



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



# DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA MECÁNICA

## CARRERA DE INGENIERÍA MECÁTÓNICA

**“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA INTERACTIVO PARA SUELDA Y CORTE ROBOTIZADO MULTIFUNCIÓN, USANDO TECNOLOGÍA INVERTER EN UN SCORBOT ER-4U DEL LABORATORIO DE CNC DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE SEDE LATACUNGA”.**

**AUTORES:** LÓPEZ AIMACAÑA, TAMARA PATRICIA  
PÁEZ SALAS, ALEX FERNANDO

**DIRECTOR:** ING.ACUÑA COELLO, FAUSTO VINICIO.



# CONTENIDO

RESUMEN

OBJETIVOS

CONCEPTOS BÁSICOS

ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN

DISEÑO MECATRÓNICO

**SELECCIÓN DE COMPONENTES**

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

PRUEBAS Y RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



## RESUMEN



El Presente proyecto se realizó con la finalidad de diseñar e implementar un controlador con arquitectura abierta al Scorbot ER-4PC, que se capaz de interactuar con máquinas de suelda y corte con tecnología inverter, ejecutando procesos de soldadura MIG y corte PAC a lo largo de sus ejes cartesianos con resultados satisfactorios.

# OBJETIVOS

## General

Diseñar e implementar un sistema interactivo para suelda y corte Robotizado multifunción usando tecnología inverter en un Scorbot ER-4U del laboratorio de CNC de la Universidad de las Fuerzas armadas ESPE Sede Latacunga

## Específicos

Investigar proyectos similares al sistema interactivo para suelda y corte robotizado

Realizar el diseño mecatrónico para la celda de soldadura robotizada.

Diseñar el sistema de control y HMI adecuado para el controlador.

Seleccionar los componentes tanto para el sistema de fuerza como de control.

Acondicionar un sistema interactivo de soldadura y corte por plasma acorde a las características del Scorbot ER-4U.

Implementación del sistema interactivo para suelda y corte robotizado multifunción en el Scorbot ER-4U.

Realizar pruebas del funcionamiento del sistema logrando resultados favorables en el campo de la soldadura.

# CONCEPTOS BÁSICOS

## Máquinas con tecnología inversora

El funcionamiento de este tipo de máquinas se divide en cinco etapas en donde: en la 1era y 2da etapa, la corriente del suministro de la red se rectifica, transformando de corriente alterna a una de corriente continua; en la 3era etapa se convierte otra vez la corriente continua filtrada a corriente alterna utilizando el interruptor de potencia del inversor con la diferencia que esta corriente estará a una frecuencia de 30 KHz; en la 4ta etapa el filtro o rectificador transforma la corriente alterna a corriente continua y el valor requerido para el proceso de suelda, dirigiéndola al arco de soldadura. Finalmente, en la 5ta etapa existe un sistema de control, que se encarga de monitorear los valores de entrada, salida y del operador asegurando una estabilización en las características de la soldadura o corte.



## CONCEPTOS BÁSICOS

### Scorbot ER-4PC

El Scorbot-ER4pc es un sistema versátil y fiable para la robótica industrial de educación y formación; la velocidad y repetitividad del robot hacen que sea muy adecuado para las operaciones y el uso integrado independiente en aplicaciones de trabajo automatizados como: soldadura robotizada, visión artificial, máquinas de Control Numérico Computarizado y otras operaciones de Sistemas Flexibles de Manufactura. El diseño del robot permite se pueda visualizar sus partes mecánicas, sin dejar a un lado la seguridad para los estudiantes u operadores.

### Controlador

El controlador es un microcomputador cuyo propósito general es el de realizar las tareas de control del brazo articulado.



## CONCEPTOS BÁSICOS

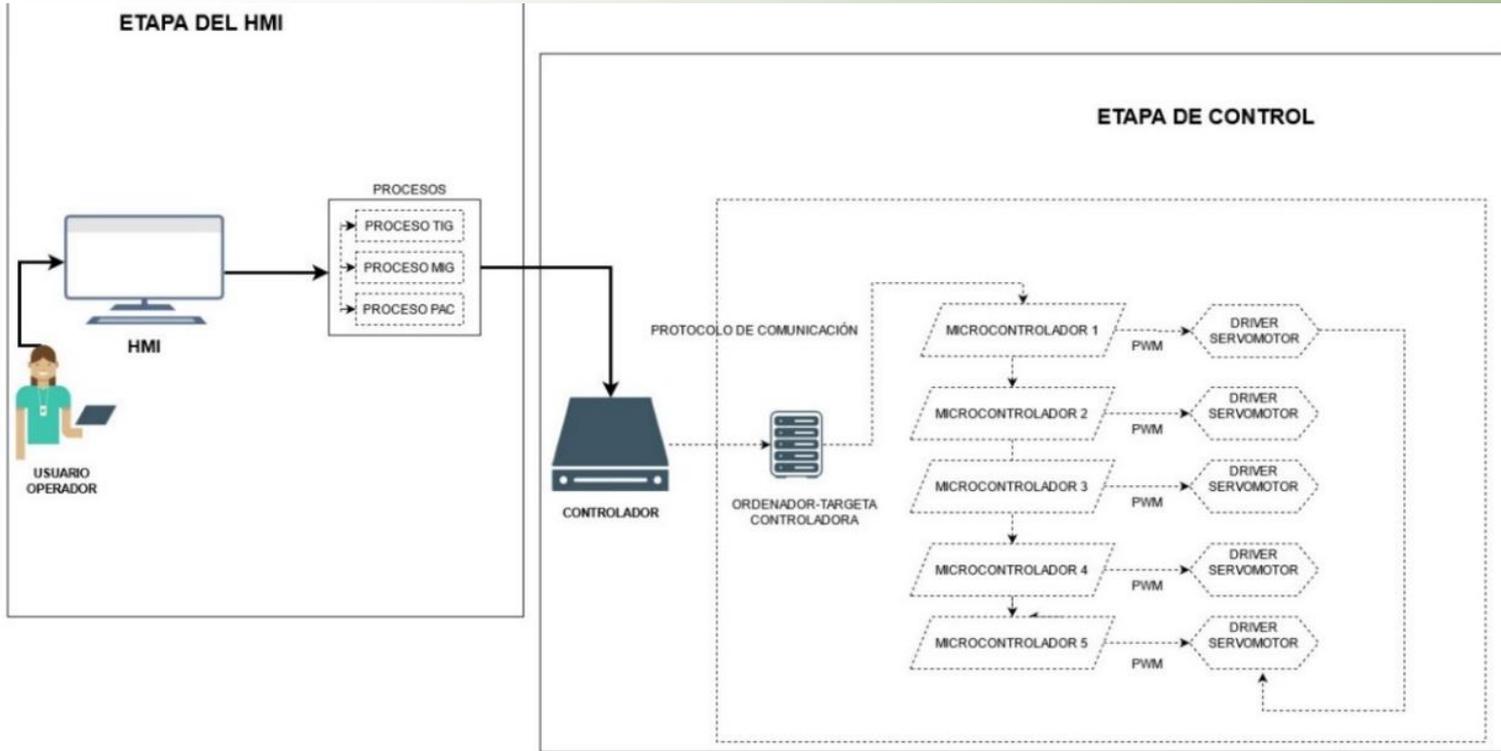
### Proceso de suelda MIG (Metal Inert Gas)

Este tipo de soldadura consiste en mantener un arco de electrodo consumible de hilo sólido y la pieza que se va a soldar. El arco y el baño de soldadura están protegidos mediante un gas inerte. El electrodo que usamos se alimenta continuamente por una pistola de soldadura.

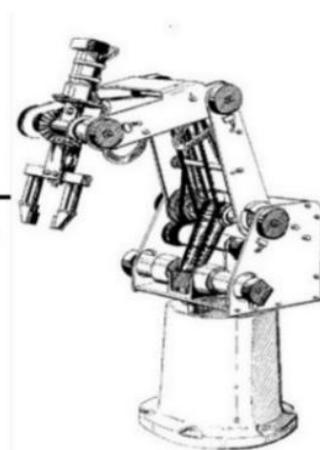
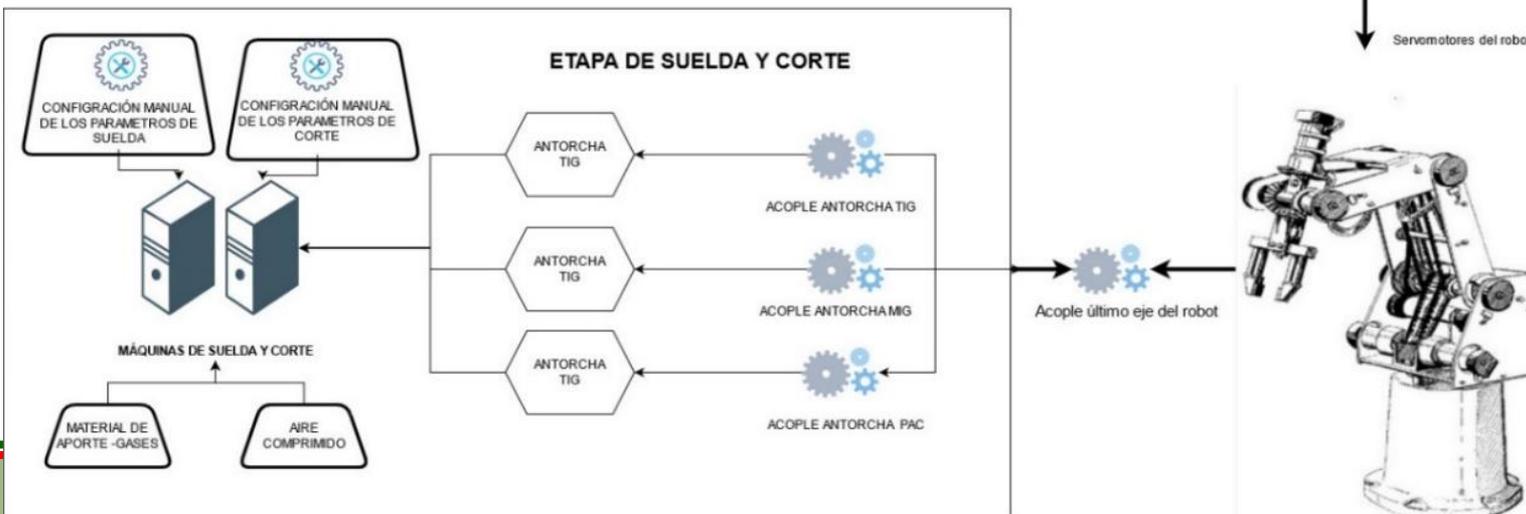
### Proceso de corte PAC

El proceso de corte con arco de plasma (Plasma Arc Cutting) separa metal empleando un arco, para fundir un área localizada de la pieza de trabajo, que al mismo tiempo elimine el material derretido con un chorro de alta velocidad de gas ionizado que sale por el orificio o la boquilla del soplete.

# ESTACIÓN DE TRABAJO PARA EL SISTEMA INTERACTIVO DE SUELDA Y CORTE ROBOTIZADO MULTIFUNCIÓN



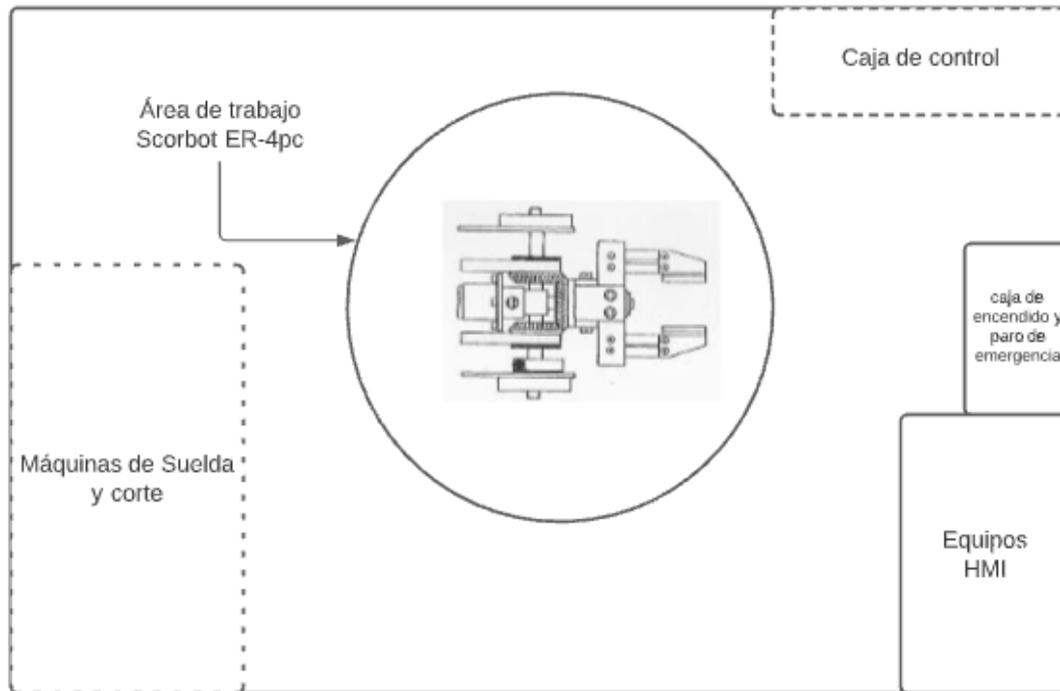
**ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN**



SCORBOT ER-4PC

## DISEÑO MECATRÓNICO

Diseño del espacio de trabajo del Scrobot Er-4pc para proceso de soldadura y corte.



