nueva iteración de desarrollo se pueda convertir este prototipo en un equipo comercial.

Algunos de los puntos más destacados a considerar en una nueva etapa se listan a continuación:

- Agregar soporte para las versiones más avanzadas del NK105 que también ofrece el fabricante y dado que comparten el mismo controlador, son perfectamente compatibles con este desarrollo.
- Validar el sistema mecánico de la máquina CNC y revisar la calibración de la impresora láser. De esta manera se podrán desacoplar los errores cometidos por la mecánica y por el sistema de alineación.
- Agregar alguna protección de acceso múltiple para que varios usuarios puedan compartir el software y monitorear la máquina sin poner en riesgo la integridad del trabajo en curso.
- Simplificar la interfaz web para facilitar el uso de las funciones más recurrentes.

- Convertir el prototipo de hardware en un producto para poder comercializarlo.
- Discriminar entre los diferentes tamaños de pantalla en los dispositivos de acceso para presentar una interfaz acorde a cada uno.
- Agregar la funcionalidad *hotspot* a la PocketBeagle, para permitir interactuar con la máquina independientemente del acceso a Wi-Fi.
- Buscar el modelo de negocios más adecuado para poder comercializar el producto.

Apéndice A

Ejemplos del proceso de reconocimiento de marcas

Se exponen algunos ejemplos de reconocimiento de marcas presentados en una secuencia que se detalla en la siguiente lista:

- Paso 1: imagen original a color.
- Paso 2: escala de grises.
- Paso 3: imagen binaria.
- Paso 4: detección de todos los bordes externos.
- Paso 5: cálculo de área mínima rectangular.
- Paso 6: cálculo de ángulo y posición de la marca seleccionada.

Se puede ver en la imagen A.1b que si la imagen es irregular, la cantidad de contornos detectados esta tan grande que afecta el rendimiento del algoritmo de detección y la performance del sistema.

Para mitigar este efecto, en los algoritmos se limita la cantidad de bordes permitidos.

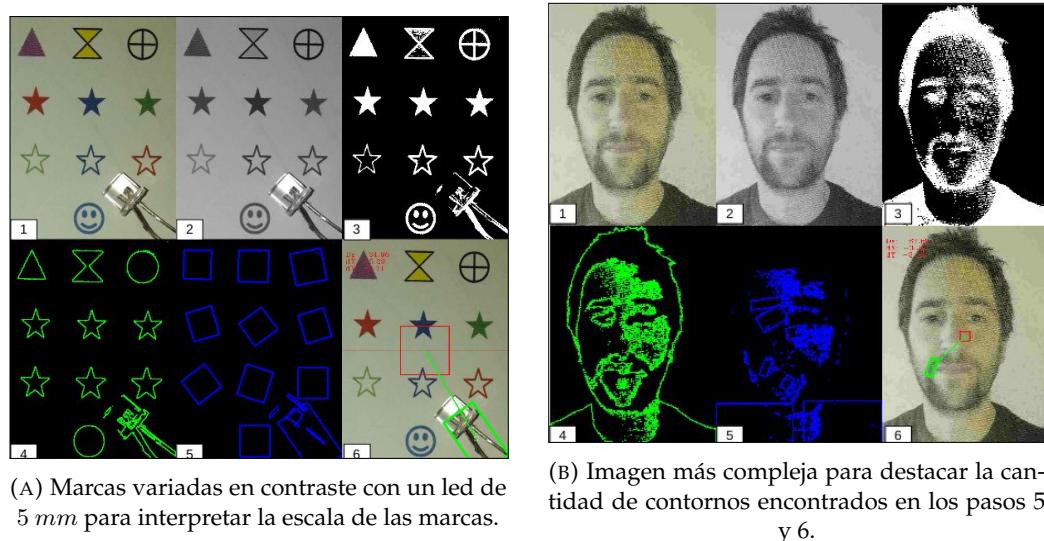
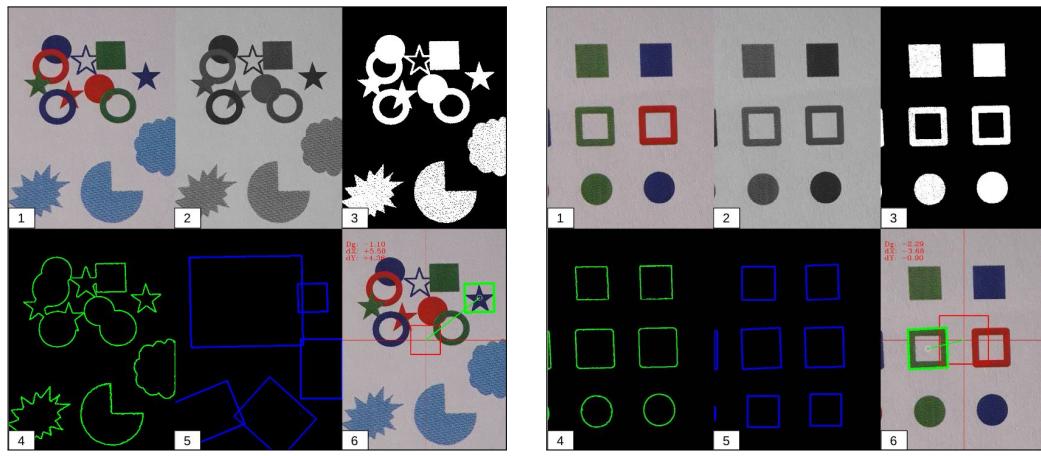


