



# FACULTAD DE INGENIERIA

Universidad de Buenos Aires

## MAESTRÍA EN SISTEMAS EMBEBIDOS

MEMORIA DEL TRABAJO FINAL

### Lectura de fiduciales para máquina CNC

**Autor:**  
**Esp. Ing. Pablo Slavkin**

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

Jurados:  
Ing. Ariel Hernandez  
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 el presente trabajo se presenta el desarrollo de un sistema electrónico capaz de dotar de visión artificial a una máquina de mecanizado por control numérico computarizado CNC de la fábrica española Wolfcut para permitir el alineamiento automático de piezas 2D mediante la lectura de marcas fiduciales. Utilizando Linux sobre la plataforma PocketBeagle, se desarrollaron los drivers del kernel en C para interactuar con un controlador de movimientos Weihong NK105, se implementó una interfaz de control web con HTML, JavaScript y Python, se habilitó la carga de archivos USB remota mediante la tecnología configFS, y se realizó el procesamiento de vídeo desde una cámara Wi-Fi mediante la biblioteca pyopencv.



## *Agradecimientos*

A Juli, Valen, Maxi y León



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>I</b>
<b>1. Introducción general</b>	<b>1</b>
1.1. Mecanizados CNC en 2D . . . . .	1
1.2. Soluciones de mercado . . . . .	3
1.3. Motivación y alcance . . . . .	5
<b>2. Introducción específica</b>	<b>7</b>
2.1. Historia y principio de funcionamiento . . . . .	7
2.1.1. Programa de movimientos . . . . .	8
2.1.2. Controlador de movimientos . . . . .	9
2.1.3. Máquina . . . . .	10
2.1.4. Tecnologías utilizadas . . . . .	10
2.1.5. Plataforma PocketBeagle . . . . .	11
2.1.6. Aplicación web . . . . .	14
2.1.7. Cámara de vídeo . . . . .	16
2.1.8. Trigonometría de alineación . . . . .	17
2.1.9. Detection y tipos de marcas fiduciales . . . . .	20
<b>Bibliografía</b>	<b>23</b>



# Índice de figuras

1.1. Ejemplos de piezas mecanizadas mediante máquinas CNC. . . . .	1
1.2. Esquema de corte de una letra A en una placa de material virgen. . . . .	2
1.3. Corte de la silueta de la letra A previamente impresa en el material.	3
1.4. Corte de la silueta de la letra A previamente impresa en el material con lectura de marcas. . . . .	3
1.5. Controlador NK105 de la firma Weihong elegido para extender sus funciones y dotarlo de lectura de marcas. . . . .	5
 2.1. Jhon Parsons, el inventor de las máquinas de control numérico junto a una de sus máquinas. . . . .	7
2.2. Los tres bloques básicos de una máquina CNC. . . . .	8
2.3. Secuencia de pasos para operar una máquina NC primigenia. . . . .	9
2.4. Secuencia de pasos para operar una máquina CNC moderna. . . . .	10
2.5. La etapa de control se suele separar en dos: controlador lógico y driver de potencia. . . . .	11
2.6. Esquema general y modelos de máquinas CNC dependiendo del tipo de material a procesar y la tecnología de corte. . . . .	11
2.7. Diagrama de bloques del sistema implementado con el objeto de identificar las tecnologías involucradas en cada bloque. . . . .	14
2.8. Plataforma de desarrollo PocketBeagle utilizada en este trabajo. . . . .	14
2.9. Capas de software relacionadas con la aplicación web utilizadas en este trabajo. . . . .	15
2.10. Aplicación IP Webcam que permite utilizar la cámara del teléfono y enviar el vídeo por Wi-Fi. . . . .	17
2.11. 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 . . . . .	18
2.12. Cálculo de rotación de la recta formada entre los puntos 1 y 2 en los planos A y B. . . . .	19
2.13. Corrección de la rotación del plano A respecto del plano B utilizando dos puntos de referencia. . . . .	20
2.14. Corrección de la escala entre los planos A y B utilizando como factor de escala las dimensiones relativas entre los dos planos. . . . .	21
2.15. Ejemplo de diferentes tipos de marcas fiduciales. . . . .	21



# Índice de tablas

1.1.	Sistemas de reconocimiento de marcas . . . . .	4
2.1.	Modelos de controladores . . . . .	12
2.2.	Modelos de drivers . . . . .	13
2.3.	Selección de la cámara . . . . .	16



*Dedicado a Fernando Sanchez*



# Capítulo 1

## Introducción general

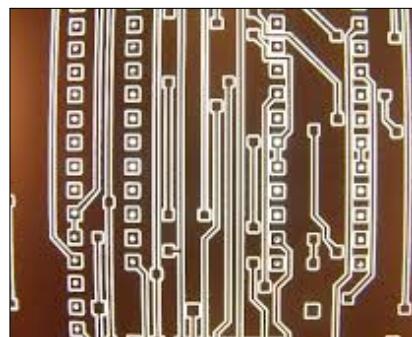
En el presente capítulo se introducen ejemplos de uso de las máquinas CNC y las dificultades que presentan para alinearse con las piezas a mecanizar. Luego se comparan soluciones de otros fabricantes y finalmente se comenta acerca de la motivación, el alcance y los objetivos de la propia.

### 1.1. Mecanizados CNC en 2D

En la actualidad, muchos de los procesos industriales que involucran el mecanizado de piezas como las que se muestran en la figura 1.1 se realizan utilizando máquinas de control numérico computarizado o CNC [1] (*computer numerical control*).



