

---

# **Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado *Leadwell* V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores**

---

Presentado por:

**Yeimy Caterine Poveda Castillo**



**LOS LIBERTADORES**  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

**FUNDACION UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES**

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas

Programa de Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C, Colombia

2022

Página dejada en blanco intencionalmente

---

# **Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores**

---

Presentado por:

**Yeimy Caterine Poveda Castillo**

En cumplimiento de los requerimientos para optar por el Título de  
**Ingeniera Mecánica**

Dirigida por:

**Ubaldo García Zaragoza M.Sc**

Codirector:

**Jesús Manuel Gutiérrez Bernal Ph.D**

Presentada a:

Fundación Universitaria Los Libertadores

Programa de Ingeniería Mecánica

Bogotá D.C, Colombia

2022

Página dejada en blanco intencionalmente

**Notas de aceptación**



---

---

---

---

---

# LOS LIBERTADORES

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Bogotá D.C., 21 de septiembre de 2022.

Página dejada en blanco intencionalmente



# LOS LIBERTADORES

## FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores y a los resultados de su trabajo.

Página dejada en blanco intencionalmente



# Agradecimientos

*Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que fueron parte en el desarrollo de este proyecto de grado.*

*Iniciando con la Fundación Universitaria Los Libertadores que me ha formado de manera íntegra con la carrera que me acompañará de aquí en adelante y a mis directores de proyecto que hacen parte de esta institución. Ingenieros Ubaldo García y Jesús Gutiérrez, sin ustedes y sus virtudes, constancia y su paciencia este trabajo no hubiese sido posible.*

*Al ingeniero Ubaldo García gracias por formar parte importante de esta historia ya que como dijo el poeta Thomas Eliot: “Una parte de la función de la educación consiste en ayudarnos a escapar -no del tiempo que nos toca vivir, pues estamos atrapados en él, sino de las limitaciones emocionales e intelectuales de nuestro tiempo”. Esta etapa la consigo gracias a sus múltiples palabras de aliento, con sus aportes profesionales que lo distinguen y por estar allí cuando el proyecto se hacía confuso.*

*Quiero expresar un agradecimiento especial a las empresas FRAME INGENIERIA S.A.S y PEMARSA S.A.S por su apuesta por la innovación en el campo de ingeniería, fue de total inspiración visitar sus instalaciones.*

*Por último y no menos importante, quiero mencionar también a mi familia que me ha acompañado durante este tiempo y que ha hecho que este recorrido resultara menos arduo, gracias por impulsar mis sueños y esperanzas, les dedico a ustedes este logro, como una meta conquistada.*

*A todos muchas gracias.*

Yeimy Catherine Poveda Castillo

Página dejada en blanco intencionalmente

# Tabla de contenido

Índice de Figuras .....	13
Índice de Tablas.....	17
Resumen .....	21
Abstract.....	23
Capítulo 1.....	25
Introducción .....	25
Capítulo 2 .....	27
Planteamiento del problema .....	27
<b>2.1 Objetivos .....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.1. Objetivo General.....</b>	<b>29</b>
<b>2.1.2. Objetivos Específicos .....</b>	<b>29</b>
<b>2.2 Justificación .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3 Metodología .....</b>	<b>31</b>
<b>2.3.1 Diseño metodológico .....</b>	<b>31</b>
Capítulo 3 .....	35
Marco Referencial .....	35
<b>3.2. Conceptos de la Manufactura Aditiva .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1. Equipos empleados en el proceso WAAM .....</b>	<b>39</b>
<b>3.2. Ventajas de la Manufactura Aditiva por soldadura por arco eléctrico (WAAM).....</b>	<b>39</b>
<b>3.3. Principales defectos para varios materiales depositados por distintas técnicas WAAM. ....</b>	<b>42</b>
Capítulo 4 .....	44
Virtualización del centro de mecanizado Leadwell V20i para manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM .....	44
<b>4.1. Estudio cinemático de la arquitectura del centro de mecanizado Leadwell V20i.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2. Generación del modelo virtual del centro de mecanizado Leadwell V20i.....</b>	<b>45</b>
<b>4.3. Virtualización del centro de mecanizado Leadwell V20i.....</b>	<b>49</b>
<b>4.4. Inclusión de la función del proceso de manufactura aditiva en el simulador .....</b>	<b>52</b>
Capítulo 5.....	54
<b>5.1. Implementación del simulador para generar una trayectoria de manufactura aditiva .....</b>	<b>54</b>
<b>5.2. Adecuación del post-procesador con base a una trayectoria de manufactura aditiva para ser utilizado en un centro de mecanizado Leadwell V20i.....</b>	<b>61</b>
<b>5.3. Comprobación del comportamiento del post-procesador con</b>	

<b>trayectorias continuas y discontinuas.....</b>	<b>75</b>
Capítulo 6 .....	80
<b>6.1. Análisis de los equipos y preparación para la adecuación de la     conexión eléctrica entre ellos. ....</b>	<b>81</b>
<b>6.2. Adecuación de la conexión eléctrica. ....</b>	<b>89</b>
Capítulo 7.....	93
Pruebas Físicas .....	93
Capítulo 8 .....	105
Resultados y Discusión.....	105
Capítulo 9 .....	107
Conclusiones.....	107
Capítulo 10.....	109
Apéndice A (Plano).....	111
Apéndice B (Manual).....	112
Apéndice C (Manual).....	116
Apéndice D (Manual) .....	120
Apéndice D (Manual) .....	124
Apéndice E (Manual).....	128
Apéndice F (Manual).....	132
Apéndice G (Manual) .....	135
Anexo A (Manual).....	140

# Índice de Figuras

<i>Figura 2.1. Resumen metodológico del proyecto</i> .....	33
<i>Figura 3.1. Relación entre los conceptos y temas de investigación</i> .....	35
<i>Figura 3.2. Clasificación de la Manufactura aditiva</i> .....	37
<i>Figura 3.3. Clasificación de los sistemas DED</i> .....	38
<i>Figura 3.4. Visita empresa PEMARSA</i> .....	41
<i>Figura 4.1. Esquema cinemático del centro de mecanizado Leadwell v20i y su ubicación en la maquina física.</i> .....	44
<i>Figura 4.2. Importe de las piezas.</i> .....	47
<i>Figura 4.3. Guardado de las piezas</i> .....	47
<i>Figura 4.4. Ruta de guardado de las piezas</i> .....	48
<i>Figura 4.5. Proceso finalizado de guardado de las piezas</i> .....	48
<i>Figura 4.6. Proceso finalizado de guardado de las piezas</i> .....	49
<i>Figura 4.7. Declaración de parámetros de la máquina</i> .....	50
<i>Figura 4.8. Implementación de la cinemática de cada eje</i> .....	50
<i>Figura 4.9. Generación del código .xml automáticamente.</i> .....	51
<i>Figura 4.10. Visualización Máquina CNC Virtual.</i> .....	52
<i>Figura 4.11. Desactivación de las herramientas de fresado</i> .....	52
<i>Figura 5.1. Importación de la maquina en SprutCAM</i> .....	55
<i>Figura 5.2. Generación de trayectorias en SprutCAM</i> .....	56
<i>Figura 5.3. Importación del primer ejercicio a SprutCAM</i> .....	57
<i>Figura 5.4. Visualización de la trayectoria en SprutCAM.</i> .....	58
<i>Figura 5.5. Visualización opción de Post-procesador en SprutCAM</i> .....	59
<i>Figura 5.6. Generación del código NC en SprutCAM.</i> .....	59
<i>Figura 5.7. Visualización del código NC en Bloc de notas.</i> .....	60