FIGURA A.1. Secuencia de reconocimiento de marcas.

En la figura A.2a, en los pasos 4 y 5 se destaca el efecto de un contorno que está formado por la unión de muchas figuras. Sin embargo, la detección de área mínima lo interpreta como un único contorno.

Esto se debe a que las figuras se están tocando en algunos puntos y el algoritmo lo considera un solo perímetro irregular.



(A) Contorno conformado por muchas figuras en contacto que es procesado como un solo perímetro cerrado

(B) Ejemplo nominal de reconocimiento. Se detalla como los cuadrados sin relleno son tomados por su contorno exterior

FIGURA A.2. Secuencia de reconocimiento de marcas.

Apéndice B

Capturas en diferentes usos del software nkHACK

En las figuras B.1 y B.2 se exponen algunas capturas del software nkHACK con diferentes configuraciones de pantalla con el objetivo de mostrar el potencial de las tecnologías utilizadas para adaptarse a diferentes máquinas y usos con cierta facilidad.

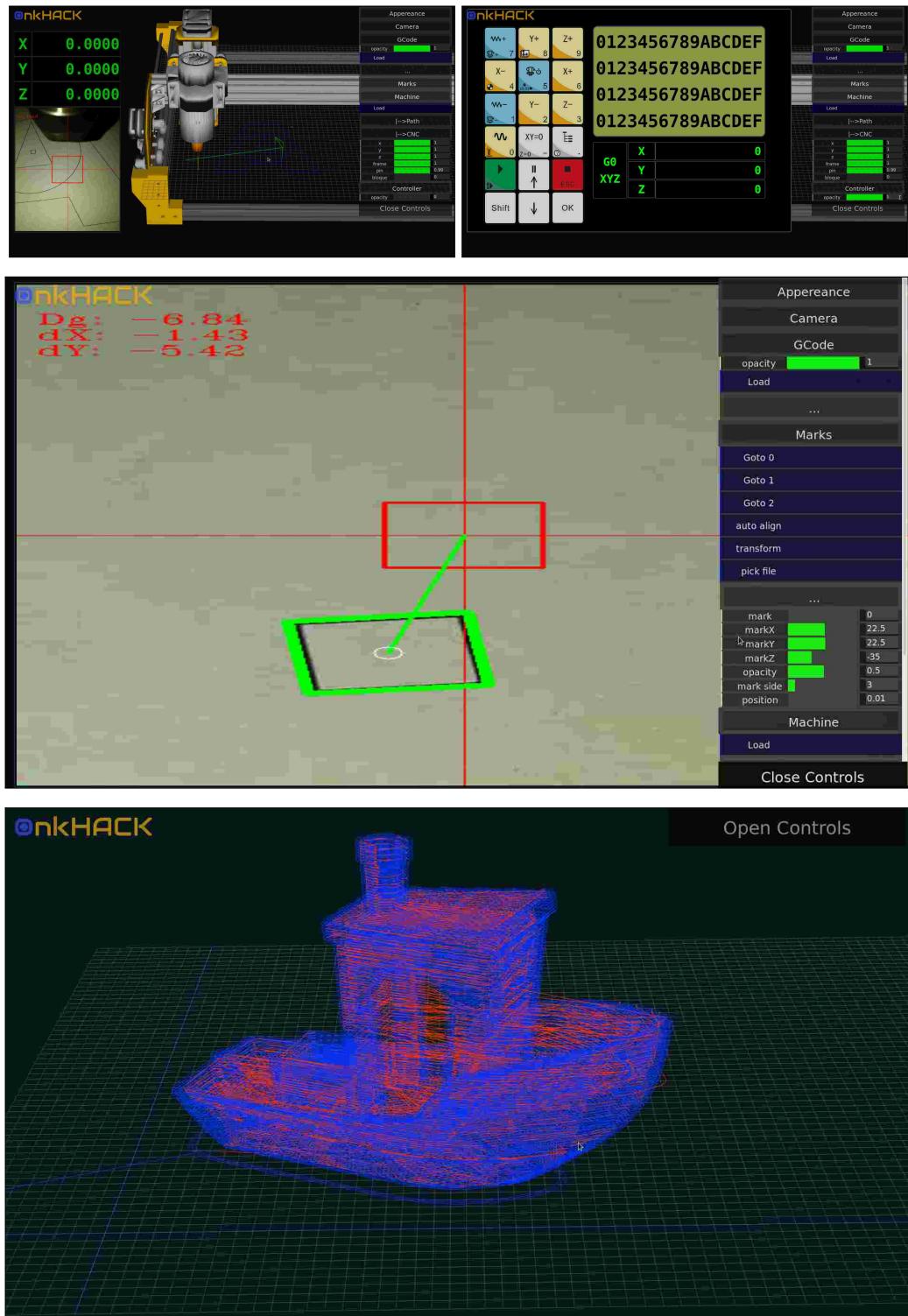


FIGURA B.1. Diferentes configuraciones del software que permiten destacar la característica más relevante en cada operación.