(A) Máquina CNC ejecutando 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.

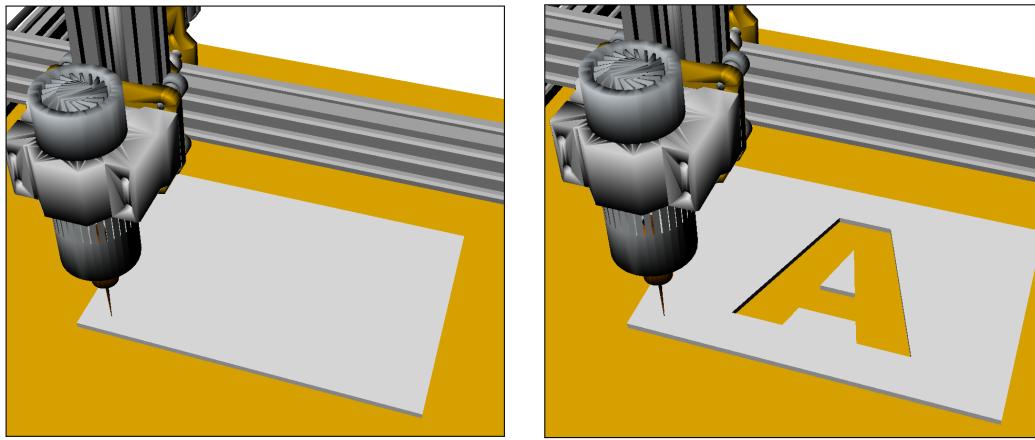


(D) Corte de logos y letras en madera.

FIGURA 1.1. Ejemplos de piezas mecanizadas mediante máquinas CNC.

El proceso de mecanizar piezas utilizando esta tecnología se esquematiza en la figura 1.2 y consiste en una serie de pasos como los 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.

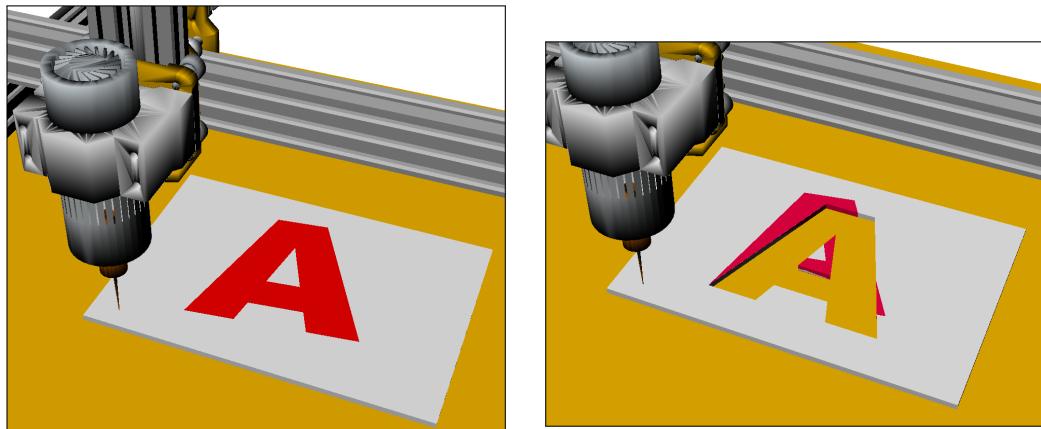
FIGURA 1.2. Esquema de corte de una letra A en una placa de material virgen.

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 1.3a. 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 1.3b, 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.

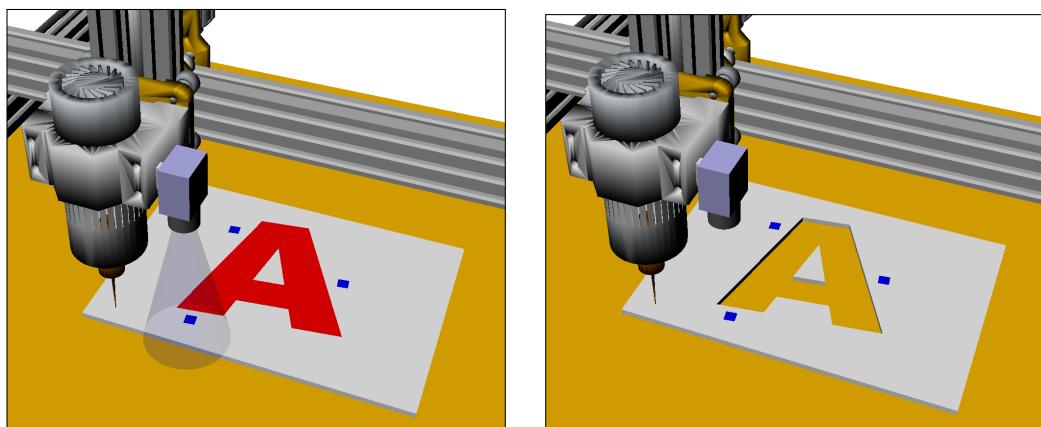


(A) Placa a cortar fijada a la mesa de corte y fresa de corte en posición.

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

FIGURA 1.3. 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 1.4.



(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 1.4. Corte de la silueta de la letra A previamente impresa en el material con lectura de marcas.