## DISEÑO MECATRÓNICO

### Especificaciones de la mesa de trabajo

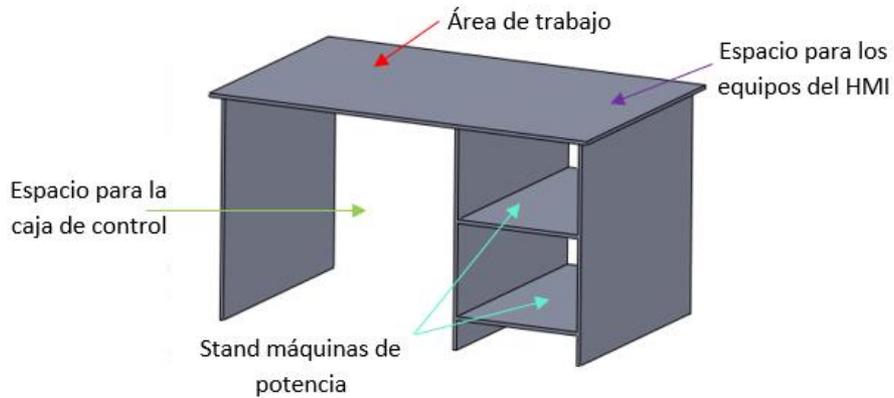
Se diseña una mesa de trabajo, en donde la altura desde el suelo debe cumplir con parámetros establecidos de la norma INEN 1641-1, Norma técnica ecuatoriana para el diseño de mesas de trabajo, en la cual especifica el rango de 600 a 800mm desde el piso, logrando que el usuario pueda operar sentado o de pie sin sentir fatiga.

La estructura de la estación de trabajo esta fabricado de materiales no inflamables y rígidos por estar sometidos a diversos esfuerzos, también debe ser diseñado para soportar cualquier peso externo que no involucre el proceso. El acabado de la mesa debe tener un aspecto mate, para minimizar todos los reflejos de luz, por lo tanto, la superficie de la mesa debe ser lisa facilitando la colocación de todos los equipos.

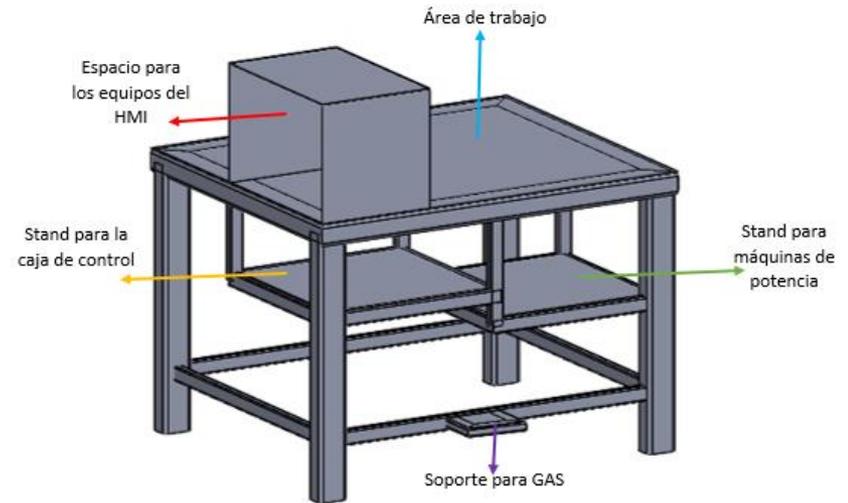
# DISEÑO MECATRÓNICO

## Mesa de trabajo

Primera propuesta de diseño

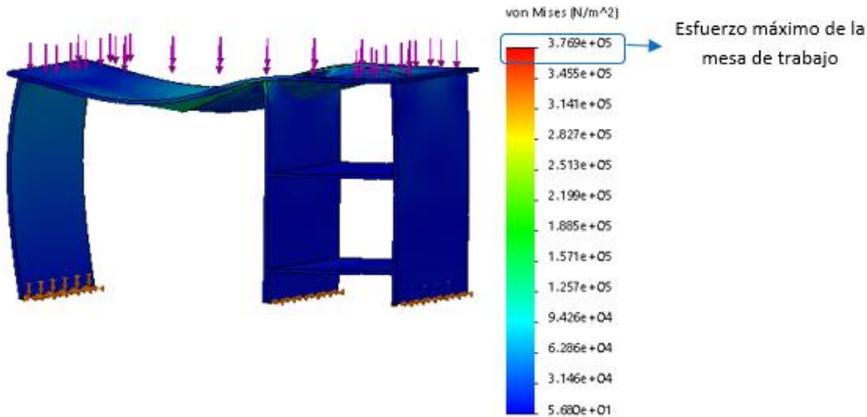


Mejor propuesta de diseño

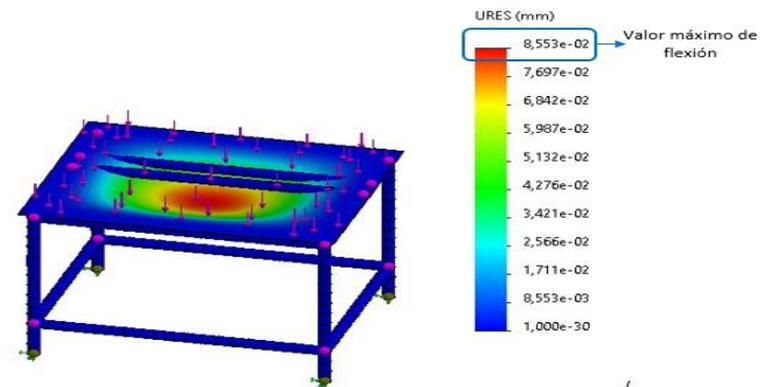
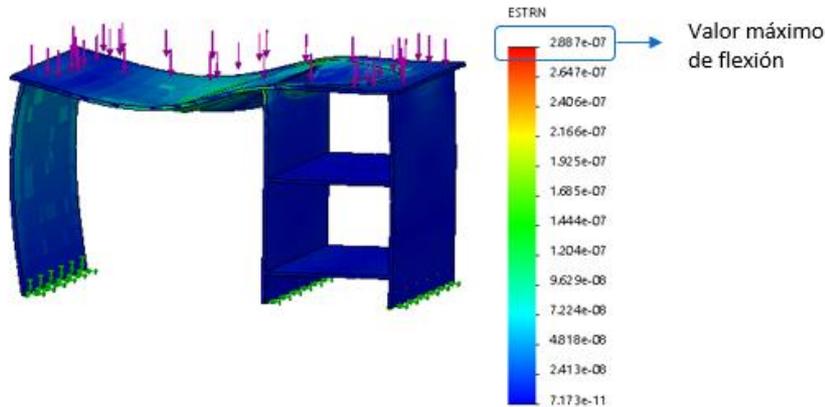
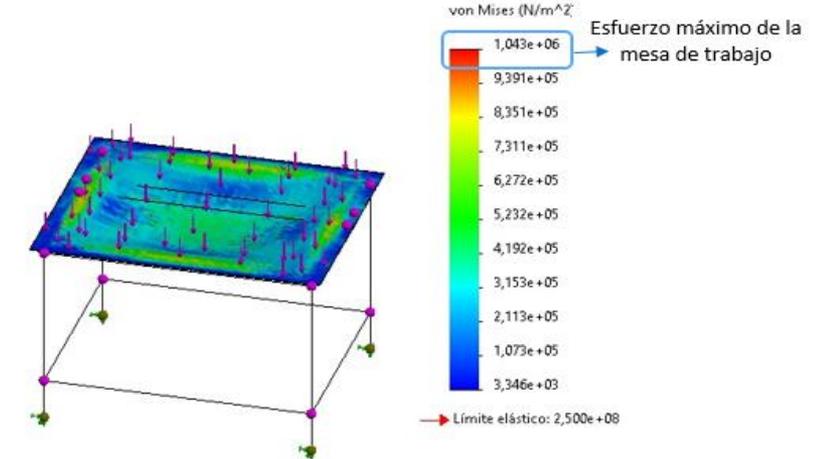


