



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Desarrollo de metodología de programación en procesos de soldadura robotizada aplicado a geometrías complejas a partir de modelos CAD 3D, optimizando tiempo de programación y ejecución.

Báez Játiva, César Esteban y Maya Ortiz, David Marcelo

Departamento de Ciencias Eléctrica y Electrónica

Carrera de Ingeniería en Electromecánica

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Electromecánico

Ing. Manjarres Arias, Félix Xavier

14 de agosto de 2020



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, *"DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE PROGRAMACIÓN EN PROCESOS DE SOLDADURA ROBOTIZADA APLICADO A GEOMETRÍAS COMPLEJAS A PARTIR DE MODELOS CAD 3D, OPTIMIZANDO TIEMPO DE PROGRAMACIÓN Y EJECUCIÓN."* fue realizado por el señor *BÁEZ JÁTIVA, CÉSAR ESTEBAN* y el señor *MAYA ORTIZ, DAVID MARCELO*, el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 14 de agosto del 2020

ING. MANJARRES ARIAS, FELIX XAVIER









C.C.: 0501987416

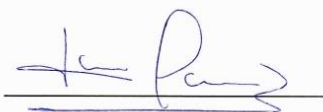
URKUND

Document Information

Analyzed document	DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE PROGRAMACIÓN EN PROCESOS DE SOLDADURA ROBOTIZADA_BAEZ -MAYA.docx (D77556064)
Submitted	8/7/2020 12:23:00 AM
Submitted by	Manjarres Arias Felix Xavier
Submitter email	fxmanjarres@espe.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	fxmanjarres.espe@analysis.orkund.com

Sources included in the report

W	URL: https://docplayer.es/33765424-Departamento-de-energia-y-mecanica-carrera-de-ingeni... Fetched: 11/22/2019 5:40:54 PM		1
SA	submission.pdf Document submission.pdf (D71489433)		6
SA	submission.docx Document submission.docx (D54485194)		2
SA	UBILLUZ GARCES CARLOS ADRIAN.pdf Document UBILLUZ GARCES CARLOS ADRIAN.pdf (D55456188)		2
SA	526eb8d447a47162da8eec733947dda4894c76ac.docx Document 526eb8d447a47162da8eec733947dda4894c76ac.docx (D76958146)		1
SA	Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / TESIS.Diseño de celda robotizada.pdf Document TESIS.Diseño de celda robotizada.pdf (D54405208) Submitted by: wfpolo@espe.edu.ec Receiver: masingania.espe@analysis.orkund.com		1
W	URL: https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/48/1/Monograf%C3%... Fetched: 6/16/2020 2:52:57 PM		1
SA	81.602_20192_PEC4: Memoria_12665179.txt Document 81.602_20192_PEC4: Memoria_12665179.txt (D75332520)		4



ING. MANJARRES ARIAS, FELIX XAVIER

C.C.: 0501987416




DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORIA

Nosotros, **BÁEZ JÁTIVA, CÉSAR ESTEBAN** y **MAYA ORTIZ, DAVID MARCELO**, con cédulas de ciudadanía 0401640990 y 1804434874 declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación **"DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE PROGRAMACIÓN EN PROCESOS DE SOLDADURA ROBOTIZADA APLICADO A GEOMETRÍAS COMPLEJAS A PARTIR DE MODELOS CAD 3D, OPTIMIZANDO TIEMPO DE PROGRAMACIÓN Y EJECUCIÓN."** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas

Latacunga, 14 de agosto del 2020


BÁEZ JÁTIVA, CÉSAR ESTEBAN
C.C.: 0401640990


MAYA ORTIZ, DAVID MARCELO
C.C.: 1804434874




DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Nosotros, **BÁEZ JÁTIVA, CÉSAR ESTEBAN** y **MAYA ORTIZ, DAVID MARCELO**, con cédulas de ciudadanía 0401640990 y 1804434874 autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"DESARROLLO DE METODOLOGÍA DE PROGRAMACIÓN EN PROCESOS DE SOLDADURA ROBOTIZADA APLICADO A GEOMETRÍAS COMPLEJAS A PARTIR DE MODELOS CAD 3D, OPTIMIZANDO TIEMPO DE PROGRAMACIÓN Y EJECUCIÓN."** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 14 de agosto del 2020


BÁEZ JÁTIVA, CÉSAR ESTEBAN
C.C.: 0401640990


MAYA ORTIZ, DAVID MARCELO
C.C.: 1804434874

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi madre, Albita Báez Játiva, quien ha sido el pilar fundamental en mi vida por todo su apoyo, sus consejos, por enseñarme a luchar por mis metas respetando siempre a los demás.

Báez César.

DEDICATORIA

A mí y mi amada familia, madres, padres, hermanas y hermanos, Alicia, Gretha, Luis, Marcelo y Daniel.

David Maya.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi familia en especial a mis Abuelita Fabiola Játiva, mis hermanos Karina, Israel, Saul, Carlos, Oscar, Alexis a mi padre Jaime Ibarra por su ayuda durante mi vida estudiantil.

A mi tutor de tesis Ing. Félix Manjarrez por guiarnos y brindarnos sus conocimientos durante la elaboración de este trabajo, un agradecimiento especial para el CIRT CELEC-EP por facilitar el uso de sus instalaciones, de igual manera al ingeniero Carlos Guerra quien estuvo a nuestro lado enseñándonos y guiándonos con sus conocimientos.

A mi compañero de tesis David Maya a su familia por acogerme en su hogar con cariño en especial a sus padres Gretita y Marcelo.

A mis amigos José Hernández, los “Ñañitos Brow”, los “Mulli Friends” por estar en esta etapa universitaria, al Ballet Folklórico Lactacunga ESPE a cada uno de sus integrantes que han sido como mi familia esperando que todo lo compartido que grabado en nuestros corazones como un bonito recuerdo. Yupaychani.

Báez César.

AGRADECIMIENTO

A toda mi familia, que sin su apoyo y amor incondicional nada de esto podría haber sido posible.

A todas las personas que de una u otra manera han formado parte de este arduo y tedioso camino universitario, con los cuales he compartido momentos grandiosos y pesares, a mis queridos hermanos "Mulli friends" los cuales con cada caída nos unió más en lo que importa, ser humanos y amigos para cualquier momento, a mi querido hermano Césarín el cual ha sido un gran apoyo para todo momento, y al fin lo logramos, mis amigos "Los pussys" que han estado siempre desde el terruño.

A nuestros tutores Félix Manjarres y Carlos Guerra por todo el apoyo y enseñanzas brindadas en este camino final; quedan cortas las palabras de agradecimiento para cada persona que supo apoyarme desde todo momento de forma directa o indirecta, a todas y todos, un infinito yupaychani.

David Maya

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	1
CERTIFICACIÓN	2
RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA	4
AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN.....	5
DEDICATORIA	6
DEDICATORIA	7
AGRADECIMIENTO	8
AGRADECIMIENTO	9
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS.....	16
ÍNDICE DE FIGURAS	17
RESUMEN	22
ABSTRACT.....	23
CAPÍTULO I.....	24
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	24
1.1. Planteamiento del Problema	24
1.2. Antecedentes	25
1.3. Justificación e Importancia	27
1.4. Objetivos	28

	11
1.4.1. Objetivo General	28
1.4.2. Objetivos Específicos	29
CAPÍTULO II.....	30
MARCO TEÓRICO.....	30
2.1. Central hidroeléctrica	30
2.2. Turbina hidráulica	32
2.2.1. Clasificación de las turbinas hidráulicas.....	33
2.3. Problemas con las turbinas	37
2.3.1. Cavitación.....	38
2.3.2. Embalamiento.....	39
2.3.3. Sedimentos	41
2.4. CIRT CELEC – EP	42
2.5. Ingeniería inversa y reconstrucción.....	44
2.6. Soldadura GMAW	45
2.7. Soldadura MIG.....	46
2.7.1. Formas de transferencia de material	47
2.8. Soldadura Robotizada.....	48
2.8.1. Brazo robótico soldador.....	49
2.8.2. Herramienta de soldadura robotizada.....	57
2.9. Planificación de trayectorias.....	61
2.10. Post-procesado para códigos KRL.....	62

	12
CAPÍTULO III.....	64
PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN	64
3.1. Modalidad de investigación	64
3.1.1. Investigación documental	64
3.1.2. Investigación experimental	65
3.1.3. Investigación de campo	65
3.2. Tipos de investigación.....	66
3.2.1. investigación aplicada.....	66
3.2.2. Investigación de método deductivo.....	66
3.3. Diseño de la investigación.....	67
3.4. Niveles de investigación.....	67
3.4.1. Nivel explicativo.....	67
3.4.2. Nivel descriptivo	68
3.5. Técnica de recolección de datos	68
3.6. Técnica de análisis de datos	69
3.7. Técnicas de comprobación de la hipótesis.....	69
CAPÍTULO IV.....	70
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	70
4.1. Recopilación de datos.....	70
4.1.1. Brazo robótico	70
4.1.2. Riel lineal.....	71

	13
4.1.3. Controlador.....	73
4.1.4. Mesa giratoria.....	74
4.1.5. Fuente de energía de soldadura trifásica	74
4.1.6. Antorcha de soldadura	76
4.2. Dimensionamiento de la celda	77
4.3. Ingeniería inversa de la antorcha de soldadura.....	85
4.4. Softwares de programación fuera de línea.....	88
4.4.1. Open Rave	88
4.4.2. KUKA Simpro	89
4.4.3. V-REP	90
4.4.4. RoboDK.....	91
4.4.5. ROS	92
4.5. Tipos de trayectorias.....	92
4.5.1. Trayectorias circulares.....	93
4.5.2. Trayectorias sobre superficies Complejas	93
4.5.3. Trayectorias sobre superficies planas.....	94
4.6. Generalidades del proceso de soldadura.....	94
4.6.1. Propiedades del acero inoxidable ASTM A743.....	94
4.6.2. Relleno por soldadura para recuperación de rodetes y alabes	95
4.6.3. Material de aporte.....	96
4.7. Matriz comparativa.....	97

	14
4.8. Tiempos de ejecución método manual vs offline	101
4.8.1. Tiempo normal.....	101
CAPÍTULO V.....	103
PROPUESTA.....	103
5.1 Generalidades.....	103
5.1.1. Antecedentes de la propuesta	103
5.1.2. Justificación de la propuesta.....	103
5.1.3. Objetivos de la propuesta	104
5.2. Diseño de la propuesta	104
5.2.1. Síntesis de la metodología de generación de la trayectoria	104
5.3. Cursograma analítico de la metodología	110
5.4. Desarrollo de la programación offline	112
5.4.1. Área de trabajos del software.	113
5.4.2. Digitalización de la celda	114
5.4.3. Generación de trayectorias.....	122
5.4.3.1. Obtención de la trayectoria	122
5.5. Descripción del código obtenido.....	135
5.5.1. Código trayectoria de trabajo sobre la superficie de los alabes	135
5.5.2. Código de movimiento de la mesa rotacional (E2).....	137
5.5.3. Código principal.....	140
5.6. Comprobación de hipótesis.....	142

	15
CAPÍTULO VI.....	151
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	151
6.1. Conclusiones	151
6.2. Recomendaciones	152
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
ANEXOS.....	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Velocidades de embalamiento respecto a la velocidad nominal.....</i>	<i>41</i>
Tabla 2	<i>Articulaciones de los robots</i>	<i>51</i>
Tabla 3	<i>Configuraciones de cuello y herramienta</i>	<i>59</i>
Tabla 4	<i>Datos técnicos del brazo robótico</i>	<i>71</i>
Tabla 5	<i>Datos técnicos riel lineal</i>	<i>72</i>
Tabla 6	<i>Datos técnicos del controlador.....</i>	<i>73</i>
Tabla 7	<i>Datos técnicos mesa giratoria.....</i>	<i>74</i>
Tabla 8	<i>Datos técnicos de suelda trifásica, Cebora Evo speed star 520 TS</i>	<i>75</i>
Tabla 9	<i>Datos técnicos de antorcha de soldadura, Abicor Binzel WH500 22</i>	<i>76</i>
Tabla 10	<i>Matriz de criterios ponderados entre software.....</i>	<i>97</i>
Tabla 11	<i>Tiempo normal de la metodología actual</i>	<i>144</i>
Tabla 12	<i>Tiempo normal de la metodología propuesta</i>	<i>147</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Esquema de la central hidroeléctrica de Ip en México.</i>	31
Figura 2	<i>Ejemplos de turbomáquinas.</i>	32
Figura 3	<i>Turbina Pelton</i>	34
Figura 4	<i>Turbina Francis.</i>	35
Figura 5	<i>Turbina Kaplan</i>	36
Figura 6	<i>Clasificación por la dirección de entrada del agua</i>	37
Figura 7	<i>Recocido en alabes</i>	38
Figura 8	<i>Rodete dañado por corrosión de cavitación</i>	39
Figura 9	<i>Escaneado 3D de un rodete tipo Francis</i>	45
Figura 10	<i>Proceso de soldadura GMAW.</i>	46
Figura 11	<i>Elementos básicos de un equipo de soldadura MIG</i>	47
Figura 12	<i>Formas de transferencia de material.</i>	48
Figura 13	<i>KUKA AG.</i>	49
Figura 14	<i>Brazo robótico.</i>	50
Figura 15	<i>Configuraciones cartesianas.</i>	52
Figura 16	<i>Partes de un brazo robótico</i>	55
Figura 17	<i>KCP (KUKA Control Panel) y controlador</i>	56
Figura 18	<i>Antorcha de soldadura.</i>	58
Figura 19	<i>Tool Center Point (TCP)</i>	58

	18
Figura 20 Configuración de cuello 45° y 22°	60
Figura 21 Rosca y sujeción por presión	61
Figura 22 Estructura de comunicación entre los elementos de la celda de soldadura en el CIRT-CELEC-EP	70
Figura 23 Toma de medida del diámetro de la base del robot	78
Figura 24 Toma de medida de la distancia entre la base del robot hacia el borde de la mesa giratoria.....	78
Figura 25 Establecimiento de primera referencia verificando el nivel	79
Figura 26 Establecimiento de segunda referencia verificando el nivel	79
Figura 27 Medición de altura desde la base de la mesa al punto de referencia	80
Figura 28 Toma de referencia sobre la base del robot.....	81
Figura 29 Referencia de la base de la mesa al punto de referencia en la base del robot.....	81
Figura 30 Posicionamiento del robot en el centro de la mesa (verificación)	82
Figura 31 Visualización en el KCP de las posiciones de los ejes con el robot ubicado en el centro de la mesa	82
Figura 32 Primera posición del robot para verificación.....	83
Figura 33 Visualización de ejes en el KCP de la primera posición	83
Figura 34 Segunda posición del robot para verificación.....	84
Figura 35 Visualización de ejes en el KCP de la segunda posición	84
Figura 36 Herramienta en el proceso de pigmentación.....	85
Figura 37 Colocación de targets de referencia sobre la herramienta	86

Figura 38	<i>Proceso de calibración de escáner</i>	86
Figura 39	<i>Proceso de escaneo</i>	87
Figura 40	<i>Escaneo con disposición de malla</i>	87
Figura 41	<i>Exportación de datos con ayuda del software VXelements</i>	88
Figura 42	<i>Logo de Open Rave</i>	89
Figura 43	<i>Logo de KUKA</i>	90
Figura 44	<i>Logo de V-rep</i>	91
Figura 45	<i>Logo RoboDK</i>	91
Figura 46	<i>Logo de ROS melodic morenia</i>	92
Figura 47	<i>Ciclo de pasivación</i>	95
Figura 48	<i>Diagrama de barras compatibilidad con el recurso</i>	98
Figura 49	<i>Diagrama de barras integración de ejes externos.</i>	98
Figura 50	<i>Diagrama de barras eficiencia del post procesador</i>	99
Figura 51	<i>Diagrama de barras desarrollo de trayectorias sobre archivos CAD 3D</i>	99
Figura 52	<i>Diagrama de barras acceso e integración de fuentes de datos.</i>	100
Figura 53	<i>Diagrama de barras comparación total entre softwares</i>	100
Figura 54	<i>Escalas de valoración del ritmo de trabajo.</i>	101
Figura 55	<i>CAD de la herramienta.</i>	105
Figura 56	<i>Partes de la herramienta</i>	106
Figura 57	<i>Obtención de ángulo principal de inclinación en la antorcha</i>	107

	20
Figura 58 <i>Modelación final de la herramienta</i>	108
Figura 59 <i>Configuración de ángulos en montaje de la herramienta</i>	109
Figura 60 <i>CAD mesa giratoria</i>	109
Figura 61 <i>Nomenclatura del cursograma</i>	110
Figura 62 <i>Cursograma de digitalización de la celda</i>	111
Figura 63 <i>Cursograma de generación de trayectoria</i>	112
Figura 64 <i>Ventana de trabajo RoboDK</i>	113
Figura 65 <i>Obtención de elementos en la biblioteca RoboDK</i>	115
Figura 66 <i>Posicionamiento de robot y riel lineal</i>	116
Figura 67 <i>Pilotaje de un elemento</i>	117
Figura 68 <i>Importar un elemento</i>	118
Figura 69 <i>Modelizar mecanismo o robot</i>	119
Figura 70 <i>Configuración de modelación de un mecanismo</i>	119
Figura 71 <i>Sincronización de ejes</i>	120
Figura 72 <i>Visualización de datos de calibración en el KCP</i>	121
Figura 73 <i>Ventana para introducir datos de calibración del TCP</i>	121
Figura 74 <i>Celda completa</i>	122
Figura 75 <i>Opciones del plugin de SolidWorks</i>	123
Figura 76 <i>Trayectorias dibujas en SolidWorks</i>	124
Figura 77 <i>Configuraciones de exportación plugin SolidWorks</i>	125

Figura 78	<i>Trayectorias importadas desde SolidWorks</i>	126
Figura 79	<i>CAD del rodete importado y ubicado</i>	127
Figura 80	<i>Configuración del proyecto de seguimiento de una curva</i>	128
Figura 81	<i>Configuración de targets para movimiento de la mesa</i>	129
Figura 82	<i>Targets agrupados</i>	130
Figura 83	<i>Configuración de un movimiento de eje</i>	131
Figura 84	<i>Llamado de programa hacia el programa principal</i>	132
Figura 85	<i>Alternación de llamados de programas</i>	132
Figura 86	<i>Selección del post-procesador</i>	133
Figura 87	<i>Generar programa de robot</i>	134
Figura 88	<i>Tiempo vs metodología</i>	150

RESUMEN

El presente proyecto realiza una investigación sobre volúmenes complejos, post procesadores, generación y programación de trayectorias con un brazo robótico para aplicación de soldadura MIG sobre volúmenes complejos, como la superficie de turbinas hidráulicas, disponibles en el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales CIRT CELEC-EP siendo el principal benefactor. La correcta ejecución del proceso de soldadura con estándares de calidad que requiere esta operación minuciosa, se basará en estudios bibliográficos y analíticos de procedimientos existentes, por consiguiente, tomando decisiones que lleven a la reducción de tiempos de programación y ejecución del proceso. Así mismo determinar una secuencia de pasos para poder facilitar la elaboración de trayectorias, por medio de una matriz comparativa con softwares específicos de programación offline discernir y escoger el software más apropiado, generación de código de trayectorias precisas sin puntos de aprendizaje, simulación/edición y optimización automática del movimiento del robot, con base al CAD 3D que será reparado. Como parte final del proyecto se elaborará una metodología y un plan de programación que permita determinar, mediante pruebas cronometradas la reducción del tiempo total de soldadura en geometrías complejas, en comparación con la alimentación manual de puntos, que es la forma en que se realiza actualmente.

PALABRAS CLAVE

- **SOLDADURA ROBOTIZADA**
- **OPTIMIZACIÓN**
- **PROCESOS INDUSTRIALES**

ABSTRACT

This project carries out an investigation on complex volumes, post processors, generation and programming of trajectories with a robotic arm for application of MIG welding on complex volumes, such as surface of hydraulic turbines, available at Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales CIRT CELEC-EP being the main benefactor. The correct execution of the welding process with quality standards that this meticulous operation requires, will be based on bibliographic and analytical studies of existing procedures, therefore, making decisions that lead to the reduction of programming and execution times of the process. Likewise, determine a sequence of steps to facilitate the development of trajectories, by means of a comparative matrix with specific offline programming software, discern and choose most appropriate software, generation of code of precise trajectories without learning points, simulation / editing and automatic optimization of the robot movement, based on the 3D CAD that will be repaired. As the final part of the project, a methodology and a programming plan will be developed that will allow to determine, through timed tests, the reduction of the total welding time in complex geometries, compared to manual feeding of points, which is the actual way.

KEYWORDS

- **ROBOTIZED WELDING**
- **OPTIMIZATION**
- **INDUSTRIAL PROCESSES**

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema

Los procesos de soldadura son parte del proceso de recuperación de material para turbinas hidráulicas, el desgaste de las mismas ocurre debido al alto índice de minerales, sedimentos, residuos sólidos y basura inmiscuidos en el agua que propulsa las turbomáquinas, minimizando el rendimiento operacional de la central hidroeléctrica. Existen diferentes factores que ralentizan el tiempo de ejecución de dicha operación.

En Ecuador la recuperación de turbinas hidráulicas es un proceso nuevo, que se lleva como auto ejecución hace pocos años gracias a la creación del Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales CIRT CELEC-EP por lo cual las investigaciones necesarias se encuentran encaminadas a la mejora de la calidad en el trabajo y tiempo para la recuperación de turbinas, asegurando así la disponibilidad de unidades de generación eléctrica del país.

Las turbinas Francis debido a su geometría compleja dificultan el trabajo por parte del brazo robotizado haciendo que la programación de trayectorias demande exceso de tiempo, en la actualidad las mismas son generadas e ingresadas manualmente mediante el *Teach pendant* del robot estando expuestas al error humano y repetición del proceso por la configuración distinta de cada rodete.

La creación de un método que automatice este proceso con el uso de software especializado minimizaría el error humano, evitaría choques del brazo robótico con la pieza en restauración y disminuiría el tiempo empleado en la recuperación de la turbina sin dejar de lado los procesos de calidad que conlleva la recuperación de material, por lo cual la generación de trayectorias a partir de un modelado 3D y un postproceso de las líneas de código generadas con el fin de obtener compatibilidad con el lenguaje propio del robot, tanto de trayectorias, posicionamiento y soldadura, reduciría el tiempo total de la reparación así como también la dificultad.

1.2. Antecedentes

La generación de energía eléctrica en el país se ha modificado significativamente durante la última década, a causa del cambio en la matriz energética del Ecuador, como principal característica del cambio surge el modelo de recursos explotados, teniendo para el año 2018 una capacidad instalada de generación eléctrica de 6204,1 (MW) según la Empresa Pública Estratégica Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC E.P.), teniendo en cuenta que el 71,71% de la energía es por aprovechamiento hidráulico.

Se debe indicar que la mayoría de hidroeléctricas del Ecuador se encuentran equipadas con turbinas tipo Francis; entre las principales: Toachi Pilatón de 254,40 MW de potencia prevista de tres turbinas tipo Francis de eje vertical, Sopladora de 487 MW de potencia que consta de tres turbinas tipo Francis, Hidronación de 213 MW que alberga tres unidades de generación con turbinas tipo Francis. Dicha turbomáquina es una turbina de reacción que utiliza agua como fluido de trabajo a flujo mixto, es decir el ingreso del fluido al rotor se da radialmente

y su expulsión se da en dirección axial, el nombre de la turbina parte por su desarrollador James B. Francis en 1848, su amplia utilización en centrales hidroeléctricas se debe al elevado rango de aplicación por su versatilidad en configuraciones de caudal y condiciones de cabeza (Yáñez Sánchez, 2017).

La recuperación de turbinas tipo Francis mediante soldadura robotizada se orienta a la mejora continua de procesos industriales en manufactura, el mercado competitivo junto a los elementos electromecánicos involucrados en la industria ha facilitado la fabricación en serie de varios productos relacionados, con optimización de tiempo e insumos.

El Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales CIRT CELEC-EP se crea bajo la premisa de realizar en el país los procesos de remanufacturado y recuperación de los elementos antes mencionados, ahorrando de esta manera gran cantidad de recursos y tiempo al estado, los cuales se generaban en el envío de turbinas o piezas de gran tamaño al extranjero, reparación y transporte de retorno de la pieza ya reparada. En la actualidad el CIRT CELEC-EP dispone de un grado sumamente elevado de tecnología, el uso de un brazo robótico en soldadura otorga eficiencia en la reparación y elaboración de turbinas, aprovechando las ventajas ofrecidas por la soldadura robotizada como son el excelente control de posicionamiento, la facilidad de acoplamiento a parámetros de procesos, fiabilidad y confiabilidad, reduciendo costos en el desarrollo.

A través de la programación un manipulador robótico para soldadura se favorecerá de forma notable la metodología de soldadura que conlleva la reparación de turbinas tipo Francis, permitiendo una óptima inserción de los procedimientos diseñados para soldadura robotizada sin apartarse de un sólido fundamento metalúrgico que proporciona garantía de calidad.

La geometría de este tipo de piezas ha generado que el procedimiento de soldadura robotizada demande gran cantidad de tiempo y actualmente la carga de los puntos de soldadura en el robot se realiza manualmente. Para lograr un proceso más eficiente de cálculo de trayectorias y puntos de soldadura es primordial el análisis de la solución cinemática del manipulador. En la actualidad se desarrollan nuevas teorías y tecnologías con el fin de mejorar las capacidades de los brazos robóticos que anteriormente se encontraban limitadas debido al servo control de ejes conjuntos separados (Mahidzal Dahari, 2011).

1.3. Justificación e Importancia

La mayoría de los ríos en la región andina cuentan con una gran cantidad de sedimentos, principalmente arena que se conforma por sílice y cuarzo, ambos de elevada dureza, que provocan severos daños si ingresan en contacto a grandes velocidades con elementos constitutivos del sistema de generación eléctrica, originando problemas de erosión, la generación hidráulica representa el 71% de la capacidad instalada en el Ecuador por este motivo es de gran importancia tener las instalaciones en óptimas condiciones de funcionamiento para que no existan repercusiones en el sistema productivo del país; una de las partes directamente relacionadas con la eficiencia de una central hidráulica es el estado mecánico del rodete así como un correcto mantenimiento, por este motivo es necesaria la optimización de estas centrales así como la recuperación de componentes, que son de elevado costo al adquirir reemplazos ocasionando costosas compras y largos tiempos de espera teniendo a la central en periodos extendidos de inactividad por mantenimiento.

En la recuperación de rodets de turbinas hidráulicas la utilización de la soldadura robotizada en procesos de aporte e injertos de material facilita y economiza procesos metalúrgicos, la importancia de la precisión y calidad de acabados que se obtiene al usar un brazo robótico en la geometría del elemento dan un gran ahorro al estado ecuatoriano en el sector energético, obteniendo una capacidad optima de funcionamientos a instalaciones que tengan partes recuperadas.

Dentro del territorio ecuatoriano existen empresas especializadas que utilizan de forma constante la soldadura en geometrías complejas, como es el caso de CIRT CELEC-EP, que se encuentra capacitada para restaurar turbinas hidráulicas y partes industriales.