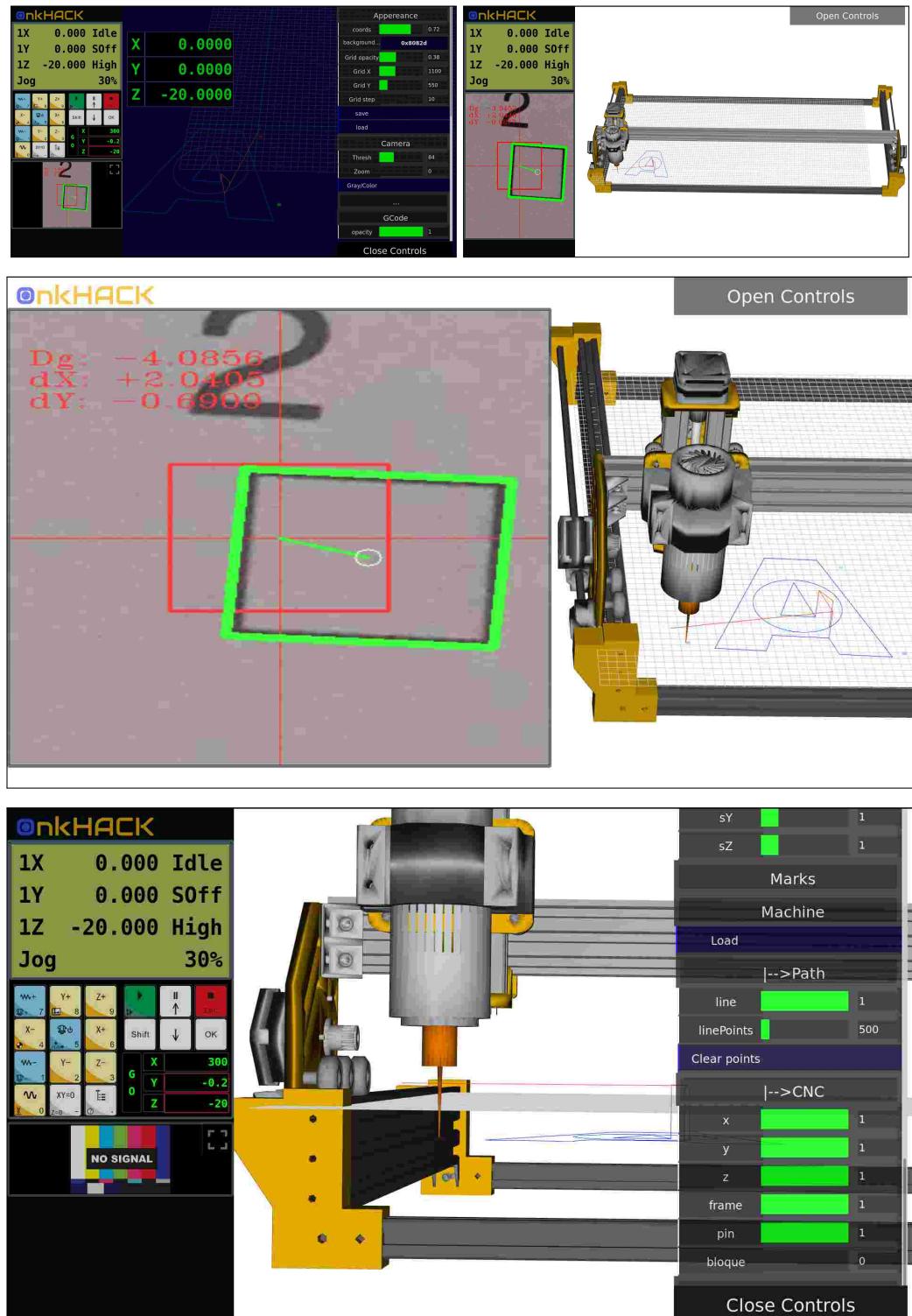


FIGURA B.2. Diferentes configuraciones del software que permiten destacar la característica más relevante en cada operación.

Bibliografía

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_control.
- [2] wikipedia.com. *La especificacion del lenguaje GCode*.
<https://en.wikipedia.org/wiki/G-code#Implementations>. Ene. de 2019.
 (Visitado 10-11-2020).
- [3] Elena R. Messina Thomas R. Kramer Frederick M. Proctor. *The NIST RS274NGC Interpreter - Version 3*. 6556. Rev. 3. NIST National Institute of Standards y Technology. 2000.
- [4] <https://www.edingcnc.com/>.
- [5] <http://www.cnccamera.nl/src-gen/products.html>.
- [6] <https://wolfcut.es/>.
- [7] <https://www.pv-automation.com/en/>.
- [8] <https://www.pv-automation.com>.
- [9] <https://www.machinekit.io/>.
- [10] <https://www.summa.com/en/solutions/>.
- [11] <https://www.weihong.com.cn/en/products/controller/20160424/23.html>.
- [12] *Ecosistema de placas de desarrollo de proposito general*.
<https://http://beagleboard.org/>. (Visitado 02-02-2021).
- [13] <https://www.xilinx.com/products/boards-and-kits/1-hydd4z.html>.
- [14] [https://www.python.org/](https://www.python.org).
- [15] <https://docs.python.org/3/library/asyncio.html>.
- [16] <https://docs.aiohttp.org/en/stable/>.
- [17] <https://en.wikipedia.org/wiki/HTML5>.
- [18] <https://en.wikipedia.org/wiki/CSS>.
- [19] <https://en.wikipedia.org/wiki/JavaScript>.
- [20] <https://get.webgl.org/>.
- [21] <https://https://threejs.org/>.
- [22] <https://en.wikipedia.org/wiki/WebSocket>.
- [23] <https://socket.io/>.
- [24] <https://opencv.org/>.
- [25] <https://pypi.org/project/pyopencv/>.
- [26] <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.pas.webcam&hl=en&gl=US>.
- [27] Christopher Hallinan. *Embedded Linux Primer, Second Edition*. A Practical, Real-World Approach. 2010.
- [28] Alessandro Rubini by Jonathan Corbet y Greg Kroah-Hartman. *Linux Device Drivers, Third Edition*. 6556. Third Edition. 2005.
- [29] <https://tldp.org/LDP/tlk/tlk-title.html>.
- [30] https://www.kernel.org/doc/Documentation/usb/gadget_configs.txt.