# VALIDACIÓN DEL DISEÑO POR SOFTWARE CAE

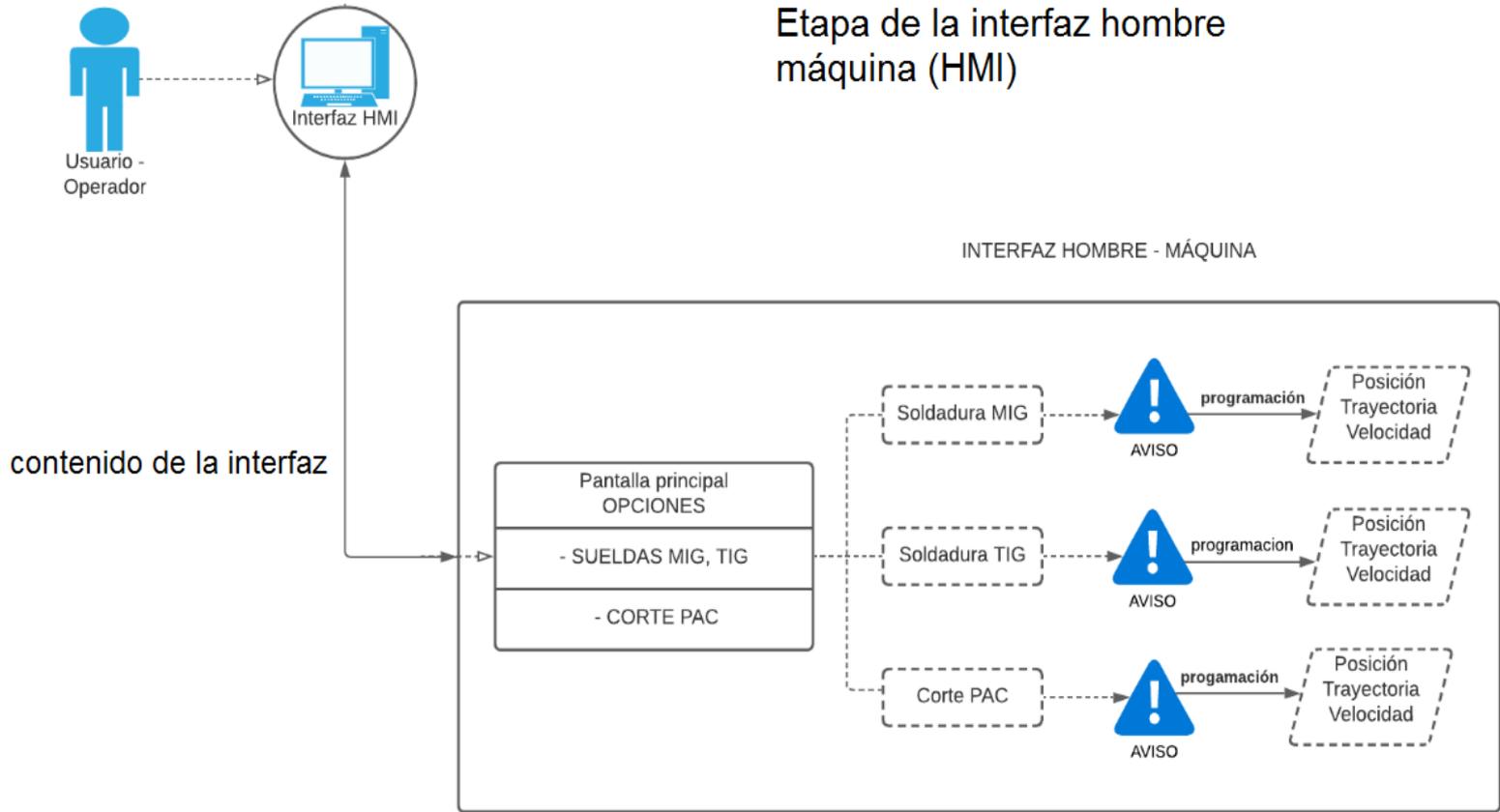
Primera propuesta de diseño



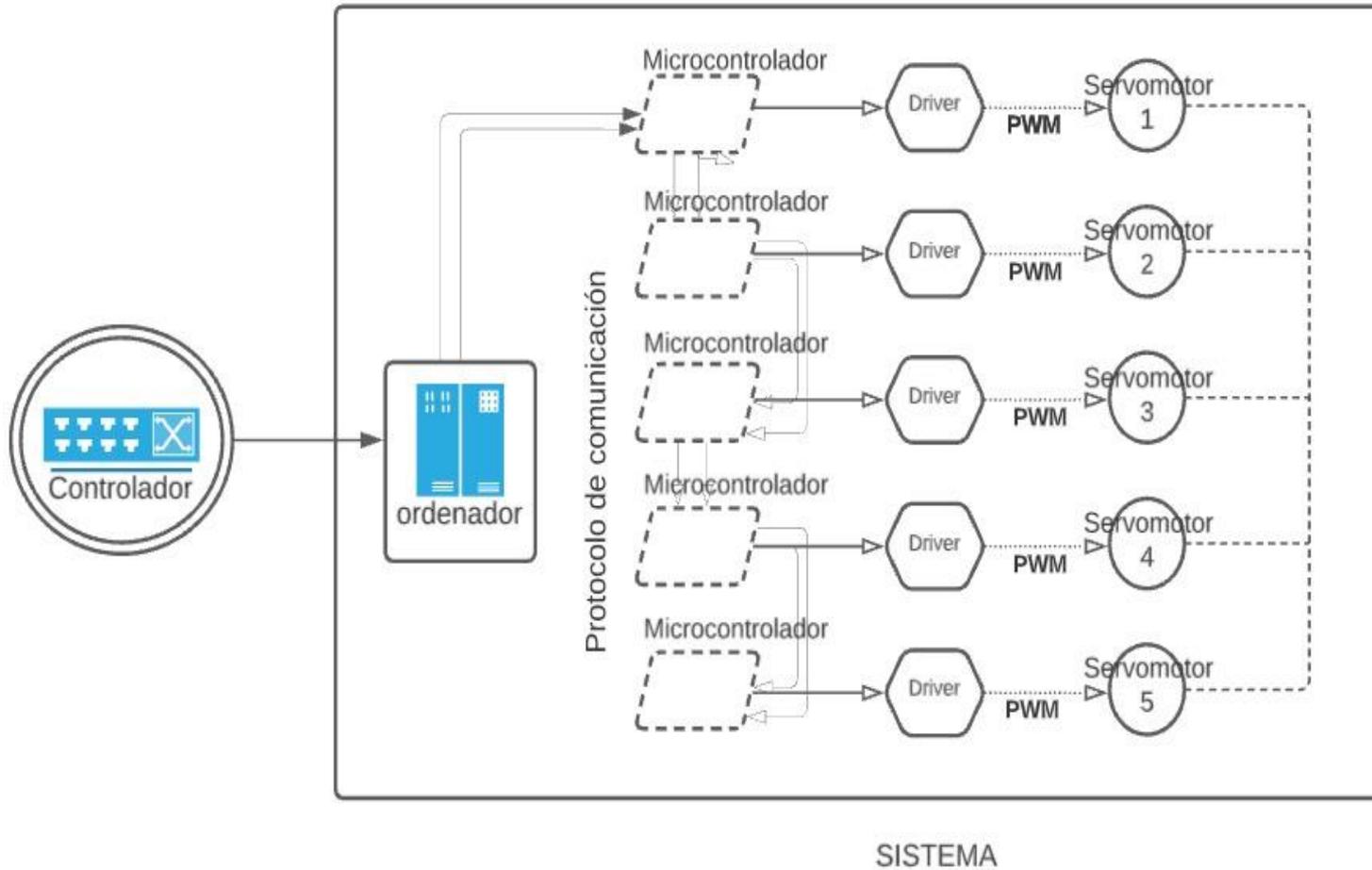
Mejor propuesta de diseño



# Diseño de la etapa para el desarrollo del HMI.

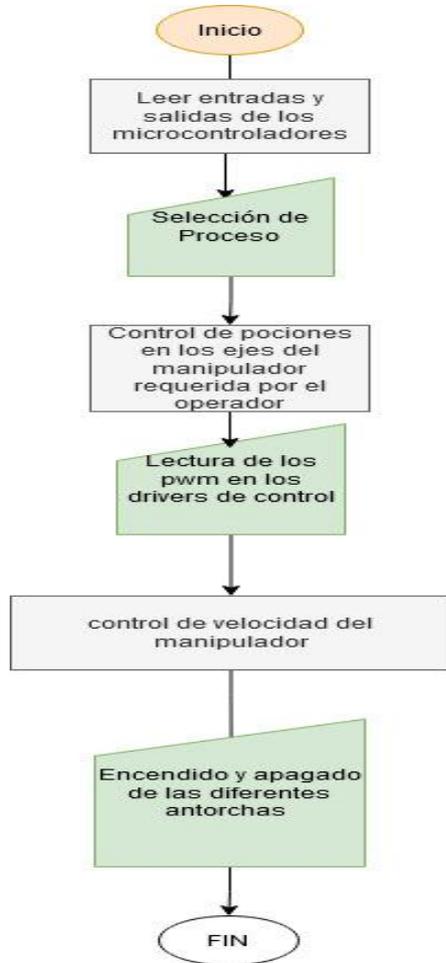


## Diseño de la etapa de control.

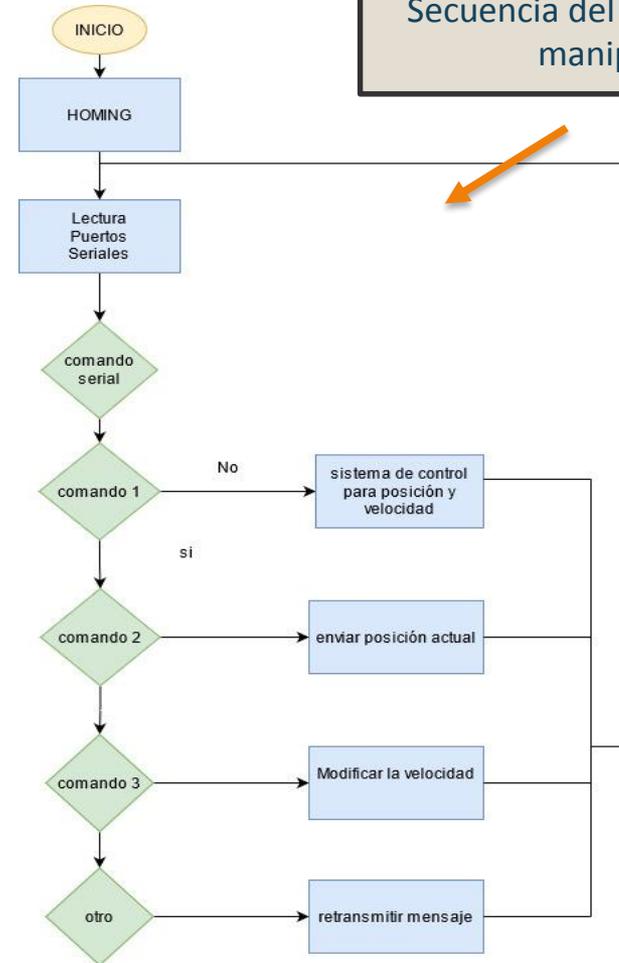


# Diseño de la lógica de programación para la etapa de control

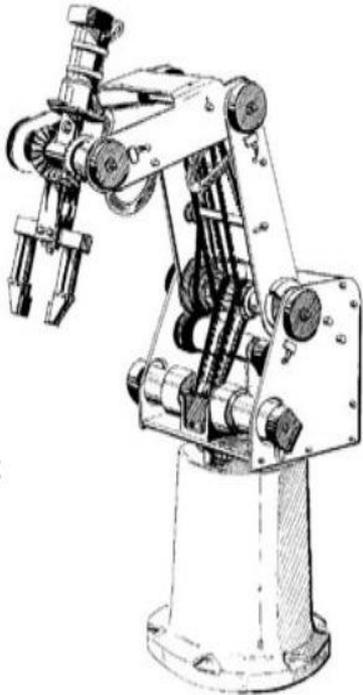
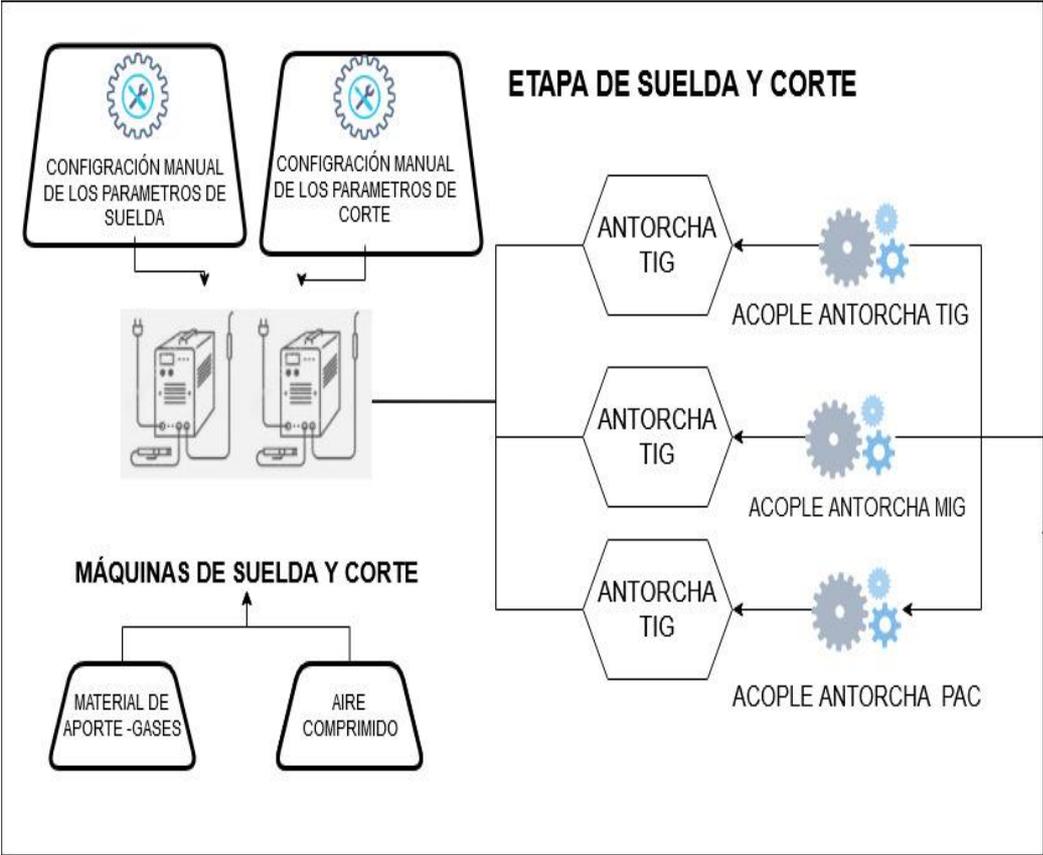
Programación de la Etapa de control



Secuencia del movimiento del manipulador



# Diseño de la etapa de suelda y corte en el sistema.



SCORBOT ER-4PC

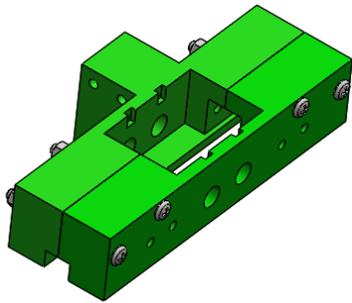


## Diseño de la etapa de suelda y corte en el sistema.

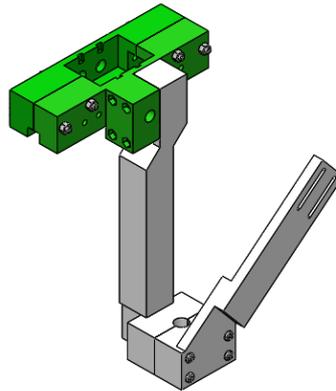
Se necesitan de distintos acoples tanto como en el último eje del manipulador como en las antorchas, los mismos que serán cambiados manualmente por el usuario, de acuerdo a las necesidades ergonómicas que estas demanden para que cumplan de manera correcta la función designada.

