



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



Ingeniería Electromecánica

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE: INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA

DIGITALIZACIÓN DE UNA CELDA DE MANUFACTURA,
PARA SOLDADURA ROBOTIZADA DE PIEZAS
INDUSTRIALES UTILIZANDO FILOSOFÍA CAD/CAM

AUTORES: MUSUCA CHICAIZA, HENRY PAUL
TOAPANTA OBANDO, JOSÉ GUSTAVO

DIRECTOR: ING. FAUSTO ACUÑA

2020



Contenido



Resumen

- Actualmente la automatización de los procesos de producción en las industrias está en crecimiento, tal es el caso de la soldadura robotizada por arco con protección de gas GMAW, donde emplean brazos robóticos y una máquina de suelda especializada ejecutan procesos mediante la programación guiada o manual de los movimientos del robot; para realizar un relleno con soldadura el operario debe introducir manualmente las trayectorias lo que implica un gran consumo de tiempo y la generación de posibles errores, es por ello que se digitalizó una celda de manufactura, para la soldadura robotizada de piezas industriales utilizando la filosofía CAD/CAM, con el empleo el software RoboDK. Se diseñó modelos CAD de piezas industriales de los cuales se seleccionaron líneas y/o curvas para la generación automática de trayectorias, mediante la simulación virtual se verificó el funcionamiento correcto del robot y se logró la creación de programas en lenguaje KRL.



Planteamiento del Problema

- El control de los brazos robotizados se los realiza mediante enseñanza que conlleva al incremento en el tiempo de manufactura, ya que el robot sigue líneas de códigos punto a punto, en este proceso cabe recalcar que se generan errores humanos, que afectan directamente al trabajo que se está realizando, al robot y posiblemente al mismo operario generando heridas o hasta su muerte.
- Algunas piezas industriales presentan geometrías complejas, lo que dificulta la programación de las trayectorias de soldadura en el robot, por lo que es necesario la intervención del operario para que introduzca manualmente las líneas de programación lo que resulta muy tedioso y alarga el tiempo de producción.



Justificación

- La soldadura robotizada, mediante la filosofía CAD/CAM permitirá la eliminación de errores humanos y un ahorro de tiempo en la realización del proceso de mecanizado mediante el empleo de paquetes computacionales que crean códigos compatibles con el lenguaje de máquina, además de ello permiten una optimización en los movimientos del robot.
- El presente proyecto servirá para que las diferentes empresas industriales opten por los avances tecnológicos dentro de la automatización del proceso de soldadura, mostrando las ventajas que tendrían en la fabricación y recuperación de piezas industriales.



OBJETIVOS

Objetivo general

- Digitalizar una celda de manufactura, para la soldadura robotizada de piezas industriales utilizando filosofía CAD/CAM.



Objetivos específicos

- Investigar sobre los tipos, parámetros técnicos y las respectivas normas de los procesos de soldadura robotizada.
- Digitalizar la celda de manufactura para la soldadura robotizada de piezas industriales.
- Utilizar diferentes softwares CAD/CAM que permitan la generación de trayectorias para la aplicación de soldadura en piezas industriales.
- Ejecutar un protocolo de ensayos/pruebas para la verificación del proyecto.



Soldadura robotizada

- Repetividad
- Trabajos prolongados,
- Mayor velocidad de trabajo,
- Reducción de tiempos muertos,
- Mayor precisión,



Descripción de la celda

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga existe un Laboratorio de Robótica Industrial que cuenta con tres celdas de manufactura, que realizan aplicaciones específicas como son: soldadura, tareas de mecanizado y paletizado, que normalmente son utilizados para impartir clases y realizar prácticas.



Partes de la celda de soldadura robotizada



- a) Brazo robótico
- b) Equipo de suelda
- c) Mesa giratoria
- a) Panel protector

KUKA KR5 arc



a) TeachPendant

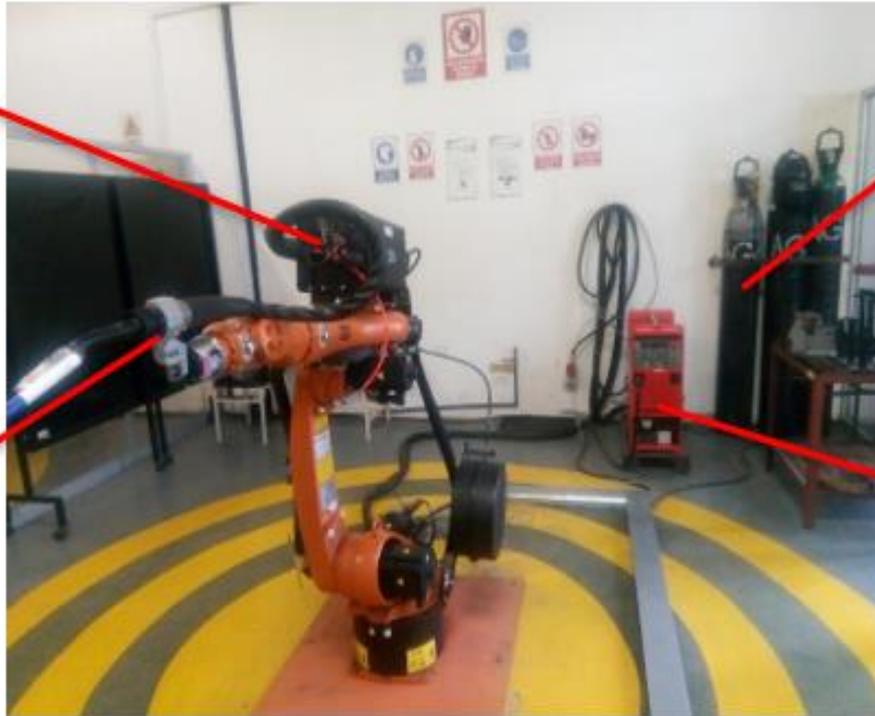


b) manipulador



c) unidad de control

Equipo de soldadura Fronius



- 1) Alimentador de alambre
- 2) Cilindro de gas con sistema de regulación,
- 3) Antorcha con haz de cables,
- 4) Fuente de alimentación.

Normas de seguridad

 ANSI/RIA R 15.06	Robots industriales y sistemas de robots	Requerimientos de seguridad
 CAN/CSA Z434		
 Dentro de Europa, tanto los robots como las células robóticas deben cumplir con la Directiva sobre maquinaria (2006/42 / EC). Para demostrar el cumplimiento de la Directiva sobre máquinas, se pueden aplicar los siguientes estándares.		
EN/ISO 10218-1	Robots y dispositivos robóticos	Requisitos de seguridad para robots industriales, Parte 1: Robots
EN/ISO 10218-2		Requisitos de seguridad para robots industriales, Parte 2: Sistemas de robot e integración
ISO/TS 15066		Robots colaborativos



WPS (Welding Procedure Specification)

- Es un documento técnico donde se describen las reglas y parámetros para realizar la soldadura.

 ESPE <small>UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS</small> <small>INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA</small>		WPS: ESPE - L.002							
		HOJA:	1 de 1						
ESPECIFICACION DE PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA (WPS) <i>(De acuerdo a AWS)</i>		EMISIÓN:	01 /10/2020						
		REVISIÓN:	1						
Nombre de la Compañía: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L		Identificación N°: 0000001							
Proceso(s) de soldadura: GMAW - Robotizada		Revisión: 01	Fecha: 01 -10- 2020						
Soporte POR N°(1): Precalificado		Elaborado por: Toapanta J, Musuca H							
DISEÑO DE LA JUNTA USADA		Tipo:	Manual : <input type="checkbox"/> Semiautomático : <input checked="" type="checkbox"/>						
Tipo: EN T		Máquina : <input type="checkbox"/>	Automático : <input type="checkbox"/>						
Simple : <input type="checkbox"/>	Doble: <input type="checkbox"/>	POSICIÓN							
Respaldo: Si: <input type="checkbox"/> No: <input type="checkbox"/>	Posición : PLANA (2F)								
Material de respaldo:		Progresión : EMPUJE							
Abertura de Raiz (R): tolerancia:	Dimensión cara raíz (pulg) f:	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS							
Ángulo de bisel(α):		Modo de transferencia (GMAW)							
Soldadura de respaldo Si: <input type="checkbox"/> No: <input type="checkbox"/>	Globular: <input type="checkbox"/> Pulverizado: <input type="checkbox"/> Corto circuito: <input checked="" type="checkbox"/>		Corriente: CA: <input type="checkbox"/> CCEP: <input checked="" type="checkbox"/> CCEN: <input type="checkbox"/> Pulsado: <input type="checkbox"/>						
METAL BASE		Otro: ---							
Especificación del material: TUB. CUADRADO NTE INEN 2415		Electrodo de Tungsteno (GTAW): N/A							
Tipo o Grado : J 403		Tamaño: N/A							
Esesor (T1) : 1.2 mm	Filete : ---	Tipo: N/A							
Diámetro (tubo) :		TÉCNICA							
METAL DE APORTE		Arastre u oscilación: EMPUJE							
Especificación AWS: A5.18		Pasada simple o múltiple (por cara): Simple							
Clasificación AWS : ER70S-6		Número de electrodos : ---							
Nombre Comercial : ESSEN FB 2 IG		Espaciado de electrodos: ---							
PROTECCIÓN		Longitudinal: ---							
Fundente: N/A	Gas: <input checked="" type="checkbox"/>	Ángulo: ---							
Composición del Gas : CO2 al 80 % - AR al 20 %		Distancia de contacto del tubo a la pieza de trabap: 12mm							
Fundente-electrodo (clase) : N/A		Forjado : ---							
Ratío de alimentación : 12 (l/min)		Limpieza: cepillado							
Tamaño de la copa :									
PRECALENTAMIENTO		TRATAMIENTO TÉRMICO POST SOLDADURA							
Temperatura de precalentamiento, mínima: Ambiente (18°C)		Temperatura: N/A							
PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA									
Pase (s)	Proceso	Metal de aporte		Corriente		Voltaje (V)	Velocidad de avance (mm/s)	Detalles de la Junta	
		Clase	Diám. (mm)	Tipo y polaridad	Amperaje (A)				
1-n	GMAW	ER70S-6	0.9	DC	100	18	200	1.2mm	1.2mm