Actualmente se necesita una mejora y agilización en estos procesos que son nuevos en Ecuador, por lo cual la presente investigación aportará con un método de programación de trayectorias que permitirá la recuperación de piezas industriales que actualmente se realiza en el extranjero, es decir ayudaría a desarrollar la matriz productiva del país y las empresas afines a soldadura robotizada.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Desarrollar una metodología de programación para procesos de soldadura robotizada aplicable a volúmenes complejos a partir de modelos CAD 3D, optimizando tiempos de programación y ejecución.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información, datos técnicos de la celda y sistemas de soldadura robotizada existentes.
- Compilar información sobre software especializado en tareas de obtención de código para soldadura y post proceso de líneas de código.
- Determinar algoritmos de generación de trayectoria, optimización de movimientos que faciliten el proceso de soldadura en volúmenes complejos de los datos CAD.
- Comprobar las trayectorias obtenidas en el brazo robótico mediante la ejecución en vacío de las mismas.
- Analizar el tiempo requerido antes y después de la implementación de la metodología propuesta.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Central hidroeléctrica

Una central hidroeléctrica son los resultados tecnológicos de la evolución de los antiguos molinos europeos, los cuales aprovechaban la corriente de ríos para mover piedras de moliendas, es definida como la instalación cuya misión es convertir la energía potencial y cinética del agua (salto geodésico) en energía eléctrica disponible la cual posteriormente se inyecta al anillo de interconexión eléctrica.

Esta definición implica que la central hidroeléctrica estará formada por todos aquellos elementos dispuestos como se ejemplifica en la figura 1, los cuales intervienen en dicha conversión de energía, los tipos de elementos son:

- Elementos de retención y almacenaje de agua, tales como embalses, presas o azudes.
- Elementos de conducción del agua, tales como obras de toma, canales, cámaras de carga, tuberías, sifones, etc.
- Elementos de apertura y cierre del paso de agua: compuertas, válvulas o ataguías.
- Equipamiento hidráulico: turbina, multiplicador, rejas y limpiarrejas.
- Equipamiento eléctrico: generador, transformador, línea eléctrica.
- Equipamiento de control y protección: interruptores, seccionadores, auto válvulas, red de tierras, etc.

- Equipamiento auxiliar: baterías de corriente continua iluminación, tomas de fuerza, etc.
- El edificio de la central.

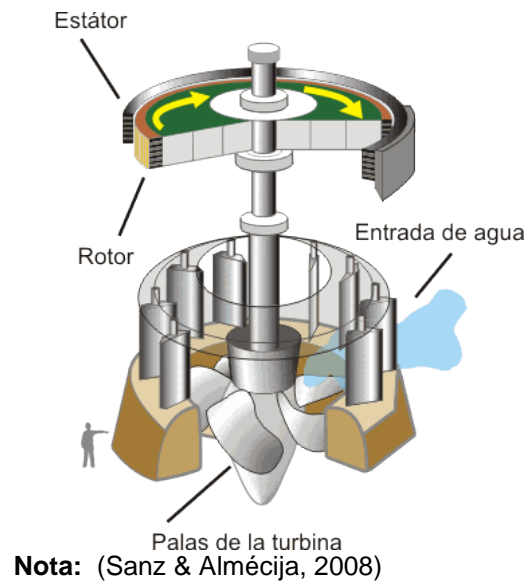
Todos los elementos que intervienen, desde la captación del agua hasta su devolución al cauce, todo el equipamiento que interviene en la transformación energética hasta la entrega de la energía eléctrica donde la compañía eléctrica disponga, forman parte de la central, por lo tanto, en el análisis de una central hidroeléctrica hay que considerar dos grandes bloques:

- Obra civil.
- Equipamiento electromecánico.

(Sanz & Almécija, 2008)

Figura 1

*Esquema de la central hidroeléctrica de Ip
en México.*



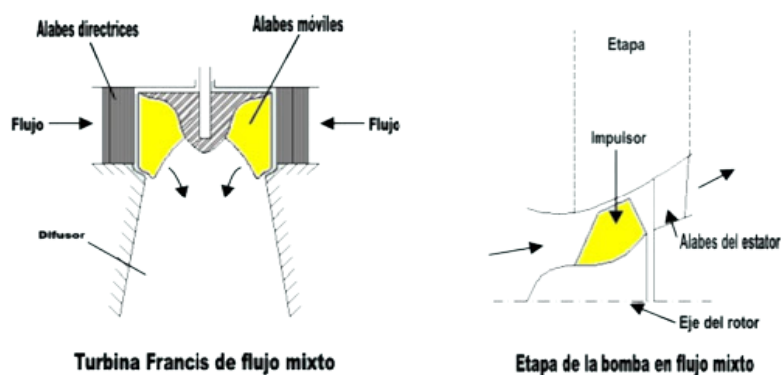
2.2. Turbina hidráulica

Las turbinas son turbomáquinas las cuales transforman la energía de un fluido en trabajo útil las cuales se componen de una serie de álabes fijos, (distribuidor), y de álabes móviles, (rueda, rodete, rotor), la combinación de los álabes fijos junto a la rueda móvil constituye una célula. Una turbomáquina según (L.F, 1998) viene a ser definida como, turbomáquinas son todo aquel componente mecánico en donde la energía es transmitida ya sea desde o a un flujo continuo de fluido por la acción dinámica de una o más filas a los álabes móviles, pudiendo ser de diferente disposición acorde al afluente ver figura 2. Desde un punto de vista profundo, el principio etimológico proviene del latín “turbinis”, el cual significa un componente que gira en forma de remolino.

En las turbomáquinas existen varias formas de clasificarlas una de ellas es referido a la dirección del flujo como se muestra en la figura 2, dando a lugar a tres formas diferentes: de flujo axial, flujo radial y flujo mixto.

Figura 2

Ejemplos de turbomáquinas.



Nota: (Saravanamuttoo, Rogers, & Cohen, 1996)

2.2.1. Clasificación de las turbinas hidráulicas

Los rodetes se constituyen como elemento principal en la turbina, conformados por álabes en los se origina el intercambio energético del agua y la máquina.

(Mallitasig, 2011)

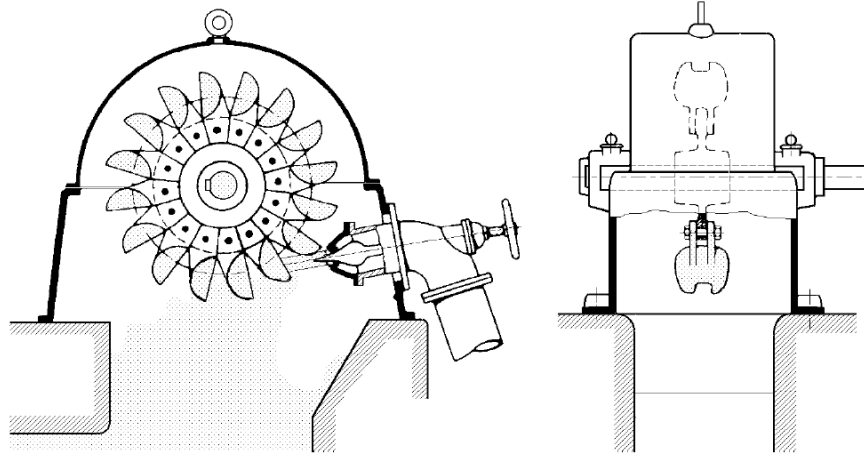
Clasificación por variación de presión

Debido a la variación de presión por parte del fluido, las turbinas se clasifican en turbinas de acción y reacción. (Mallitasig, 2011)

a. Turbinas de acción o impulsión

El agua sale de la entrada de la toma en la turbina a presión atmosférica y llega al rodete con la misma presión; en estas turbinas la energía aprovechada es toda la potencial del salto transmitida al rodete en forma de energía cinética.

Este tipo de turbinas se empiezan a usar antes de las de reacción una de las principales utilizadas en la generación de electricidad es la turbina Pelton la podemos observar en la figura 3. (Mallitasig, 2011)

Figura 3*Turbina Pelton***Nota:** (Mallitasig, 2011)**Turbina Pelton**

Este tipo de turbina es de la clasificación de acción, normalmente es de eje horizontal. este tipo de turbina se utiliza en condiciones de saltos de agua de gran altura superiores a los 200m y con pequeños caudales de agua de hasta $10 \frac{m^3}{s}$. La parte del distribuidor está formado por varios inyectores dirigidos a los cangilones del rodete. Los cangilones se encuentran situados por la periferia del rodete tomando una forma de cuchara, la fuerza que ejerce el agua en los cangilones(cucharetas) es la responsable de dar el impulso de giro a la turbina. (Viedman & Zamora, 1997)

b. Turbinas de reacción o sobrepresión

La presión del agua va disminuyendo a la par que recorre los álabes del rodete, la presión a la salida puede llegar a ser negativa; el agua circula a presión en el rodete y

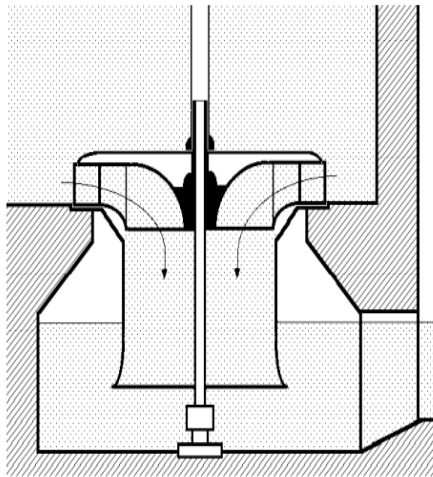
distribuidor, convirtiendo de esta manera a la energía potencial del salto geodésico, una parte en energía cinética y la otra en energía de presión. (Mallitasig, 2011)

Turbina Francis

Desarrollada en 1849 por James B. Francis, turbina con disposición de fácil acceso hacia el rodete, convirtiéndola en una turbina muy práctica, es radial centrípeta con tubo de aspiración. Funciona a elevadas RPM gracias a la facilidad que posee para ser regulada, tipo de turbina más empleado globalmente por su utilización en saltos variables, desde 0.5 a 180 metros véase en la figura 4.

Figura 4

Turbina Francis



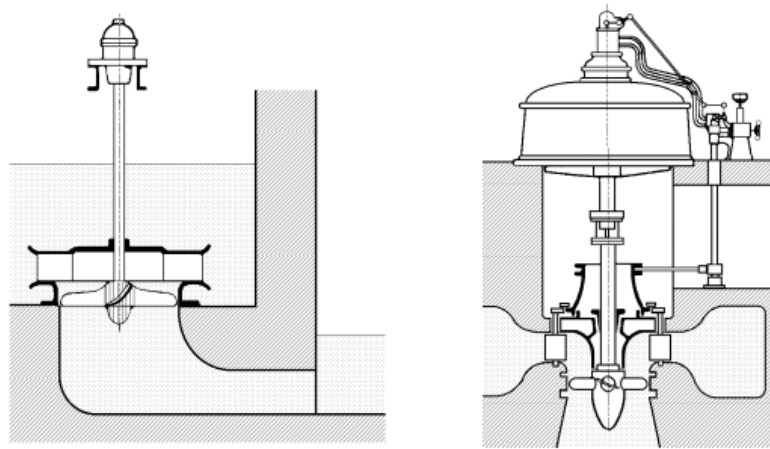
Nota: (Dixon, 1998)

Turbina Kaplan

Desarrollada den 1912 por Victor Kaplan, los álabes del rodete tienen forma de hélice, empleada en saltos de agua con pequeña altura con resultados de alto rendimiento, los álabes al ser orientables implican un paso variable. Si los álabes son fijos toma el nombre de turbina hélice.

Figura 5

Turbina Kaplan



Nota: (Dixon, 1998)

Clasificación por la dirección de entrada del agua

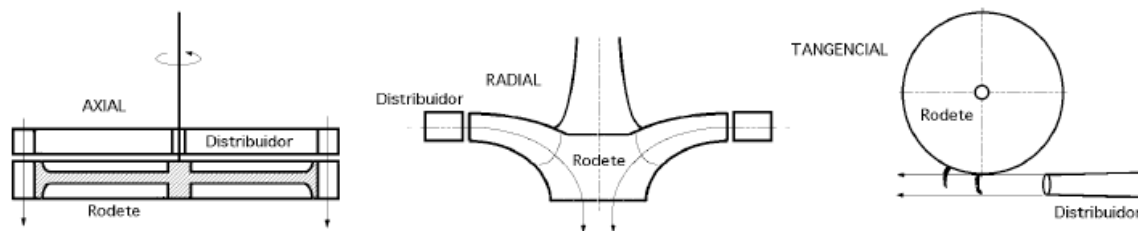
Tomando en cuenta la dirección de entrada del agua en las turbinas se clasifican de la siguiente forma

- a) **Axiales** el agua ingresa paralelamente al eje como ejemplo tenemos las turbinas Kaplan, hélice, Bulbo.

- b) **Radiales** el agua ingresa perpendicularmente al eje haciendo se centrifugas cuando el agua se direccione de adentro hacia fuera, centrípetas cuando el agua se direccione de afuera hacia dentro como ejemplo tenemos las turbinas Francis.
- c) **Mixtas** se obtiene con la combinación de las anteriores.
- d) **Tangenciales** el ingreso de agua lo hace de manera lateral o tangencial contra los cangilones o cucharas de la rueda como ejemplo tenemos las turbinas Pelton.
- Podemos observar en la ilustración los tres tipos de turbina:

Figura 6

Clasificación por la dirección de entrada del agua



Nota: (Mallitasig, 2011)

2.3. Problemas con las turbinas

Las turbinas hidráulicas en proceso de generación son la parte mecánica sometida a soportar cargas elevadas, el agua se conduce a presión por las toberas especializadas para este trabajo, impacta con una gran velocidad con cada uno de los álabes, esta fuerza transmitida por el agua a cada a los alabes haciendo que se ejerza un impulso instantáneo en el rodete, el alabe afectado permanece sin uso durante un giro completo. Lo cual conlleva a un elevado esfuerzo alternante en la base del alabe.

Para que no se produzca roturas por fatiga, los fabricantes realizan un proceso de recocido en la soldadura que está en la unión del rodete de la turbina al alabe. Es un proceso de calentado suave que mejorara la estabilidad del elemento. El calentamiento durante este proceso deberá realizarse de manera precisa y replicable, garantizando la completa homogeneidad en la firmeza del rodete. (Viedman & Zamora, 1997)

Figura 7

Recocido en alabes



Nota: (EMAG elde, 2018)

Los problemas recurrentes que desgastan a las turbinas hidráulicas son la cavitación, embalamiento y sedimentos contenidos en el agua (Viedman & Zamora, 1997)

2.3.1. Cavitación

Fenómeno ocasionado por la ebullición del líquido a temperatura ambiente provocado a muy bajas presiones que ocasiona golpes hidráulicos, se presenta al existir alta velocidad y alta

presión con baja contrapresión (por debajo de la tensión de vapor), causando pequeñas burbujas (cavidades) que al implosionar de forma molecular retiran material interno de las turbinas hasta causar el funcionamiento inapropiado de las mismas que conllevan a bajos niveles de rendimiento.

Figura 8

Rodete dañado por corrosión de cavitación



Nota: (Viedman & Zamora, 1997)

2.3.2. Embalamiento

En una turbina hidráulica cuando está en funcionamiento a condiciones de plena carga, puede existir la apertura inoportuna del interruptor de la central hidroeléctrica o al sacar carga, la velocidad puede alcanzar varias veces la velocidad nominal antes de que se dé acabo el corte en el suministro de agua. (Sanz J. , 2016)

Este embalamiento se da ya que al eliminar violentamente el par de freno que está ejerciendo el agua en el generador (esto se da al quedarse desconectado de la red), en tanto que el flujo de agua no se ha suspendido. (Sanz J. , 2016)

Este tiempo de corte del suministro de agua dependerá de la reacción de los elementos de control, especialmente del distribuidor de la turbina y de la válvula de guardia. Comúnmente la velocidad que llega alcanzar es de 130 y 180% la velocidad nominal. (Sanz J. , 2016)

Al llegar a fallar los elementos de control o cierre por alguna falla el flujo de agua seguirá actuando sobre la turbina misma acción provocara mayores velocidades. (Sanz J. , 2016)

Esta velocidad se denomina velocidad de embalamiento a la velocidad máxima alcanzada por una turbina con el distribuidor en una posición máxima apertura y la carga desconectada del generador es decir la central desconectada de la red. (Sanz J. , 2016)

Esta velocidad es importante ya que será la máxima velocidad que van a alcanzar los elementos que se encuentran conectados al eje de la turbina, es importante que la lubricación y cojinetes estén en óptimas condiciones y preparados para soportar las condiciones de un funcionamiento extremo, esta velocidad también es un indicador en el costo de un sistema ya que a mayor velocidad de embalamiento un sistema eleva su costo. (Sanz J. , 2016)

Tabla 1.

Velocidades de embalamiento respecto a la velocidad nominal

Tipos de turbina	Velocidad de embalamiento
	η_{emb}
Pelton	1,9
Francis, Ossberger	1,8
Kaplan	3

Nota: Tomada de (Sanz J. , 2016)

2.3.3. Sedimentos

Se entiende por sedimento a las partículas de materiales minerales y orgánicas, que están en la corriente de aguas los mismos que se sedimentan con condiciones adecuadas por los lechos fluviales.

Por el carácter que tienen en su movimiento los sedimentos podemos clasificarlos como: sedientos flotante y sedimentos de fondo (Ortiz, 2011)

- Sedimentos flotantes son aquellas partículas que comúnmente esta distribuidas de una manera uniforme por la sección transversal
- Sedimentos de fondo o también llamado escurrimiento solido son elementos los cuales tienen mayor peso y son arrastrados por el fondo del lecho.

La determinación de los sedimentos tiene una gran influencia para el funcionamiento de una hidroeléctrica, así como los daños que pueden ocasionar los mismos en los mecanismos que está en contacto directo con el agua.

- La captación se ve afectada por los sedimentos reduciendo la capacidad de caudal, lo cual origina sedimentos de mayor volumen mismos que pasan a la parte de conducción reduciendo el volumen del canal.
- Los sedimentos ocasionan un daño directo al rodete de una turbina como a sus alabes, ocasionando el mal funcionamiento y el requerimiento de reparación de los componentes que están en impacto con dichos sedimentos.
- Uno de los problemas que se da es el mal funcionamiento de desarenador lo que afecta al tanque de carga, esto produce que los sedimentos ingresen a la tubería de presión y posteriormente a la turbina esto re decir la vida útil de la turbina.

(Ortiz, 2011)

2.4. CIRT CELEC – EP

El Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales CIRT es parte de CELEC EP Hidroagoyán, en la ciudad de Baños de Agua Santa, Tungurahua Ecuador.

Su estructura funcional en cuanto a la distribución del personal y funciones, así como la infraestructura y equipamiento se ha implementado en relación a los procesos de recuperación y manufactura como soldadura, mecanizado, metrología, control de calidad e ingeniería

tomando en cuenta el impacto socioeconómico, ambiental que forman parte de los objetivos planteados y ejecutados por CELEC EP y su Unidad de Negocio Hidroagoyán.

El CIRT, tiene un impacto nacional en el sector eléctrico, específicamente en el de generación ya que aporta con la industrialización del mantenimiento preventivo, predictivo y correctivo de centrales hidroeléctricas, disminuyendo tiempos y costos en la entrega de partes o piezas, rompiendo de esta manera la dependencia tecnológica, creando nuevas actividades económicas para el sector industrial, tomando como base la investigación y creación.

Por otra parte, los equipos de última tecnología, así como la experiencia del personal permitirán brindar el aporte de soluciones tecnológicas, de servicios e investigación a la industria ecuatoriana en general.

Para su funcionamiento el CIRT posee una nave industrial de 1400 metros cuadrados con un ancho útil de 24 metros, longitud útil de 42 metros, oficinas interiores de 107 metros cuadrados.

Posee un área de metalizado de 120metros cuadrados, área de bodega de herramientas de 26 metros cuadrados, casa de fuerza eléctrica de 46 metros cuadrados, área de transformadores y centro de carga con una potencia de 2600 KW.

Dentro de la nave se desarrolla procesos de ingeniería de recuperación con software especializados CAD, CAM y CAE, procesos de manufactura y recuperación donde se realizan actividades de pulido, soldadura, maquinado y metalizado.

Procesos de control de calidad como tintas penetrantes, partículas magnéticas y ultrasonido para máxima calidad de procesos de recuperación el CIRT cuenta con laboratorios de metalografía y microscopia de barrido electrónico.

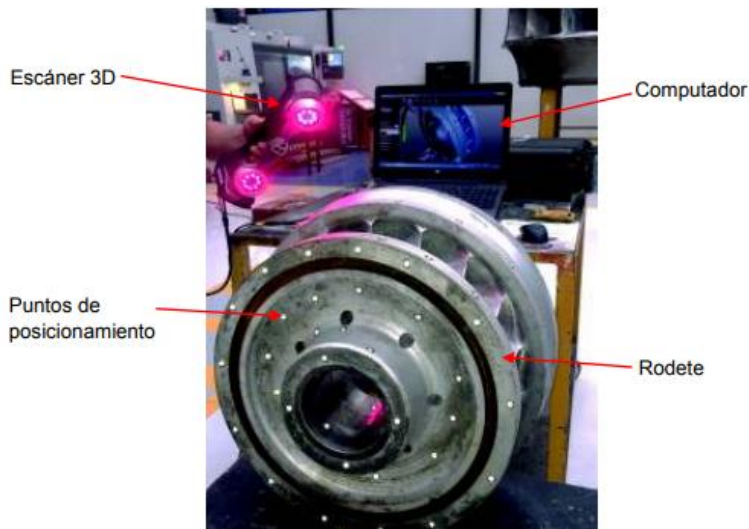
2.5. Ingeniería inversa y reconstrucción

La ingeniería inversa tiene como objetivo la obtención de información o el diseño a partir de un elemento ya existente utilizando distintos medios, los cuales ayudan al momento de realizar la restauración de piezas mecánicas, dichos medios ayudan a obtener un mallado o nube de puntos en 3 dimensiones del mismo con el fin de procesar esa malla para posteriormente comenzar con la reingeniería, rediseño o directamente a la fabricación del elemento o realizar modificaciones las cuales mejoren su desempeño y corrija errores en sus propiedades. Al reconstruir en 3D un elemento permite conocer aspectos geométricos de objetos que no se tiene referencia, ver figura 9.

Para el desarrollo de piezas y accesorios en el sector de generación, los ingenieros responsables de la reconstrucción y recuperación de elementos deben extraer las distintas dimensiones del elemento, estas deben ser precisas con el objeto de que el proceso de reingeniería tenga un desarrollo garantizado y el producto final tenga un buen ajuste y rendimiento además los datos dimensionales deben ser lo más completo posible. (Mora, 2018)

Figura 9

Escaneado 3D de un rodete tipo Francis



Nota: Tomada de (CIRT CELEC-EP,2017)

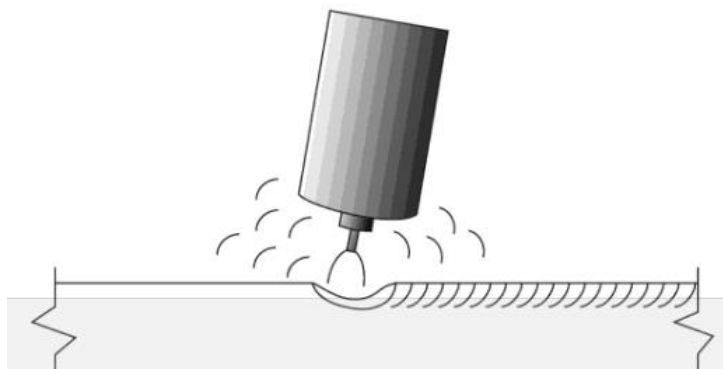
2.6. Soldadura GMAW

La soldadura GMAW básicamente utiliza un hilo (alambre) para soldar que se abastece automáticamente a una velocidad constante a manera de electrodo. Se produce un arco eléctrico entre el metal base y el hilo, dicho arco genera calentamiento el cual resulta en la fundición que proporciona la unión entre las placas base como se observa en la figura 10. (Larry, 2008)

Este tipo de soldadura se denomina como proceso de soldadura por arco semiautomático porque el hilo tiene un suministro automático a velocidad constante y el operario soldador mueve a la pistola. Durante este proceso un gas protege la soldadura de la atmosfera mitigando la oxidación del metal base. El tipo del gas protector utilizado depende del tipo de material que se va soldar. (Larry, 2008)

Figura 10

Proceso de soldadura GMAW



Nota: (Larry, 2008)

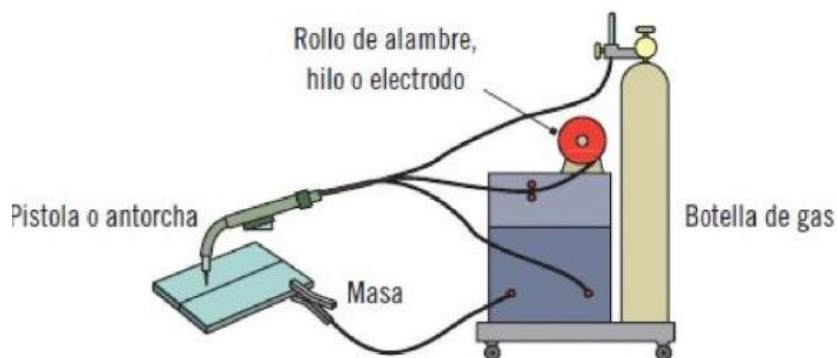
2.7. Soldadura MIG

La soldadura es un proceso fundamental en la industria y tiene su historia desde que el hombre empezó a usar metales, en procesos de recuperación de material en partes desgastadas la soldadura es muy usada ya sea para unir injertos como para relleno de partes que han perdido material por uso o por efectos ambientales. (Soto, 2017)

Soldadura MIG es un proceso de soldeo por arco eléctrico con protección de un gas inerte, el calor necesario para que se realice la soldadura es generado mediante un arco eléctrico, que se produce entre el electrodo y la superficie metálica a soldar. La finalidad de este proceso es mantener las propiedades de los metales que se está realizando la soldadura dando la mayor continuidad posible a la pieza resultante. (Soto, 2017)

Figura 11

Elementos básicos de un equipo de soldadura MIG



Nota: (Soto, 2017)

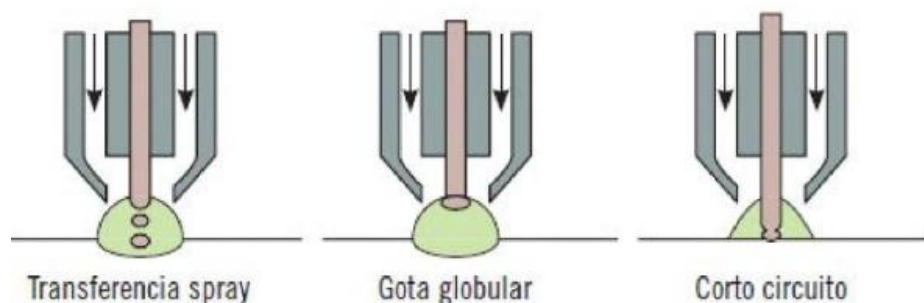
2.7.1. Formas de transferencia de material

Transferencia por cortocircuito: esta forma viene dada por el contacto del electrodo con el metal depositado y ocurre con baja intensidad y tensión de soldeo.