Cada uno de estos acoples deben ser implementados para que sostenga las diferentes antorchas, de igual manera ser capaz de resistir los diferentes esfuerzos a los que estarán sometidos en cada uno de los procesos de suelda y corte, en donde se toman en cuenta la temperatura, desgaste, fricción entre otras.

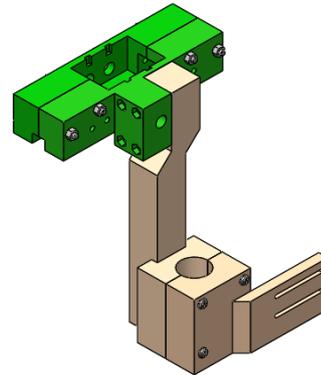
## Diseño CAD de los acoples mecánicos adaptados al quinto eje del manipulador Scorbot ER 4pc



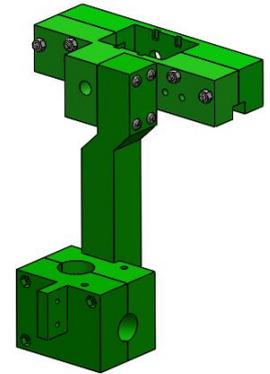
Acople eje



Acople antorcha Mig

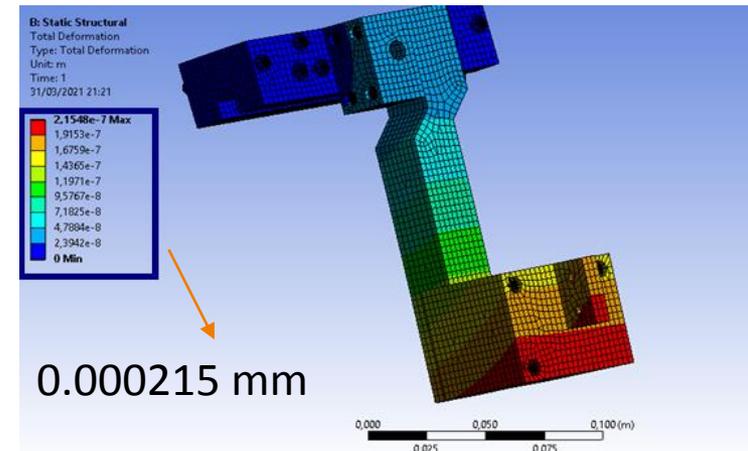
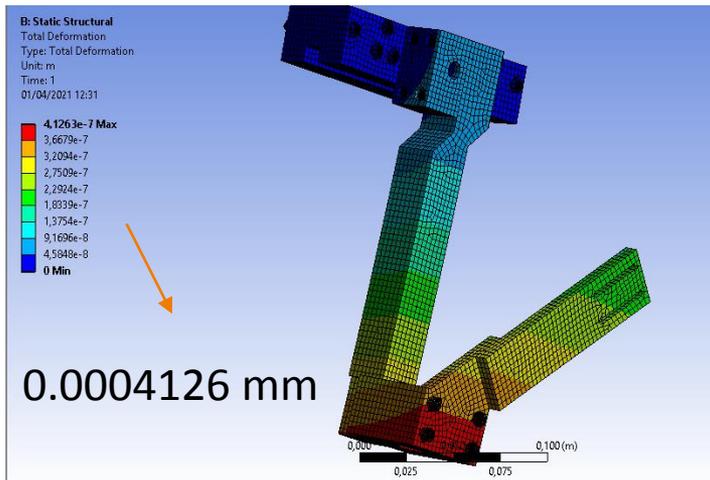
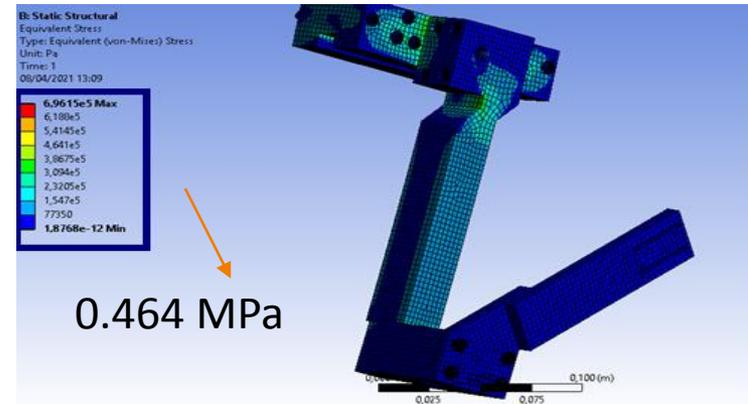
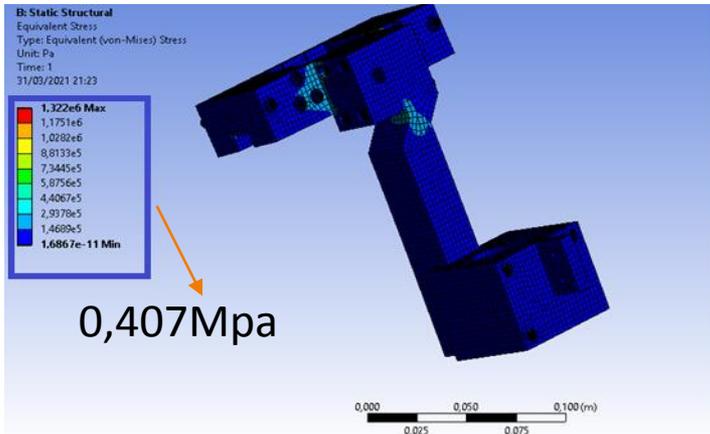


Acople antorcha Pac.



Acople antorcha Tig

# Validación Mediante software CAE de los acoples del sistema

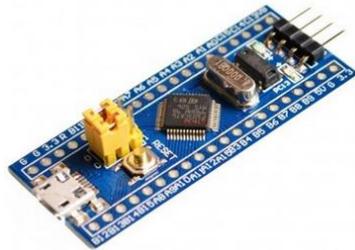


# SELECCIÓN DE COMPONENTES

Se utilizó el método de selección de elementos del libro y desarrollo de productos de (Ulrich), en donde se realizaron tablas de selección y evaluación y de acuerdo a los parámetros de diseño se eligió los siguientes componentes:



TIPO	PROCESADOR	PUERTOS	VELOCIDAD PROCESAMIENTO	COSTO [\$]	MEM. RAM
Rasp. pi 3	Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit Soc. @ 1.4GHz	CSI conexión de cámara. SI conexión de pantalla led y cuatro puertos USB 2.0.	300Mbps	75	1 GB



TIPO	VELOCIDAD DE COMUNICACIÓN	# ENTRADAS SALIDAS	MEMORIA	VOLTAJE DE OPERACIÓN
stm32 stm32f103	84MHz	50	256 KB	1,7v-3,6v

## SELECCIÓN DE COMPONENTES



TIPO	I[A]	V [V]	PMÁX.[W]	DIRECCIONALIDAD	COSTO[\$]
L298N	2	5	25	4 LED direccionales distribuidos de dos en dos por cada motor (bidireccional)	15



	SOLDADORA INVERTER MIG/ELECTRODO TIG IMET 8250/190
Costo	\$450
Peso	18Kg
Procesos	TIG/MIG/ ELECTRODO
Voltaje	110v/220v
Corriente	50A- 250A

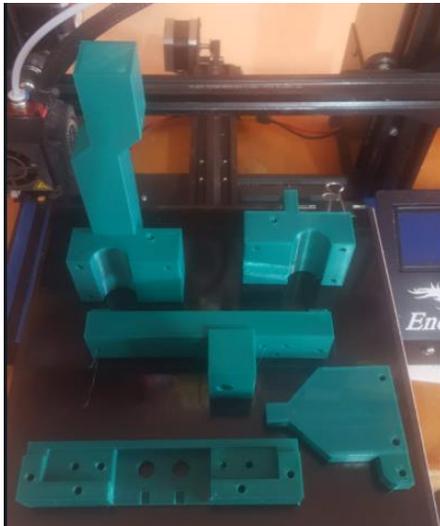


	INVERTER TIG ELECTRODO CORTADORA POR PLASMA IPET 812/170
Costo	\$430
Peso	18Kg
Procesos	TIG/MIG/ ELECTRODO
Voltaje	110v/220v
Corriente	50A- 250A



# CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA INTERACTIVO DE SOLDADURA Y CORTE ROBOTIZADO.

Manufactura de los acoples en las antorchas  
y el último eje del manipulador.