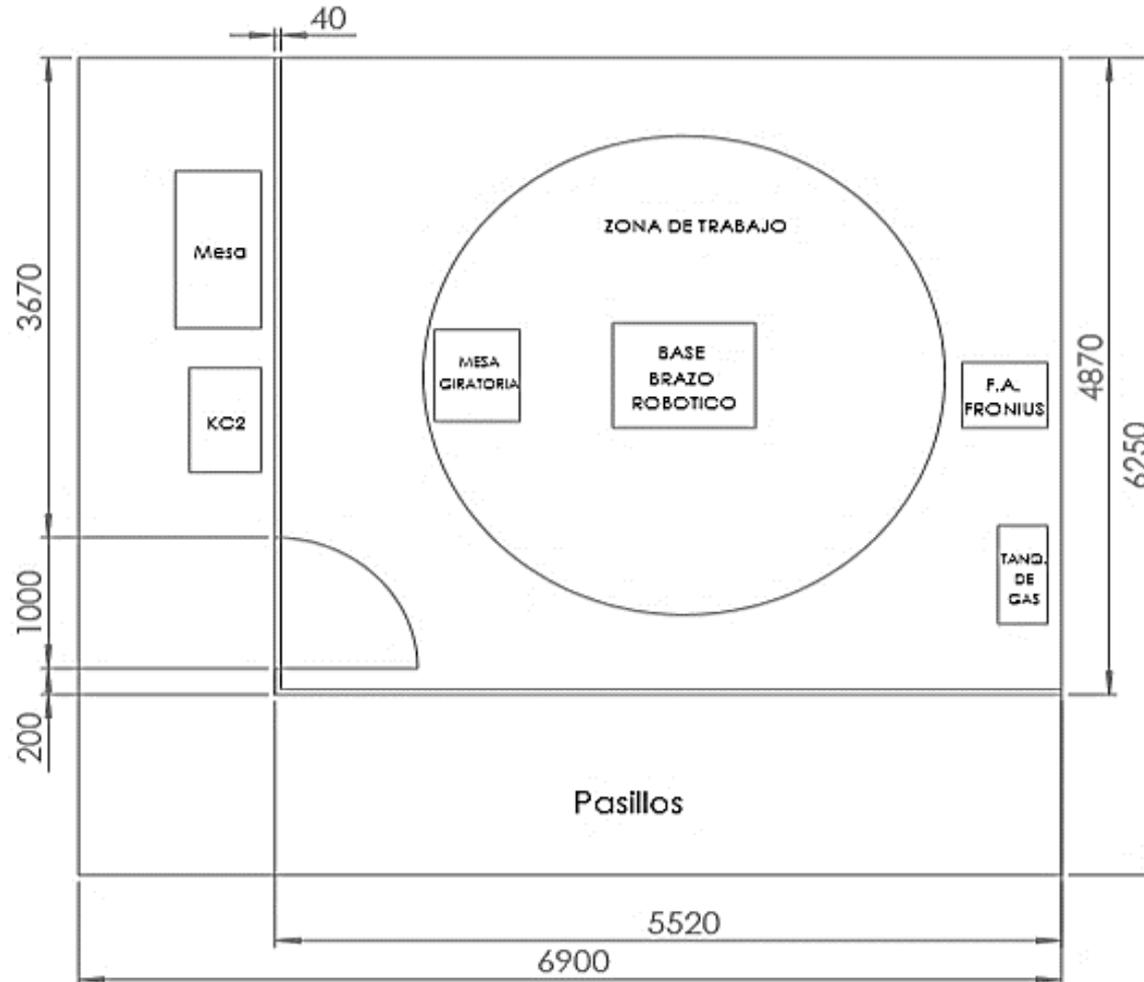
Alternativas de solución

Requerimientos	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Simulación y programación fuera de línea	Si	Si	Si
Generación de trayectorias complejas de soldadura	No	Si	Si
Incorporación de un post – procesador	No	Si	Si
Compatibilidad con KUKA KR5 ARC	Si	Si	No
Generación de códigos con extensión (SRC/JAVA/DATA)	Si	Si	No
Compatibilidad con el controlador CR2	Si	Si	No