## 1.2. Soluciones de mercado

En la tabla 1.1 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 y eso aumenta el costo general del sistema, disminuye la fiabilidad y limita el acceso desde múltiples

plataformas. Se ha podido constatar que además del costo de hardware, licencias o extensiones de software, el costo de las cámaras utilizadas son privativos para el segmento de máquinas de gama baja o media que es el segmento principal de este trabajo.

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

Por otra parte tampoco se ha encontrado alguna 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.

TABLA 1.1. Se destacan algunos modelos y marcas de sistemas de reconocimiento de marcas y sus características principales.

Características	Imagen
EddingCNC [2]: Software basado en PC sobre Windows al cual varios fabricantes como GES [3] y Wolfcut [4] lo han extendido para soportar reconocimiento de marcas.	
myCNC [5]: Esta aplicación de la empresa pv-automation [6] ofrece un sistema de visión artificial y reconocimiento de marcas basado en una PC industrial y cámaras USB.	
Machinekit [7]: Es un software de control que opera sobre Linux al cual se le han hecho algunas intervenciones para el reconocimiento de marcas.	
Summa [8]: Es una línea de máquinas de corte de contornos, principalmente en papel, que cuenta con lectura de marcas integrado en sus sistemas embebidos.	

### 1.3. 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 [9] que se muestra en la figura 1.5.



FIGURA 1.5. Controlador NK105 de la firma Weihong elegido para extender sus funciones y dotarlo de lectura de marcas.

Este controlador solo cuenta con un comando remoto para todas las operaciones de manejo y configuración. No provee una API definida por el fabricante ni una interfase física para poder conectarse y extender sus funciones.

Por otro lado, al estar basado internamente en una FPGA y no depender de una PC para funcionar, es reconocido por sus excelentes resultados de corte, su estabilidad en trabajos extensos y una excelente fiabilidad.

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. 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 expone una breve reseña histórica de las máquinas CNC, su principio de funcionamiento y su uso en la industria. Luego se introducen las tecnologías más relevantes involucradas en el desarrollo de este trabajo.

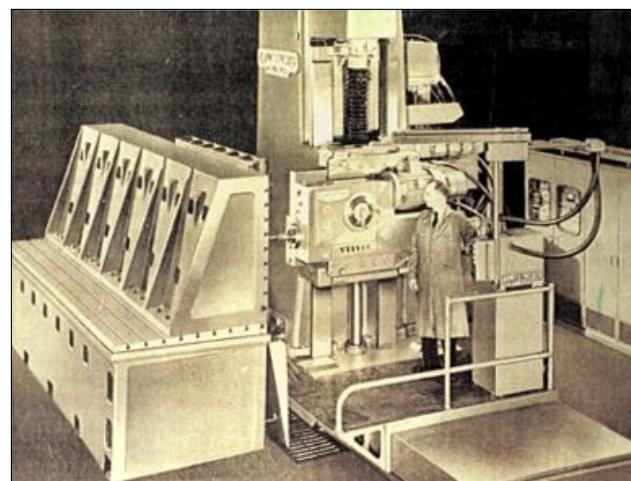
### 2.1. Historia y principio de funcionamiento

Hacia finales de la década del '40, el mecánico inventor Jhon Parsons<sup>1</sup> retratado en la figura 2.1a, logró motorizar una agujereadora de banco de precisión y la automatizó mediante el uso de una cinta perforada, figura 2.1b.

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



(A) Fotografia de Jhon 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 NC.

FIGURA 2.1. Jhon 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 por sus siglas en inglés (*computer numerical control*).

A pesar del paso del tiempo y los avances tecnológicos, los bloques constitutivos

---

<sup>1</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/John\\_T.\\_Parsons](https://en.wikipedia.org/wiki/John_T._Parsons)

de una máquina CNC siguen siendo los mismos que se muestran en la figura 2.2.



FIGURA 2.2. Los tres bloques básicos de una máquina CNC.

### 2.1.1. 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[10].

Este lenguaje fue creado por el Instituto tecnológico de Massachusetts en la década del '50 y especificado en el documento NIST-RS274-D [11].

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 sería interpretada por el controlador de movimientos.

Se pueden ver algunas fotos de este primigenio proceso en la figura 2.3.

En el presente se diseña la pieza en tres dimensiones con la ayuda de software de diseño asistido por computadora CAD (*computer aided design*).

Algunos software de CAD reconocidos se listan a continuación:

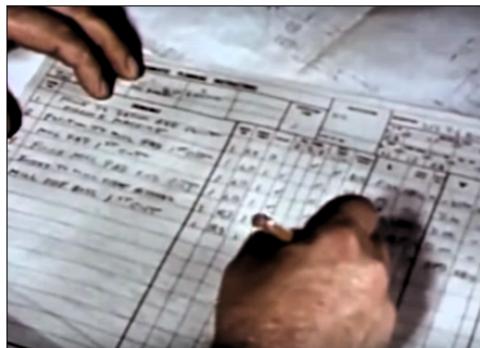
- FreeCAD
- Blender
- Rhinoceros
- AutoCAD
- SolidWorks

El archivo de salida del CAD se procesa con un software de manufactura asistida por computadora CAM (*computer aided manufacturing*) en donde el diseñador puede configurar los métodos y estrategias de mecanizado.

Algunos software de CAM reconocidos se listan a continuación:

- RhinoCAM
- Blender CAM
- FreeMILL
- Aspire
- Mastercam

El resultado final es un archivo de texto en lenguaje GCode que se almacena digitalmente y que será procesado por el controlador.



(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 2.3. Secuencia de pasos para operar una máquina NC primigenia.

Esta secuencia es conocida como diseño CAD/CAM y se muestra en la figura 2.4

### 2.1.2. Controlador de movimientos

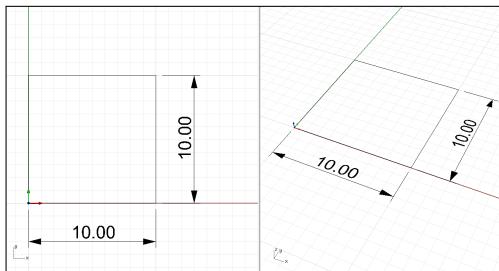
El controlador de movimientos es un equipo electrónico capaz de leer un programa en lenguaje GCode y proveer las señales eléctricas adecuadas para mover la máquina.

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.

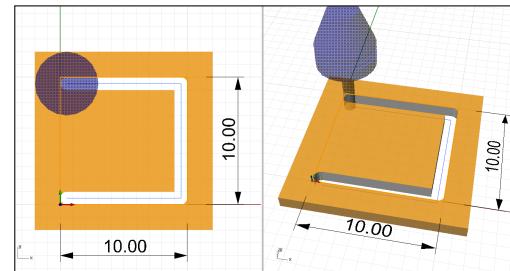
De esta manera el controlador se compone de dos etapas, controlador lógico y drivers como se aprecia en la figura 2.5.

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 2.1 y 2.2 se listan algunos modelos de controladores y drivers comerciales detallando las características principales.



(A) Se diseña la pieza en 3D en un software CAD.



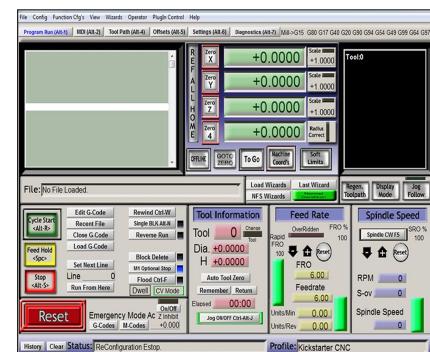
(B) Se diseña la estrategia de mecanizado y opcionalmente se simula el proceso en un software CAM.

```

1 %
2 N0001 G17 G21 G40 G90
3 N0002 T1 M06
4 N0003 S10000 M3 G4 P5 (delay 58 segs)
5 N0004 G0 X0.5000 Y0.5000 Z0.5000
6 N0005 G1 Z-1.0000 F2000.
7 N0006 X9.5000 F1500.
8 N0007 Y9.5000
9 N0008 X0.5000
10 N0009 Y0.5000
11 N0010 G0 Z0.5000
12 N0011 M30
13 %

```

(C) Se exporta desde el CAM un archivo en lenguaje GCode con las instrucciones de máquina que leerá el controlador.



(D) El software del controlador genera las señales que mueven el CNC y ejecutan el mecanizado.

FIGURA 2.4. Secuencia de pasos para operar una máquina CNC moderna.

### 2.1.3. Máquina

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 roboticos 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 2.6.

### 2.1.4. Tecnologías utilizadas

En el diagrama de bloques de la figura 2.7 se muestran las partes que componen el sistema implementado. Para explicar como se relacionan e interactúan entre sí



FIGURA 2.5. La etapa de control se suele separar en dos: controlador lógico y driver de potencia.

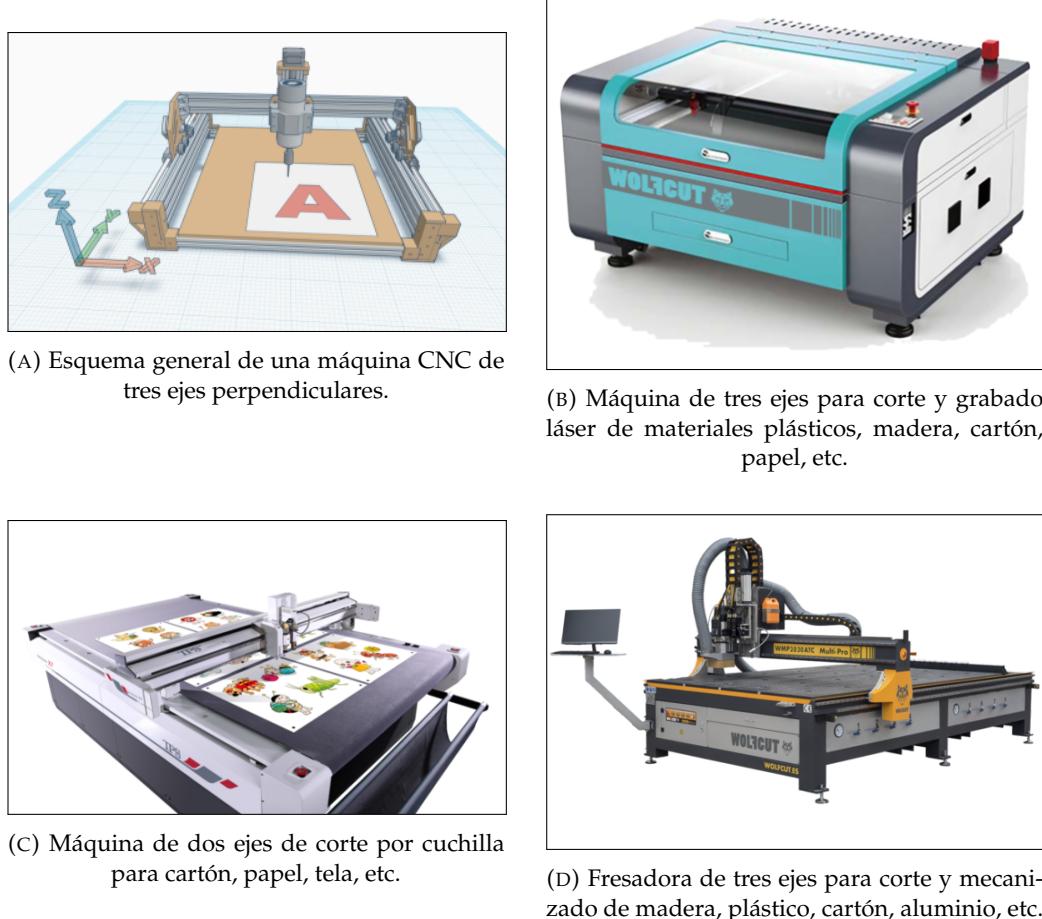


FIGURA 2.6. Esquema general y modelos de máquinas CNC dependiendo del tipo de material a procesar y la tecnología de corte.

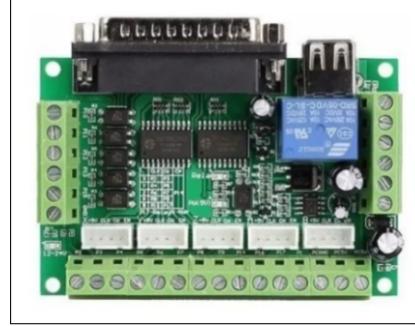
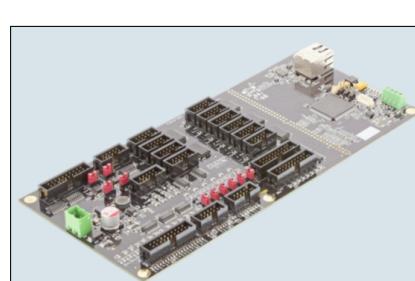
estos bloques, en las próximas secciones de esta memoria se describen las cualidades y funciones más destacadas de cada uno.

### 2.1.5. 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 2.8.A, y que son relevantes para este trabajo son las siguientes:

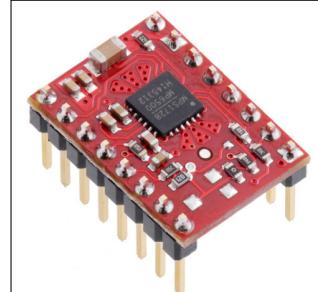
- Controlador integrado SiP (system-in-package) Octavo Systems OSD3358-SM.

TABLA 2.1. Modelos de controladores CNC disponibles en el mercado

Características	Imagen
<p>Controlador dependiente de una PC y conexión por puerto paralelo. Solución económica para máquinas de baja performance.</p>	
<p>Controlador integrado de media performance, ideal para máquinas profesionales pero de baja complejidad. Este es el controlador que se usará en este trabajo para realizar los ensayos.</p>	
<p>Controlador basado en PC sobre Windows de media performance. Este es el controlador que usa actualmente la empresa Wolfcut en sus máquinas.</p>	
<p>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.</p>	

- Memoria de 512MB DDR3.
- Unidad de procesamiento de 32b Cortex-A8 @1-GHz.

TABLA 2.2. Modelos de drivers de motores

Características	Imagen
Driver para motores paso a paso pequeños, económicos, ideales para máquinas simples, impresoras 3D, y hobby.	
Driver para motores paso a paso medianos, ideales para máquinas de media precisión y mecánica ligera.	
Driver para motores BLDC ( <i>brush less direct current motors</i> ), de potencia media, adecuados para máquinas de extrema precisión y escalables en potencia.	

- 72 pines de expansion, 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 BeagleBoneBlack<sup>2</sup>, 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 2.8b.

Se está utilizando una distribución oficial del sistema operativo Debian compilada para esta plataforma y que se puede descargar desde el link oficial<sup>3</sup>.

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.

<sup>2</sup><https://beagleboard.org/black>

<sup>3</sup><https://beagleboard.org/latest-images>

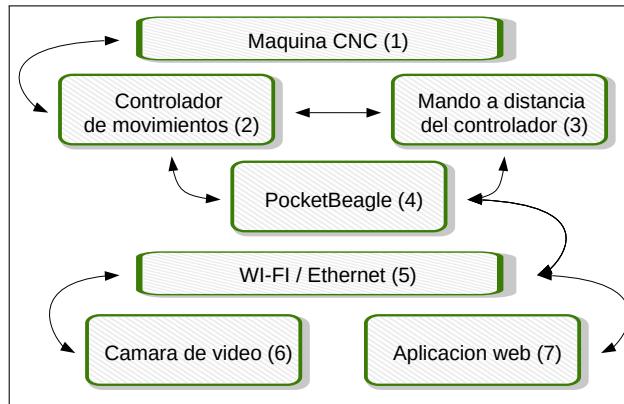


FIGURA 2.7. Diagrama de bloques del sistema implementado con el objeto de identificar las tecnologías involucradas en cada bloque.

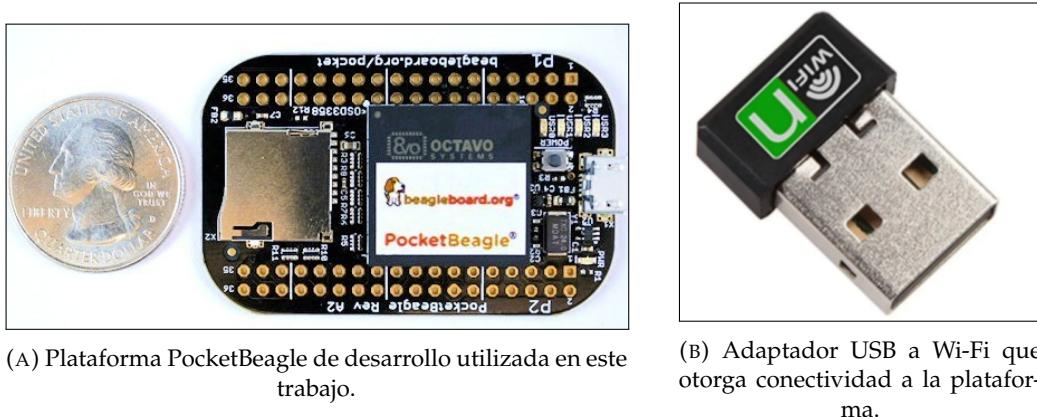


FIGURA 2.8. Plataforma de desarrollo PocketBeagle utilizada en este trabajo.

### 2.1.6. 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 macOS<sup>4</sup>, 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 2.9.

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

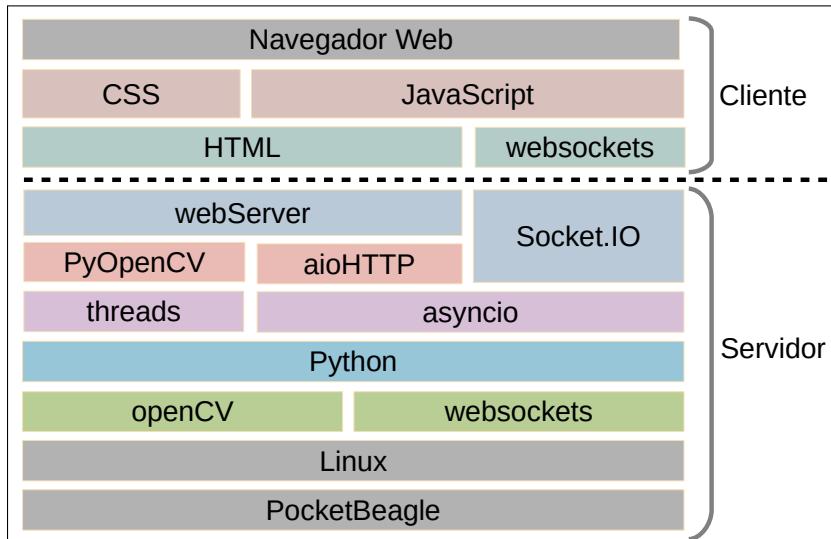


FIGURA 2.9. Capas de software relacionadas con la aplicación web utilizadas en este trabajo.

- 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 en este trabajo.
- HTML5.0 [17]: Es el lenguaje de marcas utilizado para visualizar contenidos en la web. En este trabajo 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 pero 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. En este trabajo 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, la cual a su vez utiliza libopencv-dev del sistema operativo.

### 2.1.7. 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 2.3 con las opciones más destacadas calificando de 0 a 5.

TABLA 2.3. Tabla comparativa entre diferentes cámaras calificadas de 0 a 5.

<b>Tipo</b>	<b>Interfaz</b>	<b>Calidad de imagen [0-5]</b>	<b>Disponibilidad [0-5]</b>	<b>Costo [0-5]</b>
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 2.10.

Esta opción resuelve el problema de la longitud del cable dado que transmite por Wi-Fi, 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 la cual se pueden ajustar los parámetros de la cámara más importantes: zoom, brillo, desplazamiento, resolución y calidad de imagen.



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

### 2.1.8. 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.

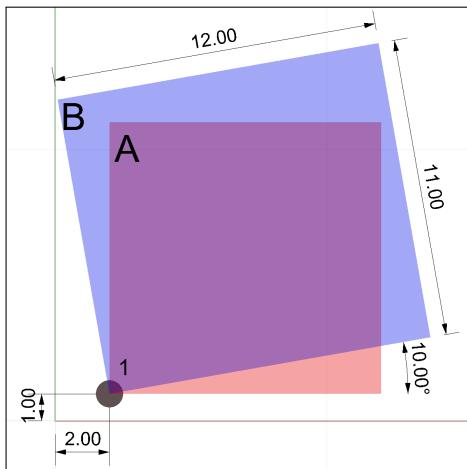
Dado dos planos A y B superpuestos como se muestra en la figura 2.11a para el siguiente análisis se define al plano A, en rojo, como el sistema de coordenadas de la máquina y sus dimensiones las establecidas en el archivo de corte. Mientras que B, en azul, como el objeto real a mecanizar que se encuentra 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 2.11b.

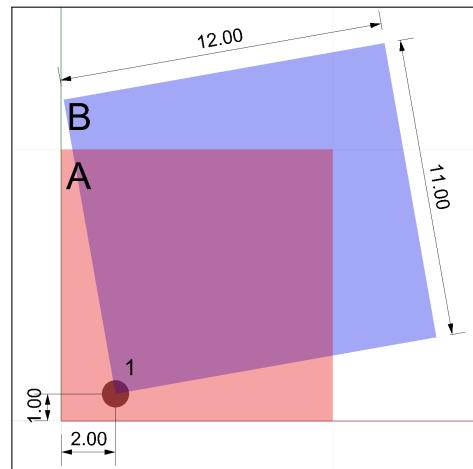
El punto 1 en el sistema A es el (2, 1) mientras que en el sistema B es el (0, 0).

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

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



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



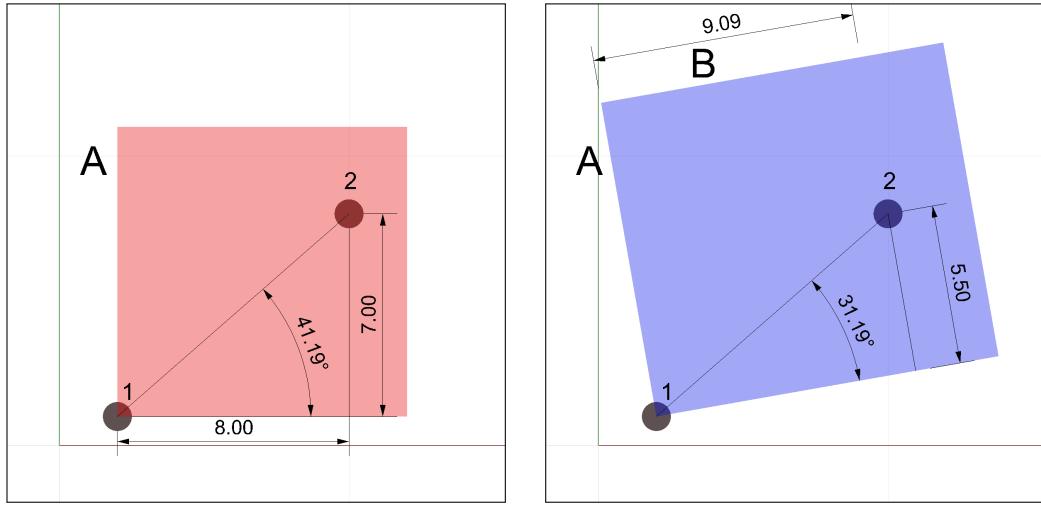
(B) El plano A se desplaza y corrige su posición.

FIGURA 2.11. 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

Ahora, si se considera el punto 2, como se muestra en la figura 2.12, 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 2.12a y 2.12b y se expresa en las ecuaciones 2.2.



(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 2.12. 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 2.13.

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 2.14 y se expresa en las ecuaciones 2.3.

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

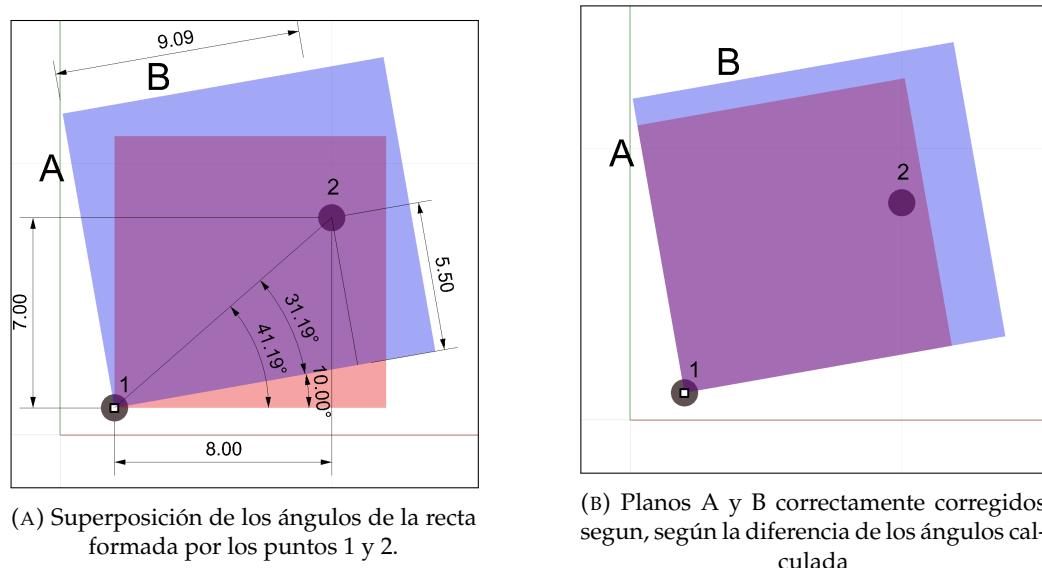


FIGURA 2.13. Corrección de la rotación del plano A respecto del plano B utilizando dos puntos de referencia.

### 2.1.9. Detection 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 es usual encontrar que las marcas son círculos o cuadrados de entre 1mm y 10mm 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 pintada internamente y que no sea solo un contorno.
- 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 2.15.

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

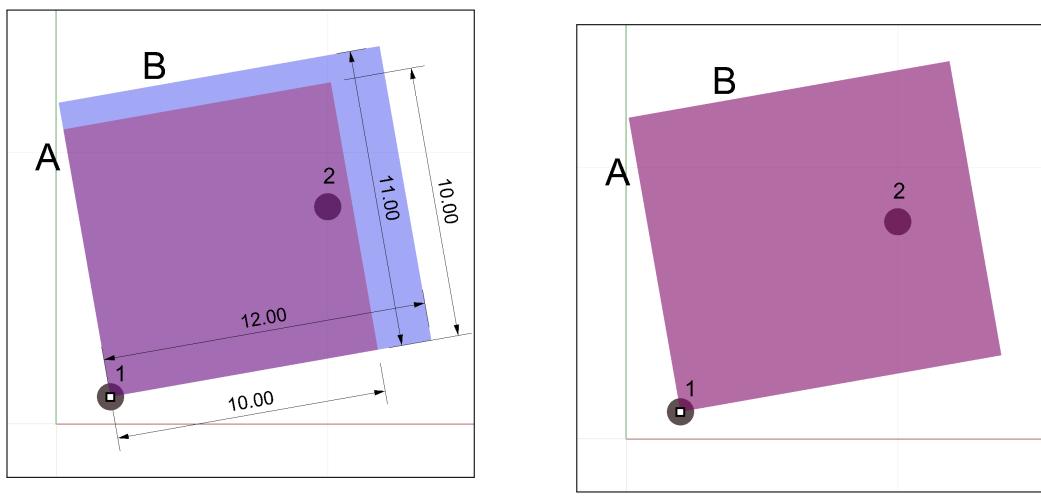
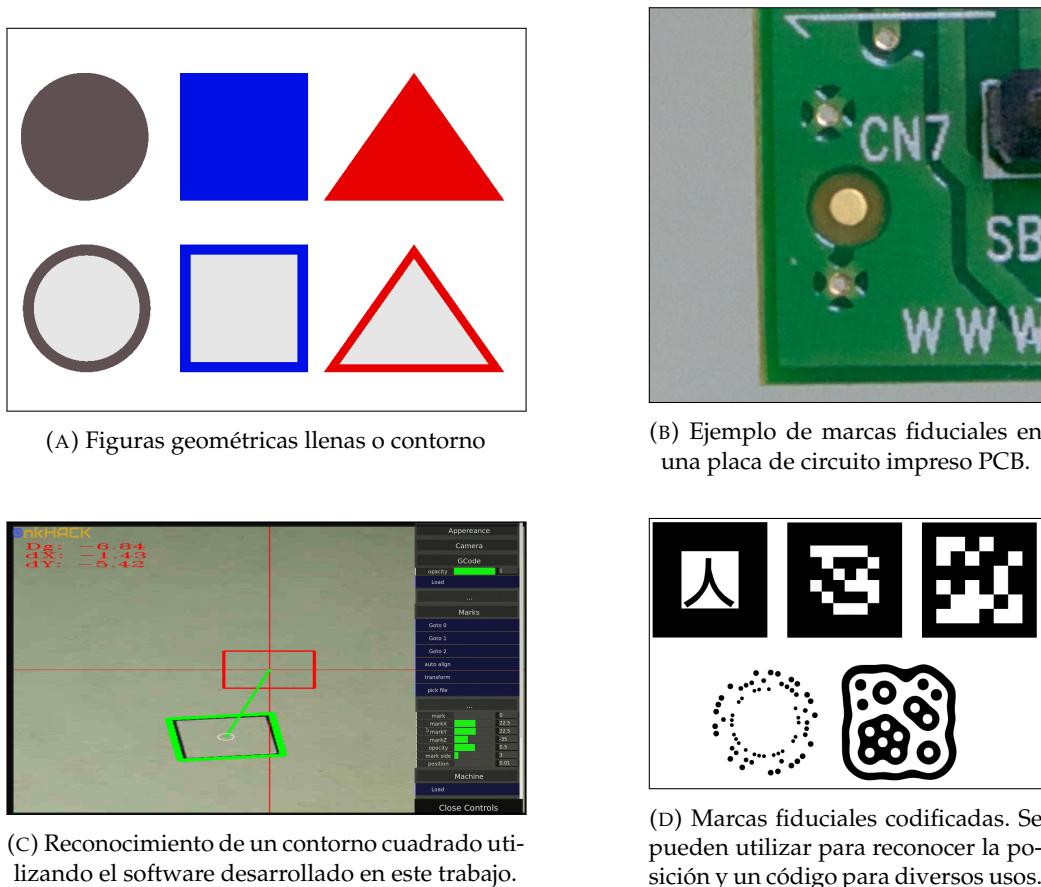


FIGURA 2.14. Corrección de la escala entre los planos A y B utilizando como factor de escala las dimensiones relativas entre los dos planos.





# Bibliografía

- [1] [https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical\\_control](https://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_control).
- [2] <https://www.edingcnc.com/>.
- [3] <http://www.cnccamera.nl/src-gen/products.html>.
- [4] <https://www.wolfcut.es/>.
- [5] <https://www.pv-automation.com/en/>.
- [6] <https://www.pv-automation.com>.
- [7] <https://www.machinekit.io/>.
- [8] <https://www.summa.com/en/solutions/>.
- [9] <https://www.weihong.com.cn/en/products/controller/20160424/23.html>.
- [10] wikipedia.com. *La especificacion del lenguaje GCode.*  
<https://en.wikipedia.org/wiki/G-code#Implementations>. Ene. de 2019.  
(Visitado 10-11-2020).
- [11] 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.
- [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/>.
- [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>.