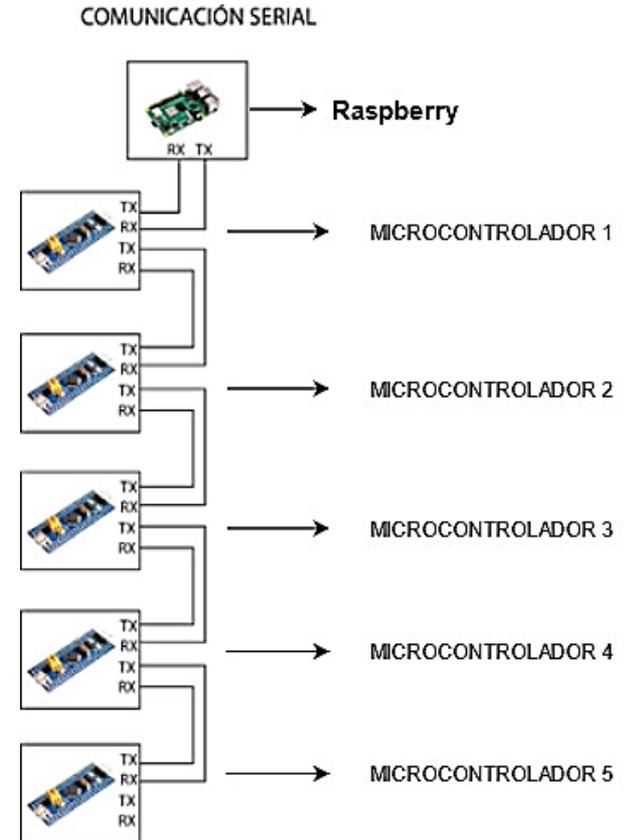
Construcción de la mesa de trabajo



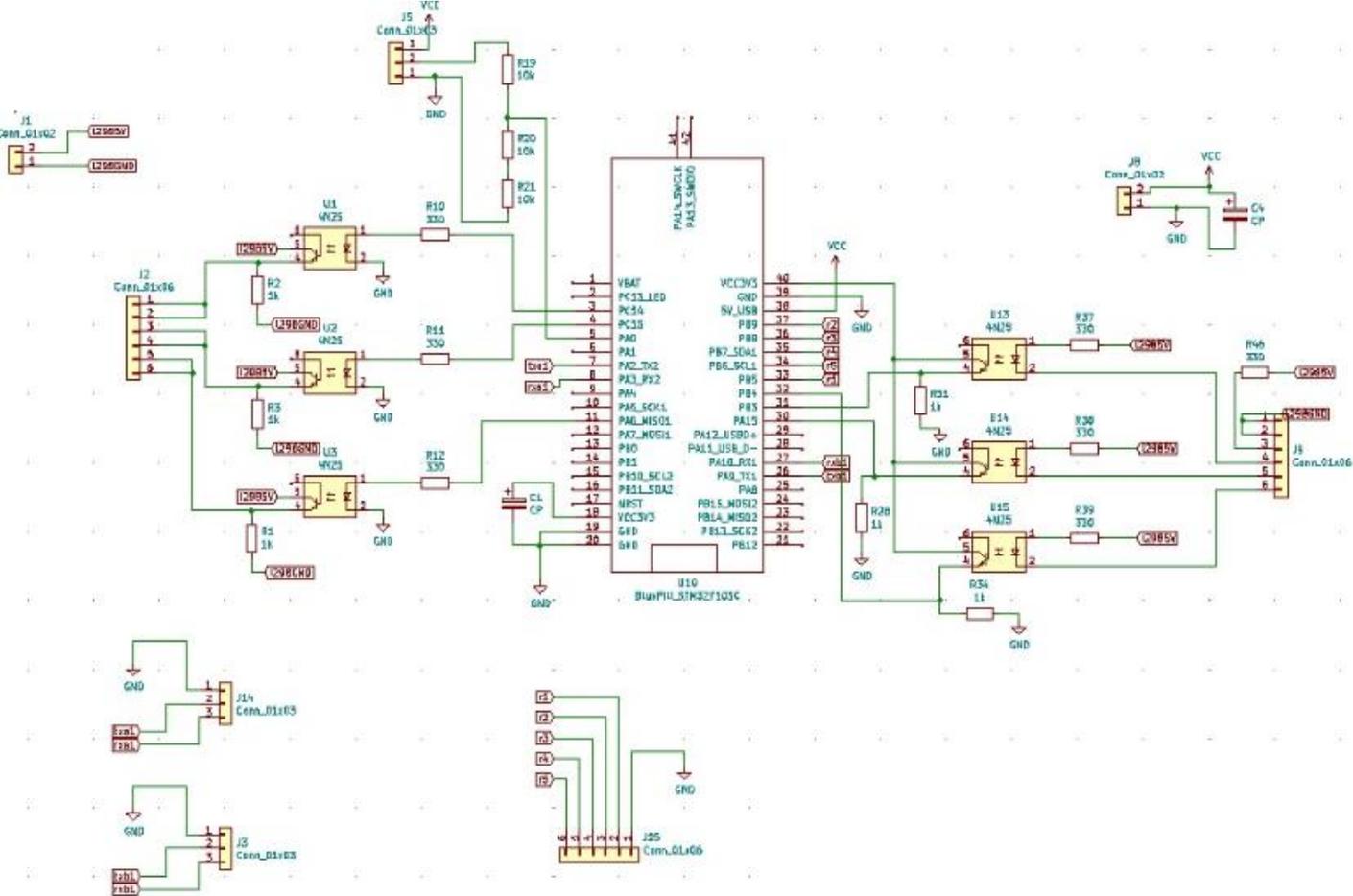
## Implementación de la etapa de control en el sistema.

### Protocolo de comunicación.

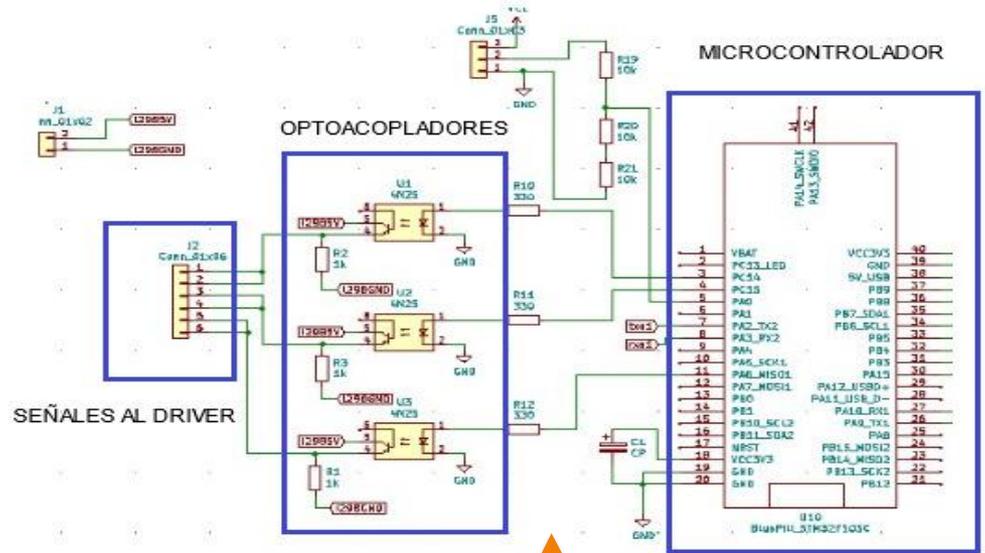
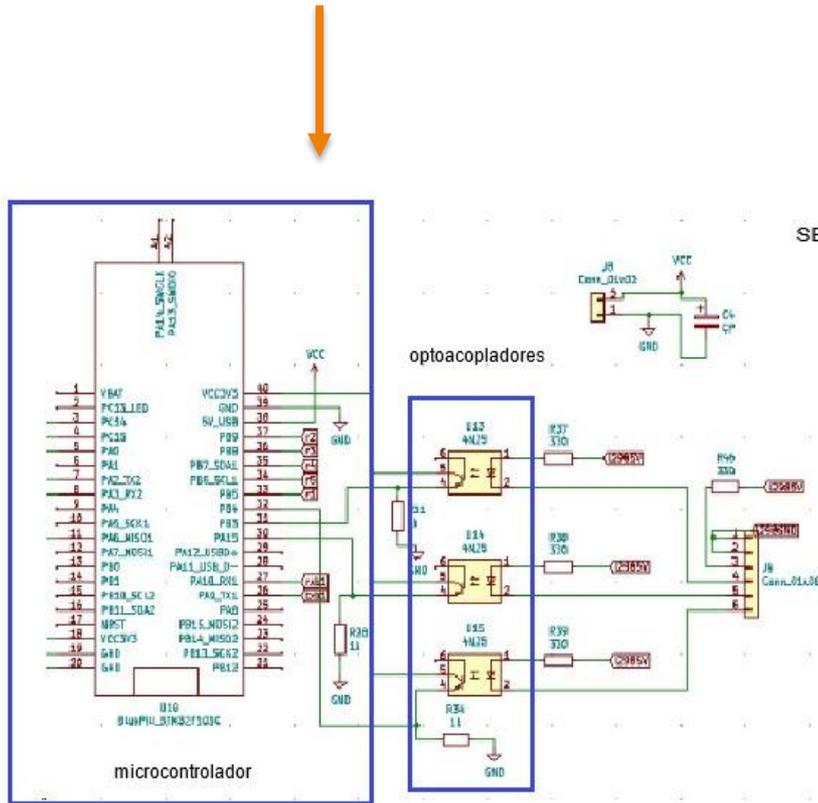
Se desarrolla el protocolo RS232 en donde la comunicación se ejecuta enviando información a cada microcontrolador de manera asincrónica mediante un solo hilo, es decir; que él envió de los bits son uno detrás de otro. La comunicación va desde la tarjeta Raspberry al microcontrolador 1, luego esta se comunica con microcontrolador 2 y así sucesivamente hasta llegar al microcontrolador 5.



# Circuito electrónico



## Diagrama de entradas del sistema.

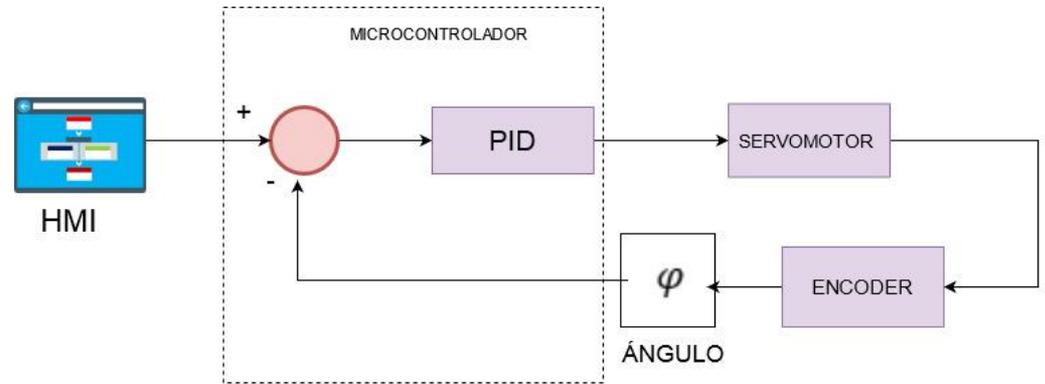


## Diagrama de salidas del sistema.

# Sistema de control

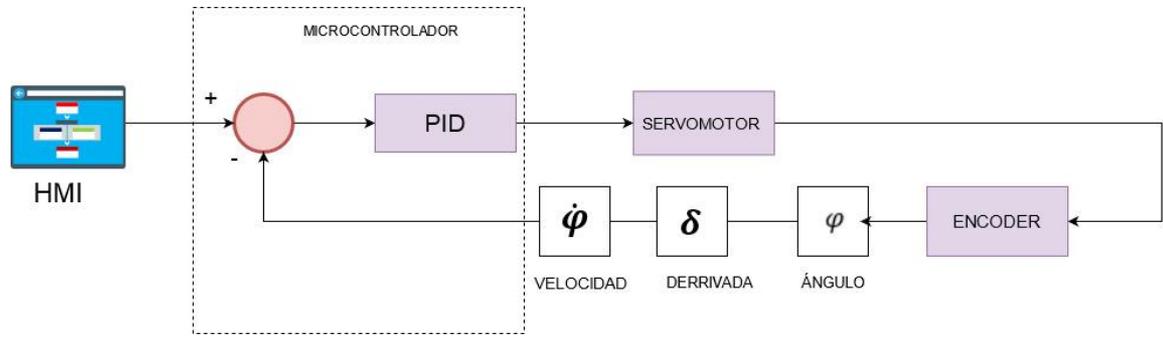
**Diagrama de bloques del sistema de control para el PID de posición.**

se aprecia el PID de posición, el mismo que está programado en el microcontrolador por medio de lenguaje en C, el set point depende de la posición a donde quiera llegar el operario variando el ángulo de cada eslabón leído por el encoder.



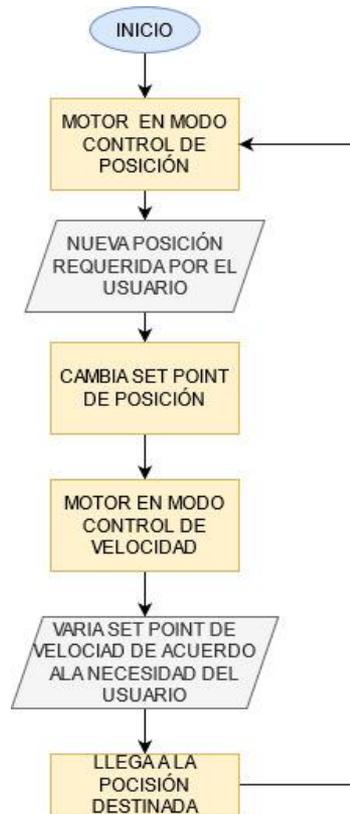
**Diagrama de bloques del sistema de control para el PID de velocidad.**

encuentra el PID de velocidad, que está programado en el microcontrolador, en esta ocasión se procede a realizar la derivada del ángulo, este dato servirá para variar la salida al motor de acuerdo al set point, que se obtiene de acuerdo a la velocidad que demande el operario desde la interfaz.

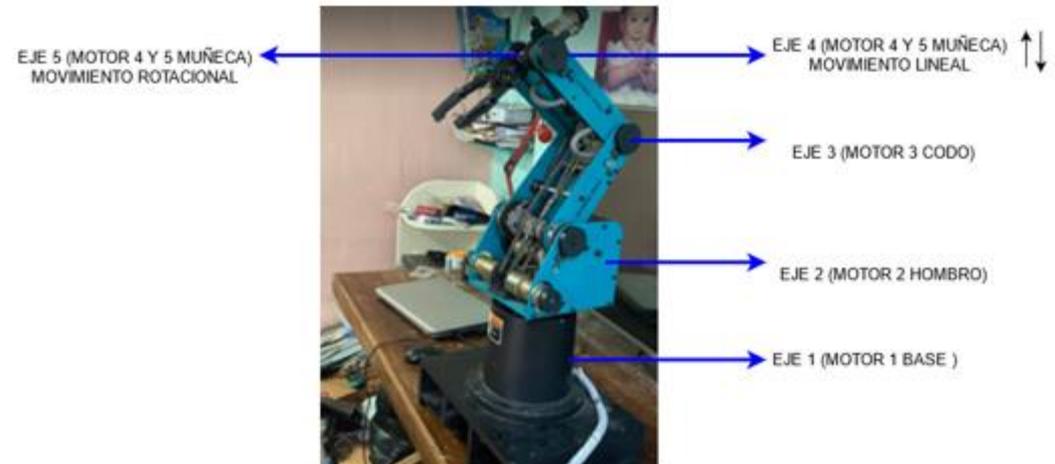


## Movimiento de los eslabones del manipulador

Diagrama de la interacción entre la velocidad y la posición en el sistema.



Eslabones del manipulador de acuerdo al movimiento y motores.



# Implementación del HMI.

Pantalla de inicio o principal del HMI.



imagen Scorbot ER-4PC

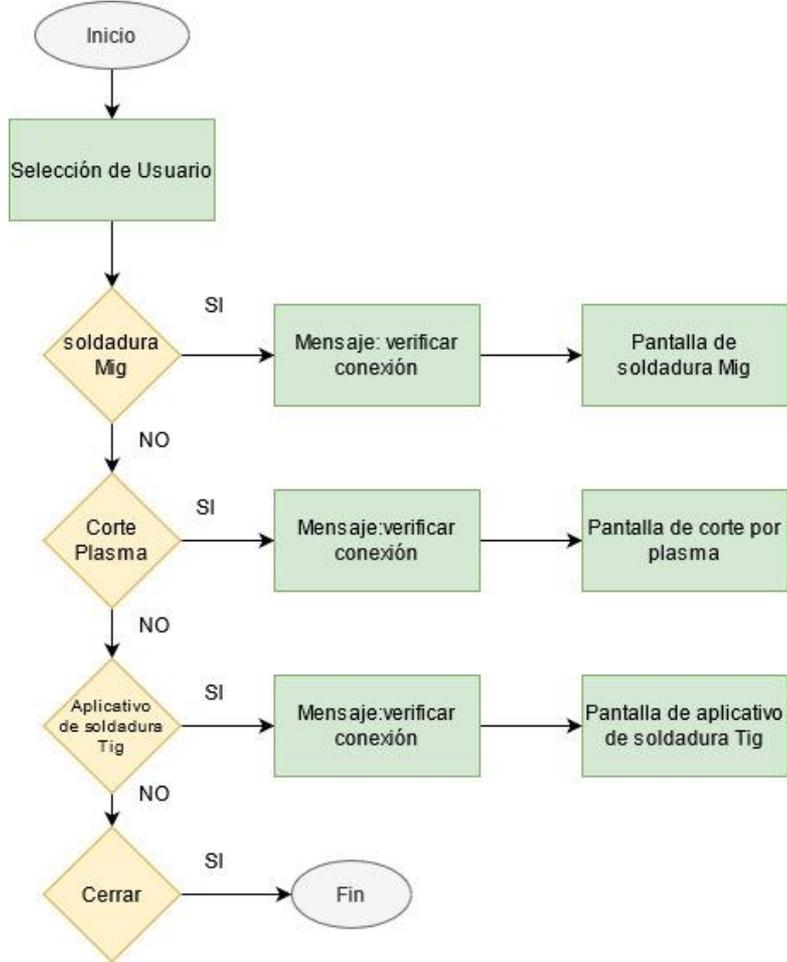
Nombre del sistema

boton proceso Soldadura MIG

boton proceso corte PAC

boton proceso aplicativo de soldadura TIG

Diagrama de flujo de la pantalla de inicio del HMI.



# Pantalla de configuración del proceso.

Control Ejes

Configuración por control de ejes

EJE 1	EJE 2	EJE 3	EJE 4	EJE 5
-	+	-	+	-
+	-	+	-	+
RefrescoEncoders		1		
Velocidad g/s		Movimiento grados		

Coordenadas Cartesianas

Configuración por control en coordenadas cartesianas (nueva pestaña)

EJE X	EJE Y	EJE Z
-	+	-
+	-	+
RefrescoEncoders		1
Velocidad mm/s		Movimiento mm

Botones de home

- Home eje 1
- Home eje 2
- Home eje 3
- Home eje 4

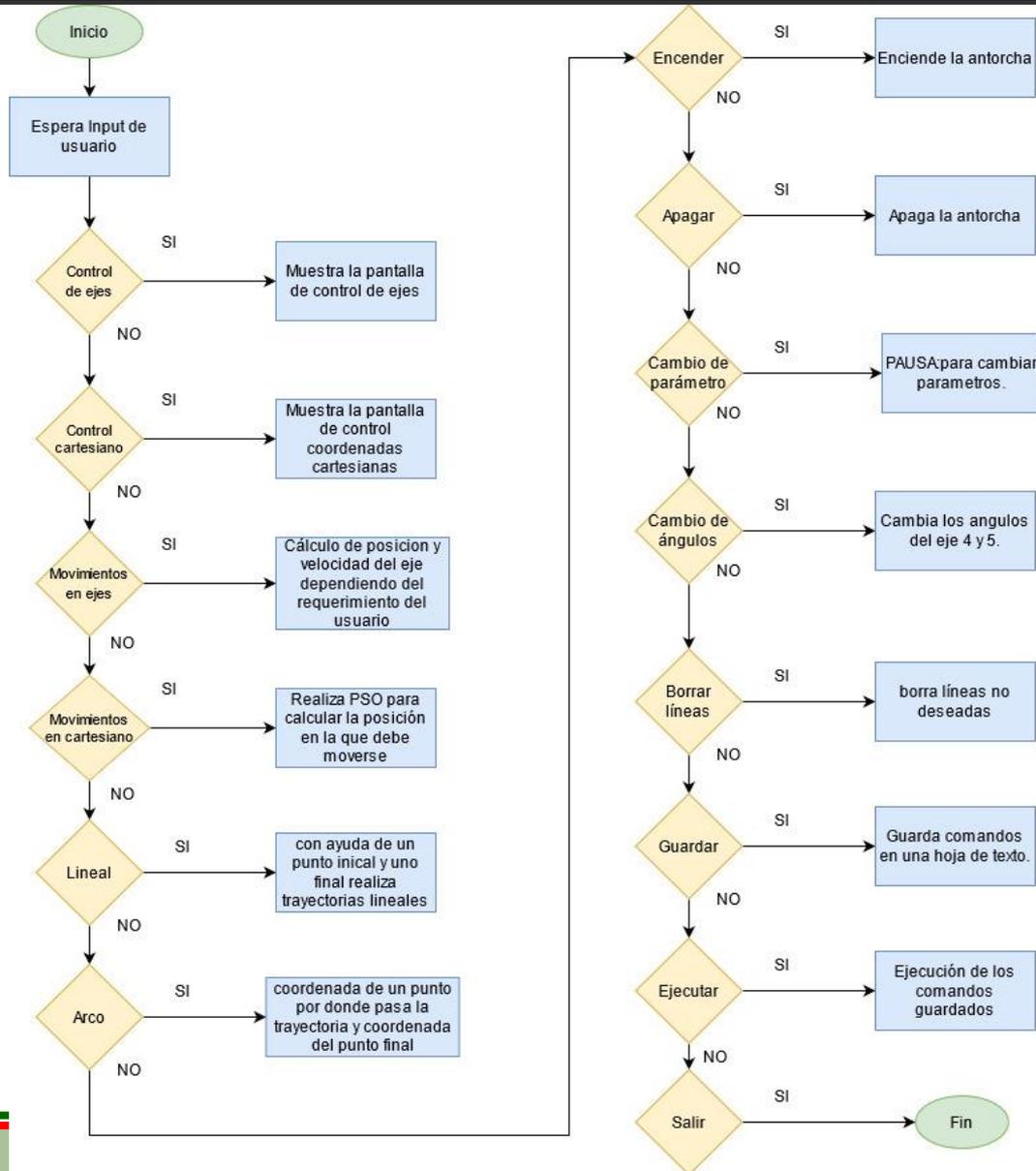
imagen de seguimiento del manipulador

Botones de programación

- +Lineal
- +Arco
- Encender
- Apagar

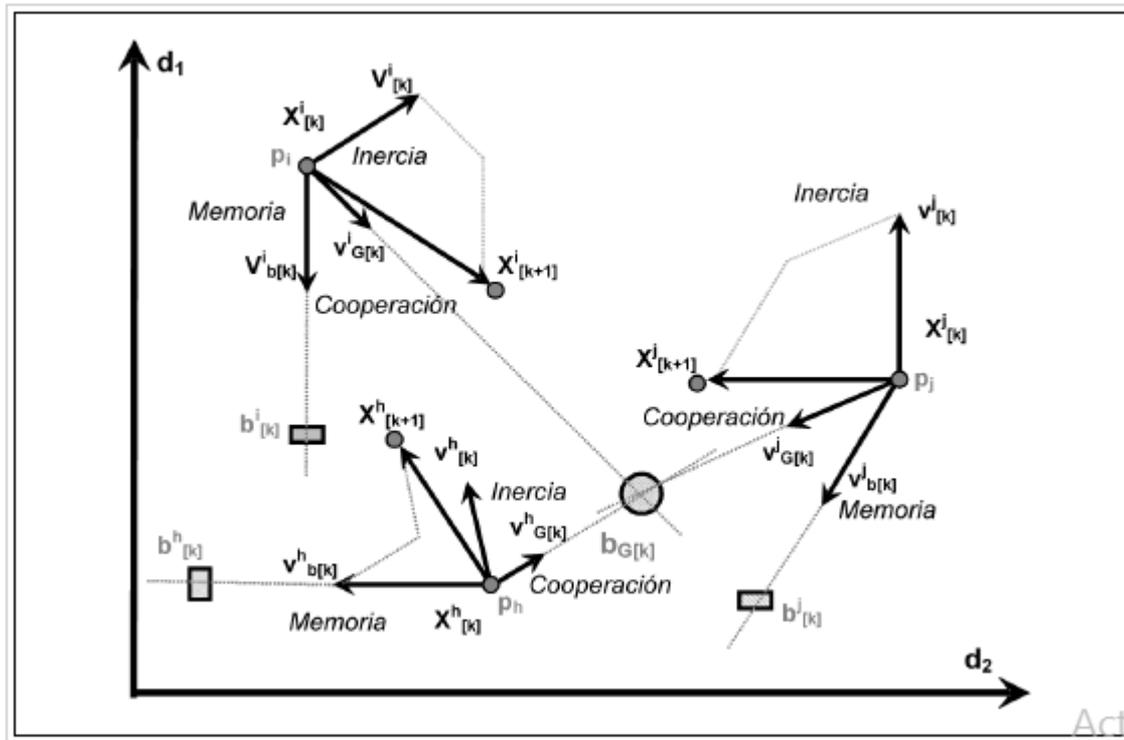


# Diagrama de flujo de la ventana de configuración en cada proceso del sistema.

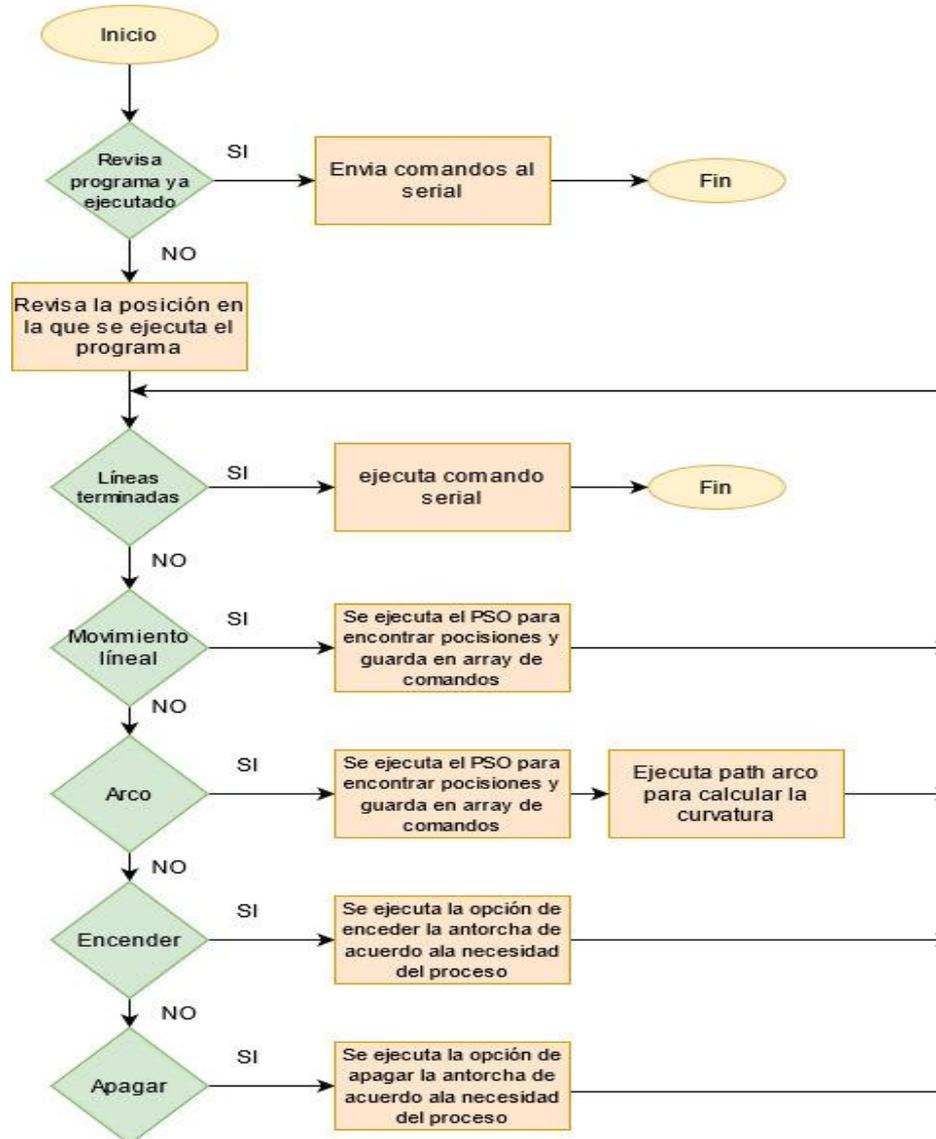


## PSO (optimización de enjambre por partículas)

Algoritmo que realiza un indefinido número de pruebas que ayuda a que la velocidad y posición del Scrobot interactúen entre si hasta llegar al punto destinado.