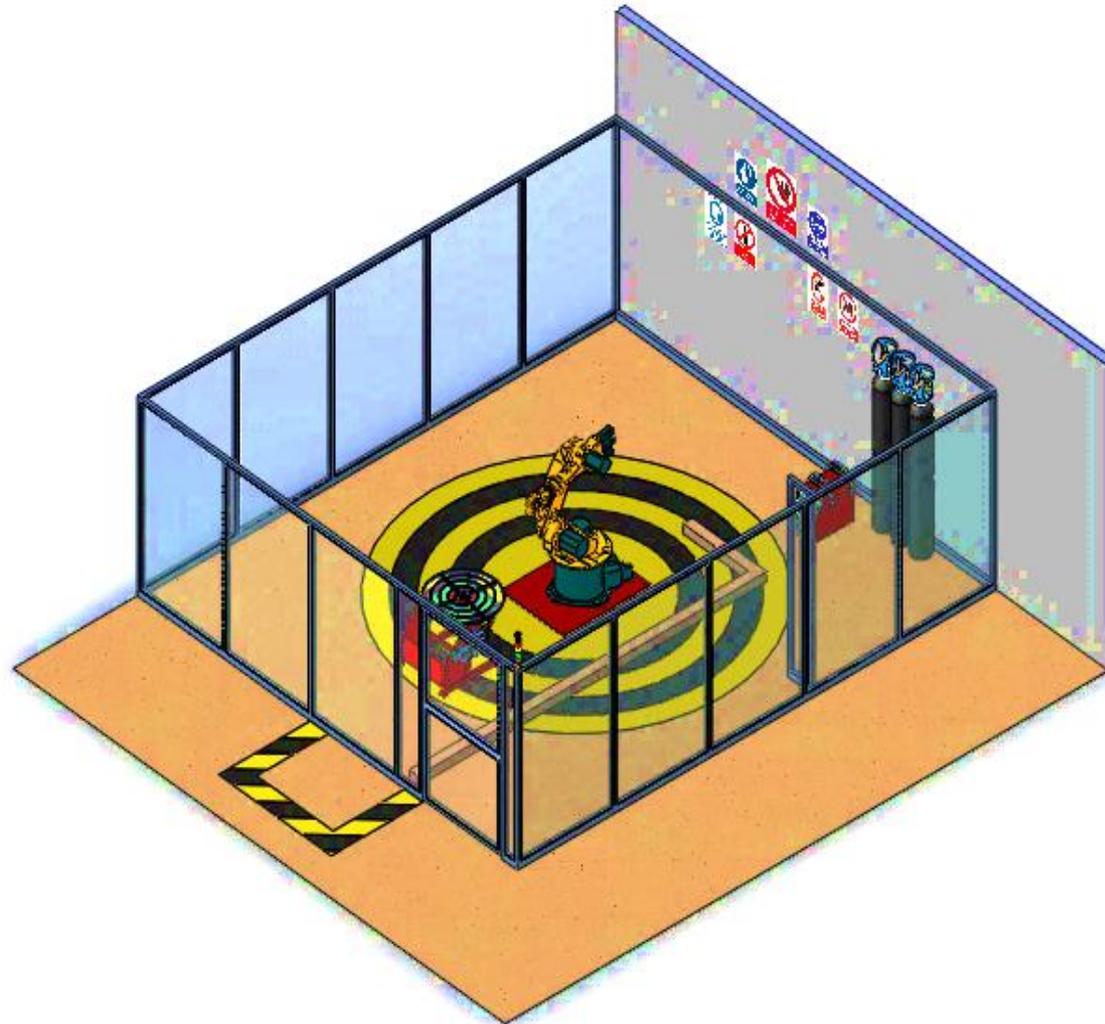


Digitalización de la celda

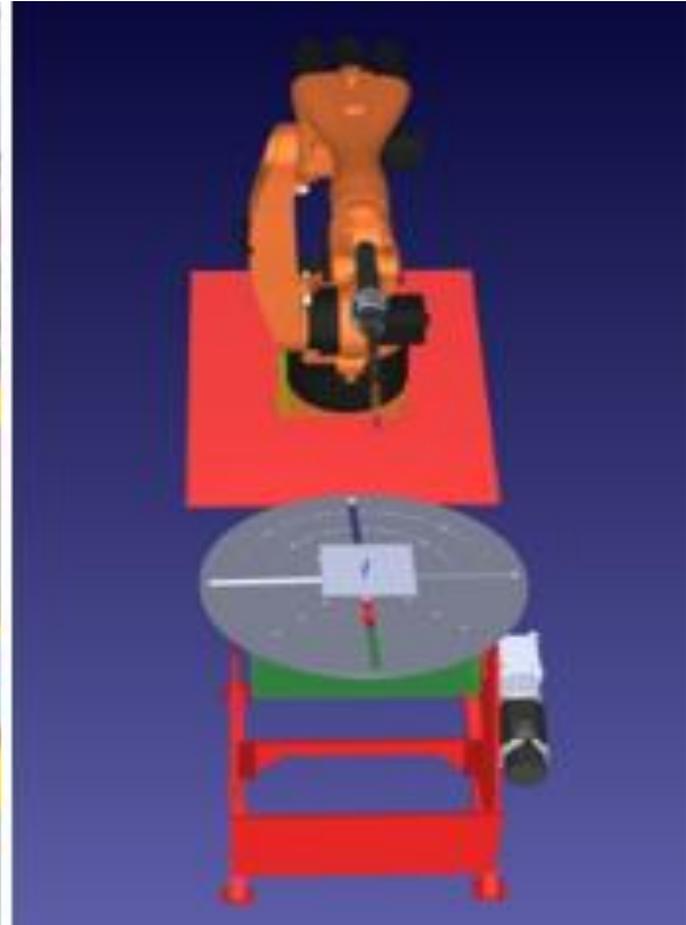
Distribución de los dispositivos



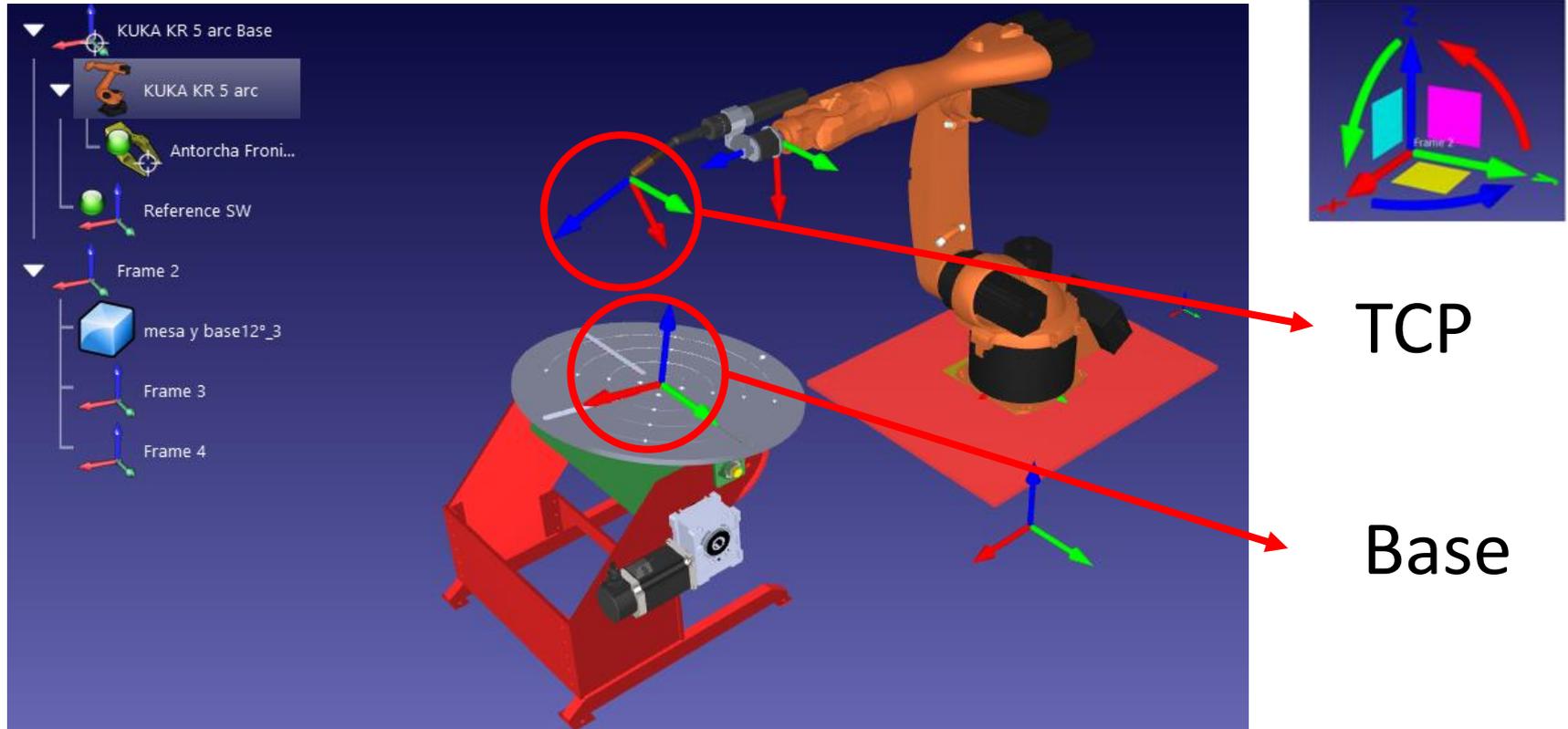
Digitalización de la celda



Digitalización de la Celda



Configuración de la celda

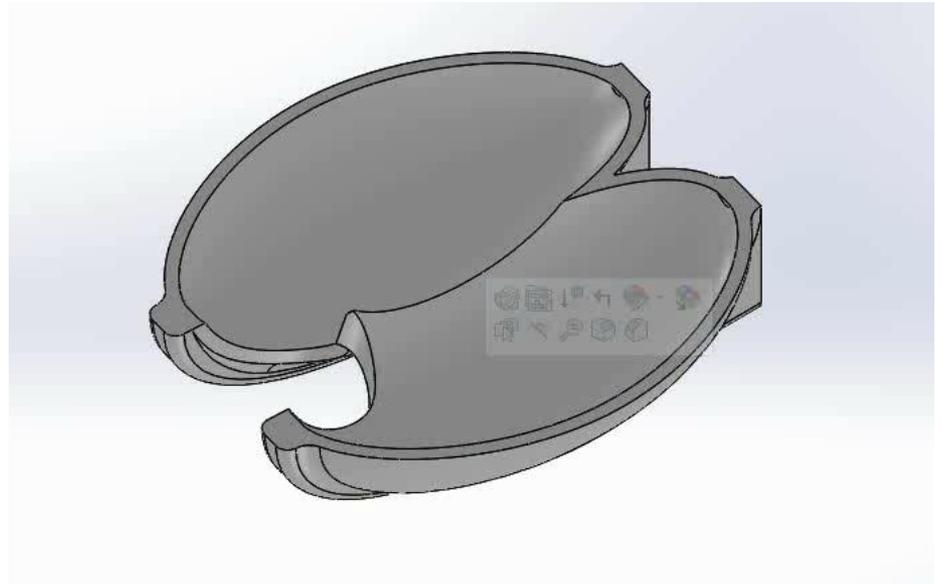
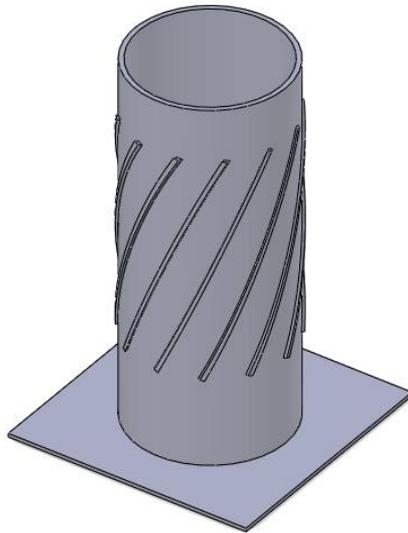
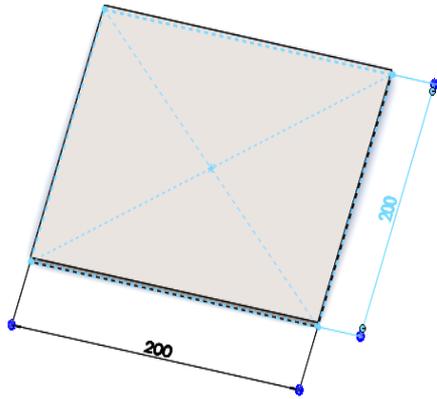


TCP

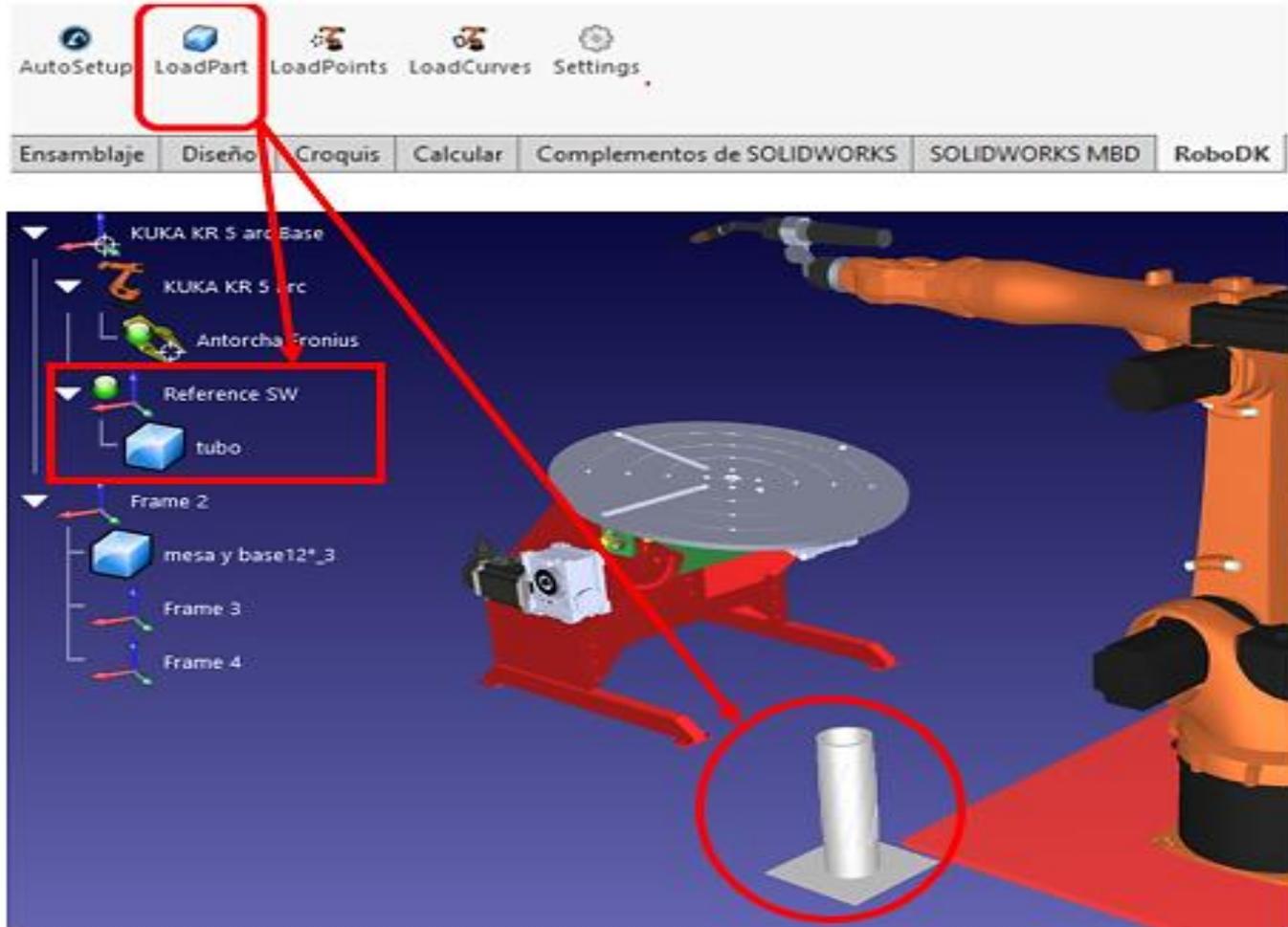
Base



Diseño CAD



Exportación CAM



Exportación CAM

Reference SW

Frame 2

Frame 3

Frame 4

Reference SW

Frame 2

Frame 3

Frame 4

Nombre del Objeto: tubo

Visible Mostrar coordenadas

Posición con respecto a Frame 3

[X,Y,Z]mm | Rot[z,Y',X'']deg - ABB/KUKA/Nachi

0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
-------	-------	-------	-------	-------	-------