Transferencia globular: para este caso el metal es transferido en forma de gotas de un tamaño superior al diámetro del electrodo.

Transferencia en spray: se desprende pequeñas gotas del electrodo que viajan por el arco hasta la el material base.

Transferencia por arco pulsado: en el caso del arco por spray los impulsos para la transferencia se realizar aleatoriamente, en este caso el pulsado es de forma regular. (Soto, 2017)

Figura 12*Formas de transferencia de material***Nota:** (Soto, 2017)

2.8. Soldadura Robotizada

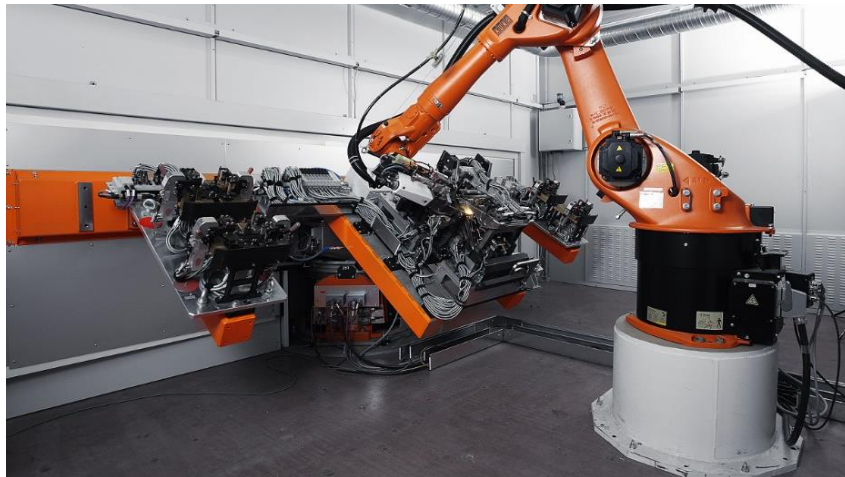
Los procesos de soldadura difieren entre las necesidades de fabricación o aplicaciones en los que se emplean, su selección se da por medio de diferentes variables, las cuales pueden tener combinaciones infinitas. En la actualidad la ingeniería de soldadura se ha enfocado en englobar todos estos procesos con el fin de optimizar las diferentes variables que pueden abarcar todo el proceso de soldadura, al momento no se ha podido llegar a descartar de forma total la mano de obra por parte del soldador calificado en la soldadura robotizada, el conocimiento en el arte de soldadura y metalurgia por parte de los mismos debe ser incluido dentro de nuevas actualizaciones en el sector, con el fin de mejoras en la competitividad, la compaginación de ambas partes nos brinda resultados excepcionales, reduciendo el tiempo de puesta a punto para los procesos.

Actualmente el mercado global exige a los fabricantes la producción en menores periodos de tiempo, aumentar su flexibilidad, reparación acelerada en procesos que conlleva adición de material, inserción de elementos, todo esto sin reducir la calidad en los servicios y

productos. Gracias a estos parámetros la utilización de robots soldadores como complemento en dichas tareas son alternativas totalmente viables ver figura 13, gracias a su facilidad en la reducción de ciclos por pieza que un operario humano, siendo sencilla la adaptabilidad a los cambios que se ofrecen. (Roman, 2005)

Figura 13

KUKA AG



Nota: (KUKA AG, 2020)

2.8.1. Brazo robótico soldador.

2.8.1.1. Brazo robótico.

Un gran porcentaje de los robots industriales son brazos articulados. De acuerdo a la definición del “Robot Institute of American”, “un robot industrial es un manipulador programable multifuncional diseñado para mover materiales, piezas, herramientas o dispositivos especiales, mediante movimientos variados, programados para la ejecución de distintas tareas”. (Ollero, 2005)

Figura 14

Brazo robótico



Nota: (KUKA AG, 2020)

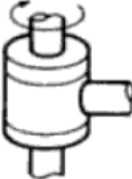
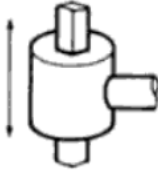
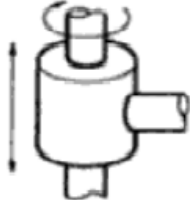
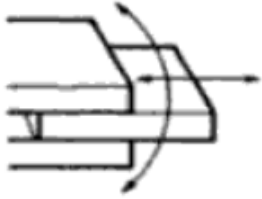

2.8.1.2. Características

Está constituido por seis articulaciones las cuales se encuentran unidas entre si además tiene un controlador para el brazo robótico y actuadores para cada sección.

Tiene la capacidad de acuerdo a la aplicación de realizar movimientos precisos.

Podemos encontrar algunas configuraciones básicas que ayudan a entender la morfología, así como el movimiento del brazo mismas que estarán compuestas por los distintos tipos de articulaciones existentes. (Ollero, 2005)

Tabla 2.*Articulaciones de los robots*

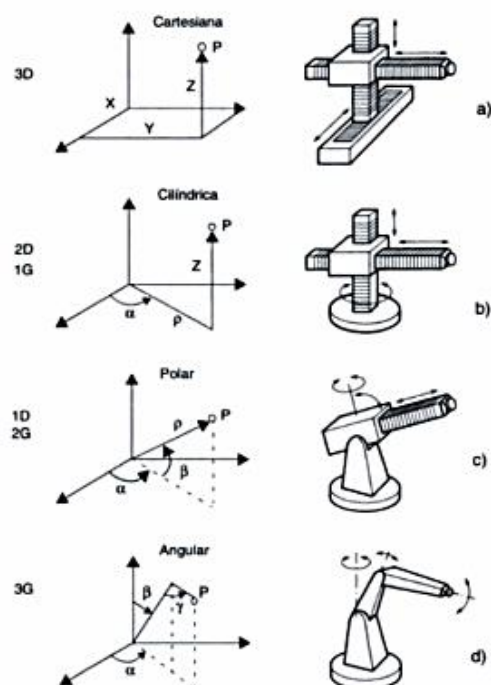
Esquema	Articulación	Grados de libertad
	Rotación	1
	Prismática	1
	Cilíndrica	2
	Planar	2
	Esférica (rotula)	3

Nota: (Ollero, 2005)

En la figura se puede observar las configuraciones cartesianas, Aquella que tiene tres articulaciones prismáticas(3D) o estructura PPP este tipo de configuración es bastante común en las estructuras de robots industriales. (Ollero, 2005)

Figura 15

Configuraciones cartesianas



Nota: (Ollero, 2005)

2.8.1.2.1 Cinemática Inversa

La cinemática inversa comienza partiendo de una posición dada del efector final y la longitud existente en cada enlace, para encontrar los ángulos de las articulaciones, consiste en hallar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares del robot $q =$

$(q_1, q_2, \dots, q_n) \exp T$ para que su extremo tome la posiciones y se oriente según una

determinada localización en el espacio. El proceso para la obtención de las ecuaciones es dependiente de la configuración que posee el robot a estudiar. Las problemáticas que se pueden encontrar en estos casos son valores de las variables articulares para que el enlace terminal tenga una determinada posición y orientación, se deben resolver un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales simultáneas. Los problemas que se pueden generar son: ecuaciones no lineales (seno, coseno en matrices de rotación), múltiples soluciones, no exista solución y singularidades.

Para la solución de un proceso que se aplique la cinemática inversa se puede aplicar distintos métodos dependiendo del caso que se va a estudiar.

- Métodos geométricos son mayormente utilizado para las primeras variables articulares, se usa relaciones geométricas y trigonométricas en otras palabras la resolución de triángulos.
- Resolución a partiendo de matrices de transformación homogénea, esto es despejando n variables q_i en función a las componentes existentes en los vectores.
- Desacoplamiento cinemático es aplicado en robots de 6 grados de libertad, separando la orientación del posicionamiento
- En otros casos podemos aplicar la algebra de tornillo, cuaterniones duales métodos interactivos. (Reyes, 2010)

2.8.1.3. Actuadores.

Generan la fuerza, así como los pares necesarios para que así la estructura mecánica sea animada, se puede encontrar tecnologías hidráulicas y neumáticas, en la actualidad se ha optado por el uso de motores eléctricos específicamente los motores de corriente continua servocontrolados, existen algunos casos que se han empleado motores paso a paso y otros actuadores electromecánicos que carecen de escobillas.

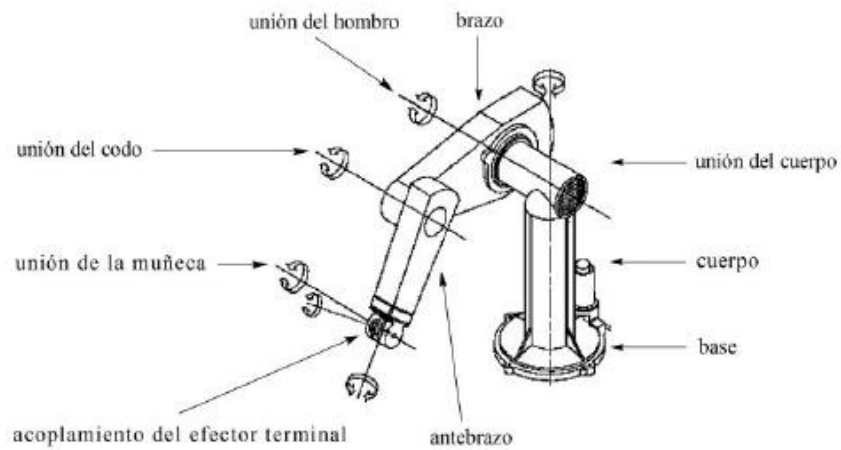
Un mecanismo de transmisión en robot industriales es el accionamiento directo el cual permite eliminar los problemas inherentes cuando se usa engranajes u otras transmisiones mecánicas.

2.8.1.4. Cuerpo de un brazo robótico.

La constitución de un brazo robótico es de elementos mecánicos los cuales permiten el movimiento interconectado, en su interior se puede encontrar elementos motrices como sistemas de transmisión (engranes) los mismos que soportan el movimiento de cuatro partes principales base, cuerpo, brazo y antebrazo. En la figura 16 se puede observar con detalle las partes de la cual está formado el robot.

Figura 16

Partes de un brazo robótico



Nota: (Ollero, 2005)

2.8.1.5. Controlador.

El controlador de un robot es el cerebro del mismo el cual está encargada de monitorear y controlar todos los motores, sensores y parámetros mecánicos como eléctricos del robot, así como también de elementos externos que estén conectados a él para sincronizando y optimizado el trabajo que debe realizar, en la figura 17 se puede observar su estructura.

Figura 17

KCP (KUKA Control Panel) y controlador



Nota: (KUKA AG, 2020)

Existe dos subsistemas o módulos los cuales están encargados de actuar en distintas áreas del robot. Estos módulos son: a) Modulo de potencia, b) Modulo de control c) Consola hombre máquina. (Reyes, 2010)

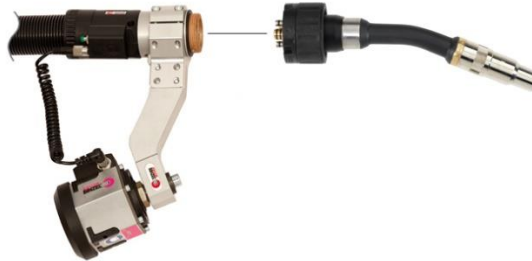
- a) Es el encargado del suministro y control de energía eléctrica que necesitan los módulos, como puede ser los servos motores que dan el movimiento a los ejes del robot para que así el brazo robótico se pueda desplazar siguiendo puntos y trayectorias definidas. Cuenta con dispositivos de protección y accionamiento eléctrico como un interruptor mismo que se encuentran comunicados con el sistema de seguridad y paro de emergencia, ya que, en situación de operación incorrecta, así como movimientos peligrosos para el operador, maquina u trabajo que este desempeñando pueda suspender la energía en el sistema.
- b) Está constituido por una computadora principal que gobierna el sistema, podemos encontrar elementos de paro de emergencia, modos de operación (Manual y

automático), las respectivas conexiones entre los módulos, señales luminosas de estados. Tiene la capacidad de procesar información proveniente de sensores y mecanismos que permitirán la suspensión de movimientos o el paro total en caso de un error o accidente. Cuenta con tarjetas de interfaz de comunicación que ayudan al operario pueda realizar protocolos de comunicación, cargar configuraciones y parametrización. También se puede encontrar elementos tales como PLCs, HMIs, que estén vinculados a los procesos que realiza el controlador.

- c) Está formada por una pequeña consola con pantalla la cual tiene un teclado y un apuntador táctil, alrededor de la pantalla cuenta con botones tipo joystick, paro de emergencia y en su parte posterior el botón de hombre muerto el cual ayuda a que la consola hombre maquina no envíe instrucciones directas de movimiento si no se encuentra presionado. Se le llama de distintas maneras las más conocidas es Teach Pendant y en el caso de KUKA (KCP KUKA control panel). (Reyes, 2010)

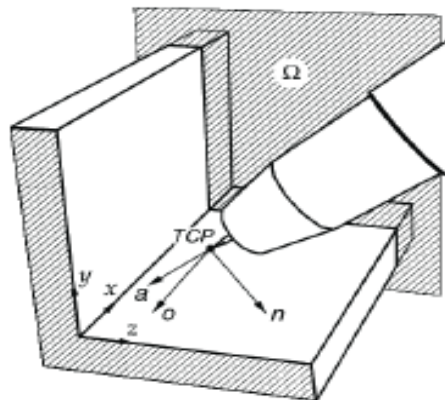
2.8.2. Herramienta de soldadura robotizada.

- **Antorcha de soldadura** es la parte donde se realiza el proceso de alimentación tanto del gas inerte como de el alambre o electrodo, es muy importante la selección del tipo de antorcha dependiendo el trabajo a realizar ya que esto será importante para obtener mejores resultados en el trabajo de soldadura. En la figura 18 podemos ver un ejemplo de herramienta y antorcha para soldadura robotizada (Maury, Niebles, & Torres, 2009)

Figura 18*Antorcha de soldadura***Nota:** (Abicor binzel, 2018)

Hay que tomar en cuenta ciertas características según (Maury, Niebles, & Torres, 2009)

- **Tool Center Point (TCP)** Punto de referencia en el espacio ubicado al extremo del robot, el TCP esta referenciado matemáticamente a la brida del robot, con esto el robot sabe la ubicación de la punta del hilo de soldadura. En la siguiente figura se puede observar el TCP en un proceso de soldadura GMAW. (Moreno, 2016)

Figura 19*Tool Center Point (TCP)***Nota:** (Fanuc, 2018)

- **Configuraciones de cuello** existe variedades de configuraciones de inclinación de la herramienta con la inclinación del cuello, los cuales serán usados de acuerdo al trabajo a realizar, continuación se citará algunos ejemplos en la siguiente tabla.

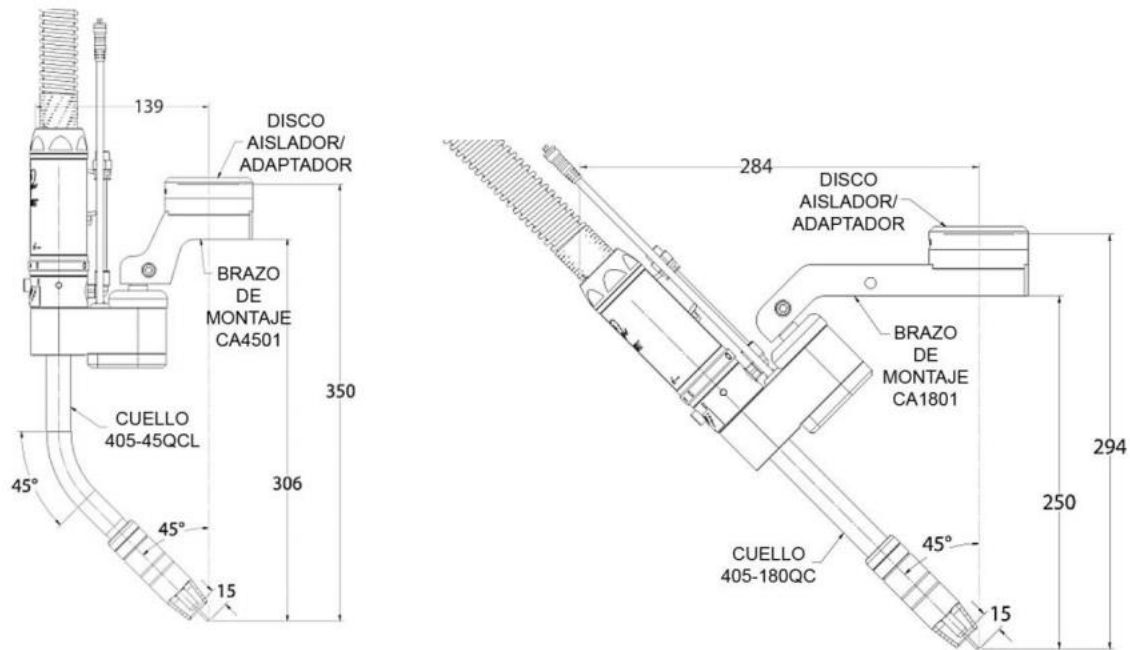
Tabla 3.*Configuraciones de cuello y herramienta*

Angulo de montaje	Angulo de cuello	Aplicación
23°	22°	Funciona de una mejor manera al momento de soldar pequeños círculos, así como también en torno a de un eje, la antorcha tiene la capacidad de girar alrededor del sexto eje es decir en la parte que se monta la antorcha al brazo
0°	45°	Tiene un mejor desempeño cuando se tiene la necesidad de llegar a pequeñas aberturas (Moreno, 2016)

Nota: Tomada de (Tregaskiss., 2015)

Figura 20

Configuración de cuello 45° y 22°



Nota: (Tregaskiss., 2015)

- Rotación de la antorcha** esta rotación depende de cuantos puntos se pretende programar y el tiempo empleado en cada movimiento, los conductores externos de una antorcha son lo limitantes de la rotación del brazo a +/-240, después de que se ha realizado una soldadura circular, el robot trata de ponerse en una posición tal que el siguiente punto del programa llevara a la antorcha a un área segura, así como también desenrollarla los conductores o cables. Las antorchas que poseen más ángulo o libertad de giro son capaces de reducir el tiempo de programación por ende se reducirá el tiempo que la antorcha este improductiva en el aire y también se multiplicará la vida útil de la antorcha. (Moreno, 2016)

- **Tobera de gas** existen varios mecanismos de fijación de una tobera de gas las cuales afectara en la perdida de gas, así como en la protección del proceso de soldadura uno de estos mecanismos es la fijación por tobera roscada la cual ofrece más fiabilidad y menos perdidas de gas pero si está bien diseñada y montada, ya que las fluctuaciones de temperatura puede provocar que se afloje y fugue el gas, los mecanismos de sujeción por presión esta constituidos por una ranura que se expande y presiona a la tobera hacia el cuello de soldadura, este sistema ofrece una mejor refrigeración pero también existe mayores pérdidas de gas que se producen por dichas ranuras, la sujeción no es muy segura como la que brinda el mecanismo roscado. (Moreno, 2016)

Figura 21

Rosca y sujeción por presión



Nota: (ESAB, 2014)

2.9. Planificación de trayectorias

Conlleva el procedimiento gracias al que se seleccionan todas las variables de entrada y movimientos relacionados con el objetivo de satisfacer las restricciones correspondientes a la problemática en la dinámica del robot. Como objetivo fundamental en la planificación de trayectorias es la generación de referencias para la entrada del sistema de control de

movimientos, que busca garantizar el desarrollo de la trayectoria posteriormente planeada, generando la secuencia durante el tiempo de los valores alcanzados, gracias a una función de interpolación en la trayectoria requerida.

Se encuentra sujeto al tipo de movimiento que va a seguir el manipulador la especificación de detalles adicionales y no solamente la configuración inicial y final, la forma de incluir más detalles dentro de la descripción de trabajo es mediante la introducción de una sucesión de puntos intermedios, regularmente llamados puntos vía (Flóres & Castro, 2014).

2.10. Post-procesado para códigos KRL

En este paso del procesamiento de códigos generados, un software ejecuta la segmentación en las direcciones que trabajara el robot en la zona a trabajar, para posteriormente convertir la figura en códigos KRL entendibles para el sistema del robot KUKA, estos códigos contienen las posiciones, trayectorias y velocidades de movimiento del brazo robótico.

Offline paramétrica, consiste en la creación de líneas de códigos en un lenguaje del robot mediante scripts personalizados, automatizando y haciendo que el proceso de soldadura sea controlado los parámetros.

El KRL (KUKA Robot Lenguaje) el lenguaje de programación de los robots KUKA, este es de carácter propietario con simulaciones al lenguaje Pascal. A diferencia de los códigos ISO (códigos G).no solamente contiene ordenes que definen los parámetros de movimiento del robot, sino que puede declarar variables y trabajar con sentencias condicionales. En otras

palabras, el lenguaje KRL consta de dos archivos separados con extensión .DATA el cual es donde se almacenan variables como posición inicial y el archivo con extensión .SRC que contiene los comandos como de movimiento, bucles y entradas.

El trabajo de soldadura con robots necesariamente debe ser controlado con precisión la ubicación que deberá adoptar, por lo que es necesario trabajar con coordenadas cartesianas. la simulación de la cinemática del brazo robótico en un entorno de diseño permite al operador reaccionar ante las posibles colisiones y los lugares de geometría compleja a la que el robot tiene que llegar, optimizando el espacio de trabajo que se dispone en el lugar donde se desenvolverá el robot (Lasluisa, 2017).

CAPÍTULO III

PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Modalidad de investigación

El abordaje investigativo para el desarrollo de la metodología de programación en procesos de soldadura robotizada, se toman en cuenta diferentes parámetros técnicos que serán de suma importancia para el desarrollo de la misma, así como varios criterios de selección de software de programación fuera de línea, para lo cual se utilizan las siguientes modalidades.

3.1.1. Investigación documental

Se inicia con la determinación de información necesaria para la selección de los softwares que se acogen de mejor manera a los requerimientos del trabajo desarrollado dentro de las instalaciones de CIRT CELEC-EP; basados en información presente en medios bibliográficos, artículos científicos, foros de robótica industrial, paginas comerciales y manuales de usuario.

Por lo cual se llega a establecer diferentes medios o alternativas de resolución a favor de los requerimientos, los cuales serán de suma importancia en el desarrollo del presente proyecto. (Tena & Rivas, 2007)

3.1.2. Investigación experimental

Culminada la recolección de información necesaria tanto de la celda como las características que beneficien al trabajo a realizar por el software, se continuará la elaboración de una matriz comparativa entre los distritos softwares tanto libres como comerciales existentes, observando cual es más viable en la generación de trayectorias, tomando en cuenta los equipos implementados en la celda y los datos obtenidos al inicio de la operación como el modelo CAD, para realizar este análisis se tomará en cuenta los siguientes parámetros específicos :

- Tipo de licencia
- Biblioteca de software
- Implementación de equipos externos al robot
- Generación de archivos DAT y SRC
- Interfaz
- Compatibilidad técnica con el equipo instalado en el CIRT CELEC-EP

(Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2014)

3.1.3. Investigación de campo

Se realizará al momento en el que se haya seleccionado un software que cumpla con las características de funcionalidad dentro de los equipos instalados en la celda de soldadura robotizada de CIRT CELEC-EP, generando trayectorias en una turbina tipo Francis,

comparando el tiempo de generación de las trayectorias de forma manual y con el software especializado. (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2014)

3.2. Tipos de investigación

3.2.1. investigación aplicada

El presente proyecto tiene como finalidad determinar y mostrar una metodología de generación de trayectorias de soldadura basada en una programación fuera de línea “off-line” utilizando un software especializado, con fundamento en investigaciones realizadas en el área de la robótica industrial y procesos de soldadura para de esta manera cumplir con lo descrito en la metodología. (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2014)

3.2.2. Investigación de método deductivo

Se determinan las características funcionales de cada software especializado mediante las prestaciones de disponibilidad y objetividad para el trabajo requerido, evaluando el desempeño en simulación, compatibilidad con los elementos mecánicos, precio en el mercado, capacidad de procesamiento de datos, compilación del lenguaje KRC e información disponible.

Mediante la evaluación del desempeño de los mismos en pruebas simuladas por computador y con el equipo instalado. (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2014)

3.3. Diseño de la investigación

Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, se realizará una investigación documentada para seleccionar un software a utilizar dentro de los existentes; para ello se tendrá en cuenta sus características y desempeño con relación al equipo instalado en el CIRT CELEC-EP. Se realizará el diseño de la metodología misma que estará sujeta a cambios con el fin de obtener la mejor opción para cumplir el proceso determinado. Como parte final se ejecutará pruebas de funcionamiento de la celda con programas generados con la metodología diseñada para determinar la diferencia entre las trayectorias realizadas con el método actual y el método propuesto, tomando en cuenta los tiempos de generación de la trayectoria como la factibilidad en el desarrollo. (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2014)

3.4. Niveles de investigación

3.4.1. Nivel explicativo

La programación en línea conlleva una pérdida del tiempo de producción, siendo en la mayoría de los casos un proceso tedioso, con un margen de error humano; mediante la programación fuera de línea se puede optimizar el entorno de producción eliminando el tiempo de inactividad ocasionado por la programación en línea, aportando con varias opciones y escenarios planteados gracias a la simulación de la celda robotizada antes de iniciar el proceso de soldadura en la celda física, disminuyendo en gran medida los errores causados por colisión y singularidades.

El tiempo de generación de nuevos programas operacionales puede ser reducido de semanas a un solo día, lo que permite mayor productividad en el proceso de reparación de turbinas. (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2014)

3.4.2. Nivel descriptivo

Este nivel es utilizado para plantear la hipótesis que se fundamenta en el nivel explicativo, por medio de esta investigación se definirá correctamente los objetivos del proyecto ya que se realizará el diseño de la metodología de generación de trayectoria como objetivo principal el desarrollo de una metodología de programación en procesos de soldadura robotizada aplicado a volúmenes complejos a partir de modelos CAD 3D optimizando tiempos de programación y ejecución ayudando de esta forma a agilizar los procesos de reparación en turbinas de las distintas centrales del país. (Rodríguez, 2005)

3.5. Técnica de recolección de datos

En el diseño de una metodología de programación existe datos los cuales serán determinantes para su correcta ejecución, en este caso serán las medidas y posiciones en el espacio de la celda real mismas que servirán para la parametrización y digitalización de la celda en el software, las cuales se realizarán con herramientas de medición como: nivel, micrómetro de exteriores, micrómetros de interiores, escuadras, calibradores vernier. La obtención de las dimensiones de la herramienta de soldadura se las realizará usando un escáner 3D, todos estos datos serán de gran importancia para realizar la digitalización de todos los equipos instalados en la celda de soldadura. (Hernandez, Fernandez, & Baptista, 2014)

3.6. Técnica de análisis de datos

A través de la identificación de prestaciones disponibles por los diferentes softwares se procede a realizar una matriz comparativa, para escoger de la mejor manera el software que se adapta a todas las características requeridas en la ejecución de los trabajos realizados por CIRT CELEC-EP, ya que puede existir varios conflictos de comunicación, compatibilidad y control de los elementos adicionales de la celda robotizada. Con el objetivo de una mayor precisión en el dimensionamiento de los elementos constituyentes de la celda se ejecutará un proceso de ingeniería inversa, el cual consiste en el escaneo y reconstrucción de la herramienta utilizada en la actualidad por el robot, diseño de la mesa giratoria al ser un mecanismo implementado para dicha celda en específico. (Rodríguez, 2005)

3.7. Técnicas de comprobación de la hipótesis

La comprobación de la hipótesis se basa en el método de validación interna, en base a pruebas en el funcionamiento y desempeño de los códigos de programación en KRL obtenidos por el software seleccionado, verificando los tiempos de ejecución actuales con los propuestos. (Rodríguez, 2005)

CAPÍTULO IV

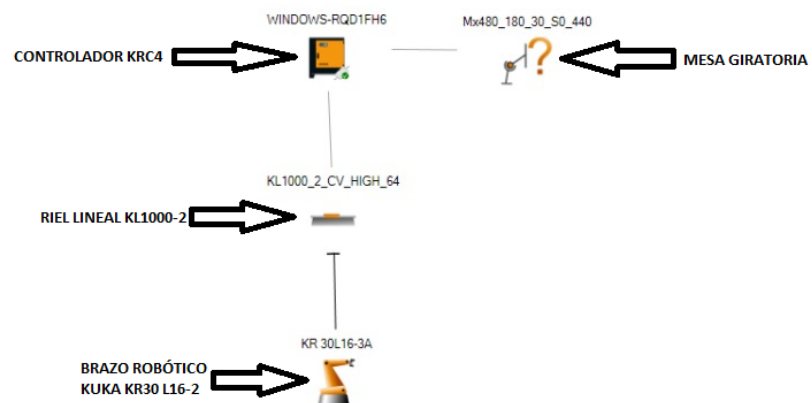
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. Recopilación de datos

El centro de investigación y recuperación de turbinas y partes industriales CIRT CELEC-EP, cuenta con una celda de soldadura robotizada con la siguiente comunicación entre elementos:

Figura 22

Estructura de comunicación entre los elementos de la celda de soldadura en el CIRT-CELEC-EP



4.1.1. Brazo robótico

Tabla 4.*Datos técnicos del brazo robótico*

Modelo	KR30 L16
Marca	KUKA
Número de ejes	6
Tipo de soldadura	GMAW
Velocidad	2 m/s
Seguridad	Sensores de proximidad, temperatura

4.1.2. Riel lineal

Tabla 5.*Datos técnicos riel lineal*

Modelo	KUKA KL 1000-2
Carrera nominal máx.	30.22 mm
Velocidad con carga nominal	1,89 m/s
Repetibilidad de posición	< +- 0,02 mm
Número de ejes	1
Ejecución	CV, C
Masa carro de desplazamiento	320 kg
Carga nominal	1000 kg
Masa del bastidor soporte por metro	300 kg
Carrera nominal mín.	1200 mm
Graduación de la carrera nominal	500 mm
Transmisión de fuerza	Cremallera

4.1.3. Controlador

Tabla 6.

Datos técnicos del controlador



Modelo	KR C4
Dimensiones (HxLxA)	960x792x558 mm
Procesador	Tecnología MultiCore
Disco duro	SSD
Punto de conexión	USB3.0, GbE, DVI.I
Numero de ejes (máx.)	9
Frecuencia de red	49 a 61 Hz
Tensión de conexión nominal	CA 3 x 308V a 3 x 575
Tipo de protección	IP54
Temperatura ambiente	De 5°C a + 45 °C
Peso	150 kg

4.1.4. Mesa giratoria

Tabla 7.

Datos técnicos mesa giratoria



Nombre	Mx480_180_30_S0_440
Capacidad	30 ton
Potencia	8,3 KW
Amperaje	15,5
Voltaje	203
Aceite	Meropa 150

4.1.5. Fuente de energía de soldadura trifásica

Tabla 8.

Datos técnicos de suelda trifásica, Cebora Evo speed star 520 TS



Entrada trifásica	400V 50/60 Hz + 15% / -20%
Capacidad del fusible	40 A
Potencia de entrada	26,0 kVA 40% 22,0 kVA 60% 20,5 kVA 100%
Mínimo máximo. corriente que se puede obtener en soldadura	10A ÷ 520A
Ciclo de trabajo (10 min. 40 ° C)	500A 40% 470A 60% 440A 100%
Tamaño de cable que se puede utilizar	0,8/0,9/1,0/1,2/1,6 Fe 0,9/1,0/1,2/1,6 Al 0,8/0,9/1,0/1,2/1,6 Inox 0,8/0,9/1,0/1,2 Cu-Si 3%

	0,8/1,0/1,2 Cu-Al8 (AlBz8)
Max. tamaño del carrete de alambre	Ø 300 mm /15 Kg
Electrodos que se pueden usar	Ø 1,5 ÷ Ø 6,0
Grado de protección	IP 23 S
Peso	118 kg
Dimensiones mm	588x1087x1396

4.1.6. Antorcha de soldadura

Tabla 9.

Datos técnicos de antorcha de soldadura, Abicor Binzel WH500 22

1	Tobera
2	Tubo de contacto, depende del diámetro y tipo de hilo
3	Porta tubos
4	Casquillo aislante

5	Enchufe cruzado
6	Tuerca soldadura, depende del diámetro y tipo de hilo
Tipo de refrigeración	Líquido
Ø del hilo	0,8 – 1,6
Temperatura de alimentación	Máximo 50 °C
Circulación	Mínimo 1,0 l/min
Presión de flujo	1,5 – 3,5 bar

4.2. Dimensionamiento de la celda

Se tomaron las dimensiones de la mesa giratoria; al no ser un elemento comercial de KUKA o de otras marcas de robots no se encuentra en bibliotecas y debe ser digitalizada con la ayuda de un programa CAD 3D.

Para la orientación del plano cartesiano de toda la celda en X Y Z se tomaron como referencia puntos fijos de la celda física.

Orientando la posición de todo el sistema en HOME se procedió a tomar como referencia el centro de la base del robot, el diámetro de la base del robot físico es medido con un micrómetro. Toma de medida del diámetro de la base del robot.

Figura 23

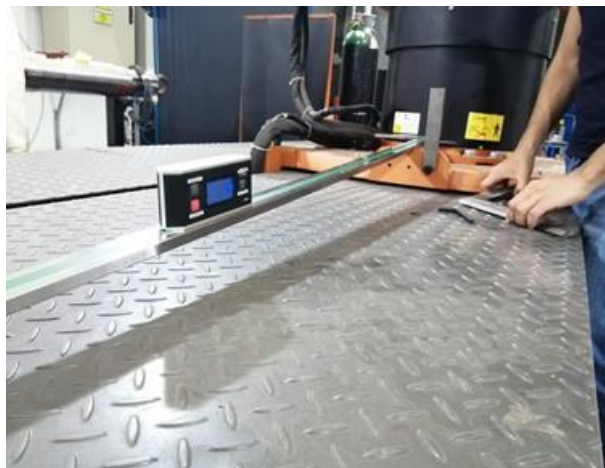
Toma de medida del diámetro de la base del robot



Se tomó la medida desde la base del robot hacia el borde de la mesa giratoria con la ayuda de dos calibradores pie de rey, escuadra y nivel digital.

Figura 24

Toma de medida de la distancia entre la base del robot hacia el borde de la mesa giratoria



Fueron tomados dos puntos que servirán como referencia para la toma de medidas, verificando su nivel.

Figura 25

Establecimiento de primera referencia verificando el nivel



Figura 26

Establecimiento de segunda referencia verificando el nivel



Por medio de dos pies de rey y un nivel digital se obtuvo la altura desde el primer punto de referencia con respecto la base de la mesa.

Figura 27

Medición de altura desde la base de la mesa al punto de referencia



Tomando como referencia el punto sobre la base del robot, se iteró el punto anterior para la medida entre la superficie del plato giratorio de la mesa y el punto antes mencionado apoyados con un micrómetro de interiores.

Figura 28

Toma de referencia sobre la base del robot

**Figura 29**

Referencia de la base de la mesa al punto de referencia en la base del robot



Con la ayuda del robot se obtuvieron 3 puntos de referencia en el eje x con respecto al plato giratorio, en el centro y hacia los costados.


Centro

Figura 30

Posicionamiento del robot en el centro de la mesa (verificación)

**Figura 31**

Visualización en el KCP de las posiciones de los ejes con el robot ubicado en el centro de la mesa



237674

16:59:28 03/02/2020 K5501350
COT alcanzada
Causante: R/ POSICIONESTACINAMENTO
Posición del robot (Específico del eje)

Eje	Pos. [grad, mm]	Motor [deg]
A1	30.00	-5520.00
A2	-90.00	-16650.01
A3	90.00	-16650.00
A4	0.00	0.00
A5	90.00	6554.35
A6	0.00	79.71
E1	0.00	0.01
E2	-624960.00	-562464000.00

Costado izquierdo del robot

Figura 32

Primera posición del robot para verificación



Figura 33

Visualización de ejes en el KCP de la primera posición

Eje	Pos. [grad, mm]	Motor [deg]
A1	0.50	-91.83
A2	-12.90	-2386.27
A3	80.04	-14008.05
A4	-98.02	7270.60
A5	88.24	6320.79
A6	0.00	-20.77
E1	1096.47	13511.95
E2	-624960.00	-562464000.00

Costado derecho del robot

Figura 34

Segunda posición del robot para
verificación



Figura 35

*Visualización de ejes en el KCP de la
segunda posición*

Eje	Pos. (grad, mm)	Motor (deg)
A1	59.62	-10369.72
A2	-12.90	-2007.12
A3	80.04	-14008.06
A4	-88.92	7270.60
A5	-90.08	-6665.01
A6	-25.90	2482.48
E1	1056.47	13511.95
E2	-624960.00	-562464000.00

4.3. Ingeniería inversa de la antorcha de soldadura

Para la recolección de información de la celda instalada en el CIRT CELEC-EP, se empleó herramientas que faciliten la adquisición de datos que serán de suma importancia para el desarrollo del proyecto, la ingeniería inversa es de gran utilidad para obtener valores de objetos reales a partir de su cuerpo, esto ayuda en ciertos casos que se desconozca planos y especificaciones físicas de un componente, a continuación se procederá a explicar los pasos que se han seguido para obtener las medidas reales de la herramienta del robot.

Pigmentar las zonas que se desea escanear que se compongan de materiales o colores reflectivos, que podrían ocasionar datos distorsionados, ayudará a obtener de una mejor manera y con más rapidez la información ha escanear.

Figura 36

Herramienta en el proceso de pigmentación



Cuando se realiza un escaneo es de gran importancia colocar referencias como targets de alta muestra reflectante para el posicionamiento del escáner 3D, triangulando los mismos de 5 a 10 cm aproximadamente, sobre la superficie de trabajo.

Figura 37

Colocación de targets de referencia sobre la herramienta



Calibración del escáner por medio de un conjunto de una plancha de targets, es fundamental realizar esta calibración para lograr un buen trabajo, se realizan algunas tomas de la plancha para así calibrar la percepción de la distancia y ubicación.

Figura 38

Proceso de calibración de escáner



Escaneo sobre la herramienta a una distancia pareja, verificando la misma en la pantalla para obtener la posición de los targets en la superficie.

Figura 39

Proceso de escaneo



Escaneo sobre la herramienta con láser en disposición malla y en línea

Figura 40

Escaneo con disposición de malla

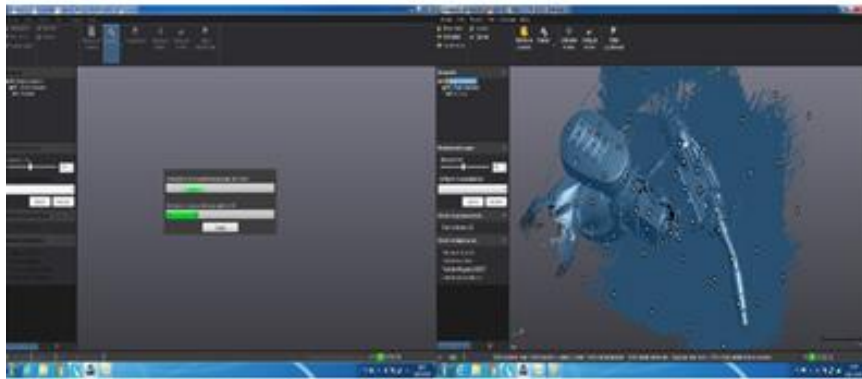


Con la ayuda del software VXelements procesar la toma de datos para exportar el archivo. STL.

Figura 41

Exportación de datos con ayuda del software

VXelements



Mediante GOM Inspect eliminar las partes innecesarias del archivo. STL

Procesamiento en SolidWorks STL a malla; por medio de la herramienta de diagnóstico de importación se procede a obtener un archivo IGES o un archivo editable el cual será usado como herramienta como herramienta en la simulación para obtener un mejor posicionamiento del TCP

4.4. Softwares de programación fuera de línea

4.4.1. Open Rave

Es un software para aplicaciones robóticas que usa la licencia GNU Lesser General Public License (LGPL) esta es una licencia de software libre. OpenRAVE proporciona un entorno para probar, desarrollar e implementar algoritmos de planificación de movimiento en

aplicaciones reales en el área de la robótica. El objetivo principal es la simulación y el análisis de información cinemática y geométrica relacionada con la planificación del movimiento. El ambiente independiente de OpenRAVE permite que se integre fácilmente en los sistemas robóticos existentes. Proporciona muchas herramientas de línea de comandos para trabajar con robots y planificadores, el núcleo de tiempo de ejecución es lo suficientemente pequeño como para usarse dentro de pequeños y grandes controladores. Uno de los objetivos de OpenRave es la automatización de la robótica industrial. (Creative Commons Attribution 3.0, 2019)

Figura 42

Logo de Open Rave



Nota: (Creative Commons Attribution 3.0, 2019)

4.4.2. KUKA Simpro

Software diseñado para la programación de robots KUKA, funciona con una licencia comercial de la misma compañía KUKA, con una conexión en tiempo real la cual facilita de forma virtual el control, análisis de ciclos y la generación de programas para robot. Permite la creación de planos perfectos en fase temprana de proyecto para las instalaciones de producción. El interfaz con el usuario es amigable facilitando la ubicación de componentes inteligentes desde su biblioteca a la posición que el usuario la necesite, ayuda a la verificación de programas en modo off-line. (KUKA AG, 2020)

Figura 43

Logo de KUKA



Nota: (KUKA AG, 2020)

4.4.3. V-REP

Es una plataforma de experimentación virtual que permite la simulación 3D de robots con un ambiente de desarrollo integrado que permite simular, editar y programar sistemas robóticos.

Contiene una gran capacidad de funcionalidades mismas que se pueden integrar y combinar por medio de una exhaustivas funcionalidad API Y script V-REP, control de la cinemática inversa de cualquier tipo de mecanismo, así como también la simulación de sensores como de proximidad, cámaras para procesar imágenes, planificación de rutas, selección de mejores opciones en trayectorias, etc.

Las aplicaciones más resaltantes de V-REP son: creación rápida de prototipos, desarrollo de algoritmos, verificación control de parámetros, monitoreo, control de hardware. Existen versiones comerciales como de licencia libre (GPL-v3) que varía en sus características

y limitaciones, esto también dependerá del uso o finalidad a la que será aplicada el software.
(Acme Themes, 2018)

Figura 44

Logo de V-rep



Nota: (Acme Themes, 2018)

4.4.4. RoboDK

Es un software que tiene sus comienzos en el año 2015 como un spin-off del laboratorio CoRo de la universidad École de Technologie Supérieure (en Montreal, Canada). CoRo es pionero en robots industriales y su principal actividad es la investigación aplicada. Ayuda a la simulación y programación de robots industriales, también ofrece una amplia biblioteca de robots industriales con más de 500 brazos robóticos, así como ejes externos y objetos prediseñados. (RoboDK Inc., 2019)

Figura 45

Logo RoboDK



Nota: (RoboDK Inc., 2019)

4.4.5. ROS

Sistema operativo del robot (ROS) el cual está formado de un conjunto de bibliotecas de software y herramientas que ayudan a la creación de aplicaciones robóticas, que van desde controladores hasta algoritmos de última generación con herramientas de desarrollo de gran capacidad, este es un software libre es decir de código abierto. Su última versión es el Melodic Morenia misma que es la doceava versión. (Commons Attribution 3.0, 2019)

Figura 46

Logo de ROS melodic morenia



Nota: (Commons Attribution 3.0, 2019)

4.5. Tipos de trayectorias

El Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales CIRT CELEC-EP, al tener una amplia actividad en la recuperación de partes industriales, se presentan distintos casos en las geometrías de las piezas a reparar, mismas que influirán en las trayectorias que el robot deberá seguir en el proceso de soldadura en conjunto con los ejes externos, en la tabla se presenta información sobre los casos más comunes en los que se emplea la celda robotizada.

4.5.1. Trayectorias circulares

Un 70 % del trabajo realizado en la celda de soldadura del CIRT se basan en una geometría circular, en este caso el proceso se lo realiza por secciones, para evitar esfuerzos térmicos y que el material no sufra pérdidas en sus propiedades mecánicas; por ejemplo, la boquilla de la válvula esférica ubicada a la entrada de agua en la turbina.

En este tipo de trayectorias se puede recalcar que el uso de los ejes externos cumple con las funciones.

El riel lineal se usa para el posicionamiento y aproximación del robot hacia la pieza que se va a trabajar facilitando el acceso a la trayectoria.

Mesa giratoria facilita la rotación de las piezas a trabajar manteniendo al robot en una posición adecuada evitando singularidades en las articulaciones del robot.

4.5.2. Trayectorias sobre superficies Complejas

Principalmente la recuperación de las turbinas hidráulicas se basa en geometrías complejas, específicamente en la superficie los alabes de las turbinas, este trabajo constituye un 25% de las tareas realizadas por la celda, esto se realiza mediante un trabajo alternado en la superficie a r es decir que si existen más de una trayectoria a seguir en la misma superficie se deberá planificar un orden alternado de ejecución con el fin de que la transferencia de calor sea simétrica; por ejemplo los alabes de las turbinas Francis.

En este caso el uso de los ejes externos es gradual teniendo en cuenta que el riel lineal cumplirá con la misma función citada anteriormente, en el caso de la mesa giratoria ayuda al correcto posicionamiento de la pieza, así como también a ejecutar repetidamente la misma trayectoria en diferentes alabes.

4.5.3. Trayectorias sobre superficies planas

Este tipo de trayectorias están presentes en un 5% de los trabajos realizados dentro de la celda robotizada, como se ha venido hablando en los casos anteriores deberá planificar la distribución del calor de tal manera que no afecte a sus propiedades mecánicas como geométricas.

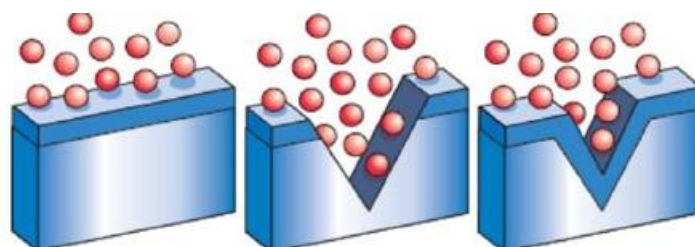
4.6. Generalidades del proceso de soldadura

4.6.1. Propiedades del acero inoxidable ASTM A743

Las turbinas hidráulicas usadas en la generación de energía eléctrica, están fabricadas con materiales metálicos como aceros inoxidable mismo que dan resistencia a la corrosión, ductilidad y elevada resistencia mecánica, estos aceros son aleaciones basadas en hierro que contienen como elemento principal al cromo mismo que está en un porcentaje en peso mínimo de 10,5% ,estas aleaciones brinda la característica de formar una fina capa de óxido de cromo ,misma que es adherente y duradera, se lo hace por pasivación. La capa protectora de existir alguna rayadura en la superficie, esta volverá a formarse, dando paso a un nuevo ciclo de pasivación como se muestra en la figura 47. En lo que se refiere los aceros inoxidables existen grupos fundamentales como los austeníticos, ferríticos, dúplex, martensíticos, entre otros. El acero ASTM A743 grado CA-6NM está dentro del conjunto de los aceros inoxidables martensíticos por su composición química y otros factores, mismas que dan características microestructurales. (Steve., 2008)

Figura 47

Ciclo de pasivación



Nota: (Steve., 2008)

4.6.2. Relleno por soldadura para recuperación de rodetes y alabes

El proceso de relleno mediante soldadura conlleva grandes volúmenes de aporte de material, que resulta factible en casos de desgaste severo y se precisa que el material aportado

tenga iguales características químicas al material original con el fin de perpetuar las propiedades mecánicas; de todos los procesos para la recuperación de rodets y alabes fijos o móviles el proceso de soldadura es el más esencial por todos los cambios metalúrgicos que conlleva, siendo el único proceso que facilita aportar grandes cantidades de material para rellenar volúmenes de ser necesario, o crear juntas para unir componentes separados por fractura, a su vez también permite la adición de nuevos elementos que remplacen a partes que hayan sufrido algún tipo de fatiga mecánica en el material.

4.6.3. Material de aporte

Se usa el electrodo 308L y 308L "Si" en aceros inoxidable auténticos los cuales tienen contenido de cromo y níquel en estas proporciones 16% a 26% de cromo y 6% a 22% de níquel. Para aplicaciones de elevada temperatura como por ejemplo industrias de energía eléctrica, en el caso del 308H este tipo de electrodo de alto carbono mejora la resistencia a la fluencia que el 308L. Se usa el electrodo 309 en el caso que la unión sea de acero suave o baja aleación a acero inoxidable este electrodo no contiene molibdeno.

El electrodo 310 para uso en aceros de elevada resistencia a la corrosión y oxidación. Este electrodo es de fácil encendido de arco y sirve para trabajar en todas las posiciones, tiene un núcleo de acero inoxidable para revestir u soldar elementos que estén sometidos a corrosión o desgaste por efecto de altas temperaturas. (INFRA, 2018)

4.7. Matriz comparativa

Tabla 10.

Matriz de criterios ponderados entre software

Ponderación	Características	Open Rave	Total	RoboDK	Total	V-REP	Total	KUKA Simpro	Total	ROS	Total
8%	Tipo de licencia	10	0,8	5	0,4	10	0,8	7	0,56	10	0,8
18%	Compatibilidad con el recurso instalado	4	0,72	9	1,62	4	0,72	8	1,44	3	0,54
8%	Interfaz con el usuario	4	0,32	9	0,72	4	0,32	8	0,64	2	0,16
10%	Acceso e integración de fuentes de datos	3	0,3	8	0,8	4	0,4	8	0,8	3	0,3
8%	Comunicación con el controlador	0	0	10	0,8	0	0	8	0,64	0	0
12%	Integración de ejes externos	0	0	10	1,2	1	0,12	6	0,72	0	0
15%	Eficiencia del post procesador	0	0	10	1,5	0	0	8	1,2	0	0
10%	Desarrollo de trayectorias sobre archivos CAD 3D	0	0	9	0,9	0	0	9	0,9	0	0
5%	Aplicabilidad industrial	0	0	10	0,5	4	0,2	10	0,5	7	0,35
6%	Precio de la licencia	10	0,6	4	0,24	10	0,6	4	0,24	10	0,6
100%	TOTAL		2,74		8,68		3,16		7,64		2,75

Figura 48

Diagrama de barras compatibilidad con el recurso

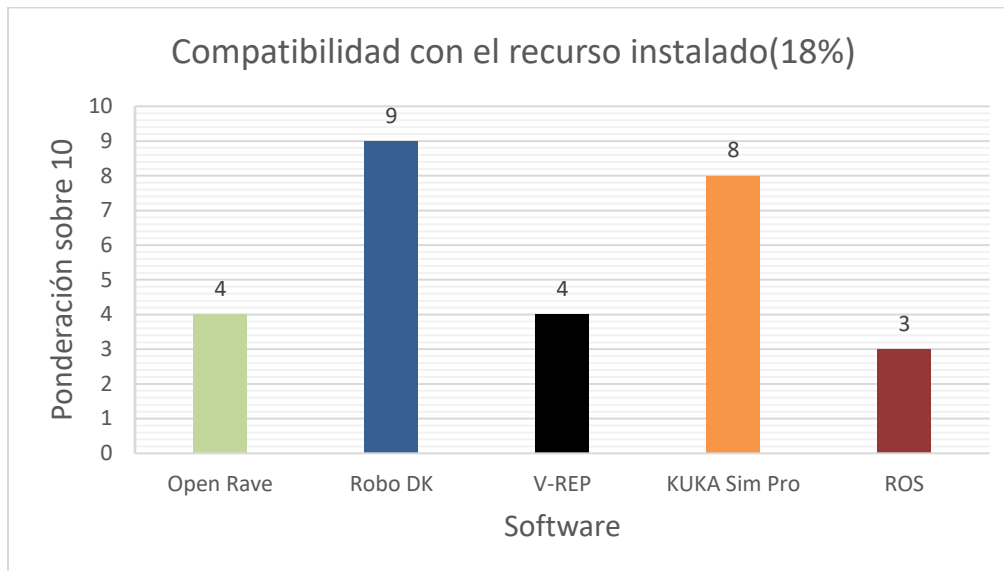
**Figura 49**

Diagrama de barras integración de ejes externos.

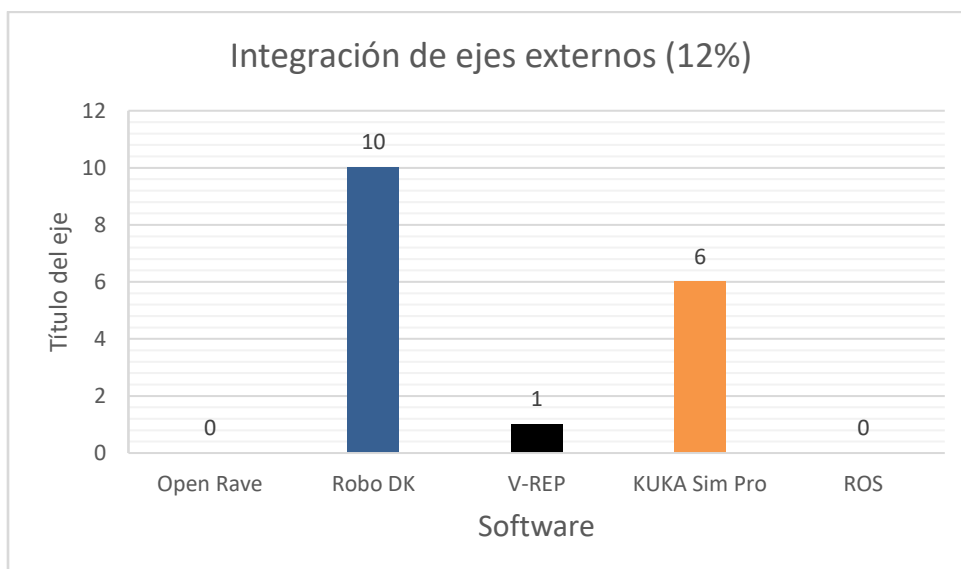


Figura 50

Diagrama de barras eficiencia del post procesador

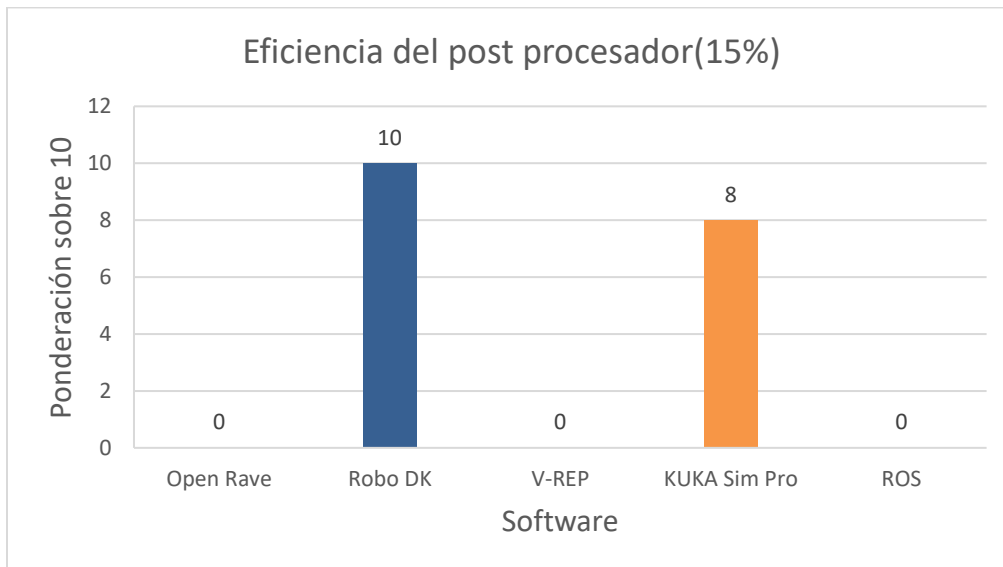
**Figura 51**

Diagrama de barras desarrollo de trayectorias sobre archivos CAD 3D

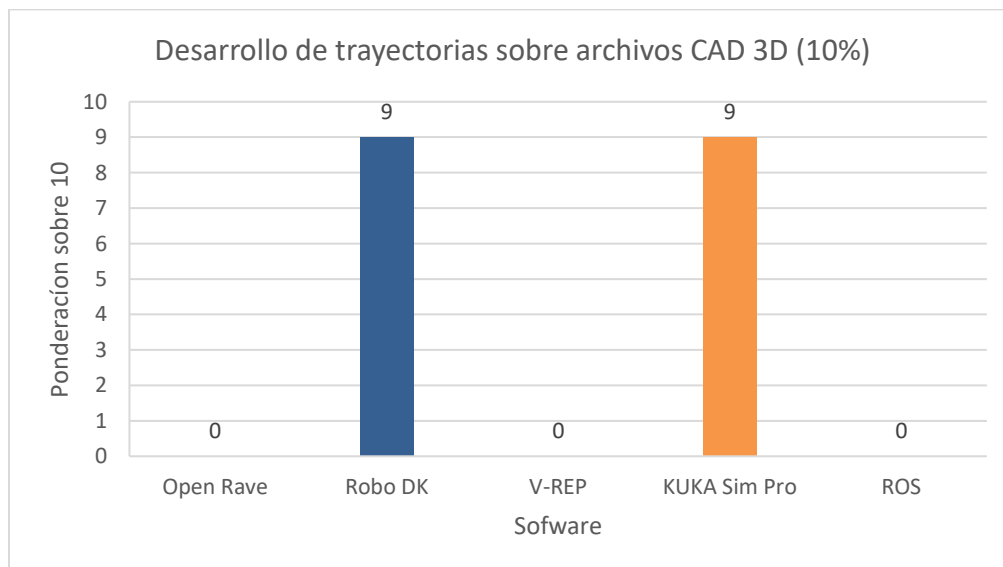


Figura 52

Diagrama de barras acceso e integración de fuentes de datos.

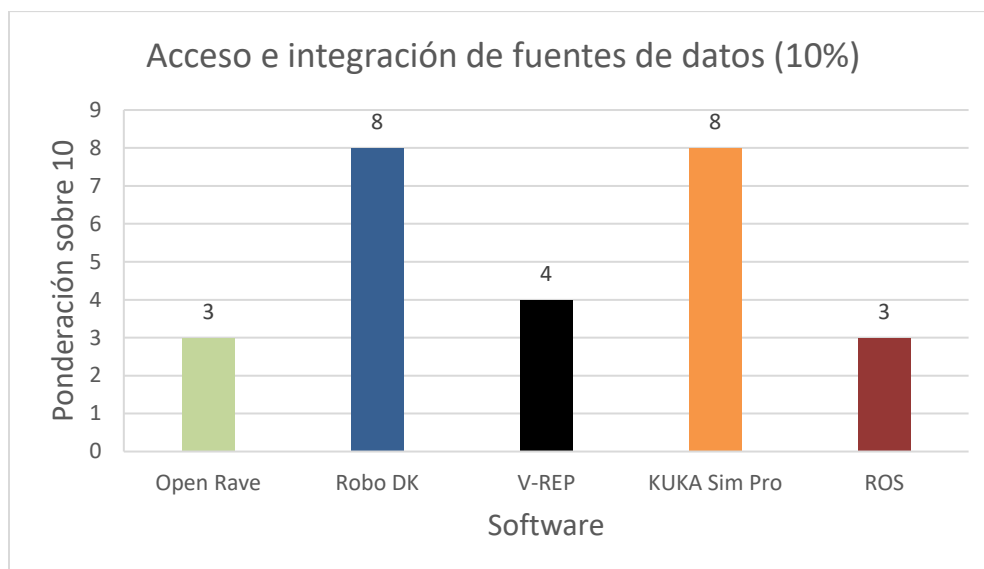
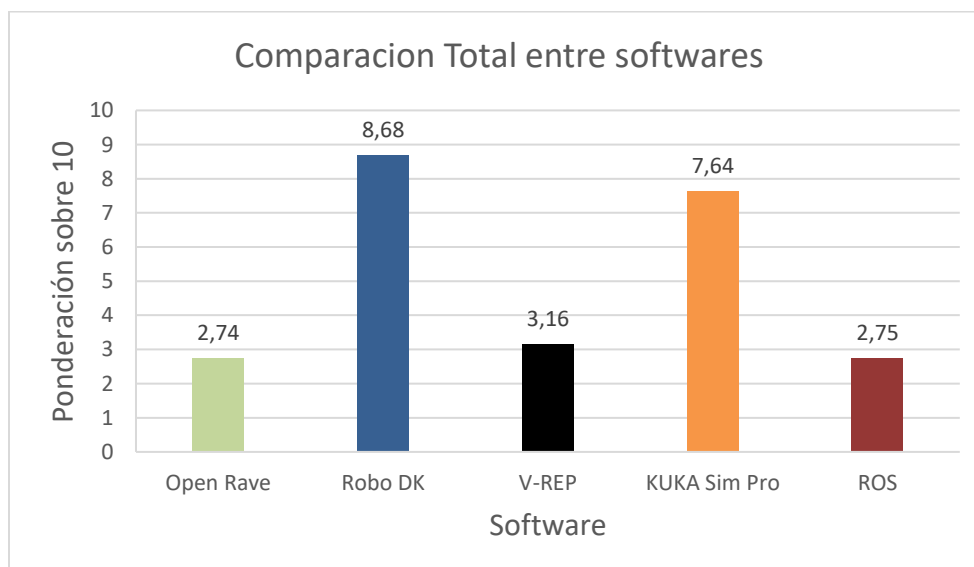
**Figura 53**

Diagrama de barras comparación total entre softwares



Tomando en cuenta las necesidades planteadas por los trabajos realizados en CIRT CELEC – EP se designó una ponderación de 10 puntos a los softwares candidatos, cada característica de selección tiene diferente valor porcentual basado en el grado que desempeña en los trabajos realizados por la celda; tomando en cuenta la puntuación más elevada gracias a la matriz y gráfico de barras se puede observar dos softwares que sobresalen ante los demás, KUKA Sim Pro y RoboDK, siendo este último el que cumple con todos los parámetros solicitados para la aplicación.

4.8. Tiempos de ejecución método manual vs offline

4.8.1. Tiempo normal

Es el tiempo requerido por una persona para que trabaje a un ritmo normal (REYES & MORALES, 2018). El tiempo normal se lo puede calcular tomando en cuenta la escala de valoración Westinghouse, para obtener los valores de los factores se presenta el siguiente gráfico.

Figura 54

Escalas de valoración del ritmo de trabajo.

Habilidad		Esfuerzo		Condiciones		Consistencia	
+0.15	A1	+0.13	A1	+0.06	A Ideales	+0.04	A Perfecto
+0.13	A2 Habilisimo	+0.12	A2 Excesivo	+0.04	B Excelente	+0.03	B Excelente
+0.11	B1	+0.10	B1	+0.02	C Buena	+0.01	C Buena
+0.08	B2 Excelente	+0.08	B2 Excelente	0.00	D Promedio	0.00	D Promedio
+0.06	C1	+0.05	C1	-0.03	E Regulares	-0.02	E Regulares
+0.03	C2 Bueno	+0.02	C2 Bueno	-0.07	F Malas	-0.04	F Deficientes
0.00	D Promedio	0.00	D Promedio				
-0.05	E1	-0.04	E1				
-0.10	E2 Regular	-0.08	E2 Regular				
-0.15	F1	-0.12	F1				
-0.22	F2 Deficiente	-0.17	F2 Deficiente				

Nota: (REYES & MORALES, 2018)

La siguiente ecuación será empleada para el cálculo del tiempo normal.

$$Tn = To * V$$

$$Tn = To * [1 + (H + E + C + K)]$$

Donde:

Tn= tiempo normal

To= tiempo medido promedio

V= valoración del ritmo de trabajo

H= habilidad

E= esfuerzo

C= condiciones

K= consistencia

CAPÍTULO V

PROPUESTA

5.1 Generalidades

5.1.1. Antecedentes de la propuesta

Tomando en cuenta en lo descrito en la sección 4.8.1. se logra concluir que en la metodología de generación de trayectorias implementa en la actualidad a la celda de soldadura robotizada tiene un grado de ineficiencia debido a su desarrollo, se lo realiza usando movimientos PTP por medio del KCP (teach pendant), para cual se realizó el análisis y factibilidad de la implementación de una metodología basada en el uso de software, tomando en cuenta los tiempos obtenidos con las dos metodologías y su respectiva comparación, se determinó que existe una mejora en el proceso de soldadura usando herramientas digitales y programación off-line.

5.1.2. Justificación de la propuesta

La presente propuesta busca la mejora en tiempos de soldadura empleados en la recuperación de partes industriales, así como también aumentar la productividad y eficiencia en la entrega de trabajos de restauración.

La implementación de esta metodología se basa en el uso de software especializado, buscando un uso más amigable y logrando realizar trabajos sin la necesidad de contar con el equipo físico de la celda presente, por medio de la creación de una estación de trabajo digital.

5.1.3. Objetivos de la propuesta

- Implementar una metodología de programación para trayectorias en procesos de soldadura robotizada aplicable a volúmenes complejos a partir de modelos CAD 3D, optimizando tiempos de programación y ejecución.
- Comprobar la eficiencia de la metodología, mediante pruebas de programación off-line.

5.2. Diseño de la propuesta

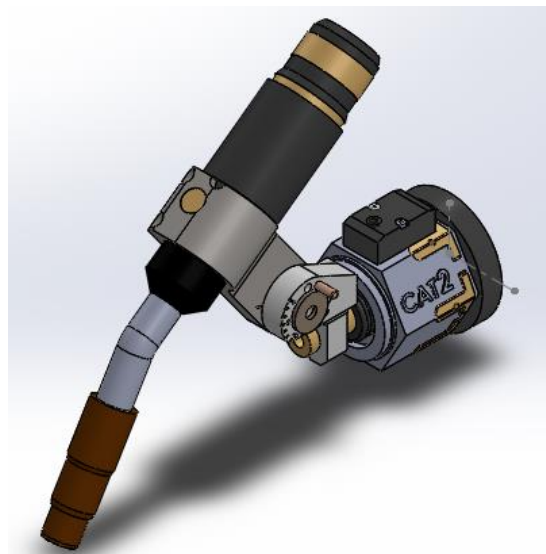
5.2.1. Síntesis de la metodología de generación de la trayectoria

En el capítulo anterior se determinó las necesidades de una metodología que mejore la eficiencia en la generación de trayectorias para soldadura, así como también parámetros importantes para realizar la digitalización de la celda robotizada. En el apartado 4.2 y 4.3 se obtuvieron los datos y parámetros de la celda física, mismos que se utilizarán en la digitalización mediante el software seleccionado.

Para la sinterización de la metodología se procederá a realizar el modelamiento CAD de los elementos que no se encuentra en la biblioteca del software que servirá para el desarrollo de la metodología.

Figura 55

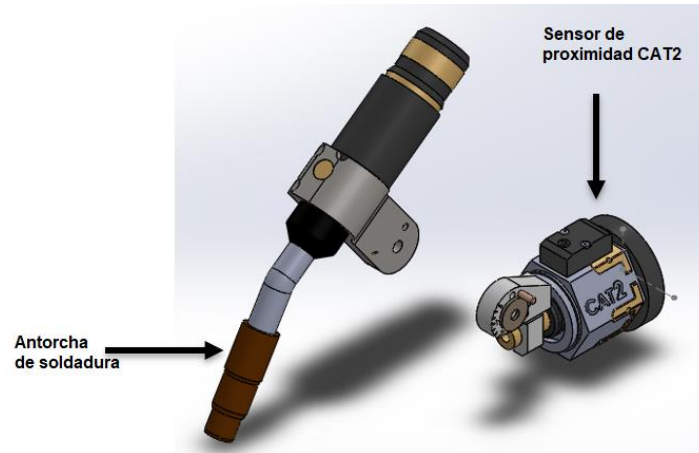
CAD de la herramienta.



La herramienta es un elemento fundamental para la correcta implementación de una estación de trabajo digital, de ella depende la posición del TCP (Tool Center Point) mismo que es el punto de acción del proceso, es importante obtener el ángulo de inclinación de la antorcha, configuración del cuello y herramienta, en este caso se utiliza la herramienta Abicor Binzel WH W500 22 la cual tiene una inclinación en su antorcha de 22° , un sensor de proximidad CAT2 el cual va montado en la muñeca del manipulador.

Figura 56

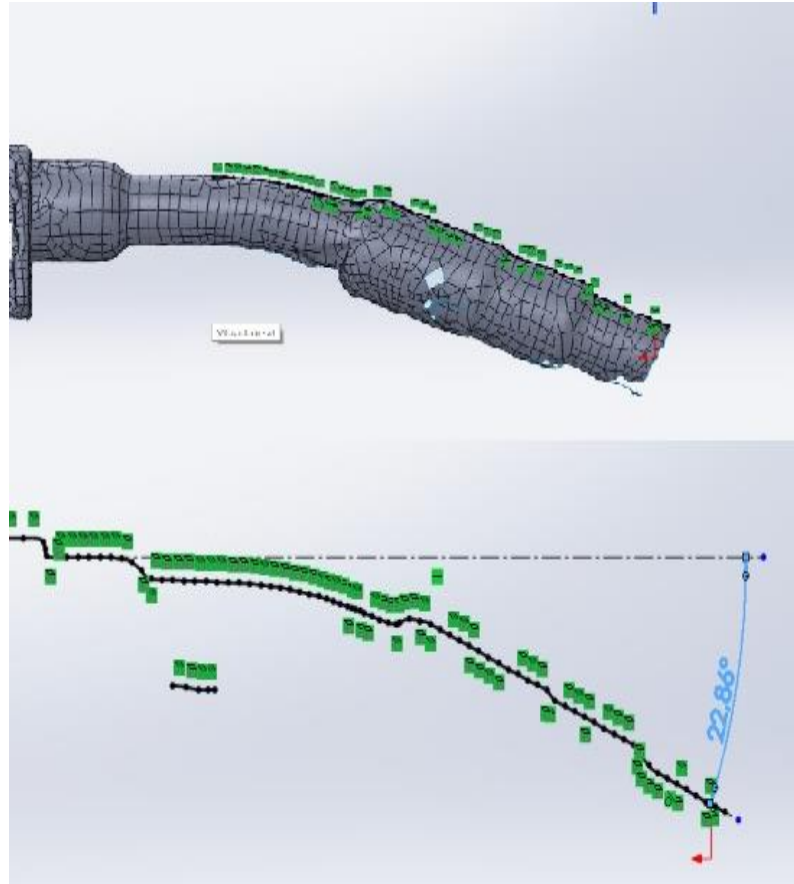
Partes de la herramienta



Para el modelamiento de la antorcha de soldadura se tomó en cuenta los valores de su ángulo y longitud, obtenidos en el proceso de ingeniería inversa. Es importante la consideración de estos parámetros los cuales serán introducidos en el software para lograr la precisión que es necesaria para el proceso.

Figura 57

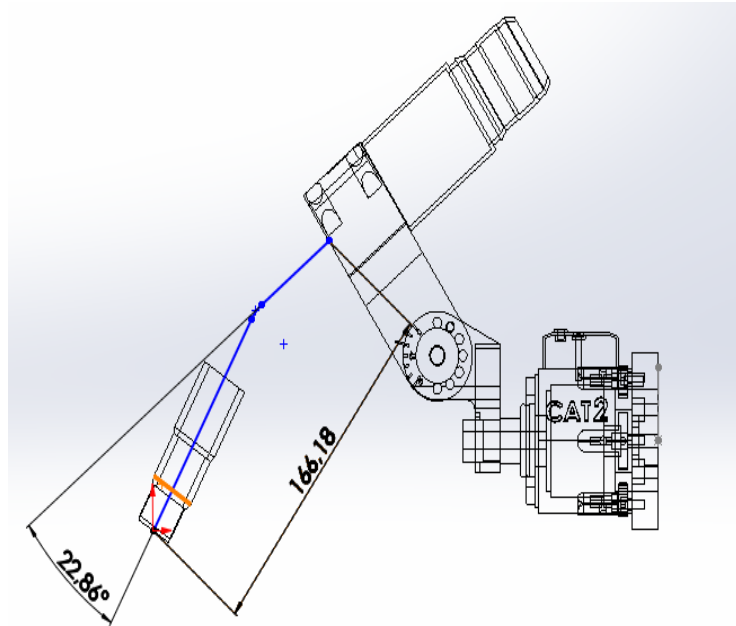
Obtención de ángulo principal de inclinación en la antorcha



El ángulo principal de la herramienta como se indica en la figura 57 tiene el valor de $\theta = 22,86$ que será usado en la modelación del elemento importado al software, en la figura 58 se puede observar los principales parámetros de la antorcha de soldadura ya en su modelación final.

Figura 58

Modelación final de la herramienta



La configuración del montaje de la herramienta se le puede observar en la unión de la antorcha entre el sensor de proximidad, las distintas configuraciones de montaje y cuello de la herramienta nos proveen de facilidades para trabajos específicos, en el caso de esta investigación se ha usado una configuración de 22 ° en la herramienta y 30° en el montaje, mírese la figura 59.

Figura 59

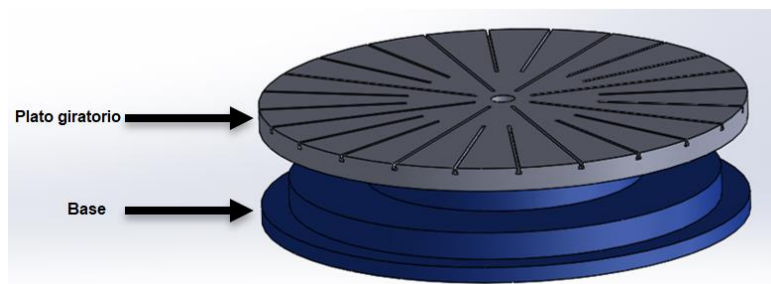
Configuración de ángulos en montaje de la herramienta



En el apartado 4.2. se obtuvo todos los datos referentes a la celda, distancia entre elementos respecto a una referencia, dimensiones de la mesa giratoria, las cuales son usadas en la modelación del mecanismo no disponible en la biblioteca del software, su construcción no corresponde a ninguna marca de productos robóticos conocidas, en la figura 60 se observa el CAD de la mesa giratoria.

Figura 60

CAD mesa giratoria



En el apartado 4.5 se determinó mediante la recolección de información basada en la experiencia de los trabajadores del CIRT CELEC-EP respecto al tipo de trayectorias que son frecuentes en los trabajos de recuperación realizados, mismos que nos ayudan a plantear las exigencias para la selección del software especializado, obteniendo parámetros que se deberá cumplir para el desempeño de la metodología.

Con la información obtenida en el apartado 4.7 se obtuvo mediante el análisis de una matriz de criterios ponderados, la selección del software a utilizar en la propuesta, dicha matriz comparativa se realiza tomando en cuenta características que influyen en el desarrollo de la investigación, así como las exigencias del lugar donde se implementara esta metodología.

5.3. Cursograma analítico de la metodología

En el siguiente cursograma analítico se presentan los respectivos procesos que tienen las diferentes etapas de la metodología de generación de trayectorias propuestas en el presente trabajo de investigación, en una metodología se debe cumplir con un orden preestablecido ya que cada etapa depende de la anterior.

Los tiempos empleados en cada operación se indican a la izquierda de cada símbolo que representa la operación, este tiempo está expresado en minutos, para mejorar la interpretación en la figura se puede observar la nomenclatura utilizada en el cursograma.

Figura 61

Nomenclatura del cursograma

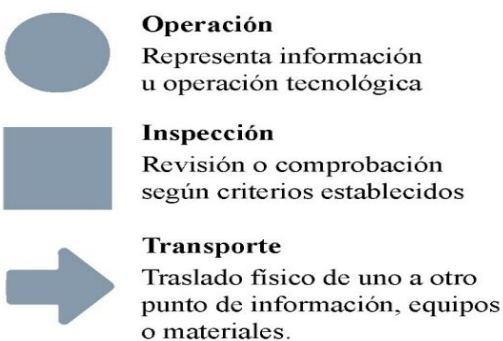


Figura 62

Cursograma de digitalización de la celda

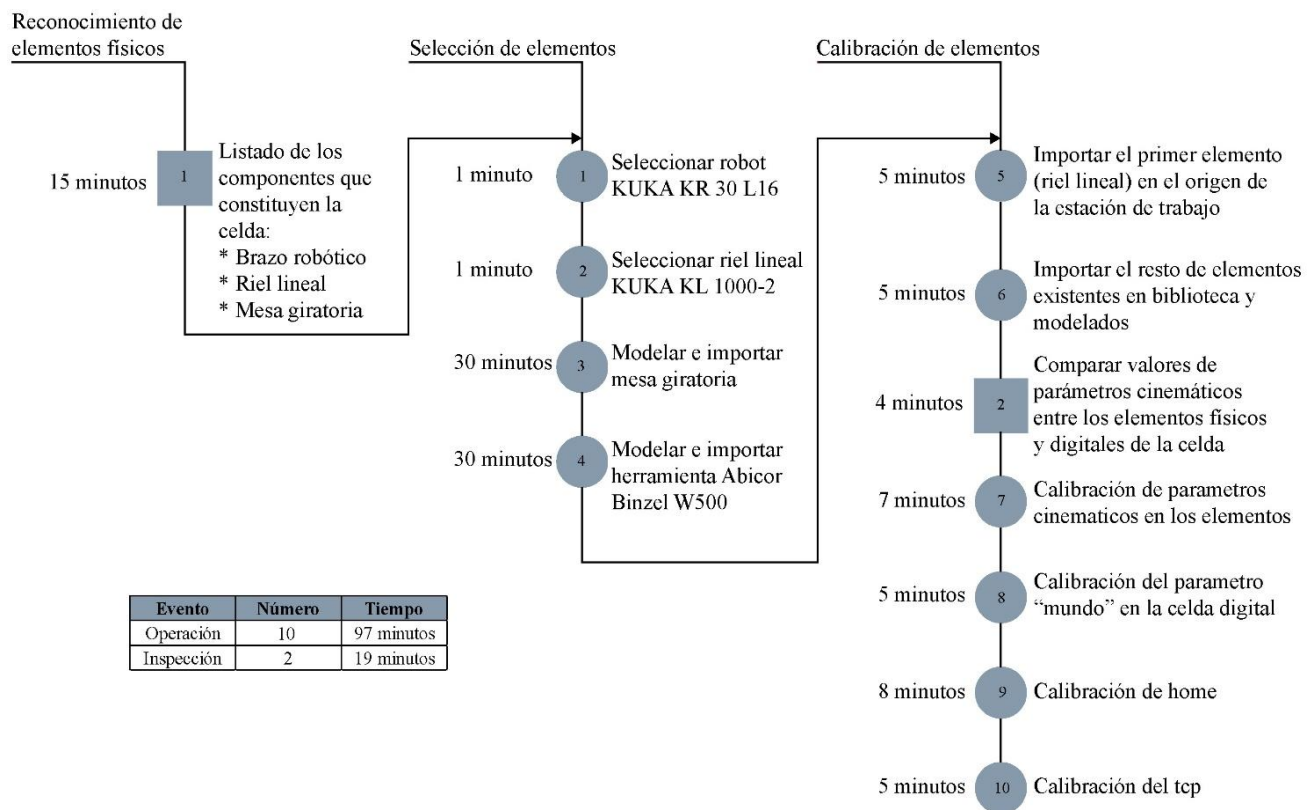
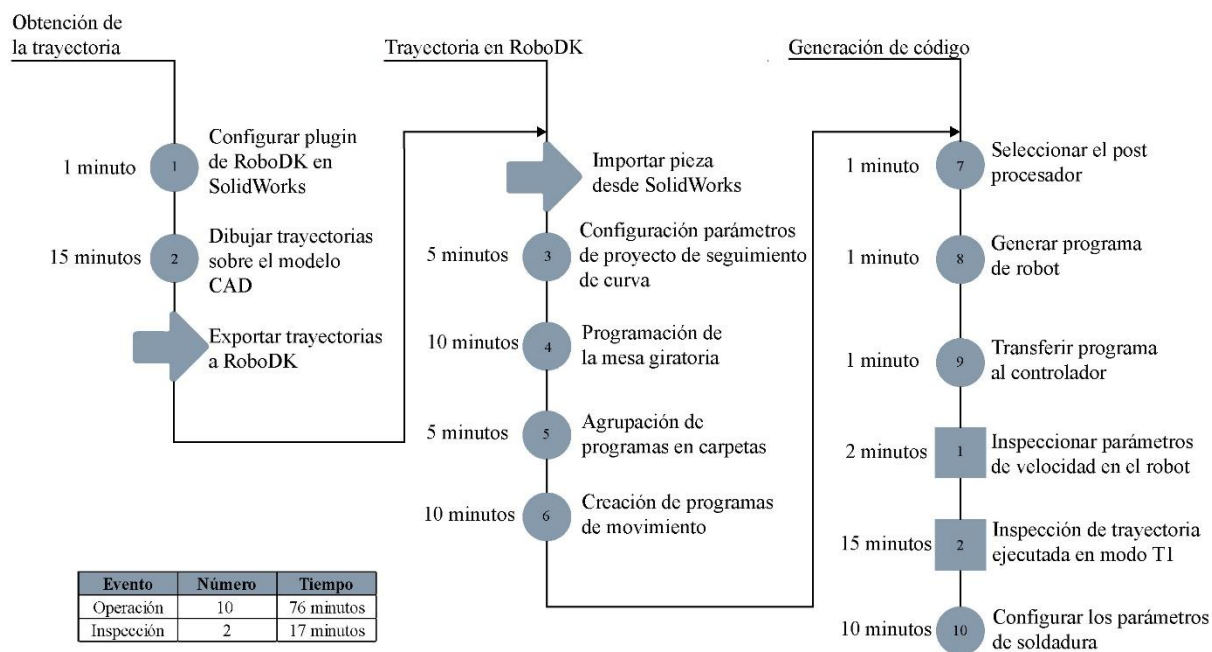


Figura 63*Cursograma de generación de trayectoria***5.4. Desarrollo de la programación offline**

Como se habló en el apartado 5.2.1.y 5.3 la implementación de una estación de trabajo digital está dada por las etapas que han sido planteadas en dichos apartados, el reconocimiento de elementos físicos que tiene instalada la celda se lo puede encontrar en el apartado 4.1. donde se detallan todos los recursos que dispone la celda de soldadura robotizada, a continuación, se describe los pasos que se realizó para la programación offline.

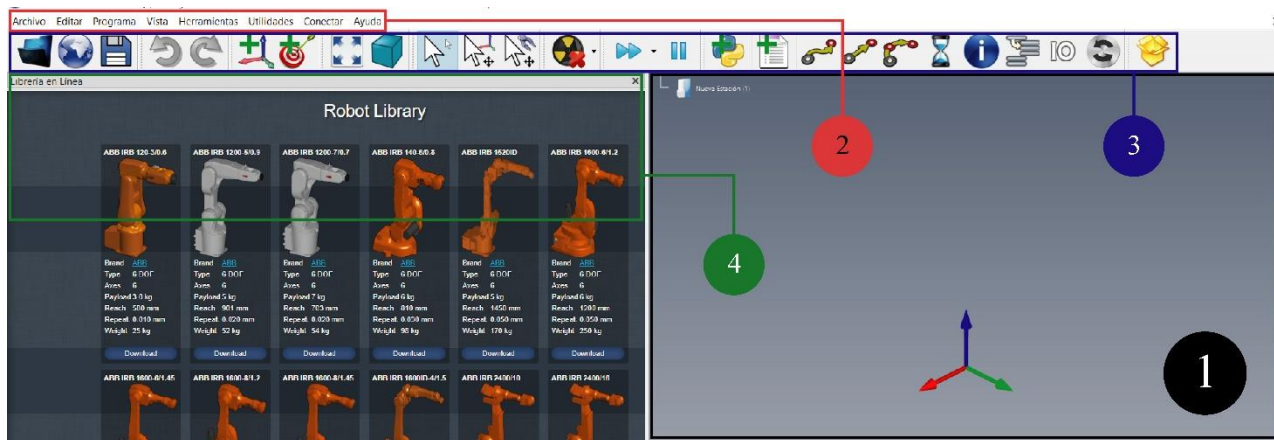
5.4.1. Área de trabajos del software.

En el apartado 4.4. de puede encontrar una pequeña introducción de los softwares que fueron puestos en comparación para selección del software a utilizar para la presente investigación. En el apartado 4.7 se determinó que RoboDK es la herramienta más idónea para el desarrollo de la metodología propuesta.


RoboDK posee una biblioteca online, la cual contiene diferentes modelos y marcas de elementos usados en la robótica industrial, la figura 64 se visualiza la ventana de trabajo de RoboDK

Figura 64

Ventana de trabajo RoboDK



1. Pantalla principal o área de trabajo, donde se realiza la estructura de la celda y se manipula los elementos.
2. Menú principal se puede encontrar opciones de archivo, editar, programa, herramienta, interfaz, utilidades, conectar, ayuda, estas opciones ayudan a configurar el software y características de la programación.

3. Barra de herramientas, contiene accesos rápidos, ayuda a tener las principales herramientas visualizadas en iconos individuales.
4. Al hacer clic en el icono de la biblioteca  ,se abrirá un filtro para facilitar la búsqueda de los elementos que se necesiten implementar una estación de trabajo.

Las anteriores partes han sido descritas de manera rápida, para un mejor detalle de las opciones que contiene RoboDK se aconseja visitar la documentación del software en la siguiente dirección <https://robodk.com/doc/es/Basic-Guide.html#Start>.

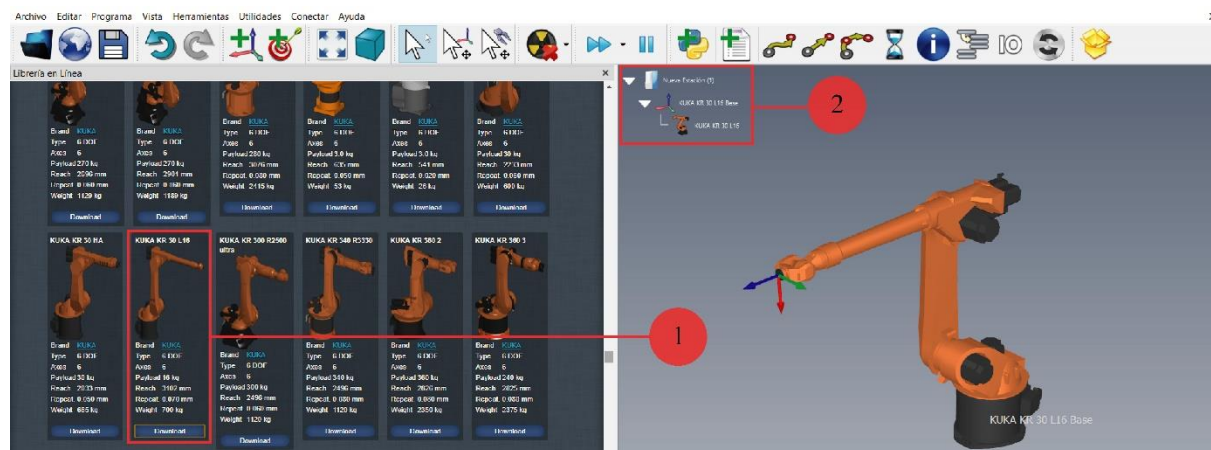
5.4.2. Digitalización de la celda

Tomando en cuenta todos los puntos tratados en el capítulo anterior y el apartado 5.2.1. se procede a la digitalización de la celda de soldadura que dispone el CIRT CELEC-EP, con el uso de los filtros de la biblioteca seleccionar los elementos necesarios.

Cómo se observa en la figura 65 en el indicador 1, se busca el robot utilizado en esta aplicación, el modelo del robot es KUKA KR30 L16, disponible en la biblioteca de RoboDK, al dar clic en “download” automáticamente se importa en el área de trabajo, se puede visualizar su ubicación en la barra de estado que se muestra en el indicador 2 de la figura 65, es importante monitorear la ubicación respecto a la cual se encuentran los elementos, esto se lo realiza fácilmente con la ayuda de la barra de estado.

Figura 65

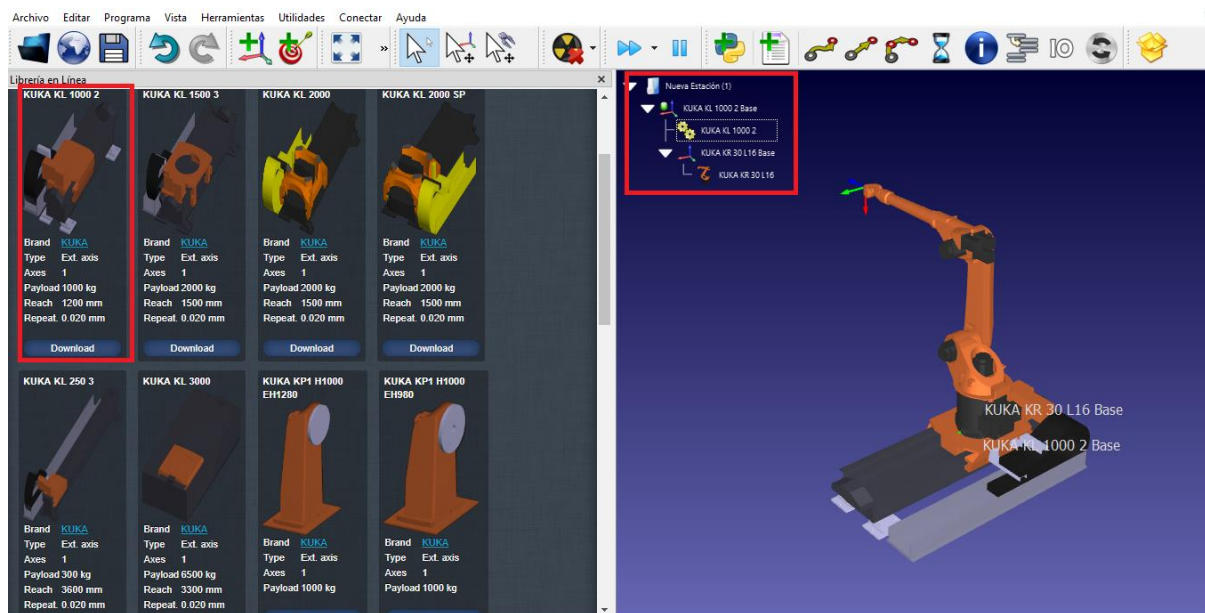
Obtención de elementos en la biblioteca RoboDK



Siguiendo el mismo procedimiento realizado para la importación del robot en la biblioteca se importa el riel lineal, como la figura 66 indica en la barra de estado se puede observar que el robot está montado en el riel lineal, esto se lo realiza arrastrando el robot al mecanismo del riel y ubicándolo con el pilotaje cartesiano, colocando todo en cero con respecto a la bridad del riel.

Figura 66

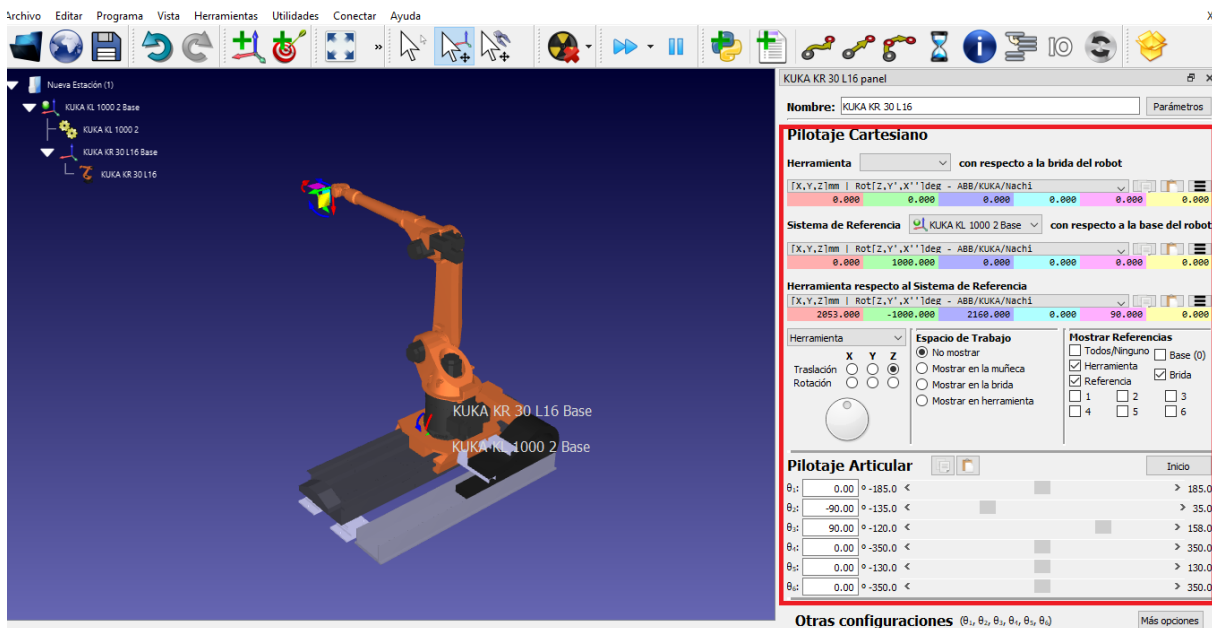
Posicionamiento de robot y riel lineal



Al dar doble clic en el robot se despliega una ventana que muestra el pilotaje cartesiano, parámetros cinemáticos y pilotaje articular estas herramientas son de gran ayuda para la correcta ubicación de los elementos en la estación de trabajo, tomar en cuenta que al dar doble clic en cualquier elemento ubicado en el área de trabajo se despliegan dichas opciones de acuerdo al elemento seleccionado. En estas ventanas se puede realizar modificaciones y configuraciones de los elementos en sus ejes X, Y, Z y A, B, C.

Figura 67

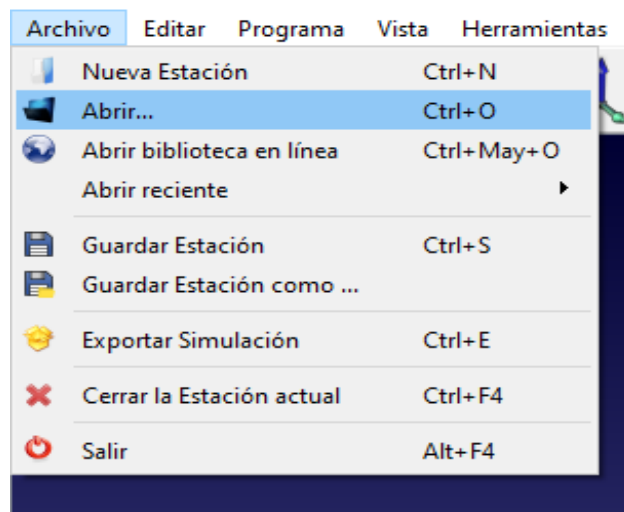
Pilotaje de un elemento



Una vez importados los elementos disponibles en la biblioteca se procede a importar los elementos restantes no disponibles en la biblioteca, modelados previamente en SolidWorks; mediante la barra de herramientas principal seleccionamos archivo, abrir en la ubicación del archivo .IGS de los modelos CAD pertenecientes a los elementos, los cuales se ubicaran automáticamente en el centro de la estación, con la ayuda del pilotaje cartesiano se puede dar la ubicación correcta, en la figura 68 se indica el procedimiento.

Figura 68

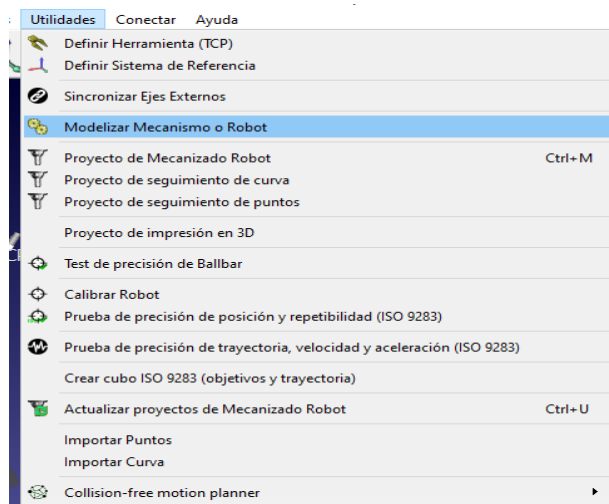
Importar un elemento



Es necesario configurar la mesa giratoria como mecanismo para asignar las características de movimiento como un eje rotatorio externo, RoboDK dispone de la opción "modelizar mecanismo o robot" ubicado en utilidad del menú principal.

Figura 69

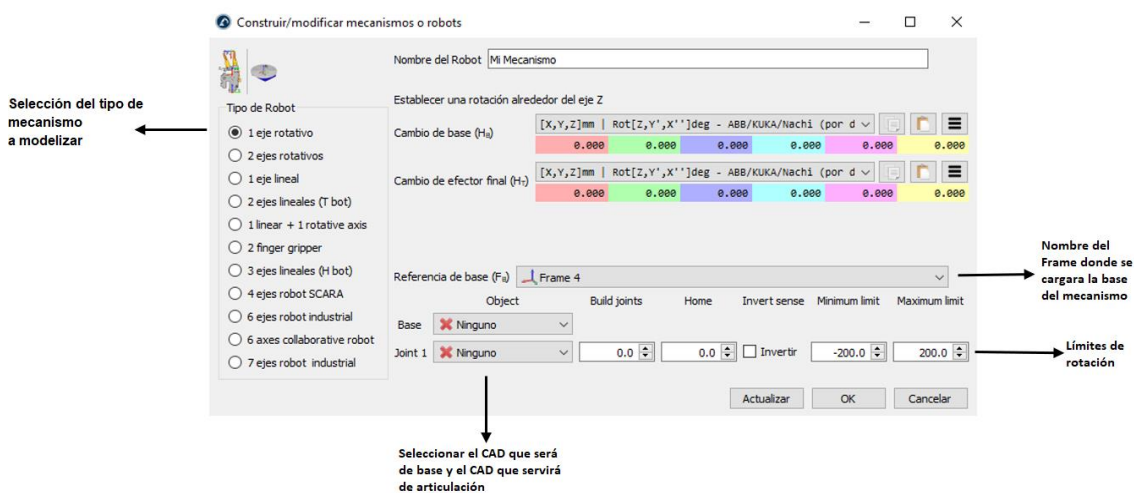
Modelizar mecanismo o robot



Al seleccionar esta opción se muestra una ventana la cual se debe configurar como se puede observar en la figura70.

Figura 70

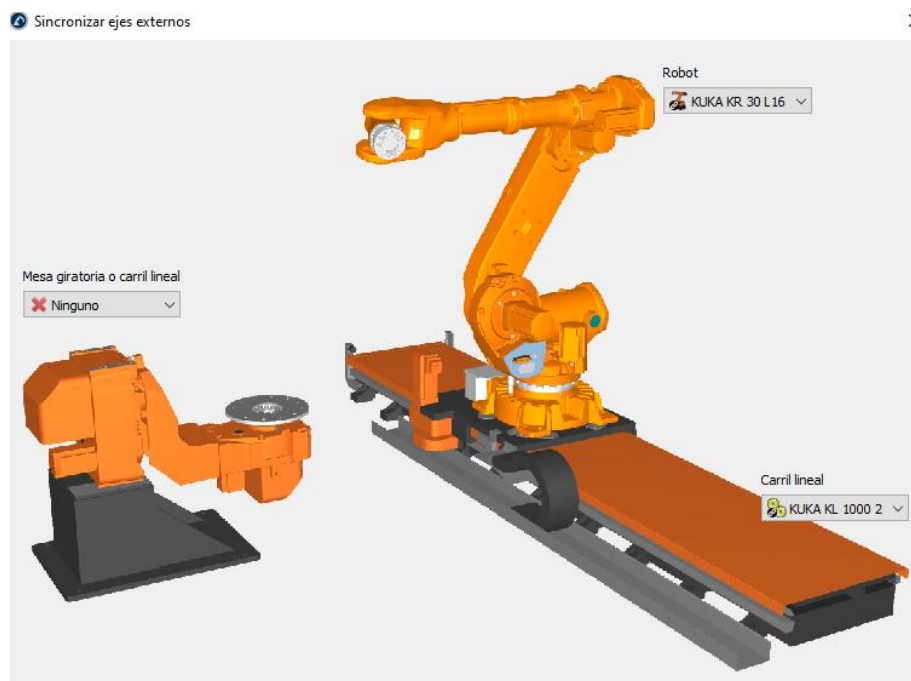
Configuración de modelación de un mecanismo



Para este caso de programación offline la celda trabaja con el riel lineal sincronizada al robot y la mesa giratoria sin sincronización, se menciona posteriormente el motivo de esta configuración, la sincronización se la ubica en la opción de utilidades, seleccionar sincronización de ejes, que se presenta como la figura 71.

Figura 71

Sincronización de ejes



Posterior a la importación y montaje de la mesa giratoria y herramienta, se procede a la calibración del TCP mediante la importación de datos del KCP que se muestran en la figura 72 en el menú que se indica, al finalizar estos pasos se dispone la celda lista para ser usada. En la figura 74 se observa la implementación de la estación en su totalidad.

Figura 72

Visualización de datos de calibración en el KCP

Método de medición

Medición "Herramienta, XYZ, 4 puntos"

Medición "Herramienta, ABC World"

	Punto1	Punto2	Punto3	Punto4
X [mm]:	3047.312	3124.374	2768.312	2803.811
Y [mm]:	839.912	688.274	731.551	950.724
Z [mm]:	1206.791	1191.745	1058.728	1032.873
A [°]:	-91.569	157.461	170.626	-138.135
B [°]:	0.784	-6.652	67.070	45.096
C [°]:	-179.776	170.422	163.783	-119.036

Figura 73

Ventana para introducir datos de calibración del TCP

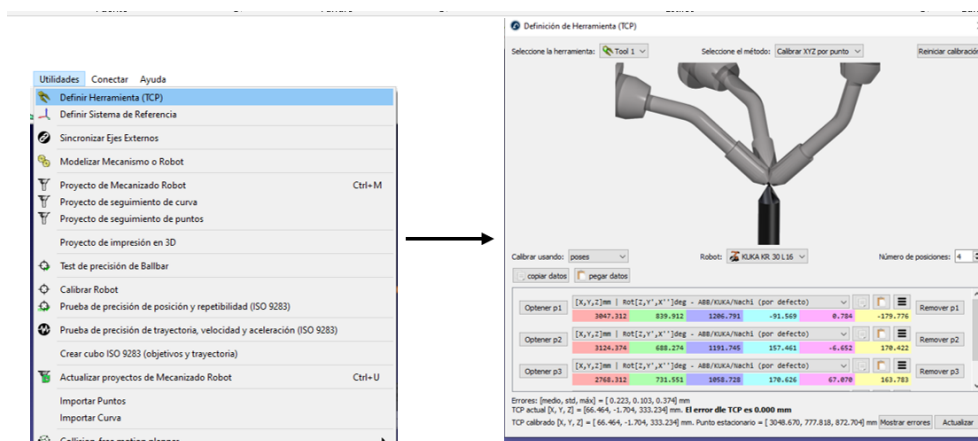
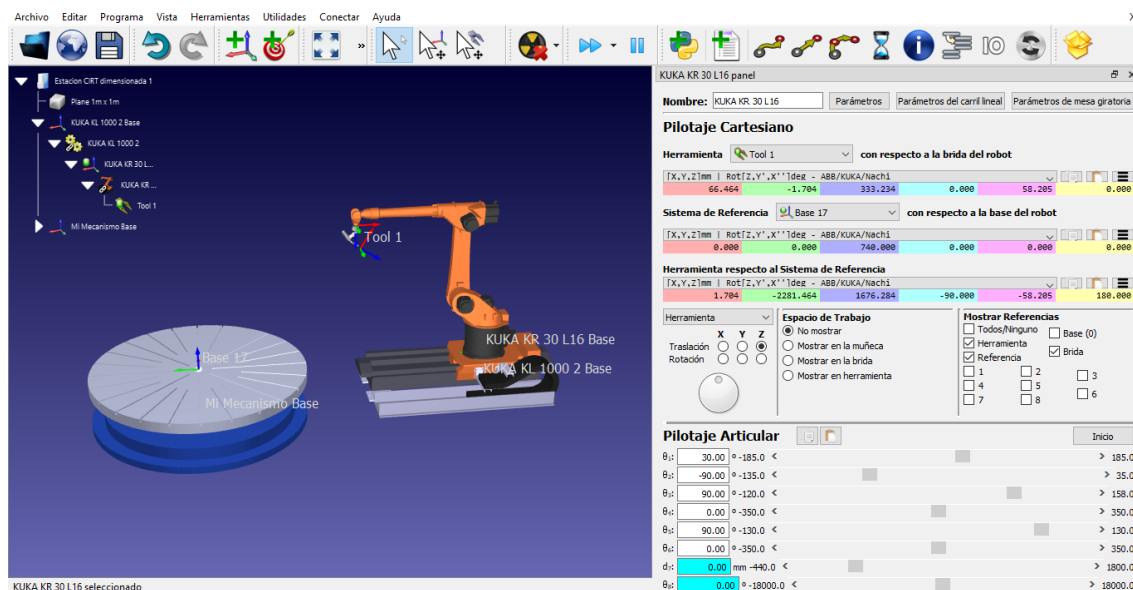


Figura 74

Celda completa



5.4.3. Generación de trayectorias

Para generar trayectorias en RoboDK es necesario tomar en cuenta algunas consideraciones mencionadas en el apartado 4.5, ya que de esto dependerá el grado de uso de los ejes externos, así como también la planificación y configuración en el software. Para este ejemplo se realizará la aplicación de la metodología de generación de trayectorias en un rodete Francis, para lo cual hay que tomar en cuenta el número de alabes que se dispone, así como la superficie donde se realizara las trayectorias.

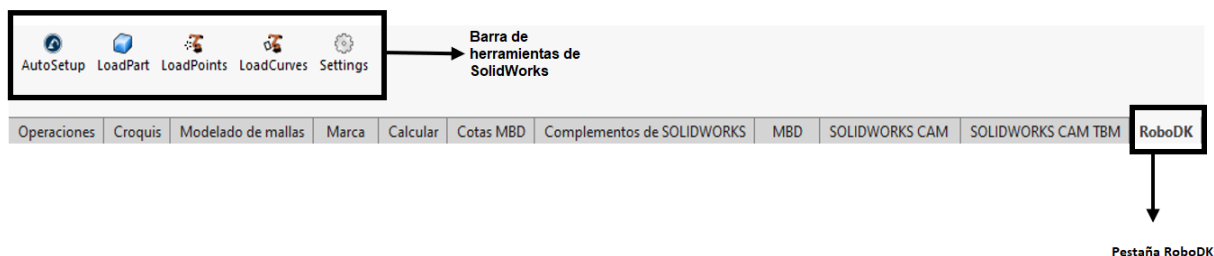
5.4.3.1. Obtención de la trayectoria

Para la obtención de la trayectoria RoboDK dispone de un plugin para SolidWorks, el cual permite dibujar la trayectoria sobre el elemento modelado en el software CAD, para


realizar esta tarea es necesario configurar algunos parámetros mismos que son descritos en la figura 75.


Figura 75


Opciones del plugin de SolidWorks





Como se observa en la figura 75 encontramos distintos botones mismos que ayudan a desarrollar la trayectoria de acuerdo a las exigencias del trabajo a realizar.

 Configuración automática, permite seleccionar cualquier geometría ya sea curvas o puntos mismos que se cargarán en RoboDK junto con el modelo 3D.

 Cargar pieza, Carga el modelo 3D de SolidWorks a RoboDK. En este caso las características como curvas o puntos no se cargarán.

 Cargar punto(s), carga todos los puntos seleccionados en RoboDK como un nuevo objeto. Todas las superficies seleccionadas se usarán para calcular los puntos normales. Estas normales son importantes ya que definen el eje de aproximación del robot.

 Cargar Curvas, carga todas las curvas seleccionadas en RoboDK como un nuevo elemento. Todas las superficies seleccionadas se usarán para calcular los normales de las curvas. Estas normales son importantes ya que definirán el eje de aproximación del robot.

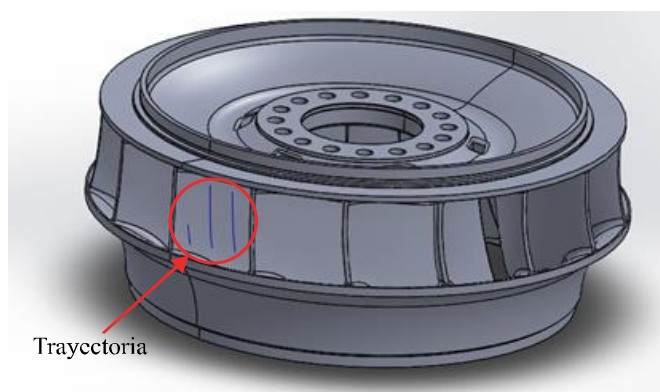
 Ajustes, Abre la ventana de ajustes predeterminados.

(RoboDK Inc., 2019)

El primer paso es realizar el trazado de las trayectorias en la pieza 3D, para el caso del rodete Francis se inserta un plano paralelo a la superficie donde se realizan las trayectorias, posteriormente se dibuja en el plano creado para proyectar el plano en la superficie donde estarán las trayectorias.

Figura 76

Trayectorias dibujas en SolidWorks

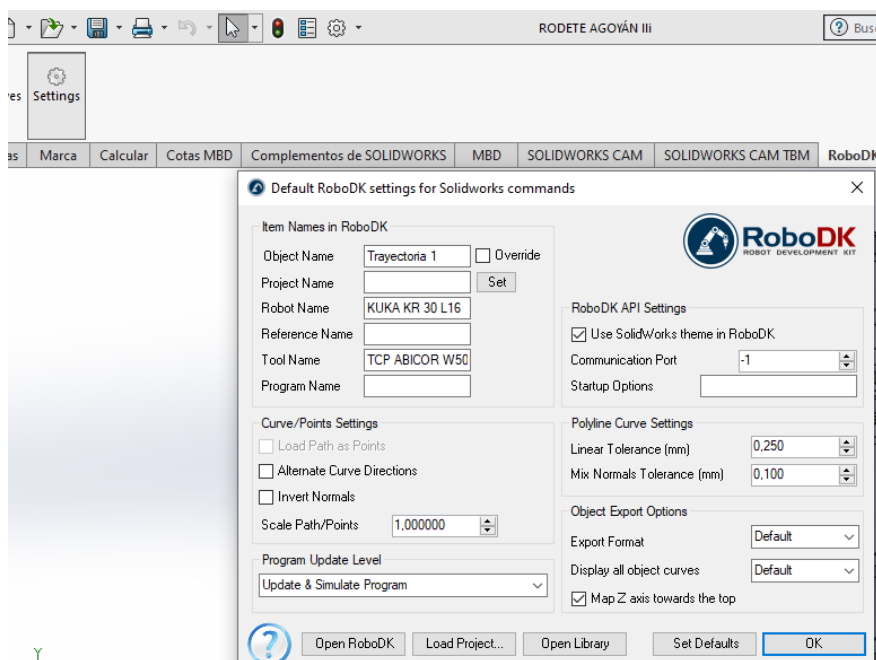


En la figura 76 se observa la trayectoria que deberá seguir el robot, esta trayectoria deberá ser realizada en todos los alabes del rodete, dicho esto se puede comenzar a realizar una planificación para la programación tomando en cuenta que la trayectoria es exactamente la misma para cada alabe, para cargar la trayectoria en RoboDK se debe seleccionar en

SolidWorks cargar curvas ya que en este caso se necesita que la trayectoria se mantenga y el rodete gire, haciendo que la trayectoria no sea vinculada con el rodete es decir si el CAD de la pieza se mueve la trayectoria deberá mantenerse, tomar en cuenta antes de cargar la trayectoria la configuración de ajustes predeterminados ya que de esto dependerá que el software cargue en la estación con los nombres de herramienta y base correctos.

Figura 77

Configuraciones de exportación plugin SolidWorks

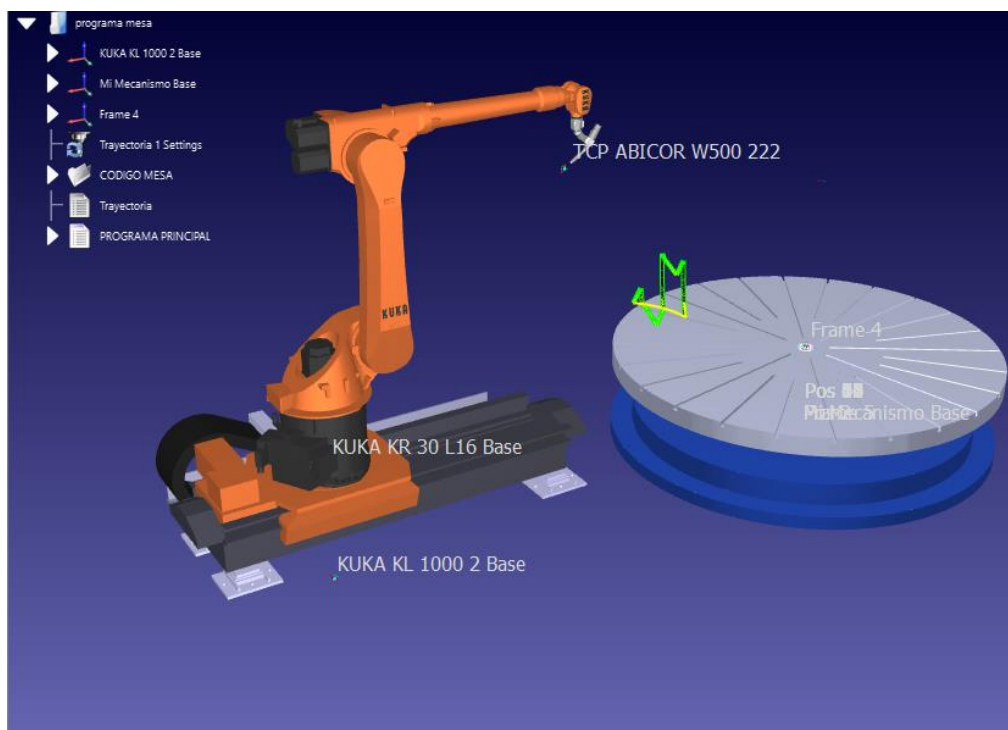


Con la configuración de estos parámetros se cargará la trayectoria en RoboDK, estos parámetros que se encuentran en la ventana facilitan la ubicación de los elementos que se importen desde SolidWorks.

Una vez configurada esta ventana al dar ok automáticamente se importará la trayectoria tomando en cuenta el frame previamente configurado.

Figura 78

Trayectorias importadas desde SolidWorks



El mismo proceso que se realizó para importar la trayectoria se debe realizar con el modelo CAD del rodete, con la diferencia que en vez de seleccionar cargar curva se selecciona cargar pieza tomando en cuenta que la pieza debe ser vinculada con el eje de rotación, es decir la junta de la mesa ya que esta debe girar con el movimiento del mecanismo.

Figura 79

CAD del rodete importado y ubicado



Se debe tomar en cuenta la configuración del proyecto de seguimiento de una curva, el cual consiste en determinar parámetros para el mejor desempeño del robot cuando se ejecute la trayectoria, aquí se podrá encontrar los ajustes de aproximación y alejamiento del TCP a la trayectoria así como el método de seguimiento de curva también se puede seleccionar la compensación y parámetros del primer movimiento, todo esto servirá para tener una programación que evita colisiones, singularidades y movimientos incómodos que puede traer problemas en el proceso.

Figura 80

Configuración del proyecto de seguimiento de una curva

Proyecto de Seguimiento de Curva: Trayectoria 1 Settings

Robot: Referencia: Herramienta: Objeto: Trayectoria 1 Programa: Trayectoria

Aproximar/Retraer cada curva
 Velocidad de operación (mm/s)
 Tolerancia para Juntar Curvas (mm)

Aproximación		Añadir	Quitar
Type	Value (mm deg)		
Normal (N)	<input type="text" value="100.000"/>		

Trayectoria visible
 Entrada de trayectoria:
 Puntos de la trayectoria: 61

Compensación del TCP:

Método: Enseñar Ver trayectoria deseada

Orienta:

 Herramienta: Def.

Compensación de la referencia:

Compensación de la herramienta:

Parámetros de optimización: Ver trayectoria planificada
 Permitir rotación del eje Z de +/- grad. por pasos de grados

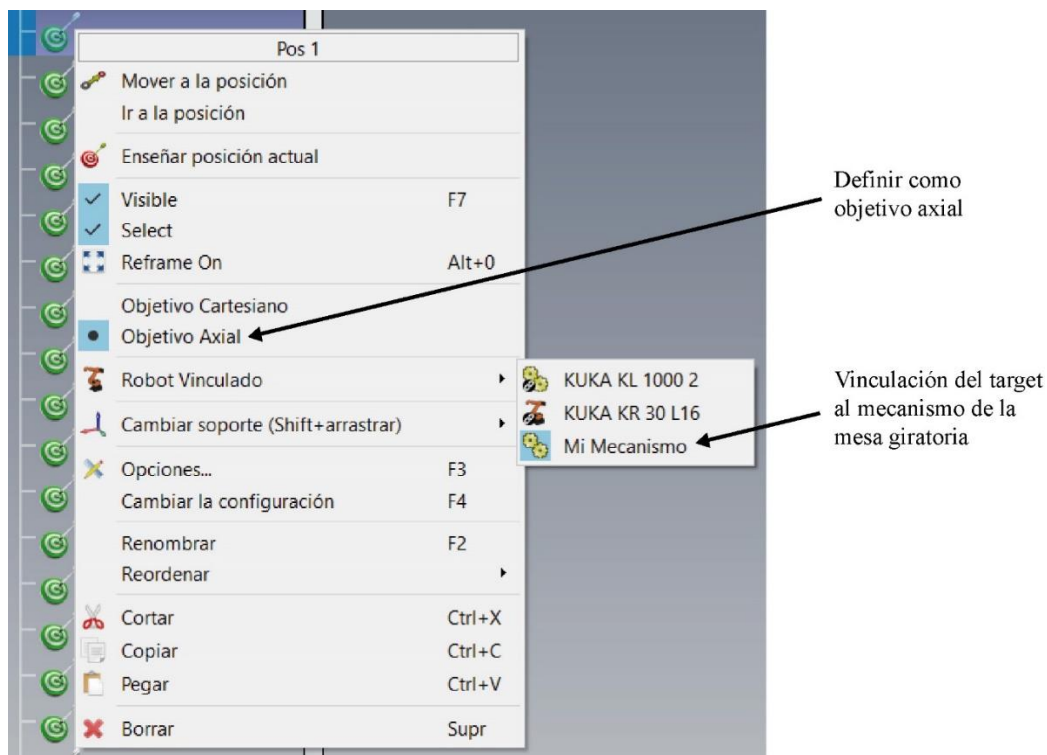
Optimización: Smart Optimization Optimizar eje
 Más Opciones

Posición preferida del primer movimiento:
 Set current

Una vez completadas la configuración se procede a la programación de la mesa giratoria, como anteriormente se mencionó la mesa giratoria será programada independientemente ya que tendrá que girar $21,17^\circ$ es decir que tendrá 17 movimientos para completar los 360° , para eso se coloca el mecanismo en 0° y se procede a poner un target que es una posición del mecanismo, esta posición deberá tener la siguiente configuración.

Figura 81

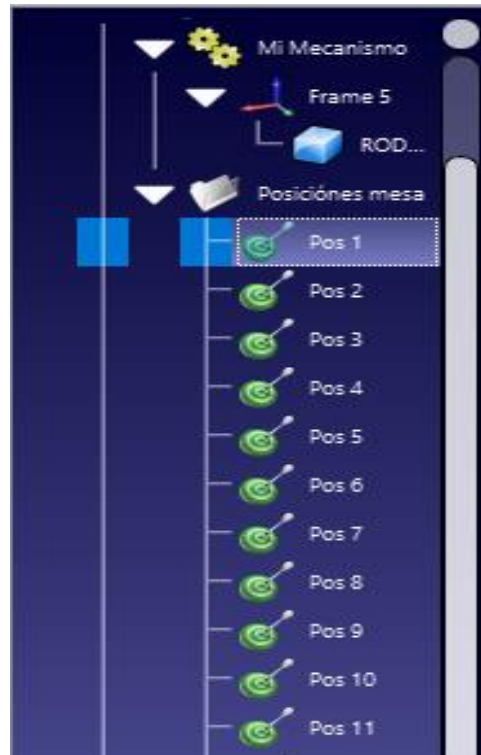
Configuración de targets para movimiento de la mesa



Este proceso se hará para cada movimiento de la mesa, una vez terminados de configurar los movimientos se agrupa en una carpeta, como se muestra en la figura 82 la carpeta que es nombrada posiciones mesa contiene todos los targets de objetivo axial vinculados al mecanismo de la mesa giratoria.

Figura 82

Targets agrupados





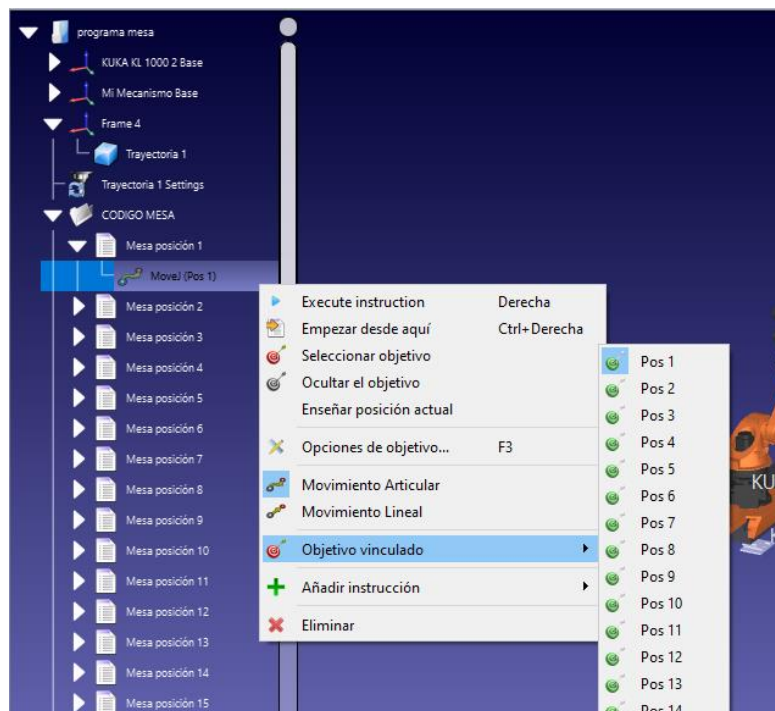
Definidas las posiciones de la mesa se continua con la creación de programas de movimiento, esto permite crear la simulación y generar programas, para ello en la barra de herramientas hacer clic en el icono añadir un nuevo programa  automáticamente se creará un programa en el árbol de la estación, seleccionar el programa y nombrarle con una denominación adecuada, en nuestro caso se le llamo como “mesa posición 1”, manteniendo seleccionado dirigirse a la barra de herramientas y dar clic en añadir un movimiento de ejes a un programa , el cual se configura haciéndole clic derecho en el mismo seleccionar y vinculándolo a la posición 1 como se muestra en la figura 83.

Figura 83

Configuración de un movimiento de eje



Realizar este procedimiento para todas las posiciones de la mesa, agrupar todos los programas en una carpeta y nombrarla, en este caso la carpeta se denomina “código mesa”.

Con la obtención de la trayectoria principal en SolidWorks y los programas del movimiento de la mesa, se procede a realizar el programa principal el cual se realiza añadiendo un nuevo programa y con el uso de la herramienta de ejecutar un programa o insertar código de instrucción, empezar haciendo el llamado del programa de la primera posición para continuar de la misma manera pero ahora realizando el llamado del programa de la trayectoria como se observa en la figura 84, así consecutivamente llamar la siguiente posición y el programa de trayectoria como se indica en la figura 85.

Figura 84

Llamado de programa hacia el programa principal

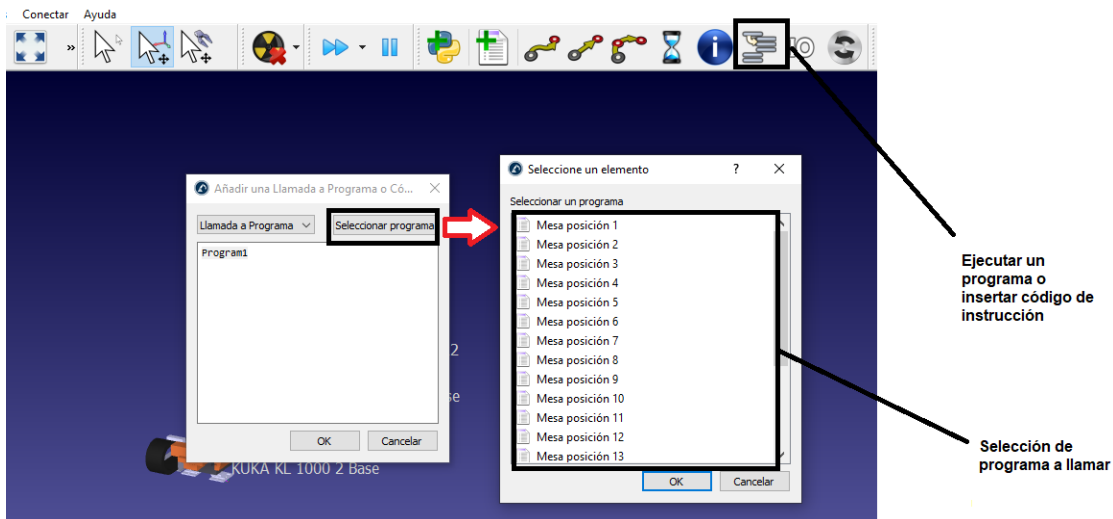
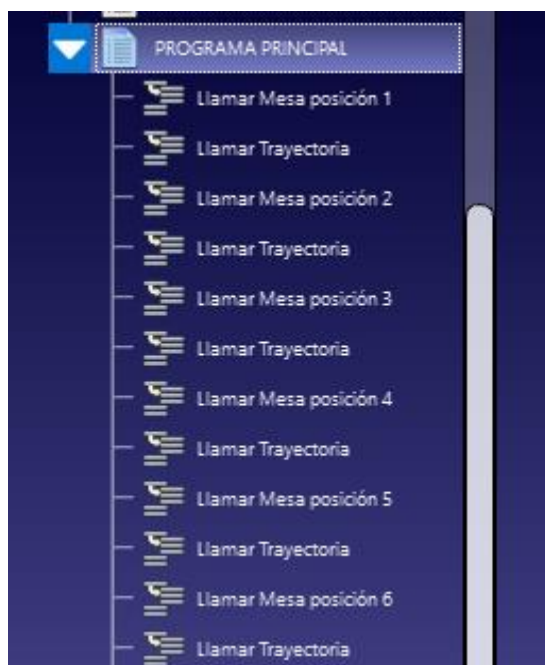


Figura 85

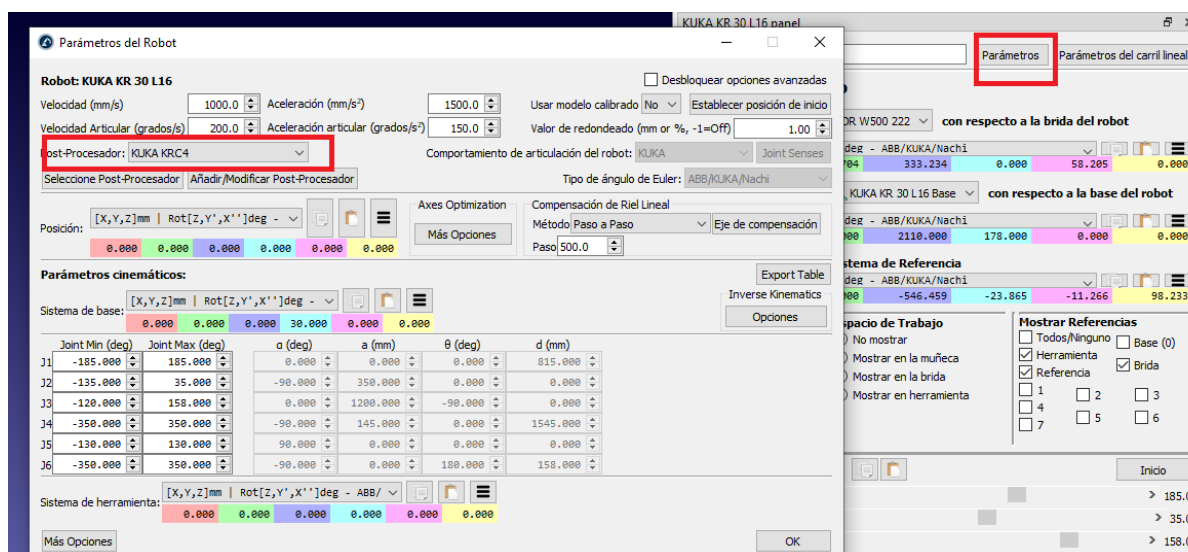
Alternación de llamados de programas



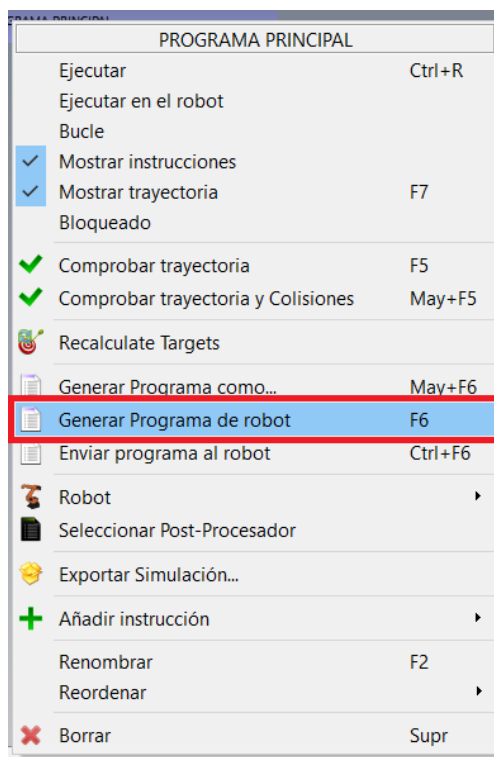
Una vez estructurado el programa principal seleccionar el post-procesador de acuerdo al controlador en cada elemento, en este caso es KUKA KRC4, ir a parámetros en la parte superior de la ventana de pilotaje cartesiana y seleccionar el post-procesador como se muestra en la figura 86.

Figura 86

Selección del post-procesador



Al culminar con la estructuración del programa RoboDK dispone de la opción Generar programa del robot como se muestra en la figura 87, la cual exporta los programas en .DAT o .SCR los cuales serán importados mediante un disco USB en el controlador del robot.

Figura 87*Generar programa de robot*

Para transferir un programa hacia el robot debemos copiar los archivos .DAT o .SRC en un disco USB e insertarlo en el controlador del robot, seleccionamos el archivo desde la ubicación del disco, presionamos editar y copiar, en una carpeta de la unidad KRC presionamos editar y pegar.

Al iniciar un programa en el robot debemos seleccionar el programa deseado en la unidad de memoria KRC, presionar en Seleccionar y el botón "R" y reiniciar el programa, empezamos a correr el programa presionando el botón ejecutar en el teach pendant.

5.5. Descripción del código obtenido

Como se mencionó en el apartado 5.4.3.1. la generación de la trayectoria se la realizó mediante el plugin de SolidWorks, y el post procesado del código se efectuó en RoboDK, cualquier código KRL consta de dos archivos diferentes con el mismo nombre: un archivo de datos permanente, con la extensión .dat, y un archivo de comando de movimiento, con la extensión .src; los tipos de archivo generados para este caso fueron en formato .src.

5.5.1. Código trayectoria de trabajo sobre la superficie de los alabes

El código a continuación explicado describe las trayectorias de trabajo a ser seguidas por las articulaciones del robot y el riel lineal (E1), por lo cual se excluye del código el eje externo "E2" como se mencionó en el apartado 5.4.2.

```
&ACCESS RVP ;Atributos archivo solo de lectura, de escritura
&REL 1 ; Contador que indica cuántas veces se ha modificado el documento
&COMMENT Generated by RoboDK
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\vorgabe ;Plantilla de parámetros
&PARAM EDITMASK = *; Plantilla de mascara de edición
DEF Trayectoria ( )
;FOLD INI - Inicio de un apartado
BAS (#INITMOV,0 ) ;Inicialización de las velocidades, aceleración, BASE, TOOL
;ENDFOLD (INI) - Fin del apartado

;FOLD STARTPOS
$BWDSTART = FALSE ;Deshabilita el movimiento hacia atrás
PDAT_ACT = {VEL 50,ACC 100,APO_DIST 10}; variable para almacenar los datos PDAT
(velocidad, aceleración, radio de aproximación) para un movimiento dado
BAS(#PTP_DAT) ;Da acceso a las variables FDAT_ACT
FDAT_ACT = {TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE} ;y programe $ VEL, $ TOOL, $
BASE y otras variables del sistema en consecuencia
BAS (#FRAMES)
BAS (#VEL_PTP,50); El "50" es el ajuste de velocidad para este movimiento
; ENDFOLD
```

```

; FOLD SET DEFAULT SPEED
$VEL.CP=0.2; Velocidad de trayectoria
BAS(#VEL_PTP,50)
BAS(#TOOL,0)
BAS(#BASE,0)
;ENDFOLD

;FOLD PTP FIRST POSITION
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT = {VEL 50,ACC 100,APO_DIST 10}
FDAT_ACT = {TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE}
BAS(#FRAMES)
$ADVANCE = 5 ;Número de pasos de movimiento en avance, como máximo
;ENDFOLD

PTP $AXIS_ACT ;Posición actual real
$ACT_EX_AX = 1 ;Número de bases externas en el sistema cinemático
; Program generated by RoboDK v4.2.0 for KUKA KR 30 L16 on 28/03/2020 02:20:19
; Using nominal kinematics.
$APO.CPTP = 1.000 ;Comienzo del posicionamiento en porcentaje
$APO.CDIS = 1.000 ;Prefijar la distancia de aproximación
$VEL.CP = 1.00000
$BASE = EK (MACHINE_DEF[2].ROOT, MACHINE_DEF[2].MECH_TYPE, { X 4126.000,Y 0.000,Z
2110.000,A 178.000,B 0.000,C 0.000 }) ;Definición del valor de base
$TOOL = {X 66.464,Y -1.704,Z 333.234,A 0.000,B 58.205,C 0.000} ;Definición del valor de
herramienta
; Mostrar TCP ABICOR W500 222
PTP {A1 35.26805,A2 -31.02348,A3 68.85885,A4 -175.55205,A5 25.61682,A6 93.02967,E1 -
440.00000} C_PTP ;Posicionamiento inicial
LIN {X 1328.927,Y 173.477,Z -745.086,A -33.122,B -6.971,C 102.087,E1 -440.00000} C_DIS
;Inicio de la ejecución de trayectoria
$VEL.CP = 0.05000
LIN {X 1328.927,Y 165.623,Z -710.630,A -33.461,B -8.188,C 100.109,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1328.927,Y 158.988,Z -675.984,A -33.527,B -9.176,C 98.607,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1328.927,Y 153.300,Z -641.191,A -33.473,B -9.980,C 97.421,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1328.927,Y 148.364,Z -606.281,A -33.379,B -10.612,C 96.501,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1328.927,Y 143.964,Z -571.288,A -33.303,B -11.009,C 95.923,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1328.927,Y 138.788,Z -526.684,A -33.301,B -11.259,C 95.549,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1328.927,Y 133.899,Z -482.041,A -33.183,B -11.478,C 95.244,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1328.927,Y 129.323,Z -437.365,A -32.666,B -11.773,C 94.896,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1328.927,Y 125.115,Z -392.657,A -31.805,B -12.176,C 94.422,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1328.927,Y 121.833,Z -347.862,A -31.057,B -13.299,C 92.729,E1 -440.00000} C_DIS
$VEL.CP = 1.00000
LIN {X 1528.927,Y 321.833,Z -347.862,A -31.057,B -13.299,C 92.729,E1 -440.00000} C_DIS
$VEL.CP = 1.00000
LIN {X 1505.980,Y 133.108,Z -291.849,A -28.197,B -14.091,C 91.627,E1 -440.00000} C_DIS

```



```

LIN {X 1459.357,Y 44.684,Z -294.603,A -28.197,B -14.091,C 91.627,E1 -440.00000} C_DIS
$VEL.CP = 0.05000
LIN {X 1459.357,Y 46.988,Z -341.409,A -28.379,B -13.215,C 93.188,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1459.357,Y 50.172,Z -388.154,A -28.485,B -12.826,C 93.874,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1459.357,Y 53.871,Z -434.864,A -28.405,B -12.591,C 94.313,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1459.357,Y 57.891,Z -481.551,A -28.395,B -12.389,C 94.683,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1459.357,Y 62.375,Z -528.191,A -28.479,B -12.016,C 95.343,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1459.357,Y 65.671,Z -558.693,A -28.557,B -11.711,C 95.878,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1459.357,Y 69.333,Z -589.157,A -28.649,B -11.298,C 96.604,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1459.357,Y 73.496,Z -619.542,A -28.694,B -10.743,C 97.598,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1459.357,Y 78.363,Z -649.802,A -28.584,B -9.974,C 99.039,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1459.357,Y 84.184,Z -679.889,A -28.239,B -9.029,C 100.932,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1459.357,Y 91.271,Z -709.749,A -27.470,B -7.875,C 103.531,E1 -440.00000} C_DIS
$VEL.CP = 1.00000
LIN {X 1659.357,Y 291.271,Z -709.749,A -27.470,B -7.875,C 103.531,E1 -440.00000} C_DIS
$VEL.CP = 1.00000
LIN {X 1627.649,Y 118.629,Z -652.385,A -20.780,B -9.385,C 104.710,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1597.205,Y 26.729,Z -677.437,A -20.780,B -9.385,C 104.710,E1 -440.00000} C_DIS
$VEL.CP = 0.05000
LIN {X 1597.877,Y 19.588,Z -648.879,A -21.512,B -10.298,C 101.751,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1598.555,Y 13.523,Z -620.101,A -22.243,B -10.668,C 100.392,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1599.420,Y 6.426,Z -583.349,A -23.082,B -10.878,C 99.468,E1 -440.00000} C_DIS
LIN {X 1600.288,Y 0.000,Z -546.459,A -23.865,B -11.266,C 98.233,E1 -440.00000} C_DIS
$VEL.CP = 1.00000
LIN {X 1800.288,Y 200.000,Z -546.459,A -23.865,B -11.266,C 98.233,E1 -440.00000} C_DIS
;Fin de la ejecución de trayectoria
END

```

5.5.2. Código de movimiento de la mesa rotacional (E2)

De acuerdo a la exigencia del trabajo de la mesa giratoria como se mencionó en el apartado 5.4.3.1. se planifico el movimiento repetitivo del mecanismo, se procede a explicar el código de la primera posición de 0° a la segunda posición de 21.17°.

Código posición 1 mesa

```

&ACCESS RVP
&REL 1
&COMMENT Generated by RoboDK
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\vorgabe
&PARAM EDITMASK = *
DEF Mesaposition1 ( )
;FOLD INI
BAS (#INITMOV,0 )
;ENDFOLD (INI)

;FOLD STARTPOS
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT = {VEL 50,ACC 100,APO_DIST 10}
BAS(#PTP_DAT)
FDAT_ACT = {TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE}
BAS (#FRAMES)
BAS (#VEL_PTP,50)
;ENDFOLD

;FOLD SET DEFAULT SPEED
$VEL.CP=0.2
BAS(#VEL_PTP,50)
BAS(#TOOL,0)
BAS(#BASE,0)
;ENDFOLD

;FOLD PTP FIRST POSITION
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT = {VEL 50,ACC 100,APO_DIST 10}
FDAT_ACT = {TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE}
BAS(#FRAMES)
$ADVANCE = 5
;ENDFOLD

PTP $AXIS_ACT ; skip BCO quickly
; Program generated by RoboDK v4.2.0 for Mi Mecanismo on 28/03/2020 02:20:38
; Using nominal kinematics.
PTP {E2 0.00000} ;Valor de la primera posición de la mesa en 0 grados
END

```

Código posición 2 mesa

```

&ACCESS RVP
&REL 1
&COMMENT Generated by RoboDK
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\vorgabe
&PARAM EDITMASK = *
DEF Mesaposition2 ( )
;FOLD INI
BAS (#INITMOV,0 )
;ENDFOLD (INI)

;FOLD STARTPOS
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT = {VEL 50,ACC 100,APO_DIST 10}
BAS(#PTP_DAT)
FDAT_ACT = {TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE}
BAS (#FRAMES)
BAS (#VEL_PTP,50)
;ENDFOLD

;FOLD SET DEFAULT SPEED
$VEL.CP=0.2
BAS(#VEL_PTP,50)
BAS(#TOOL,0)
BAS(#BASE,0)
;ENDFOLD

;FOLD PTP FIRST POSITION
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT = {VEL 50,ACC 100,APO_DIST 10}
FDAT_ACT = {TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE}
BAS(#FRAMES)
$ADVANCE = 5
;ENDFOLD

PTP $AXIS_ACT ; skip BCO quickly
; Program generated by RoboDK v4.2.0 for Mi Mecanismo on 28/03/2020 02:20:38
; Using nominal kinematics.
PTP {E2 21.17000} ;Valor de la segunda posición de la mesa en 27.17 grados
END

```

5.5.3. Código principal

El código principal se compone sistemáticamente por los códigos previamente descritos, estructurando la programación por medio de la solicitud de llamado de las diferentes posiciones de la mesa giratoria y la acción del robot conjunto al riel lineal.

```

&ACCESS RVP
&REL 1
&COMMENT Generated by RoboDK
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\vorgabe
&PARAM EDITMASK = *
DEF PROGRAMAPRINCIPAL ( )
;FOLD INI
BAS (#INITMOV,0 )
;ENDFOLD (INI)

;FOLD STARTPOS
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT = {VEL 50,ACC 100,APO_DIST 10}
BAS(#PTP_DAT)
FDAT_ACT = {TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE}
BAS (#FRAMES)
BAS (#VEL_PTP,50)
;ENDFOLD

;FOLD SET DEFAULT SPEED
$VEL.CP=0.2
BAS(#VEL_PTP,50)
BAS(#TOOL,0)
BAS(#BASE,0)
;ENDFOLD

;FOLD PTP FIRST POSITION
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT = {VEL 50,ACC 100,APO_DIST 10}
FDAT_ACT = {TOOL_NO 0,BASE_NO 0,IPO_FRAME #BASE}
BAS(#FRAMES)
$ADVANCE = 5
;ENDFOLD

PTP $AXIS_ACT ; skip BCO quickly

```

```
; Program generated by RoboDK v4.2.0 for Mi Mecanismo on 28/03/2020 02:20:38
; Using nominal kinematics.
Mesa posición 1() ;Llamado del primer programa de posición en la mesa giratoria
Trayectoria() ;Llamado del programa para ejecución de la trayectoria sobre el rodete
Mesa posición 2() ;Llamado del segundo programa de posición en la mesa giratoria
Trayectoria() ;Llamado del programa para ejecución de la trayectoria sobre el rodete
Mesa posición 3()
Trayectoria()
Mesa posición 4()
Trayectoria()
Mesa posición 5()
Trayectoria()
Mesa posición 6()
Trayectoria()
Mesa posición 7()
Trayectoria()
Mesa posición 8()
Trayectoria()
Mesa posición 9()
Trayectoria()
Mesa posición 10()
Trayectoria()
Mesa posición 11()
Trayectoria()
Mesa posición 12()
Trayectoria()
Mesa posición 13()
Trayectoria()
Mesa posición 14()
Trayectoria()
Mesa posición 15()
Trayectoria()
Mesa posición 16()
Trayectoria()
Mesa posición 17()
Trayectoria()
Mesa posición 18()
Trayectoria()
END
```

5.6. Comprobación de hipótesis

Mediante la generación y programación de trayectorias para el proceso de soldadura robotizada, de partes con geometría compleja utilizando software especializado y corrección de parámetros, se optimiza el tiempo de programación y ejecución de soldadura en dichos elementos.

Para la comprobación de la hipótesis es necesario enunciar las siguientes consideraciones

- Se realizó la toma de datos referentes al tiempo que tarda en realizarse una trayectoria con la metodología de programación en línea aplicada en el CIRT CELEC-EP.
- Con la aplicación de la metodología propuesta se realizó la toma de datos referentes al tiempo en el mismo proceso de soldadura.
- La evaluación de la hipótesis se efectuará mediante la comparación de valores de tiempo entre ambas metodologías.

La comprobación de la hipótesis se respaldará con el método de observación estructurada, aplicando los siguientes procedimientos.

De acuerdo con lo mencionado en el apartado 4.8. se utilizará la herramienta del cálculo de tiempo normal mismo que será aplicado a las dos metodologías, la presente y la propuesta.

Descripción de las muestras obtenidas:

Para la recolección de datos con la metodología aplicada actualmente, se realizó una observación y toma de tiempos mientras se ejecutaba la creación de trayectorias de soldadura sobre los alabes de un rodete Francis. En la tabla 11 se observan las características del proceso con su respectivo tiempo, los cuales serán procesados con el cálculo del tiempo normal dando un solo resultado que representa el dato que será comparado. Como ejemplo se muestra el cálculo aplicado para la obtención de tiempo normal en 3 de los tiempos más relevantes.

Centrar el rodete en el plato de la mesa giratoria

$$Tn = To * [1 + (H + E + C + K)]$$

$$Tn = 5422 * [1 + (0,08 + 0 + 0,02 + 0,01)]$$

$$Tn = 5422 * 1,11$$

$$Tn = 6018 \text{ segundos}$$

Reprogramación en un intervalo de 10 cordones

$$Tn = To * [1 + (H + E + C + K)]$$

$$Tn = 1315 * [1 + (0,08 + 0 + 0,02 + 0,01)]$$

$$Tn = 1315 * 1,11$$

$$Tn = 1460 \text{ segundos}$$

Configurar movimientos de avance de la herramienta

$$Tn = To * [1 + (H + E + C + K)]$$

$$Tn = 2955 * [1 + (0,08 + 0 + 0,02 + 0,01)]$$

$$Tn = 2955 * 1,11$$

$$Tn = 3280 \text{ segundos}$$

El registro restante de los tiempos normales en todos los procesos que conlleva la metodología actual se expone a continuación, obteniendo como total tiempo normal 296,32 minutos.

Tabla 11.

Tiempo normal de la metodología actual

N°	Descripción Actividades	Tiempos Medidos		Tiempo Promedio		Valoración Factor Trabajo					Tiempo Normal (s)
		1	2	$\sum t(s)$	t(s)	H	E	C	K	$F=1+\sum f$	
		1	Encendido de la celda	300	260	560	280	0,08	0	0,02	
2	Ubicación del operario	10	11	21	10,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	12

Centrar el											
3	rodete en el plato de la mesa giratoria	5422	5422	10844	5422	0,08	0	0,02	0,01	1,11	6018
Señalar											
4	cordones a ser soldados	625	681	1306	653	0,08	0	0,02	0,01	1,11	725
Programación											
5	de primer cordón de soldadura	925	965	1890	945	0,08	0	0,02	0,01	1,11	1049
Reprogramación											
6	en un intervalo de 10 cordones	1350	1280	2630	1315	0,08	0	0,02	0,01	1,11	1460
Ingresar											
7	parámetros de soldadura	475	420	895	447,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	497
Configurar											
8	ángulo de la herramienta	1130	1104	2234	1117	0,08	0	0,02	0,01	1,11	1240
Configurar											
9	movimientos de avance de la herramienta	2800	2945	5745	2872,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	3188

Configurar											
10	movimientos de	2960	2950	5910	2955	0,08	0	0,02	0,01	1,11	3280
	amplitud de la										
	herramienta										
TOTAL, TIEMPO NORMAL CELDA DE SOLDADURA ROBOTIZADA											17779
(s)											
TOTAL, TIEMPO NORMAL CELDA DE SOLDADURA ROBOTIZADA											296,32
(min)											

Para el caso de la metodología propuesta se tomo los datos de tiempo que conlleva la creación de las mismas trayectorias sobre los alabes del rodete Francis, tomando en cuenta los paso a seguir con sus respectivos tiempos, en la tabla 12 se puede observar con detalle el proceso seguido para la obtención de dichas trayectorias. Como ejemplo se muestra el cálculo aplicado para la obtención de tiempo normal en 3 de los tiempos más relevantes.

Dibujar trayectorias sobre el modelo CAD

$$T_n = 897 * [1 + (0,08 + 0 + 0,02 + 0,01)]$$

$$T_n = 897 * 1,11$$

$$T_n = 996$$

Configurar parámetros de proyecto de seguimiento de curva

$$T_n = 293 * [1 + (0,08 + 0 + 0,02 + 0,01)]$$

$$T_n = 291 * 1,11$$

$$T_n = 325$$

Correr el programa en T1

$$Tn = 947 * [1 + (0,08 + 0 + 0,02 + 0,01)]$$

$$Tn = 947,5 * 1,11$$

$$Tn = 1052$$

El registro restante de los tiempos normales en todos los procesos que conlleva la metodología propuesta se expone a continuación, obteniendo como total tiempo normal 178,38 minutos.

Tabla 12

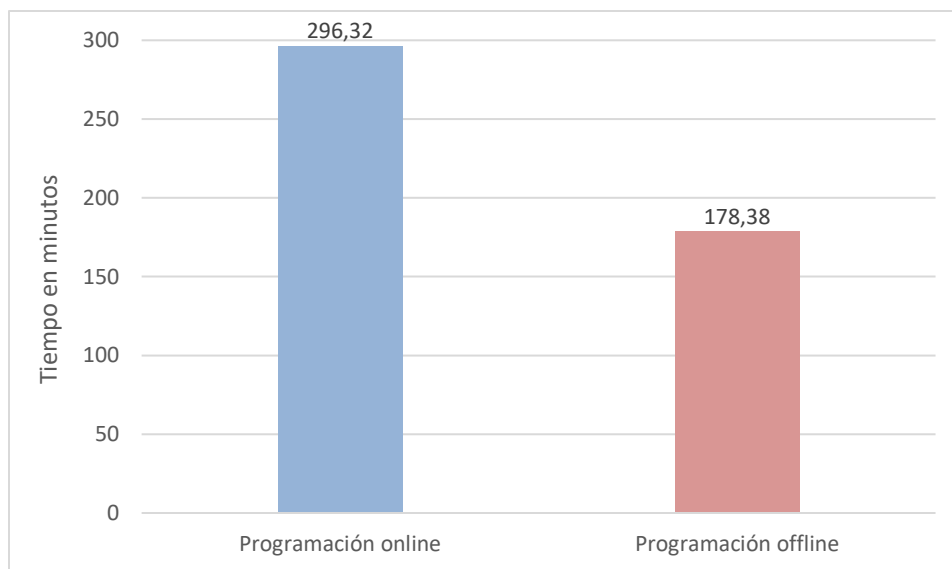
Tiempo normal de la metodología propuesta

N°	Descripción Actividades	Tiempos Medidos (s)		Tiempo Promedio		Valoración Factor Trabajo				Tiempo Normal (s)	
		1	2	$\sum t(s)$	t(s)	H	E	C	K	$F=1+\sum f$	
1	Configurar SolidWorks	62	59	121	60,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	67
2	Dibujar trayectorias sobre el modelo CAD	915	879	1794	897	0,08	0	0,02	0,01	1,11	996

	Exportar										
3	trayectorias a RoboDK	30	31	61	30,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	34
4	Importar pieza a RoboDK	30	28	58	29	0,08	0	0,02	0,01	1,11	32
5	Configurar parámetros de proyecto de seguimiento de curva	295	291	586	293	0,08	0	0,02	0,01	1,11	325
6	Programar la mesa giratoria	524	532	1056	528	0,08	0	0,02	0,01	1,11	586
7	Agrupar programas en carpetas	205	200	405	202,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	225
8	Creación de programas de movimiento	575	556	1131	565,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	628
9	Seleccionar post procesador KRC4	30	25	55	27,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	31
10	Generar programa de robot	35	34	69	34,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	38

Transferir											
11	programa al controlador	45	55	100	50	0,08	0	0,02	0,01	1,11	56
Cargar programa en el controlador											
12		35	34	69	34,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	38
Correr el programa en T1											
13		950	945	1895	947,5	0,08	0	0,02	0,01	1,11	1052
Centrar el rodete en el plato de la mesa giratoria											
14		5422	5422	10844	5422	0,08	0	0,02	0,01	1,11	6018
Configurar parámetros de soldadura											
15		500	540	1040	520	0,08	0	0,02	0,01	1,11	577
TOTAL TIEMPO NORMAL CELDA DE SOLDADURA ROBOTIZADA										10703	
(s)											
TOTAL TIEMPO NORMAL CELDA DE SOLDADURA ROBOTIZADA										178,38	
(min)											

Se puede observar que el tiempo normal que emplea en la creación de la trayectoria usando la metodología aplicada actualmente es de 296,32 minutos y tiempo obtenido con la propuesta es de 178,38 minutos mismos que son mostrados en la figura 88.

Figura 88*Tiempo vs metodología*

Con la implementación de la metodología propuesta para la generación de trayectorias en modo fuera de línea se redujo un 39,8% del tiempo total que conlleva programar las trayectorias con la metodología actual aplicada en CIRT CELEC-EP, mejorando el tiempo de producción y error humano al momento de realizar la programación en línea.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente queda comprobada la hipótesis.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- En la actualidad el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas y Partes Industriales de CELEC-EP dispone en la actualidad de una celda soldadura robotizada para trabajos repetitivos y de precisión, compuesta por un robot KUKA KR30 L16 – 2 con controlador KRC4, un riel lineal KUKA KL1000 – 2 CV, una mesa giratoria de implementación nacional con servomotor KUKA, una maquina soldadora Cebora Evo speed star 520 TS y una herramienta Abircor Binzel WH500 22.
- A través del análisis de cinco softwares afines a la investigación se logró entender su aplicación y características de cada uno, con el fin de ser comparados y seleccionar el software idóneo para la presente investigación, siendo RoboDK el seleccionado por cumplir las necesidades aplicativas planteadas.
- Mediante la asistencia de SolidWorks para la planificación de trayectorias y su plugin de RoboDK se logró integrar un correcto y optimo método de creación de movimientos que facilitan el proceso de soldadura, con la versatilidad que presenta la edición de parámetros en la opción de proyecto “seguimiento de curvas”, agilitando el trabajo sobre volúmenes complejos en archivos CAD en conjunto a la ingeniería inversa.
- Gracias a las opciones: mapa de colisiones, métodos de orientación del TCP y configuración de la compensación del TCP con la que cuenta RoboDK, la comprobación al vacío de las trayectorias obtenidas se caracteriza por una mayor precisión y seguridad respecto a las generadas manualmente con el KUKA Control Panel (KCP).

- A partir de la cuantificación de tiempo de varios parámetros inmersos en cada metodología, tanto en la actualmente utilizada y en la propuesta se obtuvo como resultados 296,32 minutos y 178,38 minutos respectivamente, obteniendo como resultado una reducción del 39,8% del tiempo empleado en el proceso de soldadura de alabes en un rodete tipo Francis, siendo un valor significativo de tiempo en el proceso de recuperación de turbinas hidráulicas.

6.2. Recomendaciones

- A la hora de realizar la digitalización de la celda tener presente las correctas orientaciones de los ejes respecto a la referencia física fijada en el controlador.
- En la planificación de trayectorias se debe tomar en cuenta el tipo de trayectorias a realizar, con el fin de obtener el uso óptimo de los ejes externos del robot.
- Previa a la ejecución de pruebas asegurarse de realizar un respaldo digital de toda la programación e información presente en el controlador.
- Verificar detenidamente las líneas de código generadas por el software seleccionado, editando los comandos que podrían generar errores en la ejecución.
- Cumplir a cabalidad las normas previstas de seguridad a la hora de realizar pruebas al vacío, siempre a baja velocidad (T1).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abicor binzel. (20 de marzo de 2018). *binzel-abicor*. Recuperado el 15 de enero de 2020, de binzel-abicor: <https://www.binzel-abicor.com/ES/spa/home/>
- Acme Themes. (15 de febrero de 2018). *AcademiX GNU/Linux*. Recuperado el 4 de mayo de 2020, de AcademiX GNU/Linux: <https://academixproject.com/es/v-rep-pro-edu-2/>
- Commons Attribution 3.0. (6 de diciembre de 2019). *ROS*. Recuperado el 5 de mayo de 2020, de ROS: <https://www.ros.org/>
- Creative Commons Attribution 3.0. (4 de enero de 2019). *OpenRAVE*. Recuperado el 4 de mayo de 2020, de OpenRAVE: http://openrave.org/docs/latest_stable/
- Dixon, L. (1998). *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*. New York: McGraw-Hill.
- EMAG elde. (23 de septiembre de 2018). *Eldec*. Recuperado el 10 de junio de 2020, de <https://www.eldec.net/es.html>
- ESAB. (8 de mayo de 2014). *Tweco®*. Recuperado el 4 de mayo de 2020, de Tweco®: <https://www.westarco.com/westarco/sp/support/documentation/upload/64-1403s-esab-tweco-consumibles-velocity.pdf>
- Fanuc. (19 de Noviembre de 2018). *Fanucamerica*. Recuperado el 4 de mayo de 2020, de <https://www.fanucamerica.com/products/cnc/cnc-technology/tool-center-point-control>
- Flóres, D., & Castro, F. (2014). *Planeación y ejecución de trayectorias en un robot delta*. Bogotá: Universidad Militar Nueva Granada.
- Hernandez, R., Fernandez, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la investigación*. Mexico: MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA.
- INFRA, E. (7 de agosto de 2018). *manual de soldadura NORMA ASME SFA 5.4 E 308L-16 AWS A 5.4 E 308L-16*. Recuperado el 5 de mayo de 2020, de

http://www.infrasur.com.mx/uploads/manuales/soldadura/manual_electrodos/aceros_inox.pdf

KUKA AG. (15 de Enero de 2020). *KUKA*. Recuperado el 4 de mayo de 2020, de KUKA:

[https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-](https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/software/planificaci%C3%B3n-proyecci%C3%B3n-servicio-seguridad/kuka_sim)

[robot/software/planificaci%C3%B3n-proyecci%C3%B3n-servicio-seguridad/kuka_sim](https://www.kuka.com/es-es/productos-servicios/sistemas-de-robot/software/planificaci%C3%B3n-proyecci%C3%B3n-servicio-seguridad/kuka_sim)

Larry, R. (2008). *Manual de soldadura GMAW (MIG-MAG)*. Madrid: Clara M. de la Fuente Rojo.

Lasluisa, H. (2017). *Investigación del prototipado rápido de piezas con orientación de fibras según su perfil mediante el robot KUKA KR16 de la ESPE-L*. Sangolquí: ESPE.

Mahidzal Dahari, J.-D. T. (2011). Forward and Inverse Kinematics Model for Robotic Welding Process Using KR-16KS KUKA Robot. *Simulation and Applied Optimization*, 6.

Mallitasig, O. (2011). *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Madrid: Académica Española.

Maurry, H., Niebles, E., & Torres, J. (2009). *Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados*. Barranquilla: UNINORTE.

Mora, C. (2018). *ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE UNA TURBINA*. Quito: ESPE.

Moreno, J. (01 de noviembre de 2016). *Antorchas de soldadura para robots, 8 puntos clave*.

Recuperado el 5 de mayo de 2020, de <https://www.josecarlosmoreno.com/single-post/2016/10/31/Robotic-welding-torch-1>

Ollero, A. (2005). *Robótica: Manipuladores y Robots Móviles*. Sevilla: MARCOBO.

Ortiz, R. (2011). *Pequeñas centrales Hidroeléctricas*. Bogotá: Ediciones de la U.

Reyes, F. (2010). *Robótica - control de robots manipuladores*. Mexico: Alfaomega.

REYES, J., & MORALES, L. (2018). *Estudio del Trabajo Aplicaciones en la Industria Ecuatoriana*. Ambato: Editorial Académica Española.

RoboDK Inc. (9 de agosto de 2019). *RoboDK*. Recuperado el 4 de mayo de 2020, de RoboDK:

<https://robodk.com/es/about>

- Rodríguez, E. (2005). *Metodología de la investigación (Ingeniería y Arquitectura)*. Mexico: Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
- Roman, G. (2005). *Soldadura robotizada*. Madrid: SN.
- Rowe, R. (2008). *Manual de soldadura GMAW (MIG-MAG)*. Madrid: Paraninfo.
- Sanz, J. (2016). *Energía hidroeléctrica: Serie Energías renovables*. Zaragoza: Prensa de la universidad de Zaragoza.
- Sanz, J., & Almécija, C. (2008). *Energía hidroeléctrica*. Zaragoza: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Saravanamuttoo, H., Rogers, G., & Cohen, H. (1996). *Gas Turbine Theory*. Longman Group.
- Soto, F. (2017). *Soldadura MIG de acero inoxidable y aluminio. FMEC0210*. Madrid: Innovación y cualificación.
- Steve., K. S. (2008). *Metales y aleaciones ferrosas: producción, propiedades generales y aplicaciones*. Cuerna Vaca: Pearson Educación.
- Tena, A., & Rivas, R. (2007). *Manual de investigación documental: elaboración de tesis*. Mexico: Plaza y Valdés.
- Tregaskiss. (6 de Enero de 2015). *Configuraciones de la pistola*. Recuperado el 5 de mayo de 2020, de https://www.tregaskiss.com/files/SpSh_CA3_Spanish.pdf
- Viedman, A., & Zamora, B. (1997). *Teoría de máquinas hidráulicas*. Murcia: Servicio de publicaciones Universidad de Murcia .
- Yáñez Sánchez, J. A. (20 de marzo de 2017). *Bibdigital EPN*. Recuperado el 4 de mayo de 2020, de http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17205/1/CD-7713.pdf?fbclid=IwAR2pq_Xd53ZcozNT66yRohB8ysUzp6llnJahxyvADokEIDSXLnDFqXtHKNs

ANEXOS