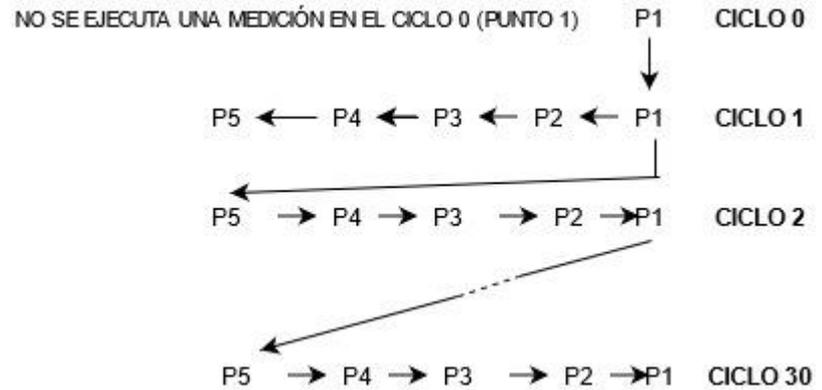
# Diagrama de flujo de la secuencia que cumple el comando de ejecución.



# PRUEBAS

## Pruebas de precisión y repetibilidad de posición Norma ISO 9283

Imagen de la secuencia para las pruebas de Repetibilidad y posición



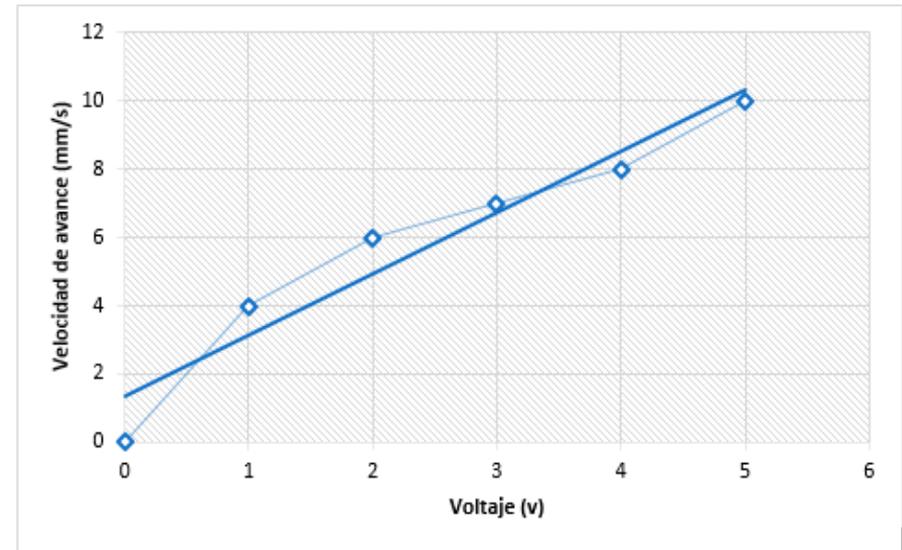
Puntos en el plano	Coordenadas cartesianas			
	Ejex (mm)	Eje y (mm)	Eje z (mm)	Grados
Punto 1	20	90	40	90
Punto 2	10	70	10	90
Punto 3	30	50	35	90
Punto 4	50	20	25	90
Punto 5	25	10	30	105

Tabla de valores de puntos determinados en el plano de trabajo del scrobot.

## Pruebas de proceso de suelda MIG.

### Regulación proceso suelda MIG

Número de cordón de suelda	1	2	3	4
IMAGEN				
• Tamaño del cordón (máquina encendida)	9,64 cm	9,95cm	9,75 cm	9,8 cm
• velocidad de avance	6 mm/s	10 mm/s	7mm/s	8mm/s
• velocidad de salida del alambre	5cm/s	3cm/s	3cm/s	4cm/s
• voltaje	5v	3v	4v	4v



## Pruebas de suelda.

Tabla de pruebas del proceso de suelda MIG.

Longitud Deseada	Número de prueba	Longitud del cordón alcanzado en el proceso de suelda en mm
100 mm	1	97,7
	2	97,1
	3	97,3
	4	97,8
	5	97,3
150mm	1	146,5
	2	147,3
	3	147,2
	4	147,3
	5	146,9
200mm	1	197,2
	2	196,2
	3	197,4
	4	197,5
	5	196,8

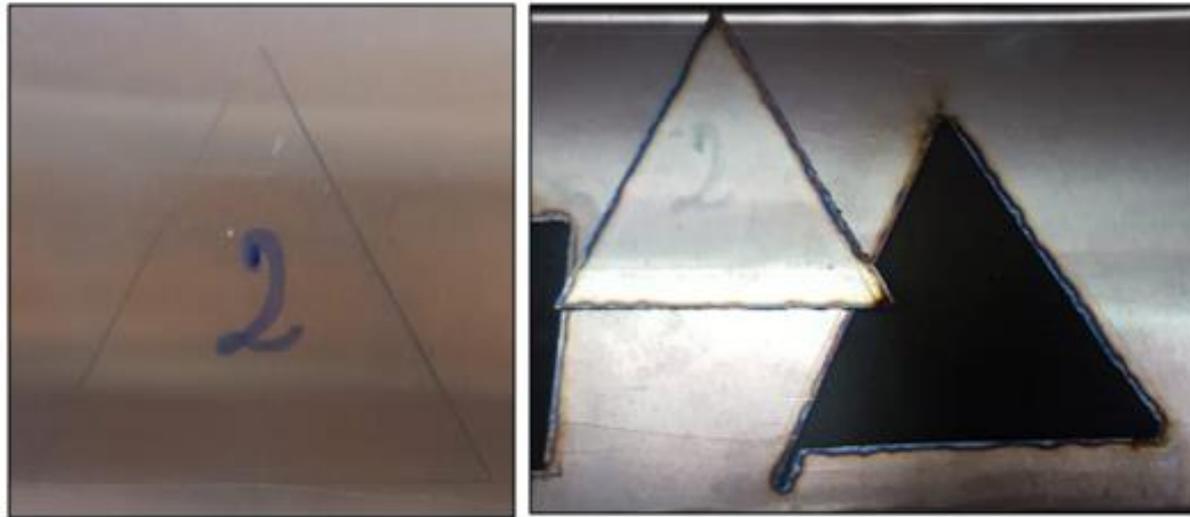
**Pruebas de corte PAC  
robotizado.**



**Cuadrado (70mm)**

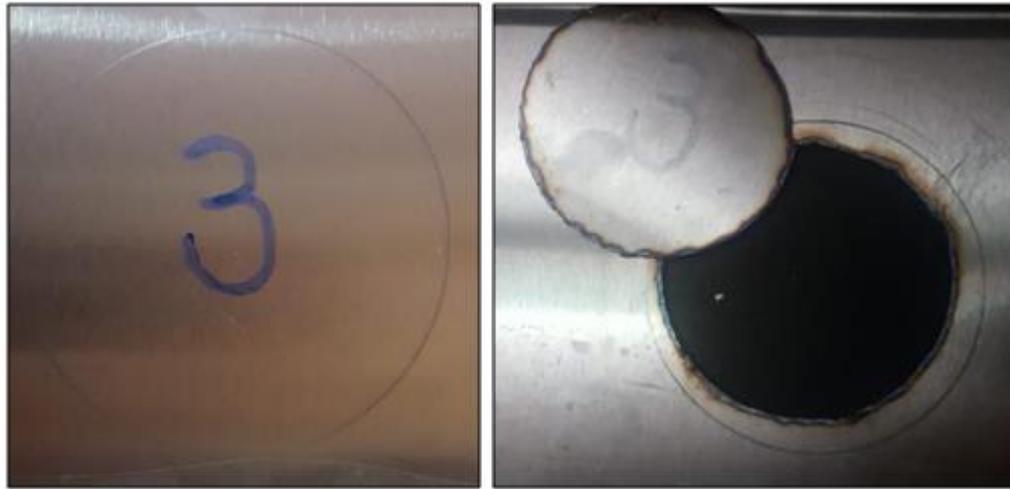
<b>Lados del cuadrado</b>	<b>Longitud</b>
Lado 1 (horizontal superior)	67,8 mm
Lado 2 (horizontal inferior)	67,9 mm
Lado 3 (vertical izquierda)	66,5 mm
Lado 4 (vertical derecha)	66,6 mm

## Triángulo 60 mm



Línea del triángulo (lado)	Longitud (mm)	Inclinación en grados
Línea inclinada derecha	57,3	59,8
Línea inclinada izquierda	57,36	60,02
Línea inferior	57,4	0

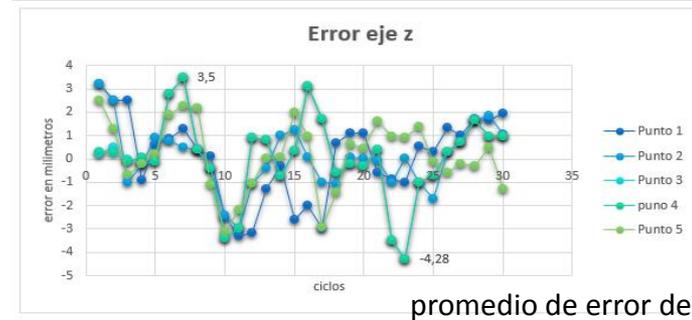
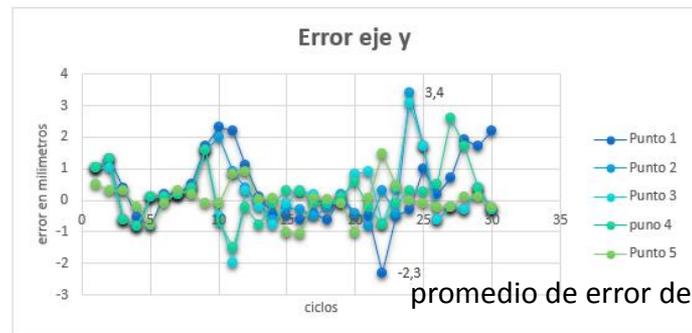
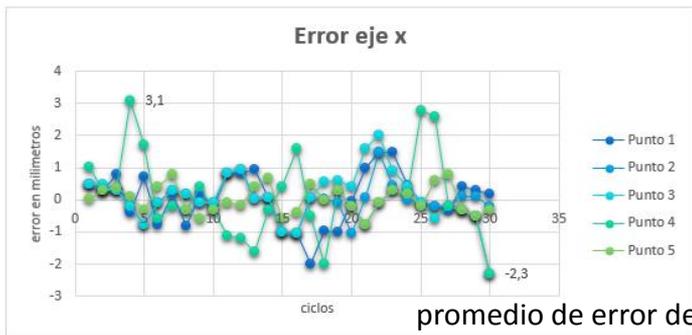
Círculo diámetro 108 mm.