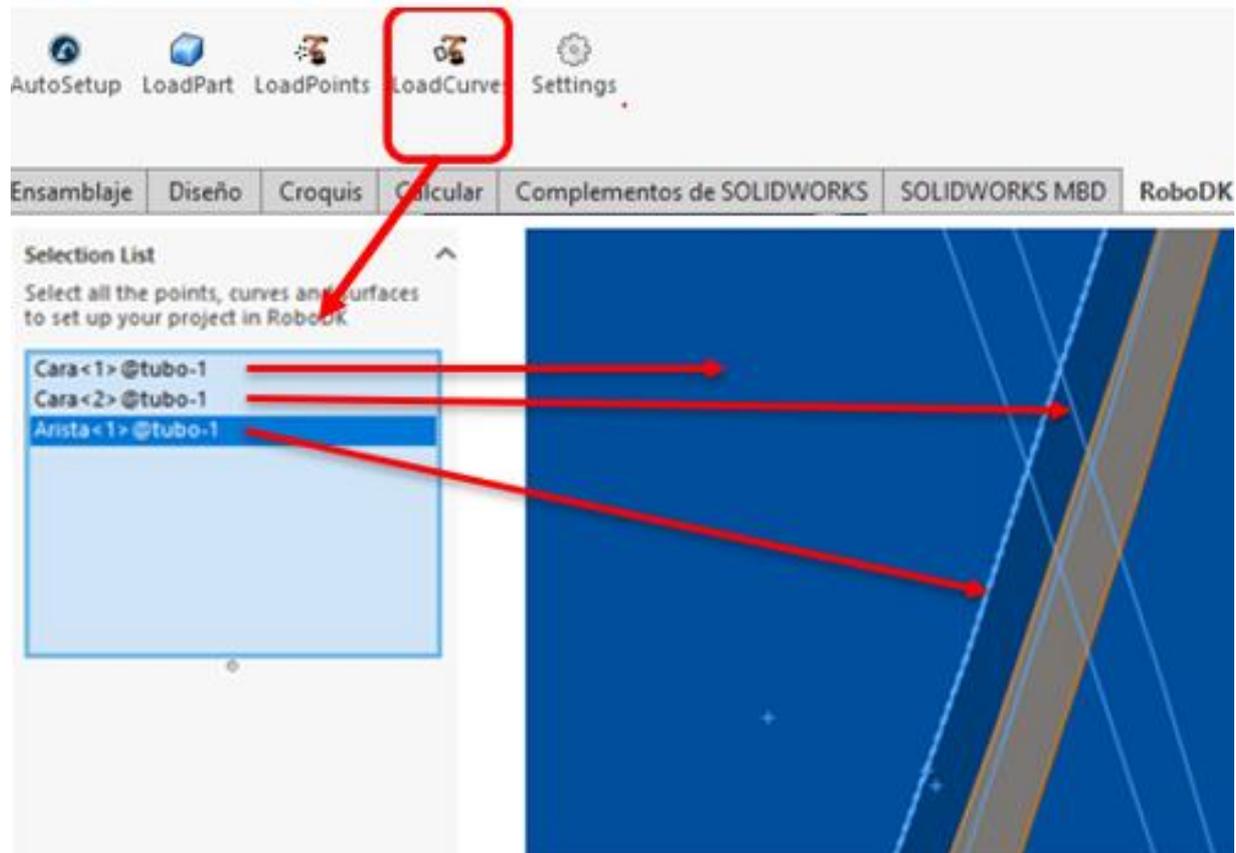
Más opciones...

Desplazamiento

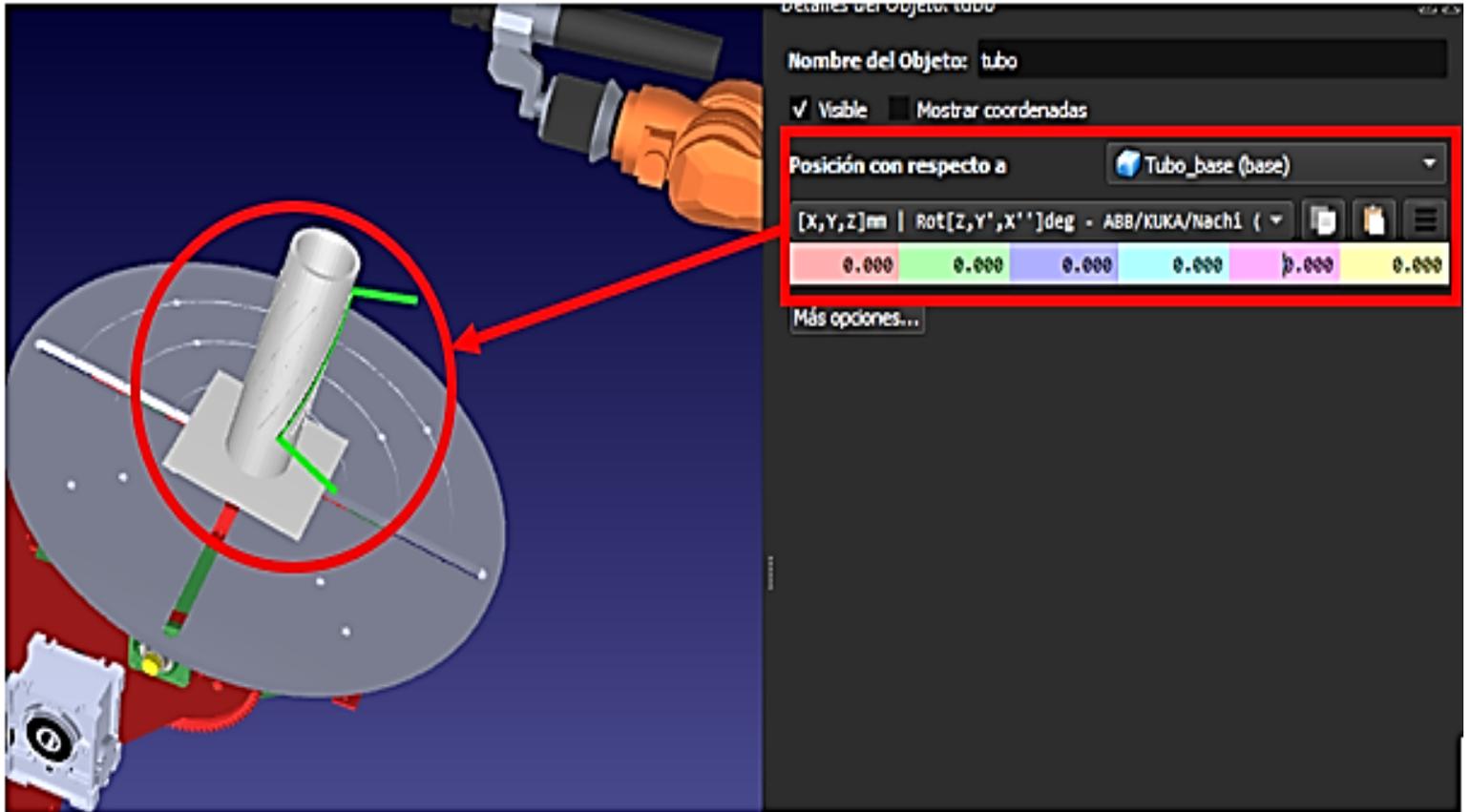
Rotación



Selección de trayectorias



Configuración de operaciones



Configuración de operaciones

Estación de soldadura con...

- KUKA KR 5 arc Base
 - KUKA KR 5 arc
 - Antorcha Fronius
 - Reference SW
 - tubo
 - Frame 2
 - mesa y base12*_3
 - Frame 3
 - Tubo_base
 - Frame 4
 - tubo Settings
 - tubo

Proyecto de Seguimiento de Curva: tubo Settings

Robot: KUKA KR 5 arc

Referencia: Reference SW

Herramienta: Antorcha Fronius

Objeto: tubo

Programa: tubo

Trayectoria visible

Entrada de trayectoria

Seleccione curva [▼] Seleccionar curva

Puntos de la trayectoria: 25

Eventos de Programa

Compensación del TCP: Script (mm,deg) transl(x,y,z)*rotz(rz)*...
rotz(θ)

Método: Cambio mínimo de orientación del TCP Enseñar + Ver trayectoria deseada

Parámetros de optimización

Establecer por defecto Ver trayectoria planificada

Permitir rotación del eje Z de +/- 180.00 grad. por pasos de 20.00 grados

Posición preferida del primer movimiento

0.0000 -90.0000 90.0000 0.0000 0.0000 0.0000

Establecer por defecto Set current -181.0, -75.5, 155.3, 68.8, 81.4, 127.6

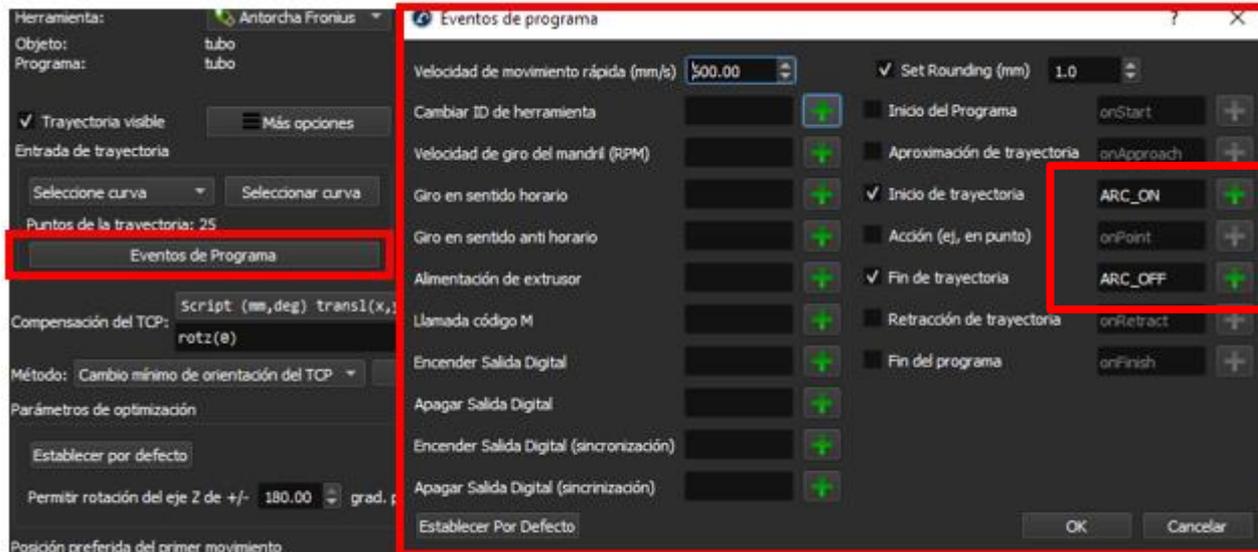
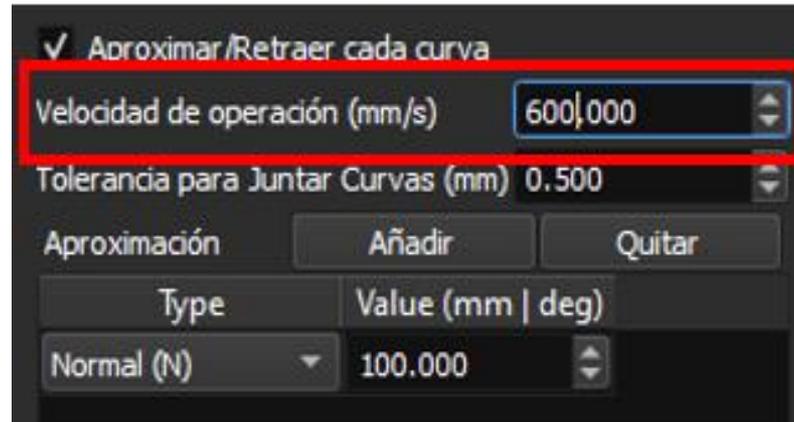
Auto update

Todos los objetivos son alcanzables.

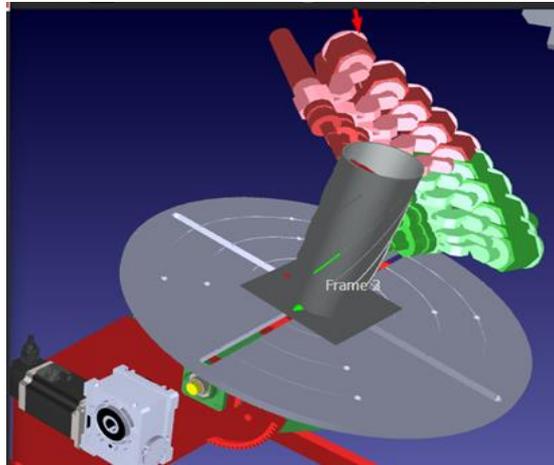
Actualizar Simular



Configuración de operaciones



Configuración de operaciones



Seleccione curva Seleccionar curva

Puntos de la trayectoria: 25

Eventos de Programa

Retracción Añadir Quitar

Type	Value (mm deg)
Normal (N)	100.000

Compensación del TCP: [X,Y,Z]mm | Rot[Z,Y',X'']deg - ABB/KUKA/Nachi

0.000	0.000	0.000	180.000	15.000	10.000
-------	-------	-------	---------	--------	--------

Método: El TCP sigue la trayectoria Ver trayectoria deseada

Parámetros de optimización

Establecer por defecto Ver trayectoria planificada

Permitir rotación del eje Z de +/- 180.00 grad. por pasos de 20.00 grados

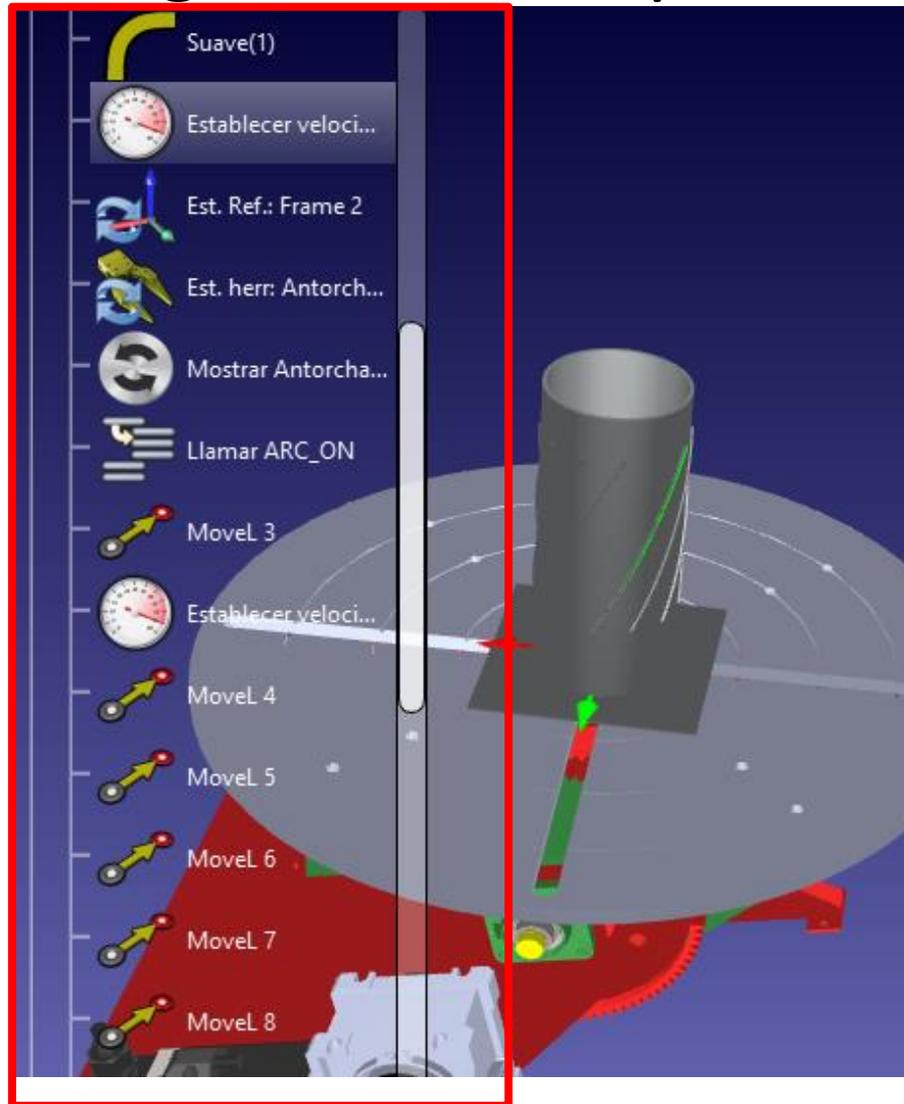
Posición preferida del primer movimiento

0.0000	-90.0000	90.0000	0.0000	0.0000	0.0000
--------	----------	---------	--------	--------	--------

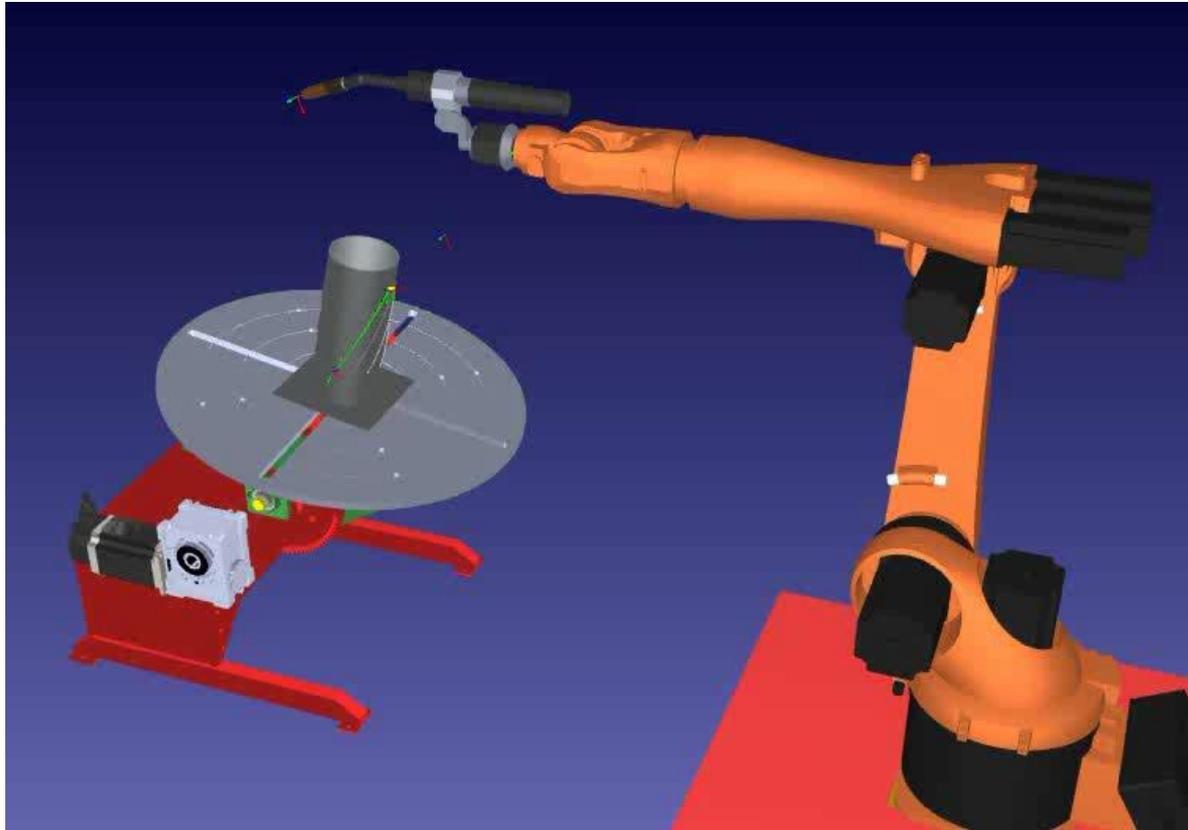
Establecer por defecto Set current -101.0, -75.5, 155.3, 68.8, 81.4, 127.6



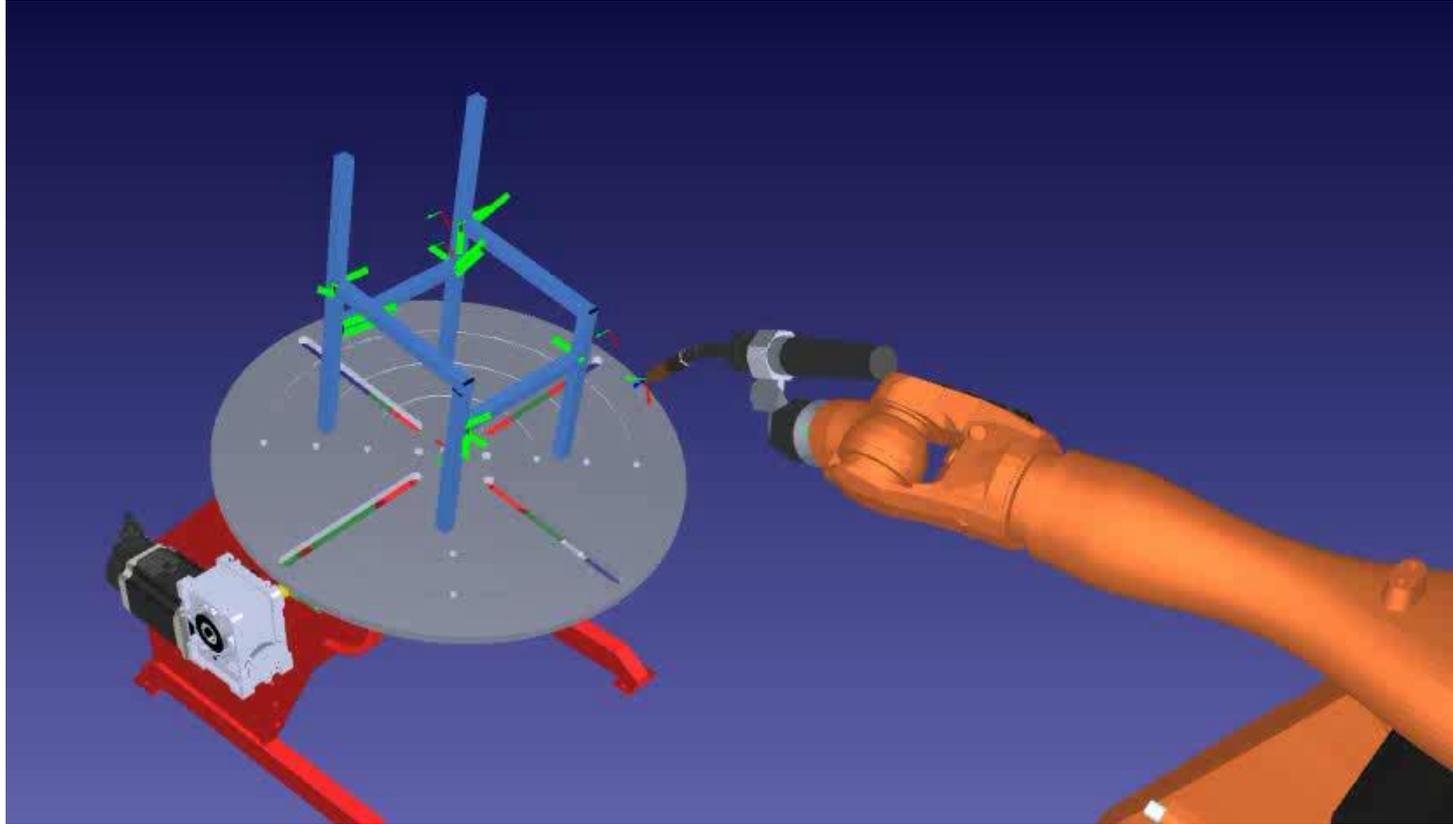
Configuración de operaciones



Simulación



Simulación



Acondicionamiento del post - procesador

Original

```
ENDFOLD (USER EXT)  
;ENDFOLD (EXTERNAL DECLARATIONS)  
DECL E6POS XP1={X 228.410202,Y 91.4412537,Z 2  
DECL FDAT FP1={TOOL_NO 16,BASE_NO 16,IPO_FRAM
```

Modificado

```
;ENDFOLD (USER EXT)  
;ENDFOLD (EXTERNAL DECLARATIONS)  
DECL BASIS SUGG T LAST BASIS={POINT1[] "P6  
DECL E6POS XP1={X 228.410202,Y 91.4412537,Z 2  
DECL FDAT FP1={TOOL_NO 16,BASE_NO 16,IPO_FRAM
```

Original

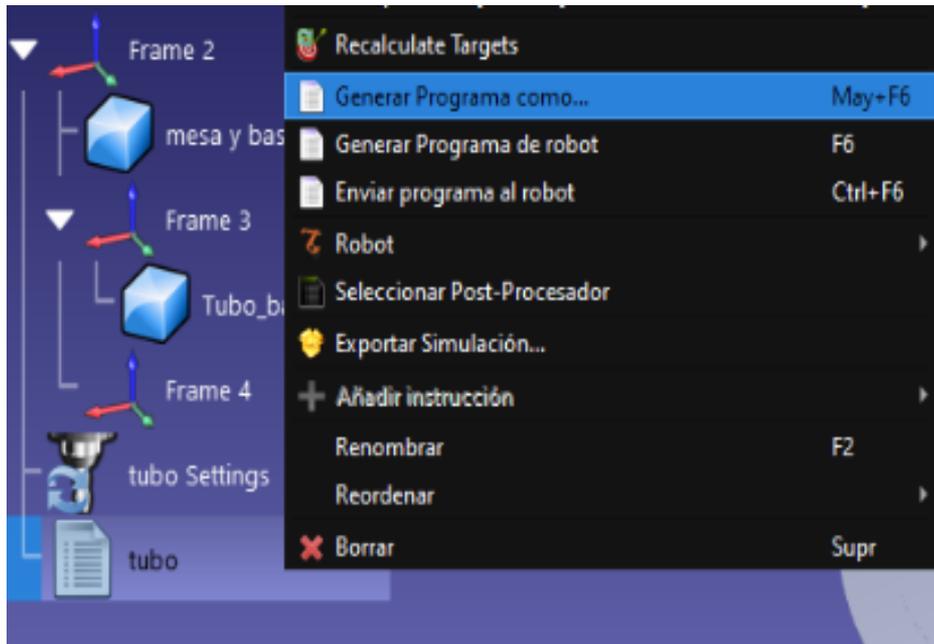
```
DECL LDAT LCPDAT1={VEL 2.0,ACC 100.0,APO_DIST  
DECL E6POS XP3={X 229.037994,Y 109.223396,Z 1  
DECL FDAT FP3={TOOL_NO 16,BASE_NO 16,IPO_FRAM
```

Modificado

```
DECL LDAT LCPDAT1={VEL 2.0,ACC 100.0,APO  
DECL A20 SUGG T LAST A20={WELD MODE[] "I  
DECL E6POS XP3={X 229.037994,Y 109.223396
```



Generación de programa

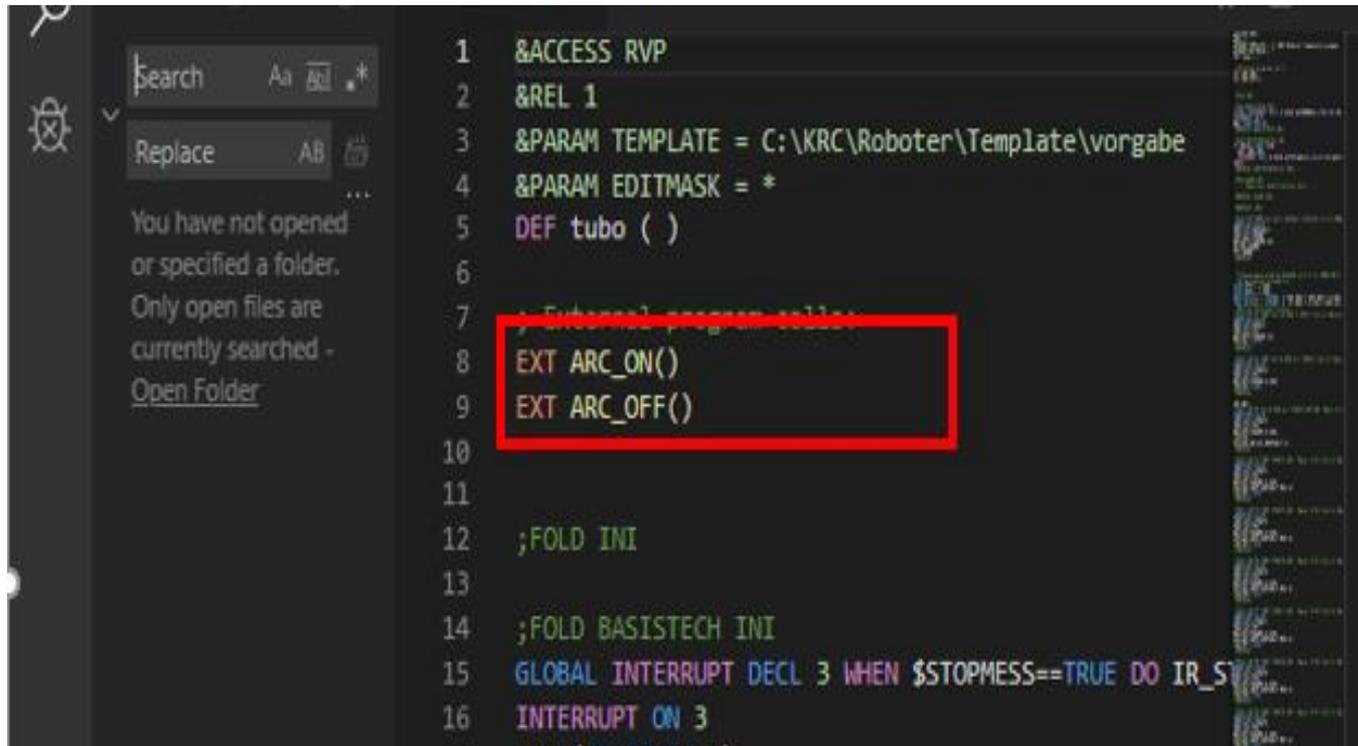


```
EXPLORER
tubo.src
NO FOLDER OPENED
You have not yet opened a folder.
Open Folder

tubo.src
1 &ACCESS RVP
2 &REL 1
3 &PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\vorgabe
4 &PARAM EDITMASK = *
5 DEF tubo ( )
6
7 ; External program calls:
8 EXT ARC_ON()
9 EXT ARC_OFF()
10
11
12 ;FOLD INI
13
14 ;FOLD BASISTECH INI
15 GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_5
16 INTERRUPT ON 3
17 BAS (#INITMOV,0)
18 ;ENDFOLD (BASISTECH INI)
19
20 ;FOLD ARCTECHDIGITAL INI
21 IF ARC20==TRUE THEN
22   A20 (ARC_INI)
23   INTERRUPT DECL 6 WHEN $CYCFLAG[3]==FALSE DO A20(TE
24 ENDIF
25 ;ENDFOLD (ARCTECHDIGITAL INI)
26
27 ;FOLD USER INI
28 ;--- Make your modifications here ---
```



Verificación del programa



The image shows a screenshot of a code editor with a dark theme. On the left side, there is a search and replace panel. The search bar contains the text 'search' and the replace bar contains 'Replace'. Below the search bar, there is a message: 'You have not opened or specified a folder. Only open files are currently searched - [Open Folder](#)'. The main editor area displays a program with the following code:

```
1 &ACCESS RVP
2 &REL 1
3 &PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\vorgabe
4 &PARAM EDITMASK = *
5 DEF tubo ( )
6
7 ; External program calls:
8 EXT ARC_ON()
9 EXT ARC_OFF()
10
11
12 ;FOLD INI
13
14 ;FOLD BASISTECH INI
15 GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_S
16 INTERRUPT ON 3
```

A red rectangular box highlights the lines 8 and 9, which contain the code 'EXT ARC_ON()' and 'EXT ARC_OFF()' respectively.



Carga de los archivos src y dat al KC

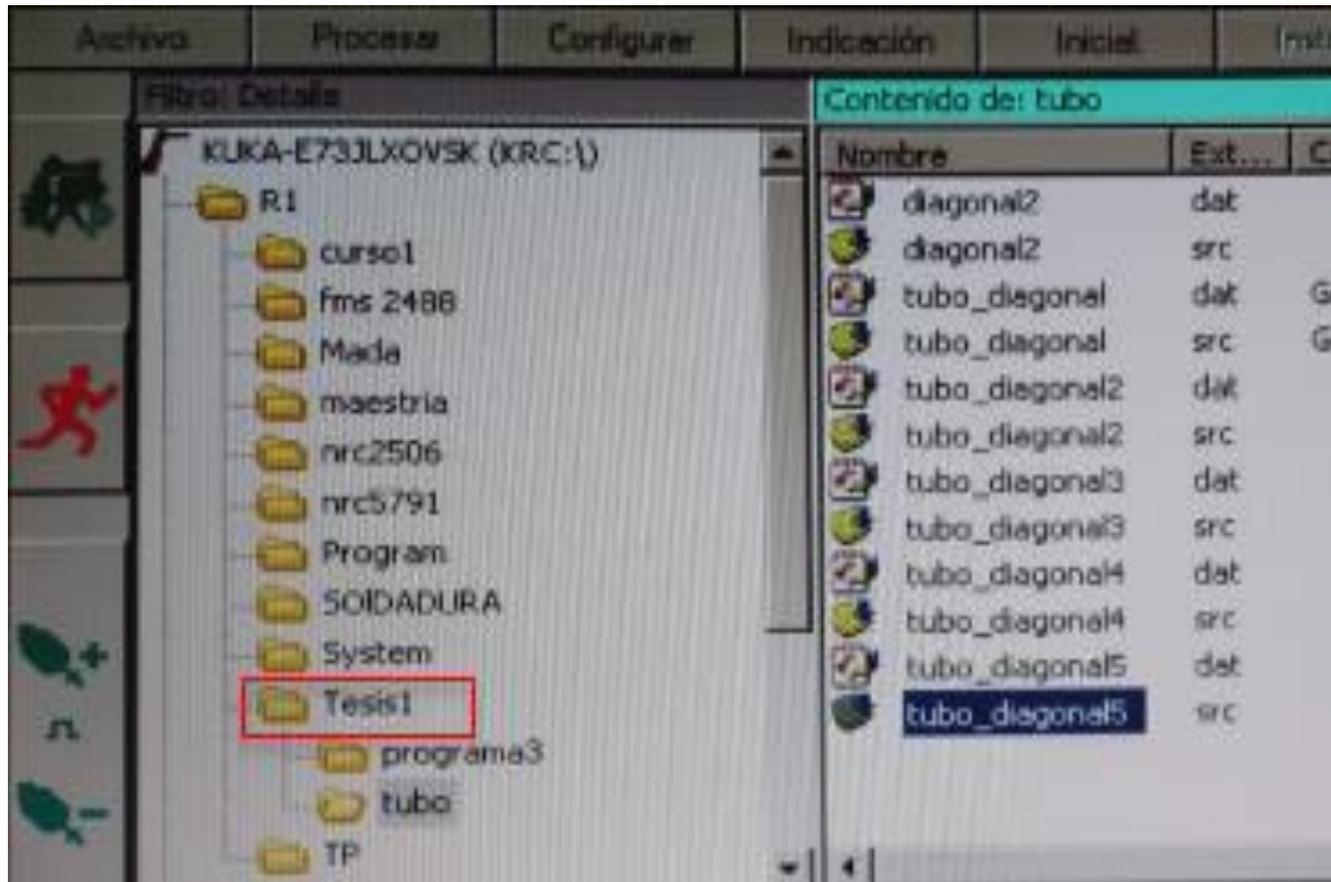
The screenshot displays a software interface with a menu on the left and a main window on the right. The menu includes options like 'Entradas/Salidas', 'Driver de E/S', 'Interpretador SUBMET', 'Teclas de estado', 'Movimiento manual', 'Grupo de usuario', 'Actual Herramienta/Base', 'Definición de herramienta', 'Opciones de Conexión / Desconexión', and 'Extras'. The main window shows a 'Conectarse por selección' dialog with fields for 'Programador', 'Programador especial', and 'ErcAdministrador', and a 'Password' field. Below the dialog is a table of active commands.

C.	Tiempo	No	Abc	Mensaje
!	15:20:08	1376	KCP	COMANDOS ACTIVOS BLOQUEADOS
!	15:20:16	1350	/R1/	COI ALCANZADA
!	15:22:07	1350	/R1/	COI ALCANZADA
!	15:22:54	1350	/R1/...	COI ALCANZADA

Below the table, there are fields for 'Num', 'C', 'S', 'R', 'Aut', 'PDV 100%', and 'Col'. The interface also includes a status bar at the bottom with 'Entanda', 'Cambiar password', and 'Conectar' buttons.

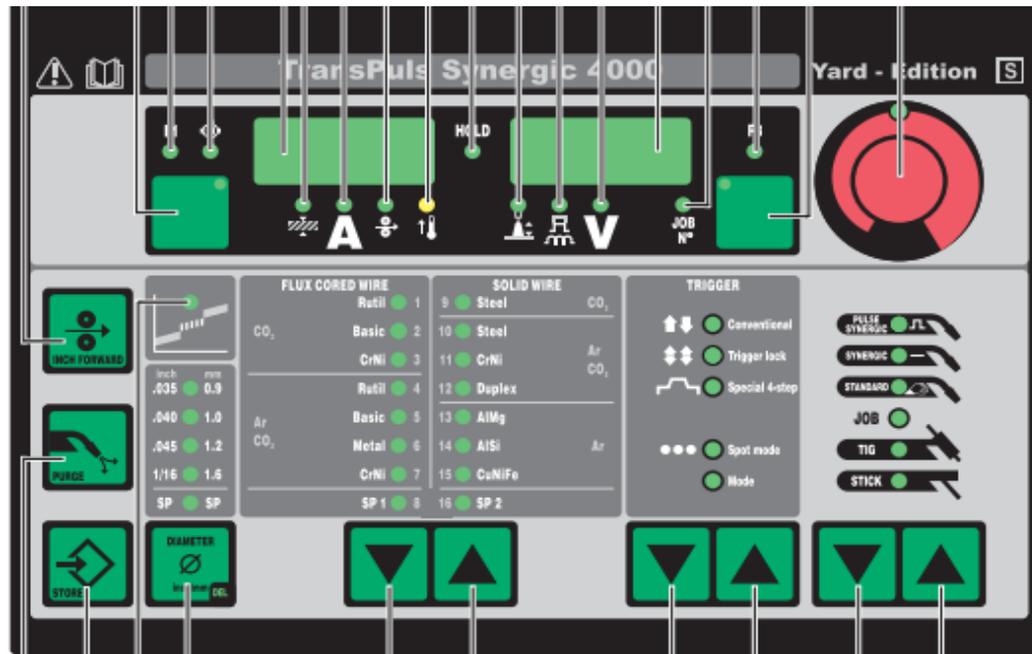


Carga de los archivos src y dat al KC



Programación de los parámetros de soldadura

Espesor del material (mm)	Corriente (A)	Velocidad de hilo (cm/min)	Voltaje (V)	Velocidad de soldadura (cm/min)
4	148	170	19.4	196



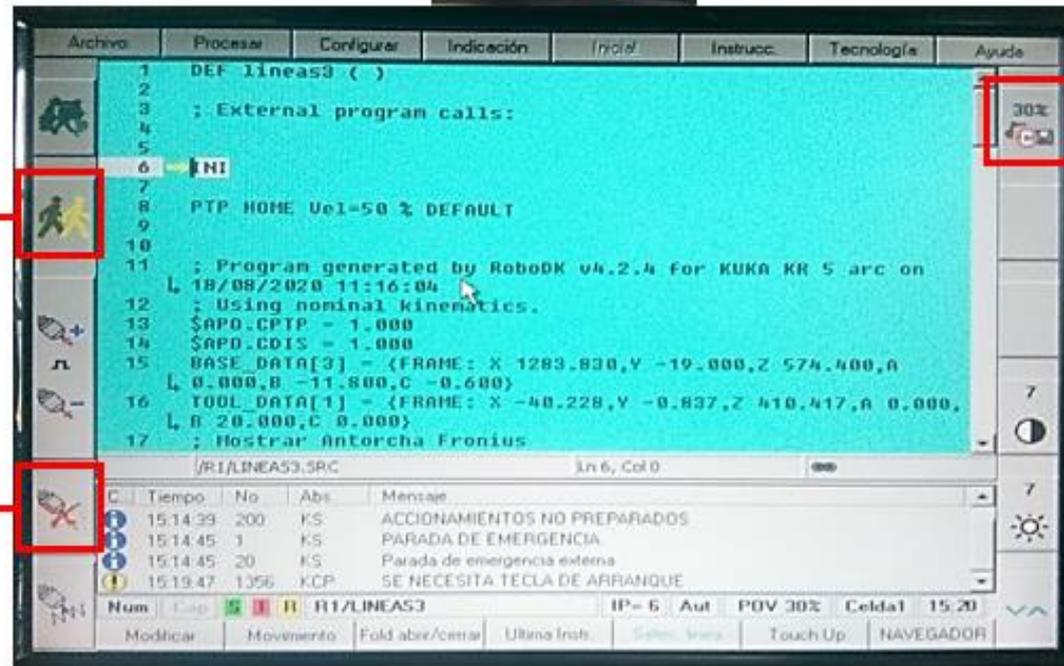
Ubicación de la pieza a soldar



Simulación



Modo T2



Archivo | Procesar | Configurar | Indicación | Inicial | Instrucc. | Tecnología | Ayuda

```
1 DEF lineas3 ( )
2
3 ; External program calls:
4
5
6 → [INI]
7
8 PTP HOME Vel=50 % DEFAULT
9
10
11 ; Program generated by RoboDK v4.2.4 for KUKA KR 5 arc on
12 18/08/2020 11:16:04
13 ; Using nominal kinematics.
14 $APO.CPTP = 1.000
15 $APO.CDIS = 1.000
16 BASE_DATA[3] = {FRAME: X 1283.830,Y -19.000,Z 574.400,A
17 0.000,B -11.800,C -0.600}
18 TOOL_DATA[1] = {FRAME: X -40.228,Y -0.837,Z 410.417,A 0.000,
19 B 20.000,C 0.000}
20 ; Mostrar Antorcha Fronius
```

30%

7

C	Tiempo	No	Abs	Mensaje
!	15:14:39	200	KS	ACCIONAMIENTOS NO PREPARADOS
!	15:14:45	1	KS	PARADA DE EMERGENCIA
!	15:14:45	20	KS	Parada de emergencia externa
!	15:19:47	1356	KCP	SE NECESITA TECLA DE ARRANQUE

Num Cap R1/LINEAS3 IP= 6 Aut POV 30% Celda1 15:20

Modificar | Movimiento | Fold abrir/cerrar | Ultima Inst. | | Touch Up | NAVEGADOR

Movimientos
paso a paso

Inicio de arco
apagado

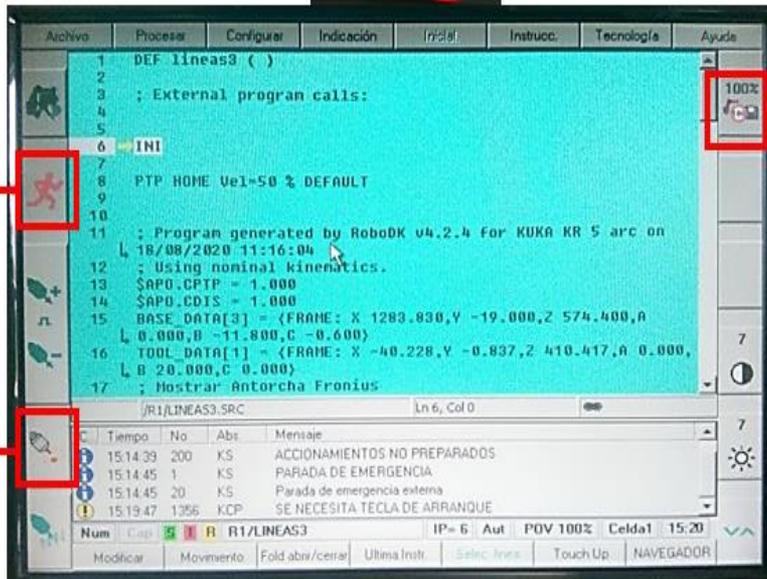
30% de la
velocidad
programada



Ejecución de programa



Modo Automático



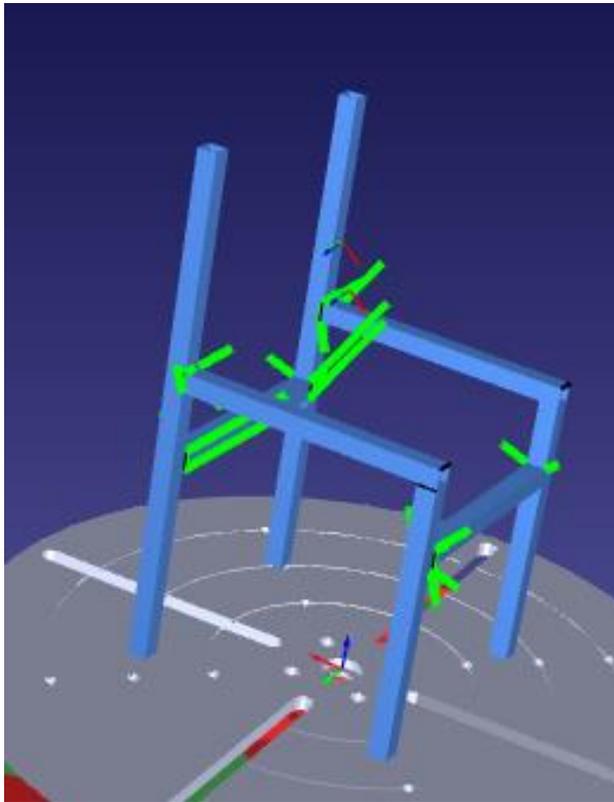
100% de la velocidad programada



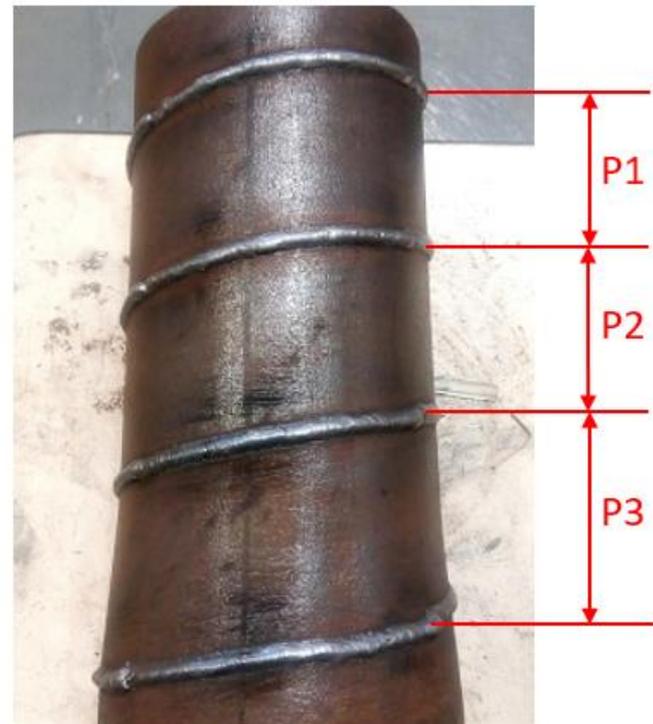
Realización de pruebas

- Uniones

- Silla



- Cordón helicoidal



Realización de Pruebas

- Recargue

- Dientes de un engrane



- Fallas en un alabe



Resultados

- Desplazamiento

Pruebas	Rango de dispersión errores (mm)
(1) Cordones simples	± 0.12
(2) Cordones helicoidales	± 0.4
(3) Cordones de uniones	± 0.28
(4) Cordones de relleno engrane	± 0.49
(5) Cordones de relleno alabe	± 0.20
Promedio	± 0.298



Resultados

- Tiempo

Pruebas	Optimización (%)
(1) Cordones simples	26.7
(2) Cordones helicoidales	13.3
(3) Cordones de uniones	31
(4) Cordones de relleno	6.4
(5) Cordones de relleno	45.6
Promedio	24.5



Conclusiones

- Se digitalizó una celda de manufactura, para la soldadura robotizada de piezas industriales utilizando filosofía CAD/CAM, para lo cual se utilizó el Software CAD “SolidWorks” que permitió la generación de archivos CAD 3D de todos los elementos, dispositivos y el modelado de las piezas a trabajar, con estos se realizó la configuración de celda y su acondicionamiento en el Software CAM “RoboDK”, lo que facilitó la creación trayectorias simples y complejas, las mismas que se post procesaron para generar programas en lenguaje KRL, que fueron ejecutados en la celda de Soldadura del Laboratorio de Robótica Industrial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Latacunga, con un error que oscila entre $\pm 0.298\text{mm}$ en la trayectoria de los cordones y el tiempo optimizado es de 24.5% con respecto a la programación manual/guiada.



Conclusiones

- La investigación de las normas y técnicas de soldadura GMAW, permitieron tener conocimientos para la configuración de los parámetros en la suelda Fronius, movimientos y posiciones de la antorcha de acuerdo con las uniones de las piezas que se emplearon en cada una de las pruebas ejecutadas y de esta manera se realizaron procesos con una buena deposición de material.
- El post - procesador de RoboDK en el paquete de instalación viene con líneas de código que no son entendidas por el controlador del brazo robótico, además no incluye los controles para el sistema de soldadura, por lo tanto, se realizaron modificaciones y acondicionamientos en el mismo, adicionalmente se incluyó líneas de código que permiten la selección y programación de los diferentes tipos de costura que son utilizados en soldadura, lo que permitió la generación de programas en los archivos *.dat y *.src de tal manera que al ser ejecutados en el robot no existieron errores.



Conclusiones

- En la realización de la estructura de la silla, los errores encontrados en la ejecución de los cordones programados a partir de la celda digital oscilan en el rango $\pm 0,28$ mm y debido a que en ciertas posiciones del robot, el alambre tiende a moverse cambiando la ubicación del TCP, por tal motivo en las uniones en “T” los cordones se depositaron ligeramente desalineados generando debilidad en la estructura.



Conclusiones

- En las pruebas realizadas en aplicaciones de rellenos en piezas industriales con desgastes o fallas, se determinó que al momento de sobreponerse las capas sufren un calentamiento generando una variación en la altura del cordón depositado de $\pm 0,49$ mm en el relleno del engrane y $\pm 0,20$ mm en relleno de los desgastes del alabe, el cual no es considerable debido a que las piezas son sometidas a procesos de rectificado para la eliminación de exceso de material y de esta forma obtiene las dimensiones requeridas, con lo cual se concluye que el presente proyecto si es aplicable para este tipo de procesos.



Recomendaciones

- La mesa y el área de trabajo deben estar solo con los elementos y piezas que se van a trabajar, ubicados de la misma manera que en el modelo digital como en el real, porque el programa funciona en base al mismo, con esto se evita cualquier choque.
- Siempre realizar pruebas en vacío, sin el encendido del arco, con movimientos paso a paso y al 30% de la velocidad programada para verificar que los movimientos del robot sean adecuados y de no ser el caso se puedan detener el movimiento antes de que ocurra algún choque y dañar los elementos.



Recomendaciones

- Tener cuidado al momento de ejecutar los programas en retroceso, pueden existir cambios en las coordenadas de los elementos y esto a su vez afecta a los movimientos del brazo robótico.
- Antes de realizar cualquier operación verificar que la longitud de alambre que sale de la boquilla de la antorcha no sea mayor a 15 mm.
- Por cada elemento que se agregue a la celda digital, añadir un sistema de referencias (frame) de modo que si este se mueve no afecte la posición de los demás elementos.





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA