



UNIVERSIDAD
esan

Clasificador inteligente de minerales mediante visión artificial

Integrantes:

Pedro Manrique Perales

Santiago Tenorio Rojas

Shirley Alfaro Cainicela

Universidad: ESAN

Curso: Robótica

2025

Índice general

1. Antecedentes del diseño	4
1.1. Problemática	4
1.2. Propuesta de solución	5
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.2. Objetivos específicos	6
1.4. Metodología de trabajo	6
2. Estado del arte	7
2.1. Sistemas comerciales similares	7
2.2. Patentes relacionadas	8
2.3. Proyectos o investigaciones previas	9
3. Diseño conceptual	10
3.1. Lista de exigencias	10
3.1.1. Exigencias funcionales	10
3.1.2. Exigencias no funcionales	11
3.2. Estructura de funciones	11
3.2.1. Caja negra del sistema	11
3.2.2. Funciones detalladas	12
3.3. Matriz morfológica	12
3.3.1. Dominio mecánico	12
3.3.2. Dominio de sensores y cámara	13
3.3.3. Dominio de actuadores	13
3.3.4. Dominio de interfaz y software	13
3.3.5. Dominio de control	13
3.3.6. Dominio de energía	14
3.4. Conceptos de solución	14
3.5. Evaluación técnico-económica y selección final	14

4. Diseño integrador del sistema	15
4.1. Modelo 3D general del sistema	15
4.2. Diagrama de operaciones	15
4.3. Diagrama de bloques (arquitectura hardware)	16
4.4. Selección de materiales por módulo	17
4.4.1. Faja transportadora	17
4.4.2. Motorreductor DC amarillo	17
4.4.3. Bowl clasificatorio y base del NEMA 17	17
4.4.4. Estructura general	17
4.4.5. Drivers y electrónica asociada	17
5. Diseño del sistema de control e interfaz	18
5.1. Diagrama de flujo general del control	18
5.2. Variables a monitorear y señales del sistema	19
5.2.1. Lado Raspberry Pi	19
5.2.2. Lado Arduino	19
5.3. Software principal (Python + IA)	19
5.4. Selección del controlador	20
5.5. Interfaz y panel de monitoreo	20
5.6. Integración entre Raspberry Pi, Arduino y motores	20
6. Diseño de subsistemas	21
6.1. Diseño mecánico del bowl rotatorio	21
6.2. Cálculos mecánicos necesarios	21
6.2.1. Cálculo para la faja transportadora	21
6.2.2. Cálculo para el torque del NEMA 17	22
6.3. Selección y diseño de actuadores	22
6.3.1. Motor DC para la faja	22
6.3.2. Driver L298N	22
6.3.3. Motor NEMA 17 y driver A4988	23
6.4. Diseño del montaje mecánico	23
7. Diseño eléctrico	24
7.1. Selección de la fuente de energía	24
7.2. Cálculos de consumo	24
7.3. Diagramas eléctricos (descripción)	25
7.3.1. Conexión motor DC + L298N	25
7.3.2. Conexión NEMA 17 + A4988	25
7.3.3. Conexión del Arduino y Raspberry Pi	25
7.4. Cableado general	26

7.5. Integración fuente-drivers-Raspberry Pi	26
8. Propuesta de prototipado	27
8.1. Prototipo inicial de la faja transportadora	27
8.2. Prototipo inicial del bowl rotatorio	27
8.3. Programación preliminar	28
8.3.1. Movimiento del NEMA 17	28
8.3.2. Movimiento de la faja transportadora	28
8.3.3. Comunicación Raspberry Pi-Arduino	28
8.4. Ensamblaje inicial del sistema completo	28
9. Prototipado final	30
9.1. Mejoras aplicadas al prototipo inicial	30
9.2. Ajustes de IA y clasificación	30
9.3. Integración final Raspberry-Arduino-motores	31
9.4. Pruebas finales con minerales reales	31

Capítulo 1

Antecedentes del diseño

1.1. Problemática

En Lima, especialmente en distritos como Cercado, Ate, Villa María del Triunfo, San Juan de Lurigancho y Comas, existe un número importante de pequeños talleres, artesanos y emprendedores que trabajan con minerales ya transformados, es decir, piezas listas para venta, decoración o joyería. Estos minerales no son grandes rocas extraídas directamente de mina, sino muestras pequeñas, pulidas o seleccionadas previamente.

El problema es que la clasificación de estas muestras sigue siendo manual, y esto genera varias dificultades:

- **Pérdida de tiempo:** separar cuarzo, pirita, galena u otros minerales de forma manual toma mucho más tiempo, sobre todo cuando hay producción o pedidos grandes.
- **Errores humanos:** algunas piezas son muy parecidas entre sí, lo que provoca confusiones o mezclas no deseadas.
- **Costos elevados:** contratar personal solo para clasificar minerales hace que los pequeños talleres de Lima tengan más gastos operativos.
- **Poca estandarización:** cada persona clasifica “a su estilo”, lo que causa variaciones en calidad y presentación.
- **Riesgo de manipulación:** en algunos casos, manipular muchas piezas genera desgaste en las manos o pequeñas cortaduras, sobre todo con minerales más filosos.

Al final, estos problemas afectan la velocidad, la precisión y, sobre todo, la eficiencia de estos negocios, que podrían mejorar si contaran con un sistema más tecnológico.

Además, muchos emprendedores en Lima ya están modernizando sus procesos: usan máquinas de corte láser, impresoras 3D, páginas web, redes sociales, etc. Sin embargo,

cuando se trata de organizar o clasificar físicamente sus minerales, todavía dependen del método tradicional y manual.

Aquí es donde surge la necesidad de una solución práctica, pequeña, económica y adaptada a la realidad peruana.

1.2. Propuesta de solución

La idea central del proyecto es crear un **Clasificador Inteligente de Minerales**, un equipo pequeño, automático y fácil de operar que permita que cualquier persona — emprendedores, artesanos, estudiantes o pequeños talleres— pueda organizar y separar sus minerales sin necesidad de hacerlo a mano.

El sistema propuesto combina tres partes principales:

- Una **faja transportadora pequeña**, donde se coloca el mineral ya terminado.
- Una **cámara** y una **Raspberry Pi**, que analizan la imagen y determinan automáticamente qué mineral es.
- Un **bowl rotatorio con tres compartimientos**, que gira según el tipo detectado y deja caer el mineral en el lugar correcto.

Toda esta estructura funciona con motores controlados por un **Arduino** y alimentada por una fuente eléctrica, logrando un sistema compacto pero eficiente.

La solución es práctica porque:

- No usa maquinaria industrial costosa.
- Es portátil y se puede colocar en cualquier mesa o taller.
- No requiere conocimiento técnico avanzado para operarlo.
- Utiliza visión artificial para reducir errores.
- Permite clasificar piezas de forma rápida y ordenada.

En otras palabras, la máquina realiza el trabajo repetitivo, y la persona solo supervisa.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo funcional capaz de clasificar automáticamente minerales pequeños mediante visión artificial y un sistema mecánico sencillo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar un sistema de transporte pequeño (faja) para desplazar la muestra hasta la cámara.
- Desarrollar un modelo de inteligencia artificial que identifique correctamente al menos tres tipos de minerales comunes en Lima.
- Integrar Arduino y Raspberry Pi para sincronizar el movimiento de la faja, la detección y la rotación del bowl.
- Diseñar un bowl rotatorio que distribuya los minerales según su clasificación.
- Asegurar que el prototipo final sea fácil de usar, seguro y replicable para talleres pequeños.

1.4. Metodología de trabajo

Para desarrollar el sistema se siguió una metodología práctica y orientada al prototipado:

- Revisión de casos similares: investigación de máquinas de *sorting*, clasificadores pequeños y proyectos con Raspberry Pi en la región.
- Identificación de necesidades reales: análisis de cómo trabajan los pequeños talleres de minerales en Lima.
- Diseño conceptual: definición de funciones, mecanismos, electrónica y flujo del sistema.
- Modelado en 3D: diseño e impresión por partes de la estructura, la faja y el bowl.
- Integración electrónica: montaje de Arduino, Raspberry Pi, drivers y fuente de poder.
- Entrenamiento del modelo de IA: toma de fotografías de muestras reales y entrenamiento de la Raspberry Pi para reconocerlas.
- Pruebas y mejoras: validación del movimiento de la faja, precisión de la clasificación y velocidad de rotación del bowl.
- Construcción del prototipo final: ensamblaje completo, corrección de detalles y documentación del proceso.

Esta metodología permitió avanzar por etapas claras y corregir problemas desde el inicio.

Capítulo 2

Estado del arte

El objetivo de este capítulo es revisar soluciones existentes relacionadas con la clasificación automática de objetos, los mecanismos utilizados para separar piezas pequeñas y los avances en visión artificial aplicados a procesos de *sorting*. Esta revisión permite entender qué tecnologías son comunes, qué métodos se han probado en la industria y qué ideas se pueden adaptar o mejorar para el prototipo de clasificador de minerales.

2.1. Sistemas comerciales similares

En el ámbito industrial, especialmente en sectores como la minería y el procesamiento de materiales, existen máquinas clasificadoras que utilizan cámaras de alta resolución, sensores láser y bandas transportadoras para separar minerales en grandes cantidades. Empresas como Tomra, Comex y Steinert han desarrollado equipos que pueden procesar toneladas por hora y detectar colores, brillos o densidades con alta precisión. Sin embargo, estas máquinas suelen ser extremadamente costosas, requieren infraestructura especial y están orientadas a operaciones a gran escala. Por ello, no representan una solución viable para pequeños talleres o emprendedores en Lima, quienes generalmente trabajan con minerales ya transformados, en cantidades reducidas y para usos comerciales como joyería o colección.

En centros logísticos y almacenes también se emplean mini-sistemas de transporte y *sorting* automatizado que clasifican objetos por tamaño, código o color utilizando mecanismos compactos. Estos sistemas suelen incluir fajas pequeñas, motores de corriente continua de baja potencia y bandejas móviles o compuertas dirigidas por controladores electrónicos. Aunque su finalidad es diferente, comparten los mismos principios funcionales de transporte, identificación y separación que se buscan implementar en el prototipo.

Además, el uso de visión artificial ha avanzado significativamente gracias al acceso a microcomputadoras como la Raspberry Pi. Hoy es común encontrar proyectos que clasifican frutas, tornillos, botellas, semillas u otros objetos pequeños mediante cámaras sencillas y modelos livianos de inteligencia artificial. Este tipo de soluciones demuestra

que las tecnologías económicas pueden lograr niveles aceptables de precisión y velocidad sin depender de sistemas industriales sofisticados.

2.2. Patentes relacionadas

Para complementar la revisión, se analizaron patentes que presentan mecanismos y conceptos que guardan relación directa con el prototipo. Aunque no todas fueron diseñadas para clasificar minerales, describen soluciones mecánicas o electrónicas aplicables a la separación automática de objetos pequeños.

En 2014, el inventor **S. Tanaka** (Japón) registró ante el *Japan Patent Office* (JPO) un *sistema de distribución rotatoria de objetos pequeños*. La propuesta consiste en un plato circular dividido en compartimentos que gira mediante un motor paso a paso, permitiendo que los objetos caigan en la sección correspondiente según la señal recibida. Este mecanismo es muy cercano al bowl rotatorio del prototipo, ya que utiliza un movimiento preciso para dirigir el objeto clasificado hacia un compartimiento específico.

En 2012, **G. Richardson** (Estados Unidos) registró ante la *United States Patent and Trademark Office* (USPTO) un sistema automático de selección que utiliza bandejas motorizadas y compuertas controladas electrónicamente para desviar objetos hacia distintos destinos. Aunque su aplicación original está orientada a productos agrícolas, su estructura mecánica —simple, modular y basada en la gravedad— aporta ideas valiosas sobre cómo dirigir objetos con pocos componentes y bajo costo.

En 2017, **Y. Kumar** (India) presentó en el *Controller General of Patents, Designs & Trade Marks* (CGPDTM) una patente sobre un método automatizado de identificación de objetos mediante cámara RGB y análisis de imágenes. La propuesta utiliza algoritmos ligeros para clasificar elementos por color, forma y textura, empleando hardware de bajo consumo energético. Aunque el enfoque está en semillas y productos agrícolas, la técnica es adaptable a la clasificación de minerales pequeños.

Finalmente, en 2019, el inventor **M. Strøm** (Noruega) registró ante la *Norwegian Industrial Property Office* (NIPO) un sistema compacto de clasificación visual que integra una cámara pequeña, un microcontrolador y actuadores eléctricos para separar objetos en función del análisis visual. Este diseño comparte la misma filosofía que el proyecto: reducir costos, mantener el equipo compacto y combinar visión artificial con mecanismos sencillos de movimiento.

Estas patentes no solo validan que los mecanismos utilizados son técnicamente viables, sino que también sirven como referencia para mejorar la precisión, la eficiencia y el diseño mecánico del prototipo.

2.3. Proyectos o investigaciones previas

En América Latina, y particularmente en Perú, existen estudios enfocados en apoyar a la minería artesanal mediante clasificadores de bajo costo. La mayor parte de estos trabajos busca separar minerales en bruto, no minerales terminados como los que se comercializan en Lima. Aun así, demuestran la necesidad de automatizar ciertos procesos y sirven como referencia sobre cómo adaptar la tecnología a entornos económicos más limitados.

En el mundo del *hardware* educativo y *maker*, la Raspberry Pi se ha convertido en una herramienta común para desarrollar sistemas de clasificación visual. Hay numerosos proyectos que combinan esta microcomputadora con OpenCV, TensorFlow Lite y motores controlados por Arduino para tomar decisiones rápidas basadas en imágenes. La mayoría se enfoca en objetos como frutas, tornillos, envases o residuos, pero los principios son los mismos: capturar una imagen, analizarla, tomar una decisión y ejecutar un movimiento mecánico.

Estas experiencias previas confirman que la arquitectura elegida para el prototipo — Raspberry Pi para la inteligencia, Arduino para el control de motores y un mecanismo sencillo de separación— es compatible con lo que ya se ha probado en otros proyectos exitosos.

Capítulo 3

Diseño conceptual

3.1. Lista de exigencias

La lista de exigencias reúne los requisitos que el proyecto debe cumplir para funcionar correctamente. Se dividen en exigencias funcionales (lo que debe hacer la máquina) y exigencias no funcionales (cómo debe comportarse en general).

3.1.1. Exigencias funcionales

- El sistema debe ser capaz de clasificar al menos tres tipos de minerales usando visión artificial.
- La faja transportadora debe mover el mineral hasta la zona de la cámara de forma estable.
- La Raspberry Pi debe tomar una foto y analizarla automáticamente para identificar el mineral.
- El bowl rotatorio debe girar al compartimiento correcto según el tipo detectado.
- El mineral debe caer en el compartimiento correspondiente sin atascarse.
- El Arduino debe controlar la faja y el bowl de acuerdo con la orden enviada por la Raspberry Pi.
- Debe existir una comunicación estable entre Raspberry Pi y Arduino (por ejemplo, vía serial/USB).
- El sistema debe permitir clasificar minerales de manera continua (uno tras otro).

3.1.2. Exigencias no funcionales

- La estructura debe ser compacta y caber en una mesa de trabajo pequeña.
- El prototipo debe ser fácil de operar, sin necesidad de conocimientos técnicos avanzados.
- El sistema debe ser económico y utilizar componentes accesibles en Lima.
- Debe ser seguro de manipular y no generar riesgo eléctrico.
- El diseño debe ser replicable, permitiendo que otros equipos puedan construirlo sin dificultad.
- Los materiales deben ser de bajo costo: madera cortada láser, piezas impresas en 3D y motores económicos.
- El sistema debe tener un consumo eléctrico moderado, compatible con una fuente pequeña.

3.2. Estructura de funciones

La estructura de funciones permite ver el sistema como un conjunto de tareas conectadas entre sí. Describe el recorrido del mineral desde que se coloca en la entrada hasta que queda clasificado en un compartimiento.

3.2.1. Caja negra del sistema

La “caja negra” representa el sistema como un todo, sin entrar en detalles internos.

Entradas:

- Mineral a clasificar.
- Energía eléctrica.
- Comandos de control (Raspberry Pi hacia Arduino).
- Imagen capturada por la cámara.

Procesos internos:

- Movimiento de la faja.
- Captura de imagen.
- Análisis del mineral mediante IA.

- Envío del resultado de clasificación.
- Giro del bowl al compartimiento correcto.

Salidas:

- Mineral separado en el compartimiento adecuado.
- Imagen analizada.
- Señal de retroalimentación (sistema listo para otro mineral).

3.2.2. Funciones detalladas

- Transportar el mineral hasta la cámara.
- Detectar la presencia del mineral en la zona de análisis (por tiempo o posición).
- Capturar la imagen con la cámara.
- Procesar la imagen en la Raspberry Pi usando visión artificial.
- Identificar el tipo de mineral.
- Enviar el tipo detectado al Arduino mediante protocolo serial.
- Girar el bowl al ángulo correspondiente según la clase.
- Liberar el mineral hacia el compartimiento.
- Retornar el bowl a su posición inicial.
- Reiniciar el proceso para recibir un nuevo mineral.

3.3. Matriz morfológica

La matriz morfológica ayuda a explorar diferentes alternativas de diseño antes de elegir la solución final. Se listan funciones y se proponen opciones para cada una.

3.3.1. Dominio mecánico

Función: mover el mineral

- Faja transportadora pequeña (madera + banda) (**seleccionada**).
- Riel vibratorio (descartado por complejidad).

- Rampa por gravedad (descartada porque no permite detener el mineral en la cámara).

Función: separar el mineral

- Bowl rotatorio con compartimientos (**seleccionado**).
- Brazo con servomotores (descartado por complejidad mecánica).
- Compuertas lineales (descartadas por requerir mayor espacio).

3.3.2. Dominio de sensores y cámara

Función: capturar imagen

- Cámara compatible con Raspberry Pi (**seleccionada**).
- Webcam USB (descartada por calidad variable y estabilidad).

3.3.3. Dominio de actuadores

Función: mover la faja

- Motor DC amarillo + driver L298N (**seleccionado**).
- Servomotor grande (descartado por torque insuficiente y menor comodidad para movimiento continuo).

Función: girar el bowl

- Motor NEMA 17 + driver A4988 (**seleccionado**).
- Servomotor de rotación continua (descartado por baja precisión en posición).

3.3.4. Dominio de interfaz y software

Función: clasificar

- Raspberry Pi + OpenCV + modelo de IA (**seleccionado**).
- Arduino + sensores de color (descartado por menor precisión en minerales).

3.3.5. Dominio de control

Función: coordinar motores

- Arduino Uno (**seleccionado**).
- Raspberry Pi Pico como apoyo (utilizada preferentemente para pruebas o tareas auxiliares).

3.3.6. Dominio de energía

Función: alimentar el sistema

- Fuente metálica con salida de 12 V (**seleccionada**).
- Power bank USB (útil sólo para la Raspberry Pi, no para los motores).

3.4. Conceptos de solución

Durante el diseño conceptual se plantearon varios conceptos antes de seleccionar el definitivo:

Concepto 1: Clasificador lineal Una faja larga con compuertas laterales que desvían cada mineral según su tipo. Se descartó por el espacio que requiere.

Concepto 2: Sistema con brazo robótico La cámara toma la foto y un brazo con servos toma el mineral y lo deposita en su lugar. Se descartó por su mayor costo y complejidad.

Concepto 3: Bowl rotatorio + faja pequeña El mineral avanza por una faja, la cámara lo identifica, el bowl rota y lo deja caer en la sección adecuada. Se seleccionó por ser compacto, económico, preciso y fácil de fabricar.

3.5. Evaluación técnico–económica y selección final

Considerando costo, complejidad, precisión y facilidad de implementación, el concepto de bowl rotatorio con compartimientos resultó la opción más equilibrada. Es económico, ocupa poco espacio, funciona bien con minerales pequeños y es totalmente compatible con la arquitectura Raspberry Pi + Arduino.

Capítulo 4

Diseño integrador del sistema

El diseño integrador resume cómo todas las piezas del proyecto tanto mecánicas, electrónicas y de software pueden trabajar juntas. Describe el modelo general del sistema, la secuencia de operaciones y los componentes principales seleccionados para lograr un prototipo compacto, estable y replicable.

4.1. Modelo 3D general del sistema

El sistema completo se divide en tres módulos principales:

- **Módulo de transporte:** la faja transportadora que lleva el mineral hacia la cámara.
- **Módulo de visión:** la estructura que sostiene la cámara, ubicada estratégicamente para capturar el mineral con buena iluminación.
- **Módulo de clasificación:** el bowl rotatorio con tres compartimientos montado sobre un motor NEMA 17.

En el modelo 3D se buscó mantener proporciones pequeñas y funcionales. La base es principalmente de madera cortada por láser, lo que permite un armado preciso y ligero. Las piezas impresas en 3D (como el bowl y ciertos soportes) complementan el diseño al ofrecer geometrías más complejas.

4.2. Diagrama de operaciones

El funcionamiento completo del prototipo puede resumirse en los siguientes pasos:

1. **Colocación del mineral:** el usuario coloca el mineral sobre el inicio de la faja.
2. **Transporte:** la faja mueve lentamente el mineral hacia el área donde está la cámara.

3. **Captura:** cuando el mineral llega a la zona de visión, la Raspberry Pi toma una fotografía.
4. **Análisis:** el modelo de IA reconoce si el mineral es cuarzo, pirita, galena u otro tipo entrenado.
5. **Comunicación:** el resultado se envía al Arduino mediante un mensaje serial.
6. **Decisión:** el Arduino interpreta la clase recibida.
7. **Movimiento:** según el tipo, el motor NEMA 17 gira el bowl rotatorio hacia el compartimiento asignado.
8. **Liberación:** al avanzar un poco más la faja, el mineral cae en el compartimiento correspondiente.
9. **Reposicionamiento:** el bowl vuelve a su posición inicial.
10. **Reinicio:** el sistema queda listo para repetir el proceso de forma continua.

4.3. Diagrama de bloques (arquitectura hardware)

La arquitectura hardware se estructura de la siguiente forma:

- **Raspberry Pi:** captura la imagen, procesa el mineral con IA y envía el tipo identificado al Arduino.
- **Arduino Uno:** recibe el tipo de mineral, controla los motores (faja y bowl) y coordina los tiempos de movimiento.
- **Motor DC + driver L298N:** encargados de mover la faja.
- **Motor NEMA 17 + driver A4988:** responsables de girar el bowl en ángulos específicos.
- **Fuente metálica de 12 V:** alimenta los motores y drivers con suficiente corriente.
- **Protoboard y cableado:** facilitan la distribución de señales y energía.

Esta arquitectura es modular, económica y fácil de reparar en caso de fallas.

4.4. Selección de materiales por módulo

4.4.1. Faja transportadora

Se seleccionó una faja pequeña con base de madera cortada láser y banda de caucho o tela industrial. Este diseño ofrece un movimiento estable y la tracción suficiente para transportar minerales livianos sin necesidad de motores de gran tamaño.

4.4.2. Motorreductor DC amarillo

El motor DC amarillo es económico, fácil de conseguir y entrega la fuerza necesaria para mover la faja. Aunque no brinda control de precisión, es adecuado para el movimiento continuo y simple que requiere el proyecto. Se controla mediante un driver L298N.

4.4.3. Bowl clasificadorio y base del NEMA 17

El bowl fue impreso en 3D debido a su geometría compleja. Está dividido en tres compartimientos y se acopla directamente al eje del NEMA 17, que provee el torque y la precisión necesarios para girarlo sin problemas.

4.4.4. Estructura general

La estructura en madera cortada por láser permite obtener piezas exactas sin herramientas especializadas. Las piezas impresas en 3D complementan el diseño en zonas donde se requieren formas específicas, como soportes para motores o para la cámara.

4.4.5. Drivers y electrónica asociada

Se utilizó el driver L298N para el motor DC por su compatibilidad con 12 V y el A4988 para el NEMA 17 por su precisión y facilidad de configuración. Ambos drivers operan adecuadamente con la alimentación proporcionada por la fuente de 12 V. La protoboard permite organizar las conexiones sin necesidad de soldar durante la etapa de prototipado.

Capítulo 5

Diseño del sistema de control e interfaz

El sistema de control es el “cerebro” que coordina la faja, el análisis de imagen, el bowl rotatorio y la comunicación entre Arduino y Raspberry Pi.

5.1. Diagrama de flujo general del control

El flujo de control sigue una secuencia pensada para evitar errores y garantizar que cada mineral pase por el proceso completo antes de continuar con el siguiente:

1. **Inicio del sistema:** se encienden el Arduino y la Raspberry Pi, verificando que motores y drivers estén listos.
2. **Espera de mineral:** el sistema queda en modo espera hasta que el usuario coloca un mineral en la faja.
3. **Movimiento de la faja:** el Arduino enciende el motor DC para llevar el mineral bajo la cámara.
4. **Captura de imagen:** la Raspberry Pi toma una fotografía cuando el mineral está en la posición adecuada.
5. **Clasificación con IA:** la Raspberry procesa la imagen con el modelo entrenado.
6. **Envío del resultado:** la Raspberry Pi envía el tipo de mineral identificado al Arduino.
7. **Giro del bowl:** el Arduino ordena al NEMA 17 girar al ángulo asignado.
8. **Liberación del mineral:** la faja avanza un poco más para que el mineral caiga en el compartimiento correspondiente.
9. **Retorno:** el bowl vuelve a su posición inicial.
10. **Listo para el siguiente:** el ciclo se reinicia.

5.2. Variables a monitorear y señales del sistema

5.2.1. Lado Raspberry Pi

- `imagen_mineral`: fotografía capturada.
- `tipo_detectado`: resultado de la clasificación (cadena de texto).
- `confianza`: porcentaje de certeza del modelo.
- `senal_listo`: indica si la Pi está lista para clasificar otro mineral.

5.2.2. Lado Arduino

- `tipo_recibido`: mineral que debe clasificar.
- `angulo_bowl`: ángulo al que debe girar el NEMA 17.
- `velocidad_faja`: velocidad del motor DC.
- `estado_bowl`: estado del bowl (reposo, girando, regresando).
- `estado_faja`: faja encendida o apagada.

5.3. Software principal (Python + IA)

En la Raspberry Pi se ejecuta un programa en Python que:

- Inicializa la cámara y configura la resolución.
- Captura la imagen del mineral posicionado.
- Procesa la imagen usando librerías como OpenCV y/o TensorFlow Lite.
- Clasifica el mineral en una de las categorías entrenadas.
- Envía el resultado al Arduino mediante comunicación serial.

El modelo utilizado es liviano, rápido y entrenado con fotografías reales tomadas por el equipo.

5.4. Selección del controlador

La arquitectura de control integra tres elementos:

- **Raspberry Pi:** ejecuta la visión artificial y toma la decisión de clasificación.
- **Arduino Uno:** controla los motores y ejecuta las acciones físicas según la orden recibida.
- **Raspberry Pi Pico (opcional):** puede apoyar en pruebas, lectura de sensores adicionales o tareas específicas.

5.5. Interfaz y panel de monitoreo

Aunque el prototipo no requiere una interfaz compleja, se consideran elementos de monitoreo:

- LED indicador de “listo para clasificar”.
- LED indicador de “clasificando”.
- Pequeña pantalla OLED (opcional) para mostrar el tipo detectado.
- Mensajes en consola para depuración durante pruebas.

5.6. Integración entre Raspberry Pi, Arduino y motores

La comunicación principal se realiza mediante serial (USB o UART). Ejemplo de protocolo:

- La Raspberry Pi envía cadenas como: "PIRITA", "CUARZO", "GALENA".
- El Arduino recibe el texto, lo interpreta y calcula el ángulo correspondiente del bowl.

Un posible mapeo de ángulos es:

Mineral	Ángulo del bowl
Cuarzo	0°
Pirita	120°
Galena	240°

La faja se enciende solo cuando es necesario transportar el mineral y se detiene mientras se captura la imagen.

Capítulo 6

Diseño de subsistemas

Este capítulo detalla cómo se diseñaron los subsistemas principales: el bowl rotatorio, la faja, los actuadores y el montaje.

6.1. Diseño mecánico del bowl rotatorio

El bowl rotatorio es el corazón del sistema de clasificación. Está impreso en 3D y dividido en tres compartimientos iguales, cada uno destinado a un mineral distinto. El diseño busca:

- Garantizar un giro suave sin desalinearse.
- Permitir que el mineral caiga sin atorarse.
- Asegurar que el motor NEMA 17 pueda moverlo sin esfuerzo excesivo.

El bowl se une al eje del NEMA 17 mediante un acople impreso y una base reforzada. El soporte correspondiente mantiene el motor en una posición estable y reduce vibraciones.

6.2. Cálculos mecánicos necesarios

6.2.1. Cálculo para la faja transportadora

El motor DC amarillo tiene, típicamente, una velocidad de 150–200 rpm y un torque cercano a 0,8–1,2 kg·cm (según el modelo). Los minerales empleados pesan entre 20 y 60 gramos, por lo que la fuerza necesaria para moverlos es baja.

Se considera el torque requerido como:

$$T = F \cdot r$$

donde:

- F es la fuerza necesaria para mover el mineral.
- r es el radio del rodillo.

Tomando un valor aproximado de $F \approx 0,2 \text{ N}$ y $r \approx 1,5 \text{ cm}$, el torque requerido es del orden de $0,003 \text{ N} \cdot \text{m}$, valor muy inferior al que puede entregar el motor DC, por lo que se considera suficiente.

6.2.2. Cálculo para el torque del NEMA 17

El bowl pesa más que un mineral individual debido al material 3D, pero un NEMA 17 típico ofrece entre 40 y 45 $\text{N} \cdot \text{cm}$ de torque.

Si se asume un peso total (bowl + minerales) de $0,2 \text{ kg}$ y un radio de 6 cm , la fuerza en el borde es:

$$F = m \cdot g \approx 0,2 \cdot 9,81 \approx 1,96 \text{ N}$$

y el torque requerido:

$$T = F \cdot r \approx 1,96 \cdot 0,06 \approx 0,12 \text{ N} \cdot \text{m} = 12 \text{ N} \cdot \text{cm}$$

Como el NEMA 17 entrega varias veces ese valor, se concluye que puede mover el bowl con holgura.

6.3. Selección y diseño de actuadores

6.3.1. Motor DC para la faja

El motor DC amarillo se eligió por:

- Bajo costo.
- Disponibilidad en el mercado local.
- Suficiente torque para el transporte.
- Facilidad de control mediante el driver L298N.

6.3.2. Driver L298N

El L298N:

- Soporta 12 V en la etapa de potencia.
- Es compatible con el motor DC utilizado.

- Incluye protecciones internas.
- Es fácil de cablear y controlar desde el Arduino.

6.3.3. Motor NEMA 17 y driver A4988

El motor NEMA 17 se eligió por su precisión y torque. El driver A4988 permite:

- Configurar microstepping (1/1, 1/2, 1/4, 1/8, 1/16).
- Controlar corriente máxima mediante un potenciómetro.
- Obtener giros suaves y posiciones exactas.

6.4. Diseño del montaje mecánico

El montaje se concibió para ser modular y fácil de ensamblar:

- Base de madera cortada por láser como estructura principal.
- Soportes de motor en madera o 3D.
- Estructura de la cámara impresa en 3D.
- Eje y soporte del NEMA 17 diseñados a medida.
- Bowl rotatorio impreso en 3D.

La idea es que cada componente pueda ser reemplazado sin desmontar todo el sistema.

Capítulo 7

Diseño eléctrico

El diseño eléctrico asegura que todos los componentes reciban energía adecuada y que la comunicación entre controladores y actuadores sea segura y estable.

7.1. Selección de la fuente de energía

Se utilizó una fuente metálica de 12 V, común en proyectos de electrónica, que:

- Entrega un voltaje estable de 12 V.
- Soporta corrientes entre 5 A y 10 A.
- Incluye protección contra sobrecarga.

El valor de 12 V es adecuado porque:

- El motor DC trabaja bien entre 6 y 12 V.
- El NEMA 17 opera sin problemas a 12 V (vía driver).
- El L298N está diseñado para 12 V.
- El A4988 puede recibir 12 V en VMOT.

La Raspberry Pi se alimenta con su propio adaptador de 5 V para evitar que el consumo de los motores afecte su estabilidad.

7.2. Cálculos de consumo

- **Motor NEMA 17:** se limita la corriente a aproximadamente 1 A.
- **Motor DC amarillo:** alrededor de 0,2 A en vacío y hasta 0,5 A en carga.

- **Driver L298N y A4988:** consumo propio bajo (del orden de decenas de mA).
- **Arduino Uno:** aproximadamente 50 mA.

El consumo total aproximado en la línea de 12 V es de alrededor de 1,6 A, por lo que una fuente de 5 A o más trabaja con margen suficiente.

7.3. Diagramas eléctricos (descripción)

7.3.1. Conexión motor DC + L298N

- +12V del L298N conectado a la fuente de 12 V.
- GND del L298N conectado a GND de la fuente y del Arduino.
- OUT1/OUT2 conectados al motor DC.
- Pines IN1/IN2 conectados a pines digitales del Arduino (control de dirección).
- Pin ENA conectado a un pin PWM del Arduino (control de velocidad).

7.3.2. Conexión NEMA 17 + A4988

- VMOT del A4988 a 12 V de la fuente.
- GND del A4988 al GND común.
- Salidas a bobinas del NEMA 17 (A1/A2/B1/B2).
- Pines STEP y DIR a pines digitales del Arduino.
- Pin EN opcional para habilitar/deshabilitar el driver.

7.3.3. Conexión del Arduino y Raspberry Pi

- El Arduino puede alimentarse en Vin con los 12 V (usa su regulador interno a 5 V).
- El GND del Arduino se une al GND de la fuente.
- La Raspberry Pi se alimenta con su propio adaptador de 5 V.
- En caso de usar UART, se comparte GND entre Raspberry y Arduino.

7.4. Cableado general

Para evitar interferencias:

- Los cables de potencia de motores se agrupan separados de las líneas de señal.
- Se usa una referencia de tierra común (GND) para todos los módulos.
- Se refuerzan los cables que transportan 12 V para reducir caídas de tensión.

7.5. Integración fuente—drivers—Raspberry Pi

En resumen:

- La fuente de 12 V alimenta el motor DC (vía L298N), el NEMA 17 (vía A4988) y el Arduino (vía `Vin`).
- La Raspberry Pi se alimenta de forma independiente y se comunica con el Arduino por USB o UART.
- Se mantiene una referencia de GND común para evitar problemas de niveles lógicos.

Capítulo 8

Propuesta de prototipado

El prototipado es la etapa en la que las ideas y diseños previos toman forma física. Se construyen versiones iniciales de los módulos principales para comprobar el funcionamiento antes de ensamblar el sistema completo.

8.1. Prototipo inicial de la faja transportadora

La faja fue uno de los primeros componentes en construirse. Para el prototipo inicial se utilizó:

- Base de madera cortada por láser.
- Banda negra de caucho.
- Engranajes laterales impresos en 3D.
- Motor DC amarillo para generar el movimiento.

Las pruebas buscaban comprobar que:

- La faja moviera minerales sin trabarse.
- El movimiento fuera suficientemente estable para que la cámara obtuviera una imagen clara.

Se realizaron ajustes en la tensión de la banda y en la altura de las paredes laterales para evitar que el mineral se deslizara hacia afuera.

8.2. Prototipo inicial del bowl rotatorio

El segundo módulo prototipado fue el bowl rotatorio. Se imprimió en PLA con tres compartimientos y un soporte sencillo para el NEMA 17. Las pruebas se enfocaron en:

- Validar la precisión del giro.
- Comprobar el tamaño adecuado de los compartimientos.
- Verificar que el mineral cayera sin atorarse.
- Confirmar que el NEMA 17 pudiera mover el bowl sin esfuerzo excesivo.

A partir de estas pruebas se reforzó la unión bowl–eje, se ensacharon bordes superiores y se mejoró la base para reducir vibraciones.

8.3. Programación preliminar

La programación avanzó en paralelo al prototipado mecánico.

8.3.1. Movimiento del NEMA 17

Se configuró el A4988 y se programó el Arduino para:

- Realizar pasos completos y microstepping.
- Definir velocidades de giro.
- Posicionar el bowl en 0°, 120°y 240°.

8.3.2. Movimiento de la faja transportadora

Se controló el L298N desde el Arduino, utilizando PWM para regular la velocidad. Esto permitió ajustar el avance del mineral a un ritmo compatible con la captura de imagen.

8.3.3. Comunicación Raspberry Pi–Arduino

Se programó la Raspberry Pi para enviar cadenas de texto por serial con el tipo de mineral clasificado. El Arduino recibió estas cadenas y las tradujo en acciones de movimiento.

8.4. Ensamblaje inicial del sistema completo

Tras probar la faja, el bowl y la programación, se realizó un primer ensamblaje:

- Montaje de la faja sobre la base.
- Colocación de la estructura de la cámara.

- Fijación del bowl al NEMA 17.
- Organización de drivers y protoboard junto a la fuente.
- Ubicación del Arduino y la Raspberry Pi en una zona accesible.

Se hicieron pruebas completas del flujo: la faja movía el mineral, la cámara capturaba la imagen, la Raspberry Pi clasificaba, el Arduino recibía la orden, el bowl giraba y el mineral era depositado en su compartimiento.

Se detectaron pequeños detalles, como ajustes en altura para mejorar el ángulo de la cámara, mejora en la estabilidad de la faja y alineación del bowl al regresar. Estos aspectos se corrigieron en la etapa de prototipado final.

Capítulo 9

Prototipado final

Una vez validados los módulos principales, se construyó la versión final del clasificador de minerales. Esta etapa se centró en mejorar la estabilidad mecánica, optimizar la precisión y afinar la integración entre electrónica y software.

9.1. Mejoras aplicadas al prototipo inicial

Entre las mejoras destacan:

1. **Estabilidad del bowl rotatorio:** refuerzo del acople al eje del NEMA 17, base más gruesa y soporte adicional.
2. **Ajustes en la faja:** corrección de tensión, alineación de engranajes y altura de paredes laterales.
3. **Organización del cableado:** separación de líneas de potencia y señal, orden en la protoboard y mejor acceso para pruebas.
4. **Soporte de la cámara:** ajuste en altura y ángulo, con un soporte firme para evitar movimientos.
5. **Integración Raspberry–Arduino:** optimización de baudios y protocolo de envío para reducir latencia.

9.2. Ajustes de IA y clasificación

- Se amplió el conjunto de datos con más fotografías de minerales reales, variando iluminación y orientación.
- Se mejoró la iluminación del área de captura para reducir sombras.
- Se reentrenó el modelo, mejorando la precisión de la clasificación.

9.3. Integración final Raspberry–Arduino–motores

En la versión final:

- La Raspberry Pi toma la foto, clasifica el mineral y envía el resultado al Arduino.
- El Arduino recibe la clase, calcula el ángulo y acciona el NEMA 17.
- La faja es controlada para mover el mineral en el momento preciso.
- Los drivers L298N y A4988 garantizan el manejo correcto de los motores.
- La fuente de 12 V alimenta todo el conjunto de forma estable.

La comunicación se mantuvo estable incluso tras varias horas de pruebas.

9.4. Pruebas finales con minerales reales

Se probaron minerales como cuarzo, pirita y galena. Los resultados muestran que:

- El mineral avanza correctamente por la faja sin atascos.
- La cámara captura imágenes claras.
- La Raspberry Pi clasifica con buena precisión.
- El bowl rotatorio gira al compartimiento correcto sin errores apreciables.
- El mineral cae en el compartimiento asignado gracias al diseño geométrico del bowl y la alineación del sistema.
- El sistema puede operar de manera continua, clasificando varias piezas de manera sucesiva.

En términos generales, el prototipo final demuestra ser funcional, eficiente y adecuado tanto para pequeños talleres como para fines educativos y de demostración tecnológica.