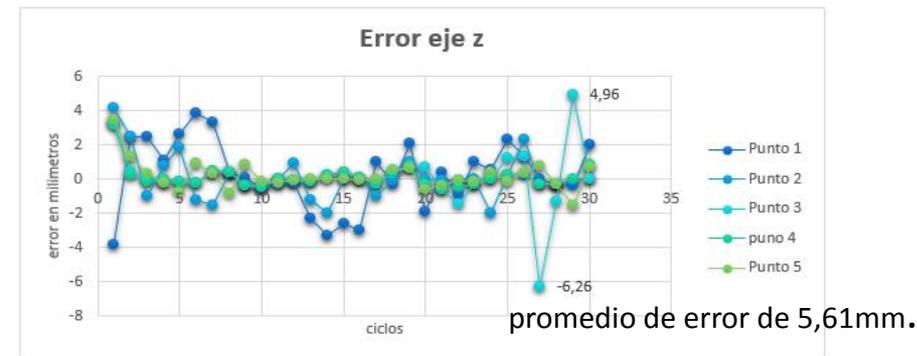
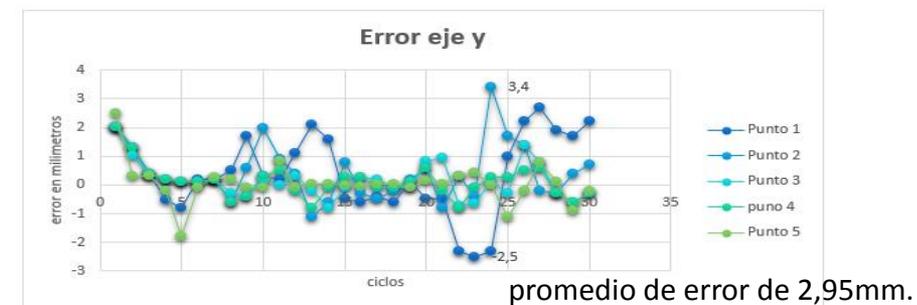
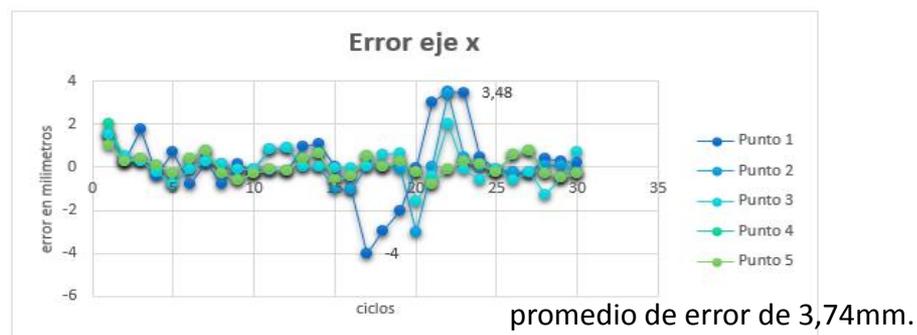
puede visualizar al lado izquierdo lo que el operador desea realizar y al lado derecho lo que el manipulador ejecuto, teniendo como resultado el corte de una circunferencia de diámetro 105,2mm.

# ANÁLISIS DE RESULTADOS

## SIN CARGA



## CON CARGA



## VALORES PROMEDIO DE PRECISIÓN Y REPETIBILIDAD DE POSICIÓN.

Puntos en el plano	Precisión en (mm)				
	Precisión eje x (Apx)	Precisión eje y (Apy)	Precisión eje z (Apz)	Precisión (App)	Repetibilidad (Rp)(mm)
Punto 1	0,242	1,907	-0,069	1,92	4,081
Punto 2	0,3086	-0,2726	0,8633	0,956	4,52
Punto 3	1,1646	1,16	0,983	1,91	5,06
Punto 4	1,5625	0,8026	0,979	2,01	4,5139
Punto 5	2,362	0,30	2,165	2,21	4,5106
<b>Promedio:</b>				<b>1,8012 mm</b>	<b>4,5371 mm</b>

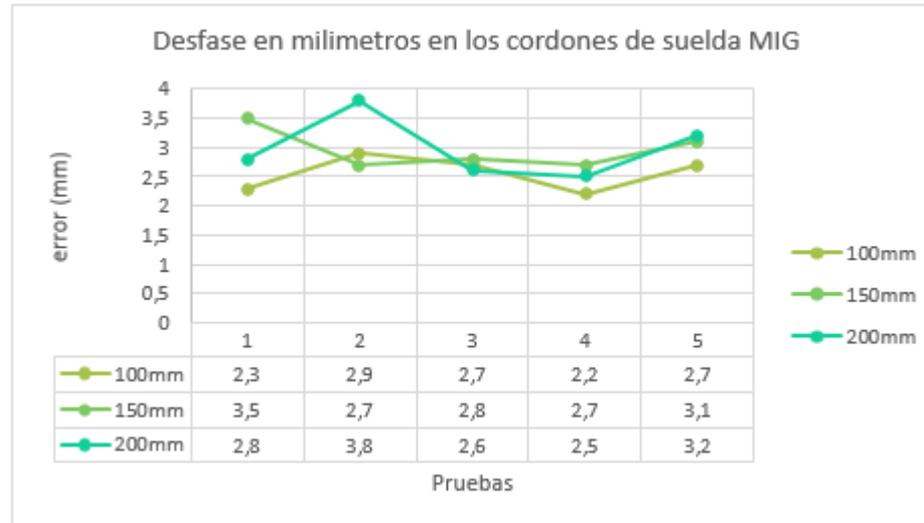
SIN CARGA

Puntos en el plano	Precisión en (mm)				
	Precisión eje x (Apx)	Precisión eje y (Apy)	Precisión eje z (Apz)	Precisión (App)	Repetibilidad (Rp)(mm)
Punto 1	0,908	2,64	1,885	3,375	5,081
Punto 2	1,242	0,827	2,0604	3,0015	4,5257
Punto 3	1,732	2,50	3,183	4,404	5,068
Punto 4	2,362	2,336	3,278	4,666	4,5139
Punto 5	1,362	2,049	3,66	4,414	4,5146
<b>Promedio:</b>				<b>3,972 mm</b>	<b>4,74 mm</b>

CON CARGA



## Análisis de las pruebas de soldadura MIG.



se aprecia la gráfica de dispersión, entre el error en milímetros con respecto a las pruebas realizadas, en donde se puede también observar en la parte inferior los valores que se obtuvieron cada prueba (100m, 150mm, 200mm) dando un valor promedio de error de 2.83mm equivalente al 2.05%.

## Análisis de las pruebas de corte PAC.

FIGURA	LADO	ERROR (mm)
cuadrado	superior	2,2
	Inferior	2,1
	derecho	3,5
	izquierdo	3,4
triángulo	inclinado izquierdo	2,7
	inclinado derecho	2,64
	horizontal	2,6
circunferencia	diámetro	2,8
<b>PROMEDIO</b>		<b>2,7425</b>

El resultado que se obtiene que de la tabla, es el valor promedio (2.74mm) del error al momento de ejecutar el proceso de corte, que al igual que en el proceso de suelda concuerda con los resultados de precisión en la posición, cuando se trabaja en vacío con carga.

# Conclusiones



En el presente proyecto se diseñó e implementó un sistema interactivo para solda y corte robotizado multifunción, utilizando software libre para el control del Scorbot ER-4pc, el mismo que obtuvo un valor promedio de error en sus ejes cartesianos  $x$ ,  $y$ ,  $z$  de (2,7mm,2,85mm,3,98mm) trabajando sin carga y (2,74mm, 2,95mm, 5,61mm) con carga respectivamente, concluyendo de esta manera que el sistema se encuentra en el rango permitido para un manipulador estudiantil refiriéndose a la norma ISO 9283.



Se logró determinar parámetros para realizar un control en robots cartesianos, dinámicas de movimiento de un manipulador de cinco ejes y diferentes máquinas de potencia para solda y corte, en donde en el presente proyecto se elaboró un sistema que posee un controlador con arquitectura abierta, cinemática inversa y equipos para soldadura y corte con tecnología inverter, logrando mejorar la velocidad de respuesta entre la interacción de estos parámetros.

# CONCLUSIONES



Se logró implementar una celda de soldadura y corte robotizada, en base a la norma INEN 1641-1, en donde se logró determinar el espacio de trabajo para el manipulador Scorbot para este sistema que es de 400mmx400mmx150mm, tomando en cuenta la separación con respecto a la caja de control de 1,22 m para proceso de suelda MIG y 2,5 m para corte PAC, logrando evitar las interferencias electromagnéticas producidas por las máquinas de potencia.



Se diseñó e implemento un control adecuado para procesos de suelda y corte robotizado, el mismo que posee valores promedio de posición y repetibilidad de (1,8012mm y 4,5371mm) sin carga y (3,972mm y 4,74 mm) con carga respectivamente, concluyendo que el controlador adquiere rangos admisibles para este tipo de robot cartesiano debido a su desgaste, basándose en la norma ISO 9283.



Se realizó una selección de elementos, basándose en el método que se describe en el libro de Diseño y desarrollo de productos de (Ulrich, 2013), mediante evaluación se escogieron los siguientes componentes: microcontrolador STM32 para la programación de los controles PIDS de cada eje, tarjeta Raspberry PI 3 para la interfaz gráfica y las máquinas inverter (gladiador) para los procesos de suelda y corte, interactuando entre sí, sin producir ningún tipo de perturbaciones.

# CONCLUSIONES



Se logró implementar acoples mecánicos con un esfuerzo máximo de 0,464 Mpa que se acondicionaron al quinto eslabón del manipulador Scorbot ER 4pc con las diferentes antorchas, para que el robot no tenga problemas al momento de realizar procesos de solda y corte, en donde a pesar de las perturbaciones producidas por el peso (0,95kg), el sistema ejecuta los procedimientos sin problemas.



Se implementó el proceso de solda MIG al sistema, en donde se alcanzó un valor promedio de error de 2.83mm equivalente a un 2.05%, en cordones de soldadura lineales sobre el eje x positivo, debido a que la antorcha acoplada al manipulador debe estar a 15° con respecto al plano de trabajo, también se logró establecer el corte PAC tanto lineales como arcos, con un valor promedio de error de 2,74 mm, determinando así que estos resultados se encuentran dentro del intervalo establecidos para procesos de solda y corte con manipuladores estudiantiles.



Se consiguió validar los resultados generados en las diferentes pruebas realizadas al sistema como: el control del manipulador (repetibilidad y precisión) y procesos de solda y corte, por lo tanto se logró certificar la hipótesis del proyecto a una significación del 5% utilizando el método de distribución normal estándar.

# RECOMENDACIONES



Debido al error promedio producido en que cada eje cartesiano del manipulador, se recomienda tomar en cuenta aquellos valores al momento de programar trayectorias en la interfaz de usuario, logrando generar una compensación en cada punto guardado mejorando el resultado final.



Para realizar cordones de soldadura a lo largo del eje de coordenadas en y, se sugiere acoplar un mecanismo que sea capaz de cumplir como un sexto eje en el manipulador, debido a que la antorcha debe estar a  $15^\circ$  con respecto al espacio de trabajo.



Se recomienda en el proceso de corte PAC, aislar los equipos que forman el sistema de tal manera que el controlador, el scorbobot y la máquina de potencia estén en tres diferentes ubicaciones y a una distancia aproximadamente de 2 m entre ellos.

# RECOMENDACIONES



Como trabajos futuros se sugiere cambiar los microcontroladores, por unos módulos más robustos, con una alta velocidad de respuesta y su propio sistema de control; para disminuir los errores promedios en cada uno de los ejes cartesianos, aumentando la precisión y repetibilidad de posición.



Se recomienda adaptar una Tablet, en donde se pueda visualizar el HMI de manera inalámbrica, logrando que el usuario pueda operar el sistema con más facilidad al momento de guardar los puntos de ejecución, ya que aumentará su visión panorámica con respecto al manipulador y su espacio de trabajo.



Se recomienda tener un ambiente ventilado por seguridad de los operadores o usuarios del sistema ya que al realizar corte o soldadura, los materiales en acción producen gases que pueden ser perjudiciales en la salud de los mismos.



# GRACIAS



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA