CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE POR HILO POR MEDIO DE UN ROBOT COLABORATIVO UR3 PARA APLICACIONES CON POLIESTIRENO EXPANDIDO

JONATHAN STIVEN BONOLIS LÓPEZ

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO
FACULTAD DE INGENIERÍA
TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA
MEDELLÍN
2026

CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE POR HILO POR MEDIO DE UN ROBOT COLABORATIVO UR3 PARA APLICACIONES CON POLIESTIRENO EXPANDIDO

JONATHAN STIVEN BONOLIS LÓPEZ

Trabajo de grado para optar al título de Tecnólogo en Electrónica

Asesor

Julio Pastor Restrepo Zapata

Último título del asesor

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

MEDELLÍN

2026

Contenido

Pág.

Contenido 3
Lista de Figuras 5
Lista de Tablas 6
Lista de Anexos 7
Resumen 8
Abstract 9
Glosario 10
Introducción 12

1. Planteamiento del problema 14
   1.1 Descripción del problema 14
   1.2 Formulación del problema 15
2. Justificación 16
3. Objetivos 18
   3.1 Objetivo general 18
   3.2 Objetivos específicos 18
4. Marco Teórico 19
   4.1 Estado del arte 19
   4.2 Conceptos generales 21
   4.2.1 Robot 21
   4.2.2 Robot colaborativo UR3 22
   4.2.3 Poliestireno expandido (EPS) 23
   4.2.4 Corte térmico por hilo resistivo 23
   4.2.5 Manos robóticas y herramientas finales (End-effector) 24
   4.2.6 Microcontrolador (Arduino) 24
   4.2.7 Programación aplicada a robótica y control térmico 25
   4.2.8 Software CAD/CAM 25
5. Metodología 26
   6.1 Tipo de proyecto 26
   6.2 Método 26
   6.3 Instrumentos de recolección de información 28
   6.3.1 Fuentes primarias 28
   6.3.2 Fuentes secundarias 29
6. Resultados 31
   7.1 Implementación del sistema de control electrónico y potencia 31
   7.1.1 Arquitectura de hardware y componentes 31
   7.1.2 Funcionamiento del algoritmo de control 31

7.2 Ingeniería y construcción del cabezal de corte térmico 33
7.2.1 Estructura de soporte e interfaz robótica 33
7.2.2 Sistema de sujeción, tensión y contacto eléctrico 34
7.2.3 Conducción eléctrica y disipación térmica 34

7.3 Programación y control de trayectorias del robot UR3 37
7.3.1 Entorno de programación PolyScope 37

7.3.2 Configuración de coordenadas y puntos de paso (Waypoints) 37
7.3.3 Ejecución del corte 37

7.4 Validación experimental del proceso de corte en EPS 39
7.4.1 Operación del brazo robótico en trayectoria de corte 39

8. Conclusiones 45
9. Recomendaciones 47
10. Referencias bibliográficas 49
11. Anexos 53
    11.1 Imagen de todo el sistema del proyecto trabajado 53
    11.2 Link de descarga Arduino 54
    11.3 Circuito electrónico 55
    11.4 Estación de trabajo y entorno operativo del sistema robótico 56
    11.5 Diagrama del circuito 57

Lista de figuras

Pág.

Figura 1. Robot conceptual 21

Figura 2. Robot UR3 para el proyecto 22

Figura 3. Poliestireno expandido EPS 22

Figura 4. Hilo resistivo 23

Figura 5. Brazo robótico 24

Figura 6. Arduino 24

Figura 7. Configuración final del módulo de control 33

Figura 8. Estructura completa del proyecto finalizado 36

Figura 9. Cabezal de corte con soportes 3D 36

Figura 10. Interfaz PolyScope 38

Figura 11. Configuración de Waypoints 38

Figura 12. Configuración de trayectorias 39

Figura 13. Posición inicial del robot 40

Figura 14. Antes de empezar el corte 41

Figura 15. Robot durante el corte 42

Figura 16. Robot realizando el primer corte 43

Figura 17. Robot finalizando segundo corte 44

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Matriz de variables y especificaciones técnicas 30

Tabla 2. Especificaciones técnicas del sistema electrónico 32

Tabla 3. Especificaciones técnicas de la construcción mecánica 35

Lista de anexos

Pág.

Anexo A. Imagen de todo el sistema del proyecto 53
Anexo B. Link de descarga Arduino 54
Anexo C. Circuito electrónico 55
Anexo D. Estación de trabajo y entorno operativo 56
Anexo E. Diagrama del circuito 57

Resumen

CONSTRUCCIÓN DE UNA HERRAMIENTA DE CORTE POR HILO POR MEDIO DE UN ROBOT COLABORATIVO UR3 PARA APLICACIONES CON POLIESTIRENO EXPANDIDO

JONATHAN STIVEN BONOLIS LÓPEZ

Este proyecto de grado aborda la falta de precisión y repetibilidad en los procesos manuales de corte de poliestireno expandido (EPS) utilizados en el ámbito académico e industrial local. El propósito de la investigación fue automatizar dicha labor mediante la construcción e integración de una herramienta de corte térmico acoplada a un robot colaborativo UR3, optimizando la calidad superficial de las piezas procesadas. La metodología implementada se dividió en tres fases: primero, el diseño mecánico de un cabezal con soportes aislantes impresos en 3D y un sistema de borneras con tornillos para templar un hilo de ferroníquel de 0.5 mm; segundo, el desarrollo de un módulo electrónico de potencia basado en un Arduino Uno, un transformador reductor de 10V AC y un relé de estado sólido (SSR) encargado de regular la temperatura por efecto Joule; y tercero, la programación de trayectorias lineales constantes (MoveL) mediante el entorno nativo PolyScope del brazo robótico. Los resultados experimentales demostraron que la sincronización entre la velocidad constante del robot y la temperatura estable del hilo elimina la resistencia mecánica del material, generando acabados superficiales lisos, uniformes y con alta precisión dimensional. Como trabajo futuro, se plantea la implementación de un control de temperatura en lazo cerrado mediante un algoritmo PID y el diseño de un cerramiento perimetral de seguridad para protección de los usuarios.

Palabras claves: robótica colaborativa, corte térmico, poliestireno expandido, relé de estado sólido, automatización industrial

Abstract

This degree project addresses the lack of precision and repeatability in manual expanded polystyrene (EPS) cutting processes used in the local academic and industrial fields. The purpose of the research was to automate this task through the construction and integration of a thermal cutting tool coupled to a UR3 collaborative robot, optimizing the surface quality of the processed pieces. The implemented methodology was divided into three phases: first, the mechanical design of a cutting head with 3D-printed insulating supports and a terminal block system with screws to tension a 0.5 mm ferronickel wire; second, the development of an electronic power module based on an Arduino Uno, a 10V AC step-down transformer, and a solid-state relay (SSR) responsible for regulating the temperature via Joule heating; and third, the programming of constant linear trajectories (MoveL) using the robotic arm's native PolyScope environment. Experimental results demonstrated that the synchronization between the constant speed of the robot and the stable temperature of the wire eliminates the mechanical resistance of the material, generating smooth, uniform surface finishes with high dimensional accuracy. As future work, the implementation of a closed-loop temperature control using a PID algorithm and the design of a perimeter safety enclosure for user protection are proposed.

Keywords: collaborative robotics, thermal cutting, expanded polystyrene, solid-state relay, industrial automation

Glosario

Cinemática: rama de la mecánica que estudia y describe matemáticamente el movimiento del brazo robótico. En el proyecto, el control cinemático es vital para garantizar que la velocidad de avance de la herramienta sea suave y constante, evitando irregularidades en el corte.

Código G (G-code): lenguaje de programación numérico estándar utilizado en la manufactura digital. Consiste en las líneas de comando que contienen las coordenadas tridimensionales y las instrucciones de velocidad que guían los movimientos del brazo robótico UR3.

Efecto Joule: fenómeno físico mediante el cual la energía de la corriente eléctrica que circula por un conductor se transforma en calor debido a la resistencia del material, siendo este el principio que permite elevar la temperatura del hilo para fundir el poliestireno.

Efector final (End-effector): dispositivo accesorio que se instala en el extremo del brazo robótico para permitirle ejecutar una tarea física específica. En este trabajo, corresponde al cabezal de corte térmico diseñado e instalado en el robot.

Grados de libertad (DOF): número de articulaciones independientes de movimiento que posee el robot. El brazo UR3 cuenta con seis grados de libertad, permitiendo orientar el cabezal de corte en múltiples ángulos dentro del espacio tridimensional.

Hilo de ferroníquel: aleación metálica compuesta principalmente por hierro y níquel, utilizada en este proyecto como elemento calefactor. Mantiene el calor necesario para realizar cortes limpios y continuos debido a su resistencia eléctrica y estabilidad a altas temperaturas.

Microcontrolador: circuito integrado programable capaz de ejecutar órdenes grabadas en su memoria. En este proyecto se utiliza la plataforma Arduino como el cerebro electrónico que procesa las instrucciones y genera las señales para regular la potencia térmica.

Modulación por ancho de pulso (PWM): técnica de control electrónico que consiste en encender y apagar la señal de energía a altas velocidades. Permite variar el tiempo que la señal permanece encendida para controlar la temperatura del hilo sin generar inestabilidad.

Relé de Estado Sólido (SSR): dispositivo electrónico que funciona como un interruptor sin partes móviles. Se utiliza para conmutar la corriente alterna proveniente del transformador hacia el hilo de ferroníquel, respondiendo a las señales de control de forma segura.

Poliestireno expandido (EPS): material plástico espumado, derivado del petróleo y comúnmente conocido como icopor. Se caracteriza por su ligereza y facilidad de modelado, siendo la materia prima que el sistema robótico procesa.

Precisión dimensional: grado de exactitud que existe entre las medidas físicas reales de la pieza cortada en poliestireno y las dimensiones teóricas del modelo virtual diseñado en el ordenador.

Repetibilidad: capacidad del sistema automatizado para posicionar la herramienta de corte en el mismo punto exacto y ejecutar una trayectoria idéntica múltiples veces, asegurando que todas las piezas producidas en serie mantengan la misma calidad.

Robot colaborativo (Cobot): brazo robótico industrial diseñado para interactuar y operar de forma segura junto a seres humanos en un mismo entorno de trabajo sin requerir barreras físicas, como es el caso del equipo UR3 utilizado.

Software CAM: herramienta informática de manufactura asistida por computador que procesa un diseño virtual para calcular las trayectorias exactas de movimiento, traduciéndolas en un código que el brazo robótico puede ejecutar.

Introducción

El presente proyecto de grado se centra en el desarrollo e integración de una herramienta de corte térmico por hilo resistivo acoplada a un robot colaborativo UR3, diseñada específicamente para el procesamiento automatizado de poliestireno expandido (EPS). El tema central del trabajo es la convergencia entre la robótica de precisión y el control electrónico de potencia para transformar un proceso que, tradicionalmente, se ha realizado de forma manual y artesanal. Este proyecto se justifica por la necesidad de eliminar la variabilidad en la calidad de las piezas, reducir el desperdicio de material y, fundamentalmente, mitigar los riesgos operativos asociados al manejo de herramientas incandescentes y la inhalación de gases derivados de la fusión del material.

El trabajo está pensado como una solución integral de manufactura digital que vincula tres áreas fundamentales: el diseño mecánico del efector final, el control electrónico de temperatura mediante un relé de estado sólido (SSR) y la programación de trayectorias complejas a través de software CAM. De esta manera, el sistema no solo busca realizar cortes, sino garantizar que estos sean fieles a los modelos digitales originales, permitiendo la creación de geometrías tridimensionales que serían imposibles de lograr con métodos convencionales de bajo costo.

El método empleado para la ejecución de esta investigación es de carácter aplicado y experimental. Se partió de una fase inductiva para comprender el comportamiento térmico del hilo resistivo, seguida de un proceso deductivo para la adaptación mecánica al brazo robótico. Finalmente, mediante la síntesis y la experimentación práctica, se validó el funcionamiento del sistema a través de ensayos de corte controlados, donde se midieron variables como la precisión dimensional y la estabilidad de la temperatura.

Finalmente, el trabajo reconoce ciertas limitaciones técnicas. El alcance del sistema está

delimitado por el área de trabajo y la capacidad de carga del robot UR3, lo que restringe el tamaño de los bloques de EPS a procesar. Asimismo, la efectividad del corte depende de la densidad específica del poliestireno y requiere de condiciones ambientales controladas, como una ventilación adecuada para la evacuación de humos, aspectos que deben ser considerados para la escalabilidad del prototipo a un entorno industrial de gran formato.

1. Planteamiento del problema

1.1 Descripción

En industrias como la arquitectura y el diseño, el corte de poliestireno expandido depende mayoritariamente de procesos manuales imprecisos o de maquinaria industrial de altísimo costo. El problema central es la dificultad de sincronizar la temperatura del hilo resistivo con la velocidad de movimiento, lo que genera piezas defectuosas y desperdicio de material. Aquí interactúan dos variables clave: la potencia térmica (gestionada por un relé de estado sólido) y la precisión de la trayectoria (ejecutada por el robot UR3).

Justificación y Relevancia

Brecha de Mercado: Actualmente, existe una notable escasez de soluciones tecnológicas de bajo valor económico que ofrezcan resultados profesionales. Las máquinas CNC de gran formato son costosas y poco flexibles, mientras que las herramientas manuales carecen de repetibilidad. Este proyecto es relevante porque propone una alternativa accesible mediante la integración de electrónica de bajo costo (Arduino/SSR) con robótica colaborativa existente.

Tecnológica y Práctica: El uso de un SSR es fundamental, ya que permite un control de potencia más rápido y duradero que los relés mecánicos, evitando el desgaste físico y garantizando un acabado limpio. Prácticamente, esto reduce la intervención humana y aumenta la seguridad.

Evidencia Estadística: Se estima que el uso de herramientas artesanales de bajo costo conlleva un desperdicio de hasta el 30% del material por errores de corte. Al automatizar el proceso con una inversión moderada en electrónica, es posible alcanzar precisiones de 0.1 mm, reduciendo drásticamente los costos de producción y el tiempo de entrega en pequeñas y medianas empresas que no pueden costear maquinaria industrial pesada.

1.2 Formulación

¿Cómo implementar el control térmico mediante un relé de estado sólido de forma que estabilice la temperatura de corte, garantizando la precisión dimensional de las piezas para el modelado de poliestireno expandido con el robot UR3?

2. Justificación

Importancia y Conveniencia El poliestireno expandido (EPS) es un material indispensable en la arquitectura, el diseño industrial y el prototipado debido a su ligereza y versatilidad. Sin embargo, su procesamiento a pequeña y mediana escala sigue dependiendo de métodos manuales imprecisos o de maquinaria industrial de alto costo. La importancia de este proyecto radica en la creación de una solución intermedia, accesible y altamente precisa. Es conveniente porque aprovecha recursos existentes (como el ecosistema de robótica de la institución) integrándolos con electrónica de bajo costo, resolviendo problemas críticos como la baja repetibilidad, el alto desperdicio de material y los riesgos operativos, logrando resultados equiparables a los de la industria automatizada.

Aporte Tecnológico Desde el punto de vista tecnológico, el proyecto representa una innovación al acoplar una herramienta de corte térmico a un robot colaborativo UR3, gestionada por un sistema embebido. La principal contribución es la implementación de un control de potencia mediante un Relé de Estado Sólido (SSR), el cual permite una respuesta de conmutación rápida y estable para mantener la temperatura del hilo resistivo en niveles óptimos. Esta sincronización entre la trayectoria compleja dictada por el software CAM (movimiento) y la electrónica de potencia (temperatura) promueve la adopción de tecnologías de la Industria 4.0, como la robótica colaborativa y la manufactura digital ágil.

Aporte Teórico y Académico A nivel teórico, la investigación contribuye al entendimiento de los procesos de manufactura híbrida, documentando la interacción entre la termodinámica del corte por hilo caliente, la cinemática del brazo robótico y la electrónica de control. Académicamente, el desarrollo de esta herramienta enriquece los laboratorios de la Institución Universitaria Pascual Bravo. Proporciona a docentes y estudiantes de ingeniería y tecnología un entorno de pruebas real para aplicar conceptos de automatización, sistemas

embebidos e integración de hardware/software, sirviendo como plataforma para futuras líneas de investigación.

Aporte Social La automatización del corte de EPS tiene un impacto social directo en la seguridad industrial e higiene ocupacional. Al delegar la tarea de corte al robot UR3, se aleja al operario de la exposición a herramientas a altas temperaturas y a la inhalación directa de los gases derivados de la fusión del poliestireno. Adicionalmente, el proyecto democratiza el acceso a herramientas de prototipado de alta precisión. Emprendedores, pequeños talleres creativos y estudiantes que antes no podían costear servicios de CNC industrial, podrán beneficiarse de esta tecnología de bajo costo.

Aporte Ambiental El impacto ambiental es altamente positivo. El EPS es un material derivado del petróleo, de degradación extremadamente lenta y de difícil reciclaje. Los métodos de corte manual generan un alto índice de piezas defectuosas que terminan como desechos. Al automatizar el proceso y garantizar una precisión milimétrica, este proyecto reduce drásticamente el desperdicio de materia prima, promoviendo prácticas de manufactura responsables, sostenibles y optimizadas.

Viabilidad y Población Beneficiada El proyecto demuestra una alta viabilidad técnica y económica gracias a la disponibilidad del robot UR3 y los laboratorios en la institución, sumado a que los componentes electrónicos requeridos (microcontroladores, SSR, sensores) son de bajo costo. La población beneficiada directamente incluye a la comunidad académica y semilleros de investigación del Pascual Bravo. De forma indirecta, la documentación y resultados de este proyecto establecen un precedente útil para Pymes del sector publicitario y arquitectónico de la región que busquen modernizar sus procesos productivos.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

3.2 Construir e integrar una herramienta automatizada de corte por hilo para poliestireno expandido (EPS), utilizando un robot colaborativo UR3 y un relé de estado sólido (SSR) para controlar la temperatura mediante señales de conmutación, con el fin de lograr cortes precisos y repetibles durante el año 2026.

3.3 Objetivos específicos

- Diseñar el cabezal de corte y su estructura mecánica para que pueda instalarse de forma segura y funcional en el extremo del robot colaborativo UR3.
- Construir el sistema de control de calor para el hilo de corte, empleando un relé de estado sólido que permita ajustar y mantener la temperatura de manera constante durante el proceso.
- Sincronizar el movimiento del brazo robótico con el software de diseño, permitiendo que la herramienta siga las trayectorias automáticas necesarias para crear figuras complejas.
- Realizar ensayos de corte en bloques de poliestireno para verificar que el sistema es capaz de repetir el proceso con exactitud y obtener acabados de alta calidad.

4. Marco teórico

4.1 Estado del Arte

El marco teórico del presente proyecto reúne los conceptos, fundamentos técnicos y antecedentes investigativos que sustentan el diseño e implementación de una herramienta de corte térmico para poliestireno expandido (EPS) integrada a un robot colaborativo UR3. En esta sección se abordan los principios del corte por hilo resistivo, las bases del control térmico mediante sistemas embebidos, la generación de trayectorias mediante software CAD/CAM, y los aportes de la robótica colaborativa a los procesos de manufactura ligera. Asimismo, se revisan estudios y aplicaciones previas relacionadas con el prototipado y la automatización del corte de materiales termoformables, estableciendo el marco conceptual necesario para comprender la relevancia técnica, académica y práctica del proyecto.

El corte térmico por hilo resistivo se ha establecido como una técnica eficiente para transformar materiales termoformables como el poliestireno expandido (EPS), debido a que el calor localizado permite obtener superficies limpias y minimizar deformaciones. Según Kalpakjian y Schmid (2018), los procesos basados en calentamiento controlado son especialmente adecuados para materiales de baja resistencia mecánica, pues eliminan el esfuerzo físico aplicado durante el corte y mejoran la estabilidad dimensional de las piezas.

El control térmico mediante microcontroladores ha optimizado el rendimiento del corte por hilo caliente, permitiendo mantener una temperatura constante durante el proceso. En la investigación de Liu, Wang y Zhao (2020), se demostró que utilizar modulación PWM en plataformas como Arduino mejora significativamente la estabilidad térmica del hilo resistivo, reduciendo defectos como quemaduras o variaciones de corte, lo cual aumenta la precisión al trabajar con EPS.

La integración de software CAM en procesos de manufactura avanzada permite generar trayectorias de herramienta que optimizan precisión, velocidad y estabilidad. De acuerdo con Patel y Singhal (2019), el uso de CAM garantiza rutas de movimiento más uniformes, lo cual es fundamental en procesos térmicos como el corte de EPS, donde variaciones en la velocidad pueden producir quemaduras o irregularidades en los bordes.

Los robots colaborativos se han consolidado como herramientas clave en la manufactura ligera debido a su precisión, facilidad de programación y capacidad para trabajar de forma segura junto a humanos. Siciliano y Khatib (2017) destacan que los cobots, como el UR3, poseen sensores de torque, interfaces abiertas y una excelente repetibilidad, características que los hacen aptos para procesos de corte, manipulación fina y prototipado en materiales ligeros como el EPS.

La incorporación de sistemas embebidos en herramientas montadas sobre robots industriales permite complementar sus funciones y aumentar su precisión. Ma, Torres y Kim (2021) demostraron que la sincronización entre los parámetros térmicos de la herramienta y los movimientos del robot es esencial para garantizar la calidad del proceso, especialmente cuando se requiere controlar temperatura y trayectoria simultáneamente, como en el corte térmico de EPS.

En el ámbito del prototipado arquitectónico y la fabricación digital, el uso de robots colaborativos ha demostrado ser altamente eficiente para el trabajo con espuma y poliestireno. Rossi y Bianchi (2022) evidenciaron que adaptar un sistema de corte térmico a un cobot UR5 permite obtener modelos tridimensionales en EPS con mayor precisión, menor tiempo de fabricación y mayor flexibilidad en comparación con equipos CNC convencionales.

4.2 Conceptos Generales

4.2.1. Robot



Figura 1. Robot conceptual
Fuente: https://www.ceupe.co/blog/robots-el-sueno-humano.html

Un robot es un sistema electromecánico programable capaz de ejecutar movimientos y tareas mediante actuadores, sensores y controladores. En ingeniería, los robots industriales destacan por su precisión, repetibilidad, capacidad para ejecutar trayectorias complejas y operar en entornos automatizados. Su uso abarca manufactura, ensamblaje, inspección y prototipado, constituyéndose como un elemento fundamental en la Industria 4.0. Siciliano, B., & Khatib, O. (2017). *Springer Handbook of Robotics*. Springer.

4.2.2 Robot colaborativo UR3



Figura 2. Robot ur3 para el prpyecto
Fuente: https://www.robotmp.com/universal-robot-ur3-cobo

El UR3 es un robot colaborativo de seis grados de libertad diseñado para tareas de precisión, ensamblaje ligero, manipulación fina y aplicaciones de laboratorio. Su repetibilidad de ±0.1 mm, su diseño compacto y su capacidad para trabajar de forma segura junto a humanos lo convierten en una herramienta versátil para procesos automatizados como el corte térmico o la manufactura asistida por computador. Universal Robots. (2023). UR3e Technical Specifications

4.2.3 Poliestireno Expandido (EPS)



Figura 3. La idea principal del proyecto
Fuente: https://www.products.pcc.eu/es/blog/precio-propiedades-y-aplicaciones-de-la-espuma-de-poliestireno-echemos-un-vistazo-a-todos-los-parametros/

El poliestireno expandido (EPS) es un material termoplástico formado por perlas de poliestireno expandidas con vapor, caracterizado por su baja densidad, ligereza, aislación térmica y facilidad de corte. Su estructura celular cerrada permite moldearlo, tallarlo y cortarlo mediante calor, lo cual lo convierte en un material ideal para prototipado, arquitectura y fabricación ligera. American Chemistry Council. (2022). *Expanded Polystyrene (EPS) Properties and Applications*.

4.2.4 Corte térmico por hilo resistive



Figura 4. Hilo
Fuente: https://www.amazon.es/Bobina-hilo-resistencia-nicrom-1-50mm/dp/B07BMH5DXN?th=1

El corte térmico consiste en hacer pasar corriente eléctrica a través de un hilo resistivo como nicrom o kanthal para generar calor suficiente que funda materiales termoformables como el EPS. Este método permite cortes limpios, sin esfuerzo mecánico y con alta precisión, lo que reduce vibraciones, deformaciones y roturas durante el proceso.Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2018). Manufacturing Processes for Engineering Materials

4.2.5 Manos robóticas y herramientas finales (end-effectors)

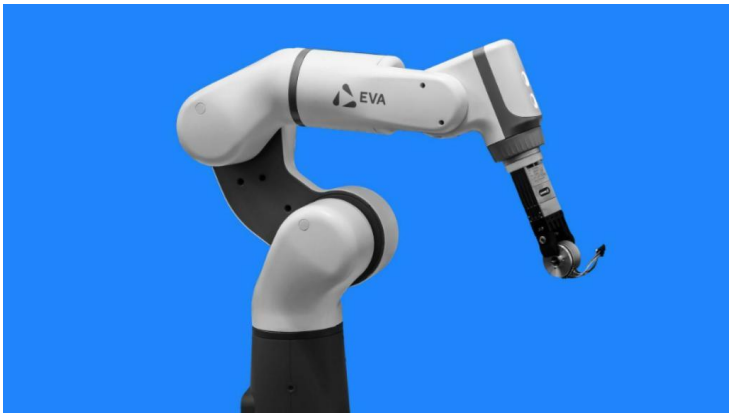


Figura 5. Brazo robótico
Fuente: https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20190622/puede-programar-brazo-robot-minutos/408209801_0.html

El end-effector es el dispositivo instalado en la punta del brazo robótico encargado de ejecutar la tarea principal, como agarrar, soldar, cortar o manipular objetos. Puede ser una mano robótica, una pinza, una herramienta térmica o cualquier módulo especializado. En este proyecto, el end-effector corresponde a una herramienta de corte térmico diseñada para operar con precisión y control de temperatura en el UR3.Craig, J. (2005). Introduction to Robotics: Mechanics and Control.

4.2.6 Microcontrolador (Arduino)

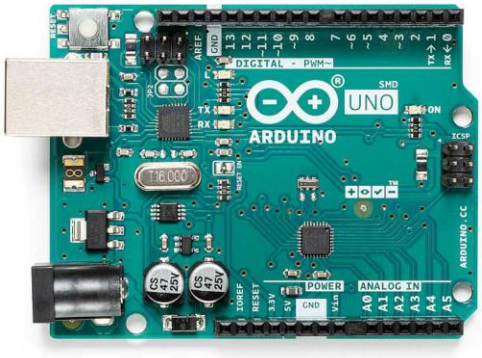


Figura 6. Brazo robótico
Fuente: https://www.arduino.cc/en/hardware/

Arduino es una plataforma electrónica de hardware libre basada en microcontroladores, utilizada para controlar sensores, actuadores y dispositivos externos mediante programación. En sistemas de corte térmico, permite regular la temperatura del hilo resistivo mediante modulación PWM y gestionar la electrónica necesaria para un funcionamiento estable y seguro. Banzi, M., & Shiloh, M. (2014). *Getting Started with Arduino*. Maker Media.

4.2.7 Programación aplicada a robótica y control térmico

La programación en robótica permite definir trayectorias, parámetros de movimiento, velocidades y secuencias de trabajo, mientras que en sistemas embebidos permite controlar señales, medir variables y regular parámetros como temperatura o voltaje. La combinación de programación robótica y embebida es clave para lograr sincronía entre el movimiento del UR3 y el control térmico del hilo resistivo. Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., & Oriolo, G. (2009). *Robotics: Modelling, Planning and Control*. Springer.

4.2.8 Software CAD/CAM

Los sistemas CAD (Computer-Aided Design) permiten crear modelos 2D y 3D, mientras que los sistemas CAM (Computer-Aided Manufacturing) generan trayectorias de herramienta basadas en dichos modelos para ser ejecutadas por robots o máquinas CNC. En el corte térmico de EPS, el CAM garantiza movimientos uniformes y precisos, evitando quemaduras, deformaciones o variaciones en el corte. Patel, R., & Singhal, S. (2019). CAM-based toolpath optimization for advanced manufacturing. *International Journal of CAD/CAM*, 19(2), 45–59.

5. Metodología

5.1 Tipo de proyecto El presente proyecto fue de tipo aplicado y experimental, dado que se orientó al desarrollo de una solución tecnológica real destinada a resolver una necesidad concreta en el proceso de corte del poliestireno expandido (EPS). Su carácter aplicado radicó en que integró conocimientos de robótica colaborativa, electrónica, manufactura digital y sistemas embebidos para diseñar y construir una herramienta funcional de corte térmico utilizada en entornos académicos y productivos.

A su vez, fue experimental debido a que requirió la manipulación controlada de variables como la temperatura del hilo resistivo, la velocidad y trayectoria del robot UR3, y la calidad del corte obtenido. A través de pruebas iterativas, calibraciones y análisis de resultados, se evaluó el desempeño del sistema, lo que permitió establecer parámetros óptimos de operación y validar la efectividad de la herramienta desarrollada.

Esta combinación metodológica permitió no solo aplicar conocimientos teóricos en un contexto práctico, sino también generar evidencia empírica sobre el comportamiento del sistema, aportando información relevante para futuras investigaciones y mejoras en procesos automatizados de manufactura ligera.

5.2 Método La metodología del proyecto se fundamentó en un enfoque experimental y en el uso combinado de los métodos inductivo, deductivo, observación directa, síntesis y experimentación práctica, orientados al cumplimiento de los objetivos planteados.

En primer lugar, se aplicó el método inductivo para recopilar y comprender la información necesaria sobre el funcionamiento del hilo resistivo y las características del poliestireno expandido. Esta etapa permitió obtener el conocimiento inicial requerido para diseñar la herramienta de corte térmico, estableciendo qué materiales utilizar, qué tipo de hilo emplear y qué voltajes eran adecuados para el proceso. De esta forma, se construyó la base

conceptual necesaria para iniciar el diseño.

Luego, se utilizó el método deductivo para adaptar el diseño previo del sistema térmico al robot colaborativo UR3. A partir de las especificaciones del robot como su alcance, capacidad de carga y orientación del efector final se determinaron las condiciones que debía cumplir la herramienta para funcionar correctamente. En esta fase se establecieron decisiones sobre montaje, fijación, conexión de cables y compatibilidad entre la herramienta y el robot, garantizando que el sistema pudiera ejecutar las trayectorias programadas desde el ordenador.

La observación directa también formó parte central del método, especialmente en las primeras pruebas de funcionamiento del hilo resistivo y en la revisión del comportamiento del poliestireno expandido frente a distintas temperaturas. Estas observaciones permitieron detectar si el material se derretía demasiado, si el hilo perdía tensión o si se requería ajustar la alimentación eléctrica. La observación acompañó todo el desarrollo del prototipo para identificar mejoras inmediatas o posibles fallos.

Posteriormente, se aplicó el método sintético, mediante el cual se integraron los diferentes componentes del sistema: la herramienta mecánica, el hilo resistivo, el módulo de control con Arduino (incluyendo el relé de estado sólido), el circuito de alimentación y el sistema de trayectorias generado en el software CAM. En esta etapa el objetivo fue unir todas las partes para obtener un sistema coherente y funcional capaz de realizar cortes automatizados.

Finalmente, se empleó el método experimental, que consistió en realizar pruebas controladas de corte sobre poliestireno expandido con el prototipo ensamblado. Estas pruebas permitieron comprobar si la herramienta alcanzaba la temperatura necesaria, si la trayectoria ejecutada por el robot coincidía con lo programado y si los cortes obtenidos correspondían a los diseños enviados desde el CAM. Los resultados de estas pruebas permitieron verificar el

cumplimiento de los objetivos del proyecto. En conjunto, estos métodos permitieron desarrollar el sistema de forma progresiva y concreta, pasando del estudio inicial del fenómeno al montaje del prototipo y, finalmente, a su validación mediante pruebas reales.

5.3 Instrumentos de recolección de información La recolección de información para el desarrollo del proyecto se realizó mediante el uso de fuentes primarias y secundarias, las cuales permitieron obtener información técnica confiable, actualizada y pertinente para el diseño, construcción e integración del sistema de corte térmico automatizado. Los instrumentos utilizados correspondieron a documentos técnicos, artículos científicos, manuales de referencia, libros académicos y material especializado en robótica, control de temperatura, corte térmico y manufactura digital.

5.3.1 Fuentes primarias Las fuentes primarias empleadas correspondieron a documentos originales que presentaron información técnica validada, estudios experimentales, principios teóricos fundamentales y manuales oficiales de los equipos implicados en el proyecto. Estas fuentes permitieron comprender de manera directa los fundamentos del corte térmico por hilo resistivo, las propiedades del poliestireno expandido, las características de los microcontroladores utilizados y las especificaciones del robot colaborativo UR3. Entre las principales fuentes primarias utilizadas se encontraron:

Libros especializados en procesos de manufactura, donde se explican los fundamentos del efecto Joule, comportamiento de materiales termoplásticos y técnicas de corte térmico. *Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2018). Manufacturing Processes for Engineering Materials. Pearson.*

Artículos científicos indexados, con estudios experimentales sobre control térmico mediante hilos resistivos y microcontroladores como Arduino. *Liu, Q., Wang, T., & Zhao, H. (2020). Temperature control of resistive heating wire using microcontroller-based PWM regulation. Journal of Manufacturing Systems, 56, 112–121.*

Manuales técnicos del robot UR3, donde se especifica su funcionamiento, carga útil, cinemática, interfases de control y recomendaciones para la integración de herramientas. *Universal Robots. (2023). UR3e User Manual.*

Normas técnicas, como las normas ISO de seguridad en robots industriales y colaborativos. *ISO 10218-1:2011. Robots and robotic devices — Safety requirements.*

5.3.2 Fuentes secundarias Las fuentes secundarias utilizadas correspondieron a documentos que interpretan, resumen o analizan información proveniente de fuentes primarias. Estas ayudaron a contextualizar el uso del corte térmico, los sistemas de manufactura digital, la robótica colaborativa y la integración de herramientas personalizadas en procesos automatizados. Entre las principales fuentes secundarias empleadas se encontraron:

Enciclopedias y repositorios técnicos, que explican de forma sintetizada conceptos de fabricación digital, robótica y control de temperatura. *Encyclopedia of Robotics (Springer, 2020).*

Artículos de revisión, los cuales analizan tendencias en manufactura asistida por computador y automatización. *Patel, R., & Singhal, S. (2019). CAM-based toolpath optimization for advanced manufacturing. International Journal of CAD/CAM, 19(2), 45–59.*

Documentos institucionales, como guías de universidades, informes académicos o proyectos de investigación relacionados con prototipado y robotización. *MIT Center for Bits and Atoms (2019). Digital Fabrication Laboratory – Technical Reports.*

Libros que interpretan teorías y avances en robótica colaborativa, sin ser la fuente original de los descubrimientos. *Siciliano, B., & Khatib, O. (Eds.). (2017). Springer Handbook of Robotics. Springer.*

Estas fuentes permitieron complementar la comprensión del problema, validar enfoques metodológicos y respaldar la pertinencia del sistema propuesto.

Tabla 1.

Tabla X. Matriz de variables y especificaciones técnicas de operación del sistema

Tipo de Variable	**Parámetro Técnico**	**Rango / Valor Real Estimado**	**Instrumento / Método de Medición**	**Unidad de Medida**
Independiente	Ciclo de trabajo de la señal de control (Activación del SSR)	40% - 90%	Monitor serial de Arduino / Programación	Porcentaje (%)
Independiente	Velocidad de avance lineal del robot UR3	5.0 - 20.0	Interfaz PolyScope (Teach Pendant UR3)	mm/s
Dependiente	Precisión dimensional de la pieza final	± 0.3 - ± 0.5	Calibrador pie de rey digital	Milímetros (mm)
Dependiente	Tolerancia de la sangría de corte (Kerf)	0.7 - 1.0	Medición experimental con calibrador	Milímetros (mm)
Constante	Diámetro del hilo de ferroníquel	0.5	Micrómetro / Medición inicial fija	Milímetros (mm)
Constante	Densidad del Poliestireno Expandido (EPS)	15 - 20	Ficha técnica del material / Proveedor	kg/m^3

6. Resultados

6.1. Implementación del Sistema de Control Electrónico y Potencia

En esta fase del proyecto, se consolidó el módulo de control encargado de gestionar la energía térmica del hilo de ferroníquel. El diseño se centró en la seguridad del operario, la estabilidad de la corriente y la precisión en la conmutación de la carga.

6.1.1. Arquitectura de Hardware y Componentes

El sistema electrónico se estructuró sobre una base dieléctrica de acrílico que aloja los siguientes componentes clave:

Unidad de Procesamiento (Arduino Uno): Actúa como el cerebro del sistema. Su función principal es generar señales digitales de control (mediante modulación por ancho de pulso o ciclos de trabajo) para determinar el tiempo de activación de la etapa de potencia.
Etapa de Conmutación (Relé de Estado Sólido - SSR): Se seleccionó un SSR para manejar la carga de corriente alterna (AC). A diferencia de un relé mecánico, este permite una conmutación de alta velocidad sin desgaste físico, eliminando el ruido eléctrico y garantizando una respuesta inmediata a las órdenes del Arduino.

Etapa de Transformación: Se integró un transformador reductor para adecuar el voltaje de la red comercial (110V AC) a niveles de operación seguros para el hilo resistivo. Esto permite manejar altas corrientes a voltajes bajos, lo cual es ideal para el calentamiento por efecto Joule.

Interfaz de Conexión y Seguridad: Se implementaron terminales tipo banana (rojo y negro) para facilitar una conexión segura y de baja resistencia hacia el efector final. El montaje sobre la placa de acrílico asegura que no existan contactos accidentales con partes energizadas.

6.1.2. Funcionamiento del Algoritmo de Control

El microcontrolador Arduino ejecuta un código diseñado para regular la temperatura del hilo. Mediante la programación, el usuario puede ajustar el porcentaje de potencia entregada; el Arduino traduce este valor en pulsos que activan el SSR. Cuando el SSR se cierra, permite el flujo de corriente desde el transformador hacia el hilo de ferroníquel, elevando su temperatura de forma controlada para realizar cortes limpios en el poliestireno expandido (EPS).
Tabla de Especificaciones Técnicas del Sistema Electrónico

Tabla 2.

Y Especificaciones técnicas de los componentes del sistema electrónico de control.

Componente	Especificación	Función técnica
Microcontrolador	Arduino Uno R3	Control lógico y generación de señales de conmutación.
Relé de Estado Sólido	SSR (AC Control)	Conmutación de potencia aislada ópticamente.
Transformador	Reductor AC-AC	Adecuación de impedancia y voltaje para el hilo.
Aislamiento	Base de Acrílico	Soporte dieléctrico y prevención de cortocircuitos.
Conectores	Banana 4mm	Puntos de prueba y salida de potencia hacia el robot.

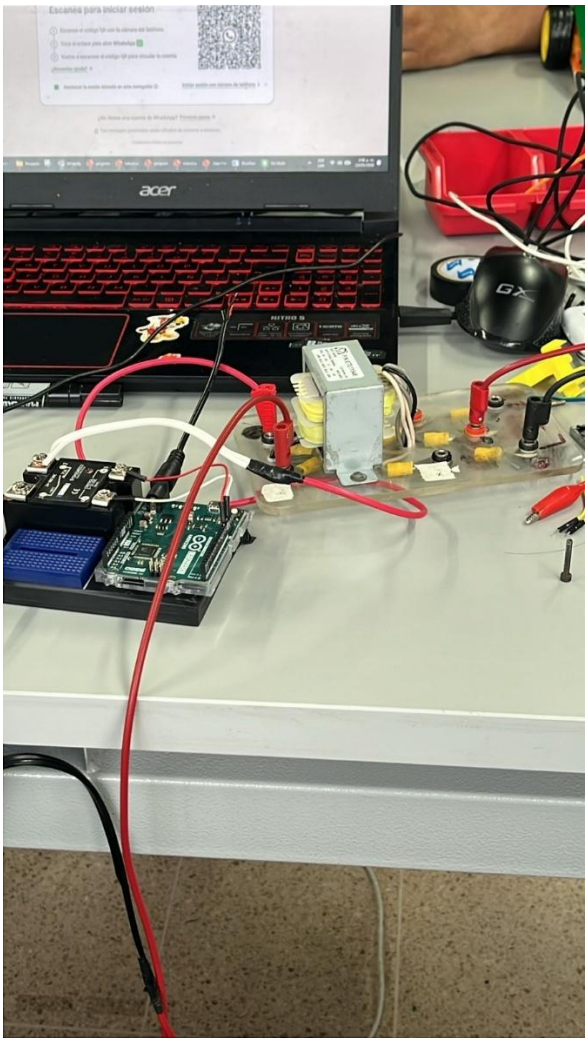


Figura 7. Configuración final del módulo de control de potencia y etapa de transformación.
Fuente: elaboración propia

6.2. Ingeniería y Construcción del Cabezal de Corte Térmico

La construcción de la herramienta de corte se diseñó bajo criterios de precisión mecánica y seguridad eléctrica. Este conjunto constituye la interfaz física entre el brazo robótico colaborativo UR3 y el material de trabajo (Poliestireno Expandido - EPS).

6.2.1. Estructura de Soporte e Interfaz Robótica

El sistema se fundamenta en una base metálica de alta rigidez que se acopla directamente a la brida de la muñeca del robot UR3. Esta base actúa como el chasis estructural del conjunto. En los extremos de dicha base se integraron dos piezas diseñadas a medida y fabricadas mediante manufactura aditiva (impresión 3D). Estas piezas cumplen una función crítica como aislantes dieléctricos, impidiendo que el potencial eléctrico del sistema de corte se derive hacia la estructura del robot, protegiendo así sus sensores y actuadores internos.

6.2.2. Sistema de Sujeción, Tensión y Contacto Eléctrico

El elemento activo de corte es un hilo de ferroníquel de 0.5 mm, seleccionado por su alta resistividad y estabilidad mecánica a altas temperaturas. La integración del hilo se realiza mediante un sistema de borneras de conexión industrial situadas en las puntas de los soportes 3D.

Un aspecto fundamental del diseño es el mecanismo de tensión mecánica. El hilo no solo se encuentra sujeto, sino que es tensionado mediante un sistema de tornillos de presión integrados en las borneras. Estos tornillos cumplen una doble función:

1. **Aseguramiento Eléctrico:** Garantizan una presión de contacto óptima entre el conductor (cable dúplex) y el elemento calefactor (ferroníquel), minimizando la resistencia de contacto.

2. **Tensión Estructural (Templado):** Permiten ajustar la tensión del hilo para mantenerlo perfectamente rectilíneo. Esta tensión es vital para evitar deformaciones térmicas durante el corte, asegurando que la geometría final de la pieza coincida con el diseño CAD programado.

6.2.3. Conducción Eléctrica y Disipación Térmica

La transferencia de energía desde la etapa de potencia hasta el cabezal se realiza a través de un cable dúplex calibre 18 AWG, el cual recorre longitudinalmente la estructura de la herramienta. La elección de este calibre responde a la necesidad de conducir una corriente significativa con una caída de tensión despreciable.

El sistema opera bajo una diferencia de potencial de 10 Voltios (AC). Al circular esta corriente por el hilo de ferroníquel, se produce una disipación de energía por Efecto Joule, elevando la temperatura del conductor por encima del punto de fusión del EPS. Esta configuración permite una transición de fase rápida del material al contacto con el hilo, eliminando la resistencia mecánica y permitiendo que el robot ejecute trayectorias fluidas con una precisión milimétrica.

Tabla 3.

Z Especificaciones Técnicas de la Construcción Mecánica

Parámetro / Componente	Especificación Técnica	Función en el Sistema
Soporte Estructural	Perfilería de aleación metálica	Rigidez y acople mecánico al robot UR3.
Soportes de Extremo	Polímero Termoplástico (Aislante)	Aislamiento galvánico y soporte de carga térmica.
Elemento Calefactor	Hilo de Ferroníquel (0.5 mm)	Resistencia activa para corte térmico.
Sistema de Tensión	Tornillos de presión en borneras	Templado del hilo y ajuste de contacto eléctrico.
Conductor de Potencia	Cable Dúplex 18 AWG	Conducción eléctrica de baja pérdida.
Tensión de Trabajo	10 V (AC)	Potencial eléctrico para activación térmica.



Figura 8. Estructura completa del proyecto ya finalizado
Fuente: elaboración propia

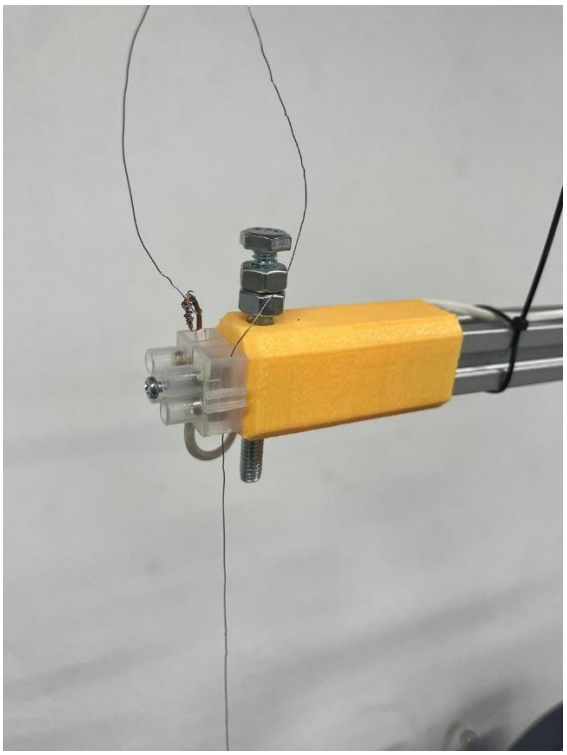


Figura 9. Cabezal de corte con soportes 3D, borneras y sistema de tensión del hilo.
Fuente: elaboración propia

6.3. Programación y Control de Trayectorias del Robot UR3

La fase final del proyecto consistió en programar los movimientos del brazo robótico para garantizar que la herramienta térmica realizara los cortes con la máxima precisión sobre el bloque de poliestireno (EPS).

6.3.1. Entorno de Programación PolyScope

Todo el proceso de control espacial y diseño de trayectorias se realizó utilizando **PolyScope**, el entorno de programación gráfica nativo de Universal Robots. Este software se ejecuta directamente desde la consola de mando del robot (*Teach Pendant*), lo que permitió programar la máquina a pie de obra sin necesidad de usar un computador externo.

6.3.2. Configuración de Coordenadas y Puntos de Paso (Waypoints)

Para indicarle al robot el recorrido exacto que debía hacer, se utilizó el método de enseñanza por puntos espaciales. El proceso consistió en los siguientes pasos:

Asignación de Coordenadas: Se movió el brazo robótico manualmente y mediante la pantalla hasta los puntos clave de inicio, avance y finalización del corte, guardando las coordenadas tridimensionales de cada posición (*Waypoints*).

Tipos de Movimiento: En el árbol de programación se configuraron las instrucciones de movimiento. Para acercarse al material de forma rápida y segura se utilizaron movimientos articulares (**MoveJ**). Sin embargo, para el momento exacto en el que el hilo caliente entra en contacto con el icopor, se programaron movimientos lineales (**MoveL**).

Control de Velocidad: El uso del comando *MoveL* fue fundamental, ya que obliga a la herramienta a moverse en una línea perfectamente recta y a una velocidad constante. Esto es vital en el corte térmico, pues si el robot se detiene o cambia de velocidad, el calor del hilo derretiría el material de forma irregular.

6.3.3. Ejecución del Corte

Una vez guardadas las coordenadas y configuradas las velocidades, el programa PolyScope ordena al robot ejecutar el recorrido de forma secuencial. El brazo se posiciona, espera a que el hilo de ferroníquel alcance la temperatura ideal, y luego realiza el recorrido programado, logrando un corte preciso, limpio y que se puede repetir de forma idéntica todas las veces que sea necesario.

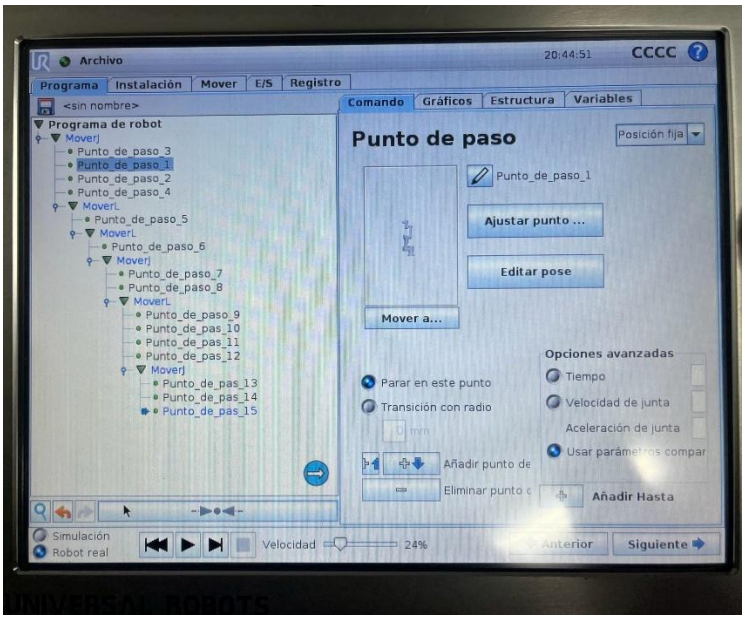


Figura 10. nterfaz de programación PolyScope en el Teach Pendant del robot UR3, mostrando el árbol de instrucciones
Fuente: elaboración propia

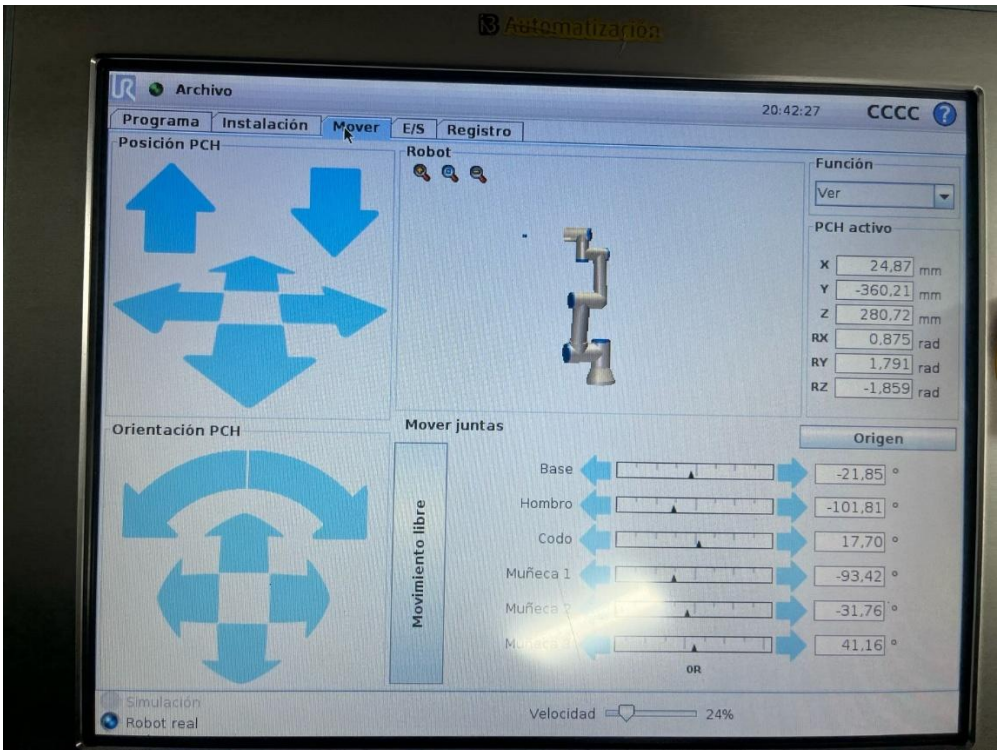


Figura 11. Configuración de coordenadas espaciales y puntos de trayectoria (Waypoints) para el proceso de corte.
Fuente: elaboración propia

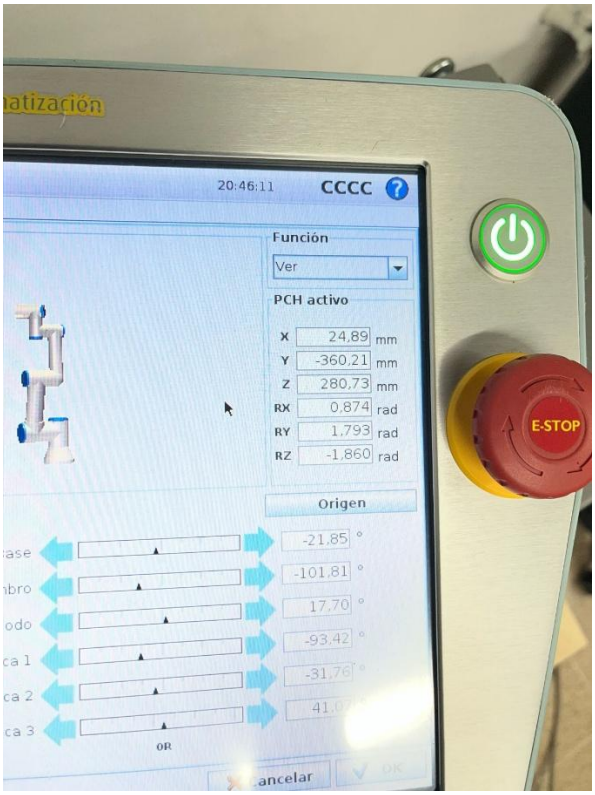


Figura 12. Configuración de coordenadas espaciales y puntos de trayectoria (Waypoints) para el proceso de corte.
Fuente: elaboración propia

6.4. Validación Experimental del Proceso de Corte en EPS

Una vez integrados y programados los sistemas mecánicos, electrónicos y de software, se procedió a realizar las pruebas de funcionamiento en tiempo real. Este apartado presenta la evidencia empírica de la operación del sistema completo y el análisis de la calidad de los cortes obtenidos sobre poliestireno expandido (EPS).

6.4.1. Operación del Brazo Robótico en Trayectoria de Corte

Las figuras que se presentan a continuación ilustran la ejecución del programa de corte mediante el robot UR3. En las imágenes se observa cómo el brazo robótico, siguiendo las coordenadas y el tipo de movimiento lineal (**MoveL**) programados en **PolyScope**, desplaza la herramienta térmica de manera fluida y precisa a través del bloque de icopor.



Figura 13. Posición inicial del robot antes de empezar el corte
Fuente: elaboración propia



Figura 14. Antes de empezar el corte
Fuente: elaboración propia



Figura 15. Robot durante el corte
Fuente: elaboración propia



Figura 16. Robot realizando el primer corte
Fuente: elaboración propia



Figura 17. Robot finalizando segundo corte
Fuente: elaboración propia

7. Conclusiones

A partir del desarrollo e implementación del sistema robótico de corte térmico para poliestireno expandido (EPS) utilizando el brazo colaborativo UR3, se establecen las siguientes conclusiones, derivadas del cumplimiento de los objetivos planteados y el análisis de los resultados obtenidos:

Cumplimiento del objetivo general y viabilidad del sistema: Se logró construir e integrar con éxito una herramienta automatizada de corte térmico, demostrando que la sinergia entre la robótica colaborativa (cobots) y los sistemas de control térmico de bajo costo (Arduino y SSR) es altamente viable. El sistema superó las limitaciones de los métodos de corte manual, garantizando cortes repetibles, uniformes y con un alto grado de precisión dimensional.

Desarrollo y eficiencia del diseño mecánico: El diseño híbrido del cabezal de corte demostró ser estructuralmente robusto y eléctricamente seguro. La implementación de soportes fabricados por impresión 3D cumplió a cabalidad su función de aislamiento galvánico, protegiendo los componentes internos del robot UR3. Asimismo, el sistema de tensión mediante borneras fue clave para compensar la dilatación térmica del hilo de ferroníquel de 0.5 mm, manteniendo su linealidad y garantizando un corte recto sin deformaciones.

Estabilidad del módulo electrónico de potencia: La integración del microcontrolador Arduino Uno junto con el Relé de Estado Sólido (SSR) y el transformador reductor de 10V AC, resultó ser la arquitectura ideal para el control de la temperatura. El SSR permitió una conmutación de alta frecuencia rápida y segura, aislando la etapa de control lógico de la etapa de potencia. Esto garantizó que el hilo de ferroníquel alcanzara la temperatura óptima por efecto Joule casi de manera instantánea y estable.

Impacto de la programación en la calidad superficial (Resultados): Se comprobó

empíricamente que la calidad del corte en el EPS depende directamente de la sincronización entre la temperatura del hilo y la velocidad de avance. La programación de trayectorias lineales (comandos *MoveL*) a través de la interfaz PolyScope del UR3 permitió mantener una velocidad constante (ej. 10 mm/s), lo que evitó la sobreexposición térmica del material y generó piezas con acabados superficiales lisos y libres de irregularidades.

Aportes y proyección a nivel local e industrial: A nivel institucional y local, este proyecto aporta una solución tecnológica escalable para el prototipado rápido y la fabricación de piezas en materiales espumados, optimizando los tiempos de producción y reduciendo el desperdicio de material. A nivel más amplio, el trabajo sirve como referente sobre cómo adaptar herramientas de fabricación personalizadas a robots colaborativos comerciales, abriendo la puerta a futuras investigaciones en la industria del embalaje, la construcción y el diseño industrial.

8. Recomendaciones

A partir del desarrollo e implementación del sistema robótico de corte térmico para poliestireno expandido (EPS) utilizando el brazo colaborativo UR3, se establecen las siguientes conclusiones, derivadas del cumplimiento de los objetivos planteados y el análisis de los resultados obtenidos:

Cumplimiento del objetivo general y viabilidad del sistema: Se logró construir e integrar con éxito una herramienta automatizada de corte térmico, demostrando que la sinergia entre la robótica colaborativa (cobots) y los sistemas de control térmico de bajo costo (Arduino y SSR) es altamente viable. El sistema superó las limitaciones de los métodos de corte manual, garantizando cortes repetibles, uniformes y con un alto grado de precisión dimensional.

Desarrollo y eficiencia del diseño mecánico: El diseño híbrido del cabezal de corte demostró ser estructuralmente robusto y eléctricamente seguro. La implementación de soportes fabricados por impresión 3D cumplió a cabalidad su función de aislamiento galvánico, protegiendo los componentes internos del robot UR3. Asimismo, el sistema de tensión mediante borneras fue clave para compensar la dilatación térmica del hilo de ferroníquel de 0.5 mm, manteniendo su linealidad y garantizando un corte recto sin deformaciones.

Estabilidad del módulo electrónico de potencia: La integración del microcontrolador Arduino Uno junto con el Relé de Estado Sólido (SSR) y el transformador reductor de 10V AC, resultó ser la arquitectura ideal para el control de la temperatura. El SSR permitió una conmutación de alta frecuencia rápida y segura, aislando la etapa de control lógico de la etapa de potencia. Esto garantizó que el hilo de ferroníquel alcanzara la temperatura óptima por efecto Joule casi de manera instantánea y estable.

Impacto de la programación en la calidad superficial (Resultados): Se comprobó

empíricamente que la calidad del corte en el EPS depende directamente de la sincronización entre la temperatura del hilo y la velocidad de avance. La programación de trayectorias lineales (comandos *MoveL*) a través de la interfaz PolyScope del UR3 permitió mantener una velocidad constante (ej. 10 mm/s), lo que evitó la sobreexposición térmica del material y generó piezas con acabados superficiales lisos y libres de irregularidades.

Aportes y proyección a nivel local e industrial: A nivel institucional y local, este proyecto aporta una solución tecnológica escalable para el prototipado rápido y la fabricación de piezas en materiales espumados, optimizando los tiempos de producción y reduciendo el desperdicio de material. A nivel más amplio, el trabajo sirve como referente sobre cómo adaptar herramientas de fabricación personalizadas a robots colaborativos comerciales, abriendo la puerta a futuras investigaciones en la industria del embalaje, la construcción y el diseño industrial.

Diseño e implementación de un sistema de cerramiento y aislamiento de seguridad: Con el fin de mitigar los riesgos asociados a la operación del sistema de corte por hilo en entornos compartidos, se recomienda proyectar una estructura de confinamiento físico (celda de seguridad) perimetral para el robot. Este cerramiento, construido preferiblemente con perfiles de aluminio y paneles de policarbonato transparente, debe contar con sensores de apertura interconectados al circuito de parada de emergencia (Safety) del robot UR3. Esta medida es indispensable para aislar completamente el área de trabajo, eliminando cualquier peligro de corte mecánico por el movimiento del brazo, quemaduras por el contacto con el hilo de ferroníquel caliente o riesgos de electrocución para los operarios o personas que transiten cerca del sistema en ejecución.

9. Referencias bibliográficas

Arduino. (2024). Arduino – Official website.

https://www.arduino.cc

ISO. (2011). ISO 10218-1:2011 Robots and robotic devices — Safety requirements for industrial robots — Part 1: Robots.

International Organization for Standardization.

https://www.iso.org/standard/51330.html

Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2014). Manufacturing Engineering and Technology (7th ed.).

Prentice Hall. *(PDF recuperado de biblioteca universitaria)*

https://lib.zu.edu.pk/ebookdata/Engineering/Energy%20System/Manufacturing%20Engineering%20and%20Technology%20by%20Serope%20Kalpakjian,%20Steven%20R.%20Schmid%20.pdf

---

Knauf Industries. (2023). Poliestireno expandido: qué es y cómo se fabrica.

https://knauf-industries.es/poliestireno-expandido-que-es-y-como-se-hace

---

Korea University. (2020). 3D cutting machine of EPS foam for manufacturing free-

formed concrete molds.

https://pure.korea.ac.kr/en/publications/3d-cutting-machine-of-eps-foam-for-manufacturing-free-formed-conc/?utm_source

---

Liu, Q., Wang, T., & Zhao, H. (2020). Temperature control of resistive heating wire using microcontroller-based PWM regulation.

Journal of Manufacturing Systems.

https://www.sciencedirect.com/journal/journal-of-manufacturing-systems

---

MRCE. (2017). Robotics – Springer Handbook of Robotics (2nd ed.).

Springer. *(PDF educativo)*

https://mrce.in/ebooks/Robotics-Springer%20Handbook%20of%20Robotics%202nd%20Ed.pdf

---

Nuts & Volts Magazine. (2016). Arduino PID temperature control.

https://www.nutsvolts.com/magazine/article/arduino-pid-temperature-control

---

Patel, R., & Singhal, S. (2019). Optimization and efficiency of toolpath generation in CAD/CAM system.

ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/337675859_Optimization_and_efficiency_of_toolpath_generation_in_CADCAM_system

---

ResearchGate. (2024). Experimental design of temperature adjustment based on

PWM of STC15 microcontroller.

https://www.researchgate.net/publication/381419826_Experimental_Design_of_Temperature_Adjustment_Based_on_PWM_of_STC15_Microcontroller

---

ResearchGate. (2023). Industrial applications of collaborative robots.

https://www.researchgate.net/publication/388046588_Industrial_applications_of_collaborative_robots

---

Springer. (2017). Springer Handbook of Robotics (2nd ed.).

B. Siciliano & O. Khatib (Eds.).

https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-32552-1

Springer. (2020). Encyclopedia of Robotics.

https://link.springer.com/referencework/10.1007/978-3-642-41610-1

SSRN. (2024). Collaborative robotics: Trends, applications, and future impact.

https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4806644

Universal Robots. (2023). UR3e – Robot colaborativo.

https://www.universal-robots.com/es/productos/ur3e

Universal Robots. (2023). Descargas y manuales técnicos.

https://www.universal-robots.com/download/?query=

WorldCat. (2018). Manufacturing Processes for Engineering Materials – bibliographic record.

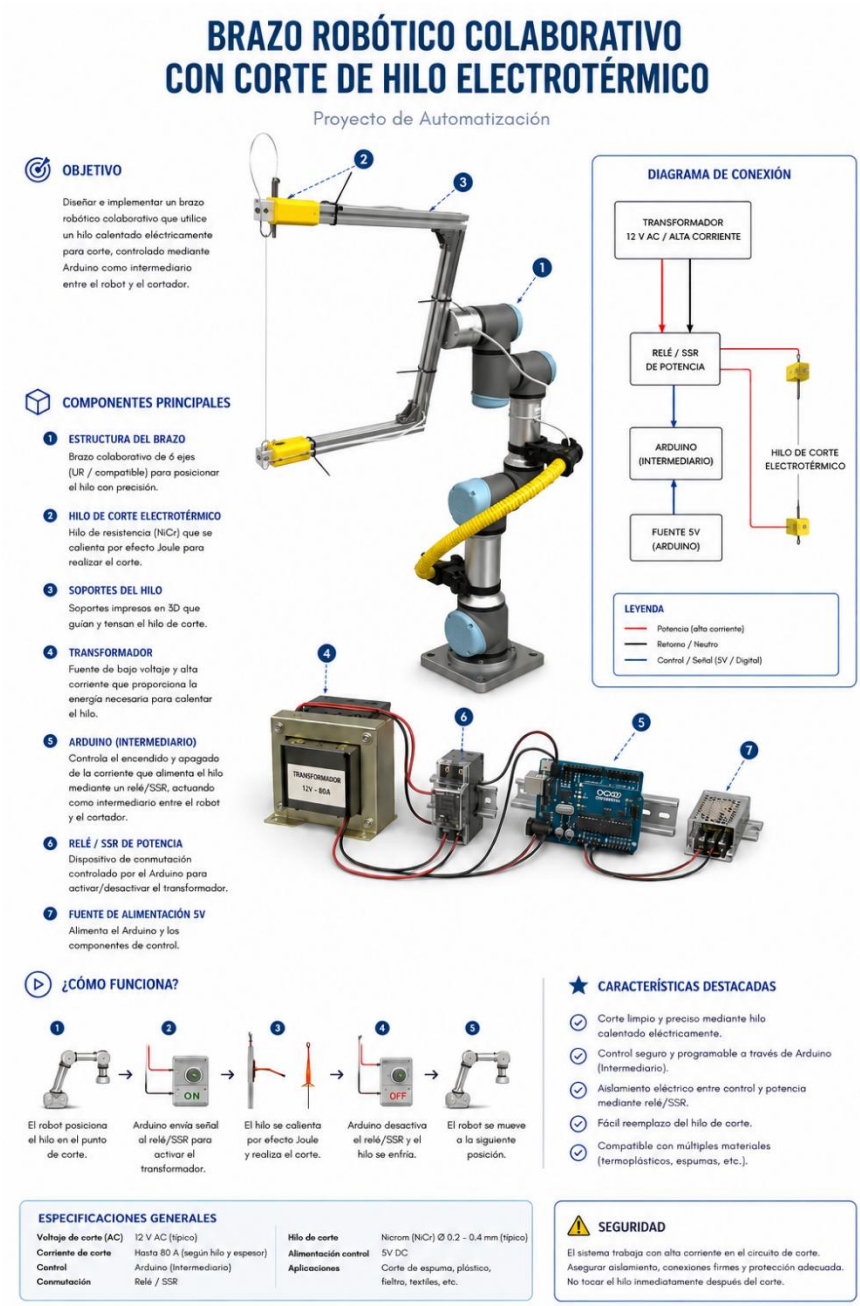
https://search.worldcat.org/title/1021886862

CURSO DE UNIVERSAL ROBOTS POLYSCOPE Clase #2 Configuración de TCP

https://www.youtube.com/watch?v=2whurzZtfRA

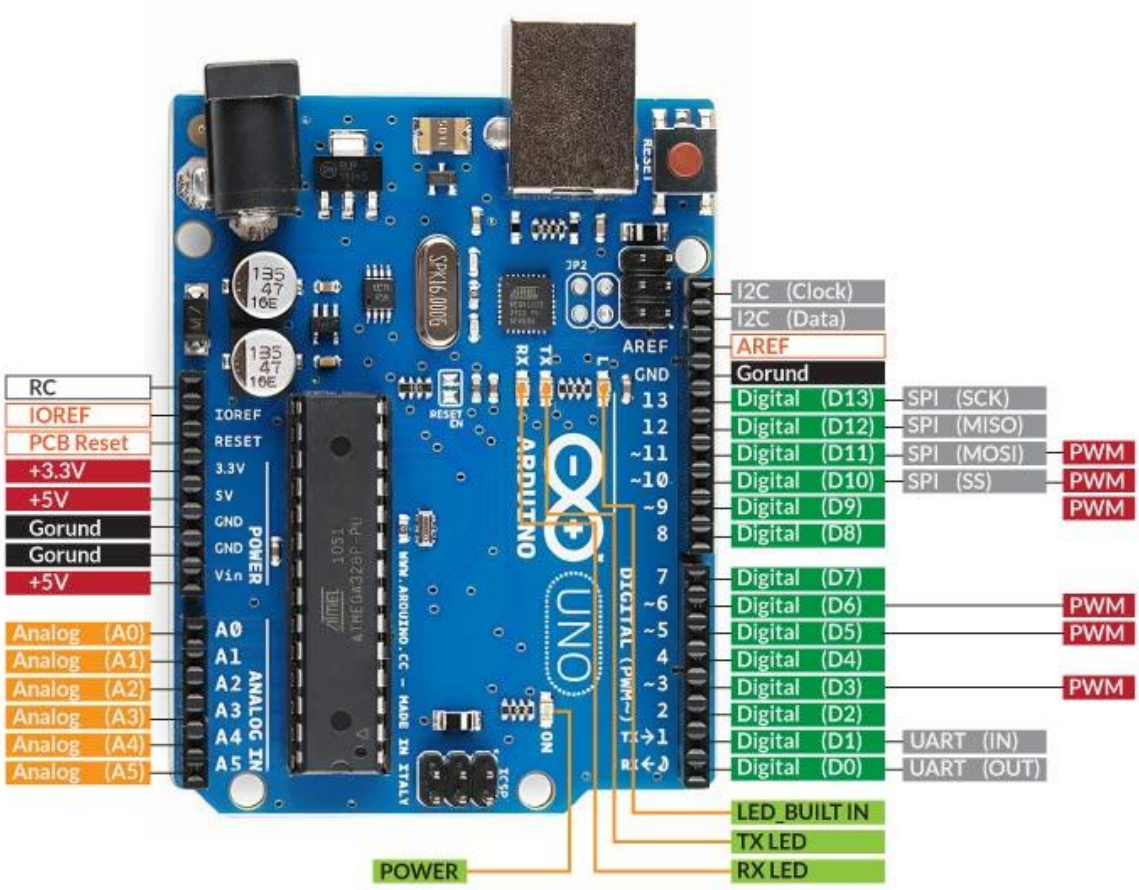
10. Anexos

Anexo Imagen de todo el sistema de proyecto trabajado

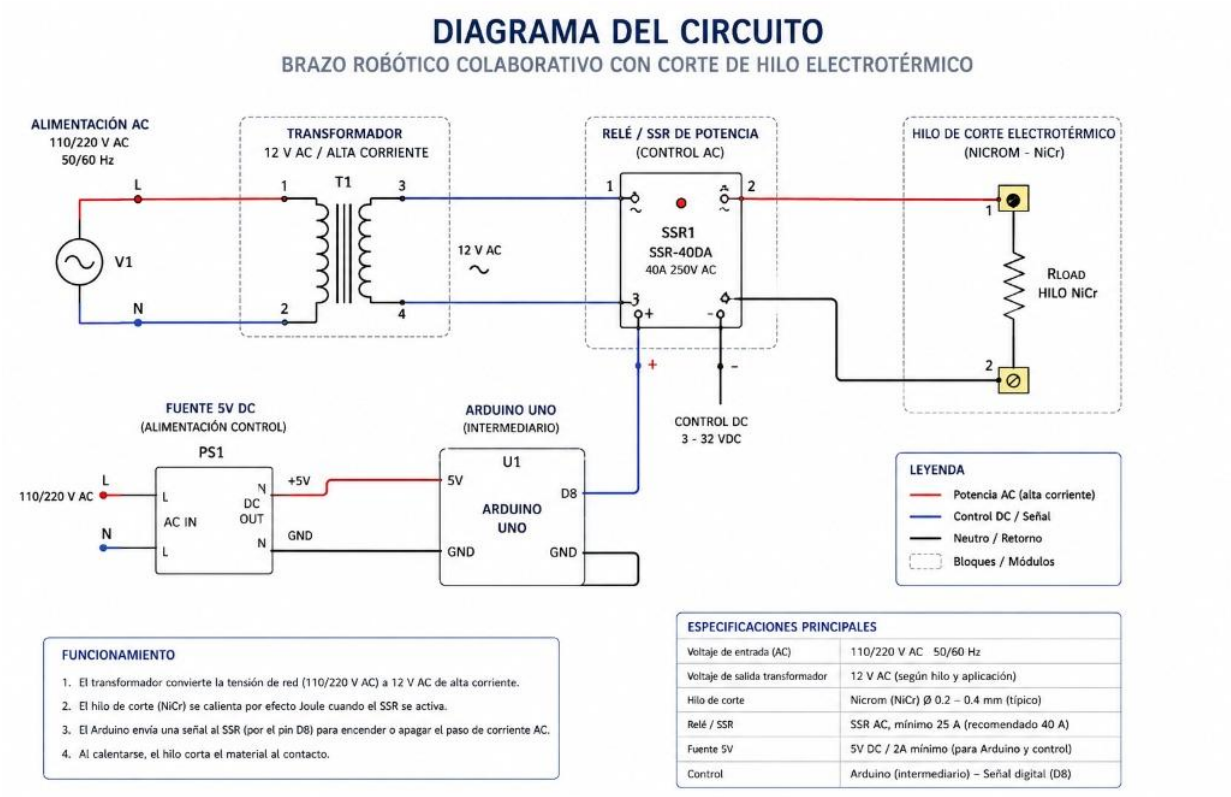


Anexo A Link de descarga Arduino

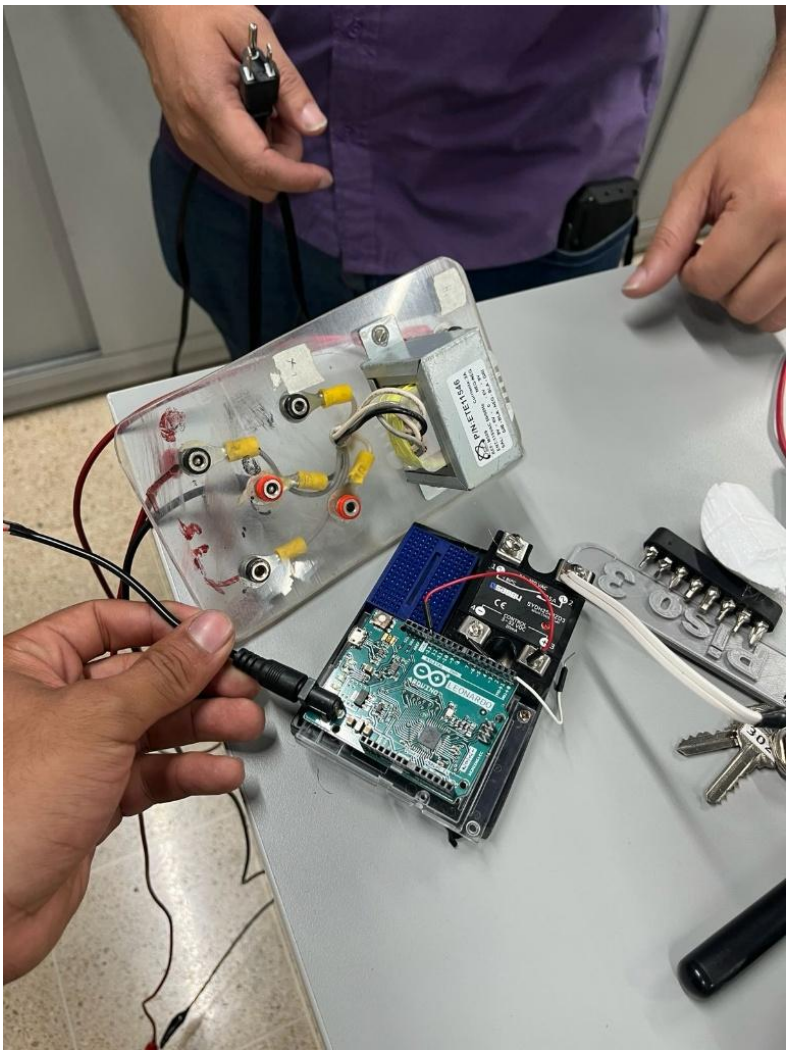
Fuente: https://www.arduino.cc/en/software/



Anexo circuito Electrónico



Anexo . Estación de trabajo y entorno operativo del sistema robótico



Anexo diagrama del circuito