<i>Figura 5.8. Estructura código NC</i>	63
<i>Figura 5.9. Generador de post procesadores</i>	64
<i>Figura 5.10 Ventana principal del post procesador.</i>	65
<i>Figura 5.11 Desactivación comando de la bomba del refrigerante.</i>	67
<i>Figura 5.12 Desactivación comando del husillo.</i>	68
<i>Figura 5.13. Alistamiento del montaje virtual en SprutCAM</i>	68
<i>Figura 5.14. Visualización de la segunda trayectoria en SprutCAM.</i>	69
<i>Figura 5.15 Adición de la variable</i>	71
<i>Figura 5.16. Inicialización de variable</i>	71
<i>Figura 5.17. Condicional para desactivación de variable</i>	72
<i>Figura 5.18. Condicional para activación de variable</i>	72
<i>Figura 5.19. Importación de la tercera trayectoria a SprutCAM</i>	73
<i>Figura 5.20. Visualización del tercer ejercicio en SprutCAM.</i>	73
<i>Figura 5.21. Importación del cuarto modelo a SprutCAM.</i>	75
<i>Figura 5.22. Visualización de la cuarta trayectoria en SprutCAM</i>	76
<i>Figura 5.23. Importación del modelo a SprutCAM.</i>	76
<i>Figura 5.24. Visualización de la última trayectoria en SprutCAM.</i>	77
<i>Figura 6.1. Flujo de comandos y señales eléctricas para la integración del proceso WAAM.</i>	80
<i>Figura 6.2 Dispositivo de sujeción</i>	81
<i>Figura 6.3 Mecanismo de sujeción.</i>	83
<i>Figura 6.4 Vistas de mecanismo de sujeción.</i>	82
<i>Figura 6.5. Diseño tablero de control.</i>	84
<i>Figura 6.6. Tabla de relevadores.</i>	85
<i>Figura 6.7. Diseño de placa de relevos de entradas y salidas</i>	86
<i>Figura 6.8 Plano eléctrico de señales de salida de área de control.</i>	87
<i>Figura 6.9 Partes del equipo de soldadura</i>	88
<i>Figura 6.10 Antorcha de soldadura.</i>	89
<i>Figura 6.11. Diagrama de relé electromagnético</i>	90
<i>Figura 6.12 Antorcha de soldadura.</i>	91

<i>Figura 6.13 Antorcha de soldadura.</i>	92
<i>Figura 6.14 Montaje para proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco.</i>	92
<i>Figura 7.1 Flujo de operación para puesta a punto de proceso WAAM.</i>	94
<i>Figura 7.2 Posición del sustrato en el eje lineal X y ubicación del cero de pieza.</i>	95
<i>Figura 7.3 Posición de la puesta a tierra.</i>	96
<i>Figura 7.4 Parámetros de la máquina.</i>	97
<i>Figura 7.5 Parámetros de la simulación</i>	98
<i>Figura 7.6 Impresión ejercicio de Avances</i>	100
<i>Figura 7.7 Resultado del primer ejercicio</i>	101
<i>Figura 7.8 Ensayo de líquidos penetrante</i>	101
<i>Figura 7.9 Resultado pruebas experimentales.</i>	102
<i>Figura 7.10 Tareas posteriores a la impresión.</i>	103
<i>Figura 7.11 Ensayo de termografía</i>	103

Página dejada en blanco intencionalmente



# Índice de Tablas

<i>Tabla 3.1. Características de los procesos de fabricación aditiva.....</i>	<i>40</i>
<i>Tabla 3.2. Características de los procesos de fabricación aditiva.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4.1. Modelos de componentes Centro de mecanizado Leadwell V20i.....</i>	<i>46</i>
<i>Tabla 5.1. Códigos G del Centro de mecanizado Leadwell V20i. ....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 5.2. Códigos M para Centro de mecanizado Leadwell V20i.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 5.3. Comparación del encabezado.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 5.4. Comparación de códigos NC.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 5.5. Estructura código NC para Centro de mecanizado Leadwell V20i para manufactura aditiva ..</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 5.6. Últimos códigos NC generados. ....</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 7.1 Condiciones de soldadura especificados en el manual. ....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 7.2 Valores salida nominal.....</i>	<i>99</i>
<i>Tabla 7.3 Valores del ejercicio Avances.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 7.3 Ensayo Metrológico.....</i>	<i>104</i>

Página dejada en blanco intencionalmente

## Abreviaturas

<b>WAAM</b>	Manufactura aditiva mediante arco e hilo ( <i>Wire Arc Additive Manufacturing</i> )
<b>MA</b>	Manufactura Aditiva
<b>NDT</b>	Ensayos no Destructivos ( <i>Non-destructive testing</i> )
<b>DED</b>	Deposición Directa de Energía ( <i>Directed Energy Deposition</i> )
<b>WFS</b>	Velocidad de Alimentación del Hilo ( <i>Wire Feed Speed</i> )
<b>GMAW</b>	Soldadura a Gas y Arco Metálico ( <i>Gas Metal Arc Welding</i> )
<b>CAD</b>	Diseño Asistido por Computador ( <i>Computer Aided Design</i> )
<b>CAM</b>	Manufactura Asistida por Computador ( <i>Computer Aided Manufacturing</i> )
<b>MIG</b>	( <i>Metal Inert Gas</i> )
<b>MAG</b>	( <i>Metal Active Gas</i> )
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>XML</b>	<i>Extensible Markup Language</i>
<b>IRT</b>	<i>Infrared thermography</i>

Página dejada en blanco intencionalmente

# **Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores.**

## **Resumen**

La Manufactura aditiva, por su capacidad de crear piezas tridimensionales, aportando flexibilidad, integridad estructural y resolución geométrica, similares a otros procesos de manufactura convencionales; está posicionada entre una lista de 15 tecnologías disruptivas que logran un cambio relevante e interrumpe la forma en la que operan las industrias, empresas y consumidores. Este documento presenta el desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (por sus siglas en inglés WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores con ayuda del software SprutCAM. El objetivo es fortalecer las capacidades en términos de investigación, equipos de laboratorio, y capacitación de personal, brindando a los estudiantes de la institución la posibilidad de generar autonomía en la fabricación de componentes en metal. Mediante el enfoque metodológico utilizado, se revisaron inicialmente los parámetros teóricos sobre el estado del arte de la manufactura aditiva en específico con soldadura por arco permitiendo tener un acercamiento positivo a la implementación de esta tecnología. Los principales aportes de la investigación se enmarcan en la integración de un equipo de soldadura Lincoln SPEEDTECCC 200C al centro de mecanizado Leadwell V20i para así generar una máquina de doble propósito las cuales son: técnica sustractiva y aditiva, al igual que el desarrollo de un simulador con los parámetros deseados que permite tener una vista preliminar a la impresión, obteniendo como resultado el desarrollado de una metodología de trabajo que permite la fabricación automática de piezas mediante el proceso WAAM y finalmente un acercamiento al proceso desde la perspectiva de los ensayos no destructivos .

**Palabras Claves:** Manufactura aditiva, Leadwell V20i, Simulador, soldadura por arco.

Página dejada en blanco intencionalmente

# **Development of an additive manufacturing simulator based for arc welding (WAAM) for the Leadwell V20i machining center at Fundación Universitaria Los Libertadores Lab.**

## **Abstract**

Additive manufacturing, for its ability to create three-dimensional parts, providing flexibility, structural integrity and geometric resolution, similar to other conventional manufacturing processes; is positioned among a list of 15 disruptive technologies that achieve relevant change and disrupts the way industries, businesses and consumers operate. This document presents the development of an additive arc welding manufacturing simulator (WAAM) for the Leadwell V20i machining center of the Los Libertadores University Foundation with the help of SprutCAM software. The objective is to strengthen capacities in terms of research, laboratory equipment, and personnel training, providing the students of the institution the possibility of generating autonomy in the manufacture of metal components. Using the methodological approach used, the theoretical parameters on the state of the art of additive manufacturing in specific with arc welding were initially reviewed, allowing a positive approach to the implementation of this technology. The main contributions of the research are framed in the integration of a Lincoln SPEEDTECCC 200C welding equipment to the Leadwell V20i machining center to generate a dual purpose machine which are: subtractive and additive technique, as well as the development of a simulator with the desired parameters that allows to have a preview to the print, resulting in the development of a working methodology that allows the automatic manufacture of parts through the WAAM process and finally an approach to the process from the perspective of non-destructive testing..

**Key Words:** Additive manufacturing, Leadwell V20, Simulator, arc welding, WAAM.

Página dejada en blanco intencionalmente



# Capítulo 1

## Introducción

De acuerdo con la Alianza Tecnológica Intersectorial De Galicia, los procesos convencionales de fabricación de componentes requieren el uso de gran cantidad de elementos de control, necesarios para conseguir niveles de precisión y fiabilidad muy elevados; sin embargo, existen ciertas limitaciones en los procesos convencionales de fabricación, ya que en función del tamaño del lote a fabricar y la complejidad geométrica del componente, es necesario utilizar procesos y utensilios que pueden encarecer el coste del producto final [1]. Por ejemplo, con un enfoque convencional de manufactura, el fresado de una pieza de un bloque sólido genera alto tiempo de procesamiento, desgaste de la herramienta y pérdida de material durante el mecanizado, lo que conlleva a un costo extra [2].

El sector industrial está en busca de procesos con mayor eficiencia, calidad y detalle en la producción de productos que cumplan y sobrepasen con las necesidades de cada cliente [3]. Uno de los procesos que está revolucionando la forma en que muchos productos son diseñados y fabricados es la Manufactura Aditiva (MA) que según la norma ASTM F2792-10 se define como: “El proceso de unión de materiales para crear objetos desde un modelo 3D, la unión se produce usualmente capa tras capa, en contraposición a las tecnologías de fabricación sustractiva” [4]. Por otro lado, la Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D (ADDIMAT) la define como: “Grupo de procesos que se basan en añadir material de forma selectiva, formando un objeto mediante la superposición de capas sucesivas de material a partir de un modelo digital [5].

La Manufactura aditiva, por su capacidad de crear piezas tridimensionales, aportando flexibilidad, integridad estructural y resolución geométrica, similares a otros procesos, está posicionada entre una lista de 15 tecnologías disruptivas que logran un cambio relevante e interrumpe la forma en la que operan las industrias, empresas y consumidores [6] [7]. A pesar de la relevancia de esta tecnología patentada en áreas como el diseño creativo o en la fabricación de

modelos y prototipos, el sector industrial aún desconoce toda su magnitud. El ejemplo más conocido de manufactura aditiva es: la impresión 3D que utiliza como material de aporte filamentos termoplásticos; sin embargo, este concepto ha venido evolucionando de manera que está integrando a ella materiales metálicos para adaptarse a otras necesidades [8].

Uno de los procesos más requeridos en la industria de la manufactura aditiva con metales es denominado Sinterizado por Láser (SLS-DMLS), este utiliza como insumo el polvo (Materiales en forma de polvo, principalmente metales y aleaciones) [1]; sin embargo, la tecnología de fabricación aditiva mediante arco e hilo (WAAM por sus siglas en inglés *Wire Arc Additive Manufacturing*) es uno de los procesos aditivos que está ganando protagonismo ya que utiliza el material en forma de hilo en compañía de un arco eléctrico que se encarga de fundirlo. Este proceso aditivo brinda beneficios que procesos como el de Sinterizado por láser (SLS-DMLS) no ofrece como: la tasa de deposición, su coste de proceso en seguridad y reutilización del material [6]. Este método generativo ofrece grandes ventajas, en especial cuando hay que producir formas complejas de manera rápida y a un costo bajo, lo que hace de WAAM una opción muy atractiva para la fabricación de moldes y pequeñas series.

Finalmente, teniendo en cuenta el desarrollo de nuevas tecnologías como la presentada anteriormente, y su aplicación en la industria nacional, la Fundación Universitaria los Libertadores con el objetivo de fortalecer las capacidades en términos de investigación, equipos de laboratorio, y capacitación de personal, presenta una solución denominada: Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva con soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado *Leadwell V20i*, que brindará a los estudiantes de la institución la posibilidad de generar autonomía en la fabricación de componentes en metal implementando esta tecnología.

## Capítulo 2

# Planteamiento del problema

La aparición de tecnologías de fabricación avanzada, junto con las demandas de los consumidores de productos y servicios más personalizados, están provocando cambios en la escala y distribución de la fabricación [9]. Deloitte, por su parte, presenta los desafíos de la fabricación aditiva, resaltando que los procesos convencionales de manufactura están altamente sincronizados y que el cambio o el tiempo de manejo del producto se han reducido al mínimo. Sin embargo, establece que la Manufactura Aditiva (MA) promete introducir flexibilidad en los procesos de fabricación convencionales, pero se debe tener en cuenta la implementación de la confiabilidad, ya que estas tecnologías son bastante costosas y aún carecen de estabilidad en el proceso, calidad de las piezas o reproducibilidad [10].

En ese sentido, esta tecnología denominada Manufactura Aditiva (MA), bastante conocidos como procesos de impresión 3D, permiten realizar la producción de piezas geométricamente complejas capa por capa sobre la base de datos tridimensionales (3D) generados mediante el escaneo de objetos físicos o el uso de *software* de diseño [11]. Sin embargo, la libertad de diseño que ofrecen los procesos de Manufactura Aditiva (MA) aún no se utiliza por completo, esto, porque los estándares y procedimientos de diseño actuales tienen como objetivo aprovechar las fortalezas y limitaciones de las rutas de fabricación tradicionales [12].

Conociendo su impacto, las grandes industrias han mostrado su gran interés en la Manufactura Aditiva (MA), buscando personas para que trabajen en ello, pero como era de esperarse no hay personas del todo capacitadas en este campo. De acuerdo con Damgaard, la industria de la fabricación aditiva está creciendo a un ritmo increíble con nuevos fabricantes, tecnologías y aplicaciones presentadas casi semanalmente. Por otro lado, establece que la guerra por el talento ha dado lugar a una reserva de talento cada vez más selectiva. Como es limitada, los profesionales en demanda se han vuelto más selectivos en cuanto a las

oportunidades de empleo y las empresas que están dispuestas a considerar, ya que es probable que tengan múltiples ofertas a la mano [13]. Lo que indica que hay una demanda de diseñadores e ingenieros conocedores sobre los procesos de Manufactura aditiva (MA). Esta demanda debe ser tomada en cuenta para poder fortalecer y potenciar el talento desde la Fundación Universitaria Los Libertadores, llegando a tener un impacto en proyectos de investigación avalados por la institución, así como en proyectos de grado, e inclusión de nueva tecnología en espacios académicos.

Adicionalmente, de acuerdo con la OWSD, la Organización de Mujeres en la Ciencia para el Mundo en Desarrollo (OWSD) es una organización internacional fundada en 1987, su propósito es unir a mujeres científicas eminentes de los mundos en desarrollo y desarrollados con el objetivo de fortalecer su papel en el proceso de desarrollo y promover su representación en el liderazgo científico y tecnológico. En Colombia la OWSD se estableció en mayo de 2021 y está alojada en la Fundación Universitaria Los Libertadores en Bogotá, para el 2022 tiene 164 miembros, visibilizando el trabajo de las mujeres científicas en Colombia a través de la difusión en los medios [14]. Este trabajo busca que se pueda comenzar a disminuir la barrera que existe en la industria de la manufactura aditiva, debido a la escasez de personas capacitadas, y, asimismo, a generar un aporte en la divulgación de esta tecnología, resaltando el papel de la mujer en la ciencia, en la tecnología y en la ingeniería; presentando una iniciativa de la Fundación Universitaria Los Libertadores para la capacitación de personal idóneo en procesos de manufactura.

Teniendo en cuenta el creciente desarrollo de la Manufactura Aditiva (MA) y de la necesidad de un cambio en la capacitación de personal idóneo para este tipo de tecnología, el desarrollo e implementación de este proyecto generará un cambio positivo en el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería, ya que pueden utilizar los equipos existentes en el laboratorio de CNC de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, combinando los esfuerzos para sincronizar las tecnologías de Manufactura Aditiva (MA) con las tecnologías convencionales en el proceso de producción, conllevando a la implementación de una tecnología nueva de manufactura en la Fundación Universitaria Los Libertadores. Finalmente, con

base en la información mencionada se formula la siguiente pregunta: ¿Es posible unificar dos procesos de manufactura convencional para generar manufactura aditiva de metal utilizando insumos y equipos de la Fundación Universitaria Los Libertadores y de esta manera impulsar la industria 4.0 en Colombia?

## **2.1 Objetivos**

### **2.1.1. Objetivo General**

- Desarrollar un sistema de simulación y verificación virtual del centro de mecanizado *Leadwell V20i* para manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM.

### **2.1.2. Objetivos Específicos**

- Producir un modelo virtual del centro de mecanizado *Leadwell V20i* para manufactura aditiva por soldadura por arco.
- Ajustar el post procesador para que pueda generar el código basado en centro de mecanizado *Leadwell V20i* para manufactura aditiva por soldadura por arco.
- Validar el modelo con una simulación de manufactura aditiva por soldadura por arco en centro de mecanizado *Leadwell V20i*.
- Corroborar la eficacia del simulador y post procesador con pruebas físicas.

## 2.2 Justificación

El espacio académico electivo Sistemas CAD/CAM del programa de Ingeniería Mecánica de la Fundación Universitaria Los Libertadores busca conseguir que el estudiante aprenda las diferentes formas de manufacturar elementos mecánicos, por medio de sistemas CAD/CAM, los cuales le permitirán ampliar su visión de los procesos de manufactura, y asimismo, relacionar los diferentes *softwares* disponibles, con el objetivo de desarrollar y diseñar sistemas de producción modernos de manufactura. De esta forma, se presenta un proyecto que surge desde la visión del espacio académico electivo, ampliando su contenido y generando otro tipo de proceso de manufactura con base en la tecnología disponible en los laboratorios de CNC de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas. Este proyecto plantea implementar en la Institución la Manufactura Aditiva (MA) con metales, enfocada en soldadura por arco llevando a la consolidación de un laboratorio con doble propósito, la adición de material con tecnología WAAM y sustracción con técnicas convencionales de manufactura. Como valor agregado, se presenta la reducción de costos de manufactura, ya que este tipo de máquinas dedicadas a la Manufactura Aditiva (MA) tienen un valor elevado en el mercado.

Para conseguir dicho propósito se establece un modelo virtual, que, llevándolo a la experimentación permite que el estudiante tenga cercanía con la Manufactura Aditiva (MA) con metales, y pueda continuar en constante investigación y mejoramiento de los prototipos planteados en los proyectos de clase, además de los respectivos proyectos de investigación. Finalmente, en la ejecución de pruebas se realiza la evaluación del sistema con el fin de proponer y diseñar mejoras para proyectos futuros que involucren nuevos parámetros de soldadura, sistema de refrigeración entre otros.

Por último, este proyecto conlleva a la capacitación de los futuros ingenieros Libertadores competentes para la industria nacional e internacional, ya que una de las grandes barreras que existen en la Manufactura Aditiva (MA) a nivel industrial es la escasez de personas capacitadas en estos campos de conocimiento.

## 2.3 Metodología

Desde el punto de vista de la naturaleza de la investigación, la metodología adoptada para el desarrollo del trabajo de acuerdo con Morales es la investigación descriptiva y explicativa, que consiste en llegar a conocer las situaciones, costumbres y actitudes predominantes a través de la descripción exacta de las actividades, objetos, procesos y personas. Su meta no se limita a la recolección de datos, sino a la predicción e identificación de las relaciones que existen entre dos o más variables [15]. Con esta investigación se pretende describir el desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (por sus siglas en inglés WAAM) para el centro de mecanizado vertical *Leadwell V20i* de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

### 2.3.1 Diseño metodológico

El diseño metodológico utilizado para el logro de los objetivos planteados consta de seis etapas presentadas a continuación:

Etapa 1: Fundamentación teórica de conceptos y normas aplicables para la realización de un simulador de manufactura aditiva con soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado *Leadwell V20i*

Etapa 2: Diseño del Modelo virtual del centro de mecanizado *Leadwell V20i*, que contiene las siguientes actividades:

1. Recopilación de información geométrica y límites del centro de mecanizado LEADWELL V20i.
2. Generación el modelo 3D del centro de mecanizado LEADWELL V20i.
3. Configuración de los parámetros del simulador en el *software MachineMaker*.
4. Generación del archivo XML con los archivos necesarios para el simulador.
5. Modificación del archivo XML para adicionar el módulo en manufactura aditiva.

Etapa 3: Sincronización del modelo virtual con el post-procesador del *software* SprutCAM, que contiene las siguientes actividades:

1. Recopilación de información de operación y funcionamiento del centro de mecanizado *LEADWELL V20i*.
2. Selección de la plantilla base de post procesador para código G.
3. Edición del post procesador para parámetros de movimientos en manufactura aditiva.
4. Edición del post procesador para activación de desactivación de antorcha de soldadura.

Etapa 4: Montaje virtual y generación de las trayectorias virtuales para proceso WAAM, que contiene las siguientes actividades:

1. Generación del modelo 3D de la pieza a fabricar.
2. Importación y ubicación espacial del modelo 3D y sustrato.
3. Configuración de los parámetros y generación trayectoria para el modelo 3D.
4. Simulación del proceso de manufactura aditiva.
5. Verificación de trayectorias en la simulación para evitar colisiones y errores para post-procesar el código G.

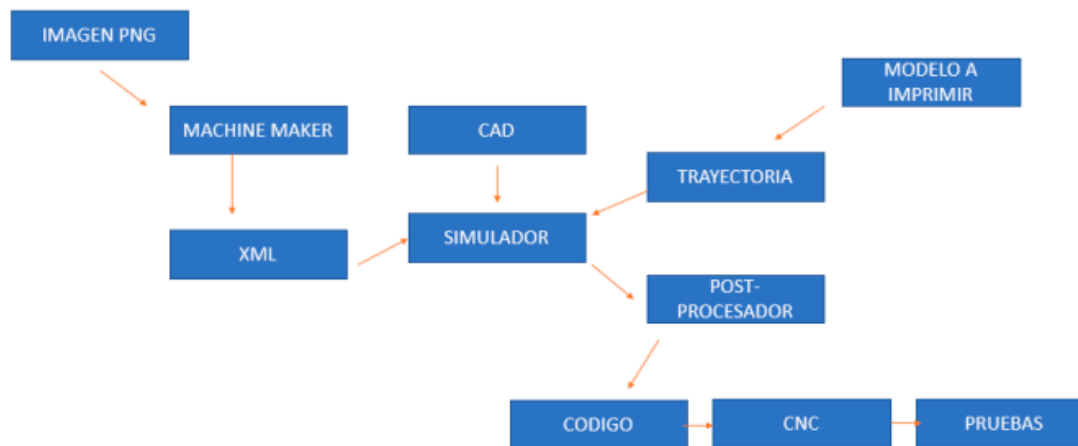
Etapa 5: Montaje físico y generación del código G, que contiene las siguientes actividades:

1. Realización de la conexión del relé para la activación y desactivación de la antorcha de soldadura.
2. Ubicación del soporte de sujeción de la antorcha de soldadura.
3. Carga y ejecución del código G post procesado en vacío.
4. Ejecución del código G para realizar la impresión por arco eléctrico.
5. Validación y verificación del resultado de aporte de metal correspondiente a la simulación realizada.



Etapa 6: Descripción de los resultados obtenidos del desarrollo de un simulador de manufactura aditiva con soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado vertical Leadwell V20 de la Fundación Universitaria Los Libertadores. Finalmente, la Figura 2.1. presenta el resumen metodológico del proyecto.

Figura 2.1. Resumen metodológico del proyecto



Fuente: Autor.

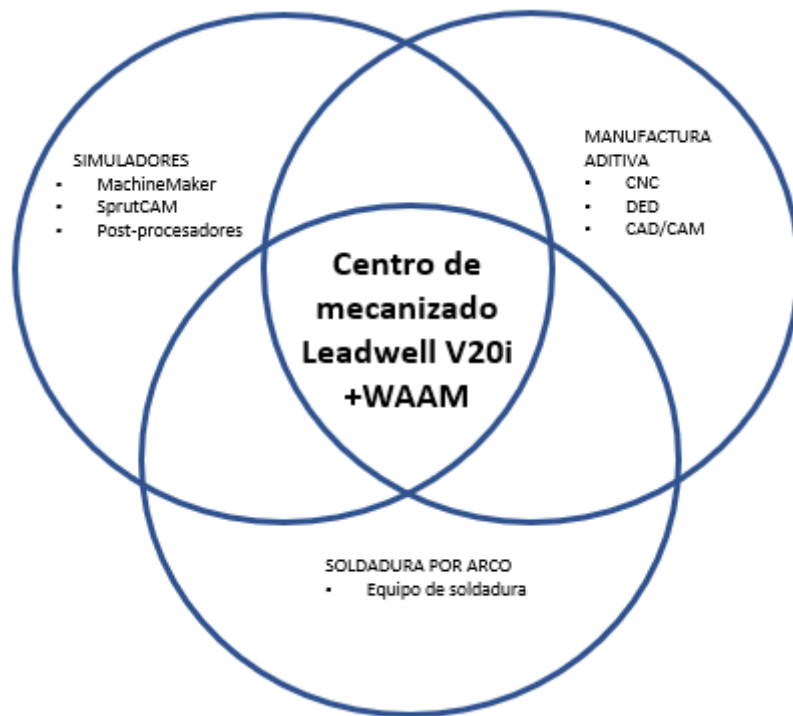
Página dejada en blanco intencionalmente

## Capítulo 3

### Marco Referencial

En este capítulo se describe la fundamentación teórica indispensable para la comprensión del presente proyecto, la Figura 3.1. presenta la interacción de los conceptos fundamentales que dieron como resultado el Desarrollo de un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

Figura 3.1. Relación entre los conceptos y temas de investigación



Fuente: Autor

### 3.2. Conceptos de la Manufactura Aditiva

Durante la ejecución de las actividades se evidencia el constante uso de diferentes conceptos y plataformas que harán posible la puesta a punto del proyecto. En primer lugar, se contempla el termino: manufactura aditiva, la cual corresponde a un método de producción digitalizada que consiste en fabricar objetos previamente modelados en *software* de diseño asistido por computador **CAD**

(por sus siglas en inglés *Computer-Aided Design*) y que mediante la deposición de capa por capa de material se logra conformar un objeto tridimensional. Posteriormente, el diseño CAD realizado previamente, se pasa a un *software* de fabricación asistida por computadora **CAM** (por sus siglas en inglés *Computer-Aided Manufacturing*). La unión de ambas disciplinas conforma una tecnología denominada: diseño y manufactura asistida por computador **CAD/CAM** que ha permitido usar los computadores para mejorar el diseño, la fabricación y desarrollo de los productos, ya que por medio de esta tecnología las piezas geométricamente complejas, moldes, troqueles, prototipos son realizadas con mayor rapidez, precisión y menor costo [16].

Uno de los *softwares* CAM existentes en el mercado, usado en el proyecto, se denomina **SprutCAM**, que permite programar y simular la producción que tendrá una máquina a la hora de realizar un producto. Esto se logra a partir de las técnicas que ofrece el *software* CAM permitiendo ver una simulación con una vista preliminar del producto a fabricar, adicional a la simulación, el *software* puede generar un código que será el lenguaje que controle la máquina que hará la impresión 3D [17].

Para el correcto funcionamiento de un *software* CAM se requiere alimentar el mismo con una serie de datos para el proceso que se quiera realizar, ya que el *software* posee una librería de diferentes máquinas y con ellas su respectivo **post-procesador** o también llamado compilador, puesto que esta herramienta trabaja en conjunto con el *software* CAM. El post-procesador es el encargado de traducir la información gráfica y las estrategias programadas en el *software* CAM a un lenguaje de programación con el que trabaje la máquina como se mencionó anteriormente [18].

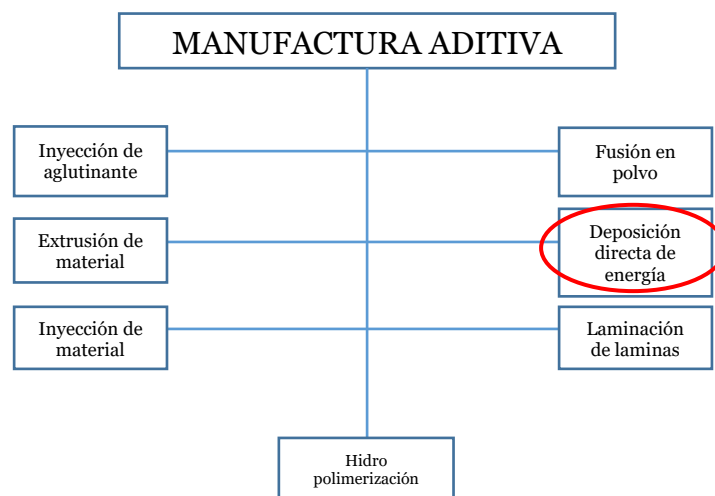
Para poder realizar las simulaciones correspondientes, se debe escoger una máquina para poder tener un acercamiento entre el escenario virtual y real, esto se logra importando la máquina virtual al *software* CAM. Por otra parte, si en la librería del *software* CAM no se encuentra la máquina con la que se desea trabajar se debe crear la máquina virtual con ayuda de un complemento del *software* SprutCAM denominado **Machine Maker**, el cual permite crear la cinemática de

la máquina y sus parámetros a partir de la importación de su diseño CAD. Adicionalmente una vez concluida la creación de la máquina virtual, el software Machine Maker producirá un código de Lenguaje de Marcado Extensible **XML** (por sus siglas en inglés *Extensible Markup Language*) cuyo propósito principal es compartir datos a través de diferentes sistemas, este código contiene toda la información insertada en el *software* Machine Maker para el simulador, tales como los parámetros de la máquina, color, imágenes, orientación de los ejes entre otros [19].

Concluyendo, se puede decir que para la elaboración de un simulador de manufactura aditiva se requiere del diseño de la máquina virtual con la que se va a trabajar con su respectivo código XML, este se importa a un *software* CAM, el cual, para simular la impresión del producto requiere de su diseño CAD y finalmente del ajuste de parámetros de impresión para que se pueda generar por medio del post-procesador un código que será importado a la máquina que ejecutará la impresión.

Una vez entendido el proceso anterior de manufactura aditiva se pretende profundizar en la clasificación de esta tecnología. Dependiendo de la clase y forma de material se clasifica grupos en función de la energía a utilizar, según la Sociedad Americana para ensayos y materiales (ASTM por sus siglas en inglés American Society for Testing and Materials) dividen esta tecnología en siete grupos como se observa en la Figura 3.2 [4].

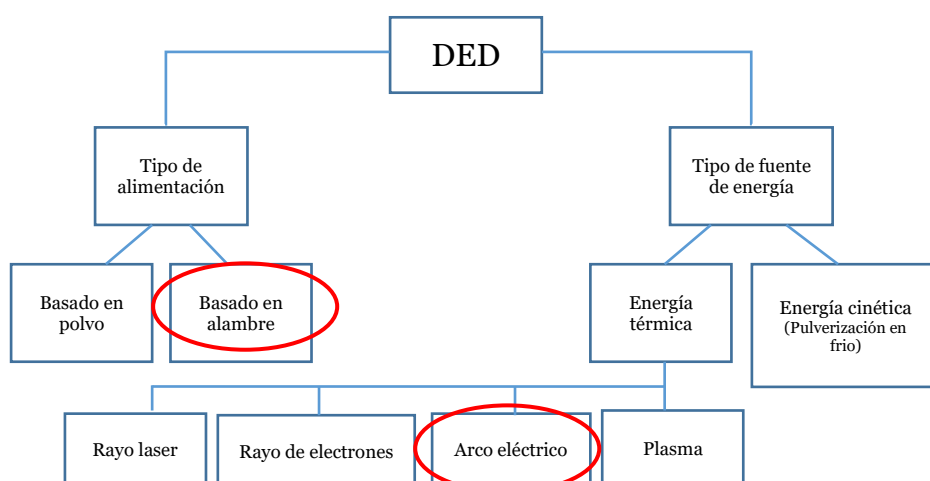
Figura 3.2. Clasificación de la Manufactura aditiva



Fuente: Adaptado de [20], Traducción libre

Este proyecto implementa manufactura aditiva usando materiales metálicos, de esta manera se puede clasificar en el grupo de deposición directa de energía **DED**. Los sistemas de deposición directa de energía DED se basan en una fuente de energía concentrada, en un sustrato y en un flujo de material que interceptan en un punto focal común, generalmente en presencia de un gas protector [6]. En este proceso se funde el material de aporte por acción de la concentración de energía y por consecuencia de las trayectorias programadas de la máquina esta genera alimentación de capa por capa formado un objeto 3D. De igual manera los sistemas de deposición directa de energía se clasifican según la forma del material de partida y la fuente de energía como se evidencia en la Figura 3.3

Figura 3.3. Clasificación de los sistemas DED



Fuente: Adaptado de [21]  
Traducción libre

Por otro lado, el proyecto se concentra en tecnologías de manufactura aditiva mediante el aporte de hilo en presencia de un arco eléctrico (WAAM), por tanto, el análisis del estado del arte se centrará fundamentalmente en sistemas de fabricación aditiva por arco e hilo, detallando el caso del arco eléctrico.

El inicio de la tecnología WAAM fue en el año 1925, cuando Baker propuso usar un arco eléctrico como fuente de calor para fundir material en forma de hilo para fabricar artículos decorativos [22]. Desde entonces la tecnología ha evolucionado, en los últimos quince años, hasta llegar al punto donde hoy se conoce como WAAM [23]. Durante estos años se han llevado a cabo numerosos estudios para poder llegar al estado actual de la tecnología, así se ha investigado

la posibilidad del WAAM como tecnología para el recubrimiento con el fin de poder alargar la vida útil de componentes sometidos a desgaste abrasivo [24]. El proceso WAAM consiste fundamentalmente en una fuente de potencia, un sistema automático de alimentación de hilo, un sistema robótico controlado mediante ordenador o máquina y algunos accesorios, como el sistema del gas de protección [25].

### **3.1. Equipos empleados en el proceso WAAM**

Para el 2022, los equipos y componentes empleados para la MA por arco (WAAM) son básicamente los mismos que los equipos utilizados para los sistemas automatizados de soldadura por arco. El equipamiento necesario para un sistema de Manufactura aditiva está compuesto por un equipo de soldadura por arco con suministro de hilo y gas, una antorcha de soldadura y un sistema robótico o máquina para moverla [6].

Este documento presenta como alternativa una máquina de control numérico computarizado **CNC** (por sus siglas en inglés *Computer Numerical Control*) más específicamente un centro de mecanizado Leadwell V20-i con un controlador FANUC Oi -MD. Su función original es mecanizar con operaciones de arranque de viruta piezas con geometrías definidas por medio de la interpolación de 3 ejes. Sin embargo, se realiza la integración de un equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C que brinda modos de soldadura TIG, GMAW y electrodo a la máquina. La integración de los dos equipos convencionales se realiza para generar un proceso de manufactura aditiva aprovechando los equipos que posee la Fundación Universitaria Los Libertadores.

### **3.2. Ventajas de la Manufactura Aditiva por soldadura por arco eléctrico (WAAM)**

El aporte mediante arco tiene ventajas destacables, entre las cuales se encuentran:

- Integridad alta del material depositado, sin defectos y con buenas propiedades de los materiales.
- Bajo costo de materia prima y alta calidad de ésta, con propiedades certificadas y con una amplia disponibilidad de materiales y bajo costo en mantenimiento, debido a que el equipamiento no incluye componentes sensibles como las ópticas de los láseres.
- No genera un gran impacto en el medioambiente debido a una mínima generación de residuos y el empleo de hilo [26].
- Tiempo de deposición en producción es corto comparado con técnicas sustractivas tradicionales, estos sistemas pueden reducir el tiempo de producción en un 40-60% y el tiempo de post-procesado en un 15-20% dependiendo del tamaño de la pieza [26].
- Utilización efectiva del material por encima del 90% y por encima del 75% si se incluye el mecanizado de acabado. Por ejemplo, recientemente se han fabricado los ensamblajes de un tren de aterrizaje de una aeronave mediante WAAM reduciendo la cantidad de materia prima utilizada en un 78% comparado con técnicas sustractivas tradicionales [27]. La Figura 3.1 presenta las Características de los procesos de fabricación aditiva.

Tabla 3.1. Características de los procesos de fabricación aditiva

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>APORTE DIRECTO POR WAAM</b>
Precisión Rugosidad	Media (Aprox $\pm 0,2\text{mm}$ ) $>10\mu\text{mRa}$
Integridad Estructural	Alta: Atmósfera protegida
Productividad	Alta. En acero: $\sim 10\text{kg/h}$
Tamaño de pieza	Grande, limitado únicamente por el alcance de la máquina.
Complejidad geométrica	Baja
Aplicación industrial	Fabricación de estructuras semicomplejas sobre sustratos. Reparación de piezas, Recubrimientos
Reparación y fabricación combinada	Es posible fabricar partes en piezas dañadas o fabricadas por otros procesos.
Costo de materia prima	Bajo

Fuente: Adaptado de [21]  
Traducción libre



Cabe resaltar que, gracias a las ventajas ya mencionadas, esta tecnología alrededor de mundo se encuentra siendo implementada en instituciones educativas e industriales tales como el proveedor mundial pionero de piezas estructurales en Titanio para el sector Aeronáutico fabricadas mediante WAAM, **NORSK TITANIUM**; el centro tecnológico TWI (Cambridge, UK) que representa una de las más prestigiosas instituciones mundiales en el ámbito de los procesos de soldadura, usan robots de hasta 6 ejes; el centro tecnológico líder en Estados Unidos en tecnologías de soldadura y tecnologías de fabricación en general, **EWI**; la empresa **RAMLAB** que ha desarrollado un sistema de WAAM basado en robot de 6 ejes para fabricar piezas de acero, la empresa **MX3D** quien lleva varios años colaborando con importantes empresas del sector de la Ingeniería y construcción para implementar soluciones robóticas totalmente para fabricación autónoma; El centro de I+D británico Nuclear **AMRC** que ofrece actualmente capacidades en fabricación aditiva, con una célula automatizada valorada en 1.3 millones de euros, desarrollada por Kuka Robotics; la empresa **Wolf Robotics** que ha desarrollado un sistema escalable, multi-alimentador de hilo, y multi-material; y por último, el primer fabricante mundial que ofrece máquinas para desarrollo de preformas metálicas de alta deposición mediante tecnología WAAM, **ADDILAN**, que también es considerado el primer sistema en ofrecer de manera integrada la tecnología láser y la de WAAM, [6]. A nivel nacional empresas como PEMARSA S.A.S se encuentra trabajando con esta tecnología en el recubrimiento de brocas petroleras como se muestra en la Figura 3.4.

Figura 3.4. Visita empresa PEMARSA S.A.S.



Fuente: Autor.

### 3.3. Principales defectos para varios materiales depositados por distintas técnicas WAAM.

La Tabla 3.2, presenta los defectos que poseen los materiales implementados en la tecnología de manufactura aditiva por técnica WAAM. Cabe resaltar que, para los ejercicios efectuados, presentados en el capítulo 7, Pruebas Físicas, se utilizó el material acero recubrimiento de cobre.

Tabla 3.2. Características de los procesos de fabricación aditiva

Material	Proceso	P	F	D	O	AS	CS
Ti6Al4V	TIG	No	No	No	Ligera	Buena	Suave
	Plasma	No	No	No	No	Buena	Suave
	CMT	No	No	No	Ligera	Buena	Suave
	DCEP-GMAW	No	No	No	Ligera	Media	Pobre
Acero Ho8Mn2Si	DE-GMAW	Baja	No	No	No	Buena	Undulación
Acero recubrimiento de cobre	GMAW	No	No	No	Ligera	Buena	Medio Rugoso
Aleación Al ER4043	CMT	Alta	No	No	Ligera	Buena	Suave
Aleación Al AA2319	VP-GTAW	No	No	No	No	Buena	Medio
	CMT	Alta	No	No		Buena	Rugosa Suave
Aleación Al 5356	CMT-PADV	No	No	No	No	Buena	Suave
	VP-GTAW	No	Si	No		Buena	Suave
Inconel 352	PPAD	Alta	Si	No	Buena	Suave	Suave
	GTAW	No	No	No	Buena	Suave	Suave
Inconel 718	GMAW	Media	si	si	No	Buena	Suave
Aleación Mg AZ31	PMIG	No	No	No	Ligera	Media	Medio rugosa
Níquel-Al-Cu	CMT	No	No	No	No	Buena	Suave
Bimetal Acero-Bronce	GMAW	No	No	No	No	Buena	Suave
Bimetal Acero níquel	GMAW	No	No	No	No	Buena	Medio rugosa
Fe/Al Inter metálico	GTAW	Alta	Si	No	No	Media	Medio deficiente
Al/Tu Inter metálico	GTAW	Baja	Si	No	No	Buena	Rugosa
Al/Cu Inter metálico	GTAW	No	No	Si	Ligera	Pobre	Rugosa

Fuente: Adaptado de [6]

P: Porosidad F: Fisuras D: Delaminación O: Oxidación AS: Adherencia al sustrato CS: Calidad superficial  
Traducción libre

Página dejada en blanco intencionalmente

## Capítulo 4

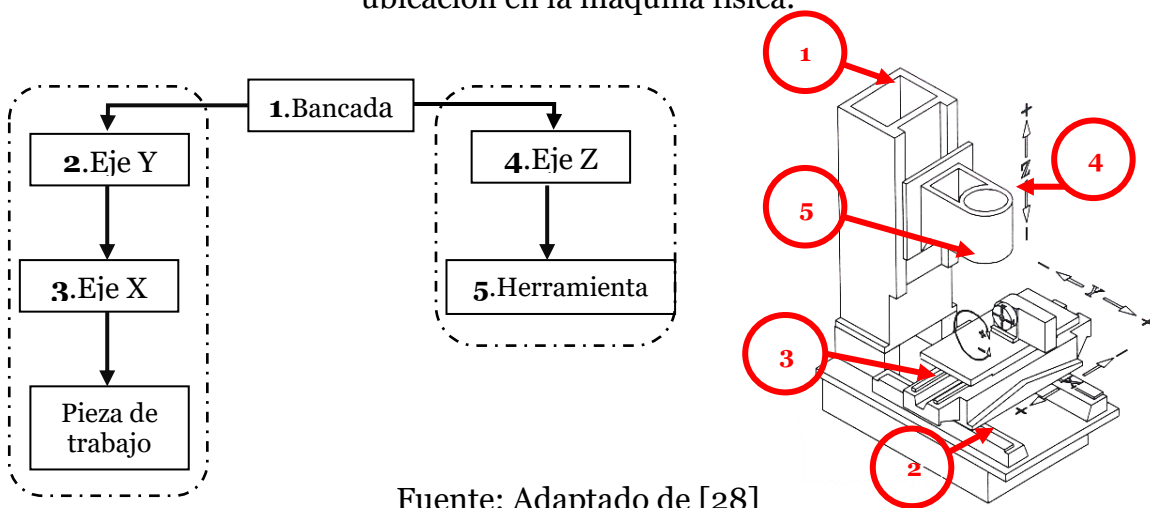
### Virtualización del centro de mecanizado Leadwell V20i para manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM

En este capítulo se presentan los pasos para la generación del modelo virtual del centro de mecanizado Leadwell V20i incluyendo el proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM. Para esto se desarrolla el estudio cinemático, la generación del modelo virtual, la virtualización de los parámetros y la inclusión de la función del proceso de manufactura aditiva. Esto con el objetivo de que se puedan desarrollar configuraciones de este proceso de manufactura en distintas arquitecturas de máquinas de control numérico.

#### 4.1. Estudio cinemático de la arquitectura del centro de mecanizado Leadwell V20i

El centro de mecanizado Leadwell V20i posee un sistema de coordenadas X, Y, Z como ejes lineales y un cuarto eje rotacional, el cual no se tendrá en cuenta para el proyecto. Como se observa en la Figura 4.1 existen 2 cadenas cinemáticas: en la primera se agrupa el eje lineal Y sobre el cual se acopla el eje lineal X que contiene la pieza de trabajo, en la segunda cadena cinemática se agrupa el eje lineal Z donde se acopla la herramienta para el proceso de manufactura.

Figura 4.1. Esquema cinemático del centro de mecanizado Leadwell v20i y su ubicación en la maquina física.



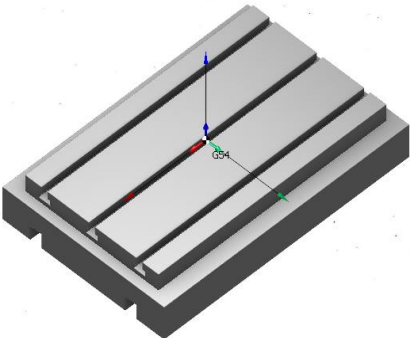

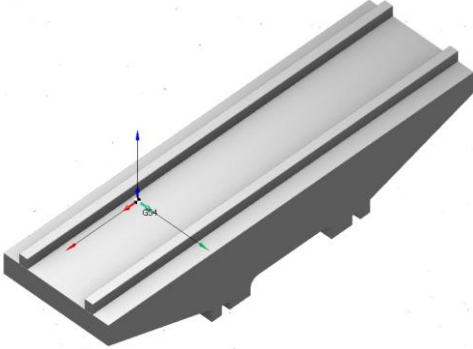
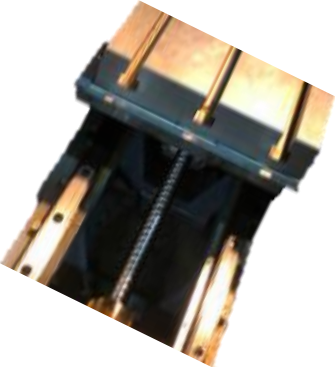
Fuente: Adaptado de [28]



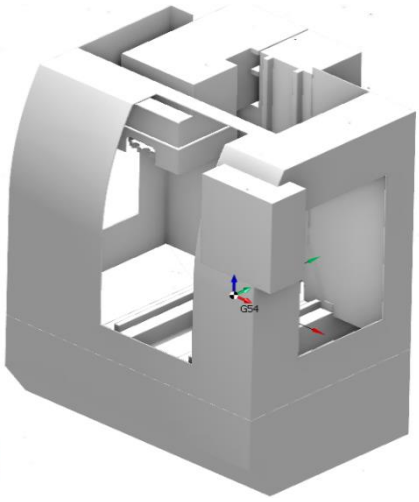

## 4.2. Generación del modelo virtual del centro de mecanizado Leadwell V20i

Realizado el estudio cinemático del centro de mecanizado Leadwell V20i se procede a realizar el modelado virtual de las piezas que lo componen, con ayuda de un *software* CAD, ignorando detalles como tornillería, parte eléctrica y neumática, uniones soldadas, entre otros. Teniendo en cuenta el objetivo del trabajo se hace necesario implementar en el eje lineal Z, una nueva herramienta que soporte la antorcha que aportará la materia prima para el proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco.

En la Tabla 4.1. se evidencia el modelo tridimensional en formato. step, generado por el *software* CAD, de cada eje lineal y la bancada correspondiente al centro de mecanizado Leadwell V20i incluyendo la antorcha de soldadura en eje Z.

Tabla 4.1. Modelos de componentes Centro de mecanizado Leadwell V20i

EJE	Modelo Tridimensional	Comparativo Maquina
<p>Eje X</p> <p>Subconjunto del eje X ubicado sobre el subconjunto del eje Y</p>		
<p>Eje Y</p> <p>Subconjunto del eje Y ubicado en la parte inferior el subconjunto del eje X</p>		

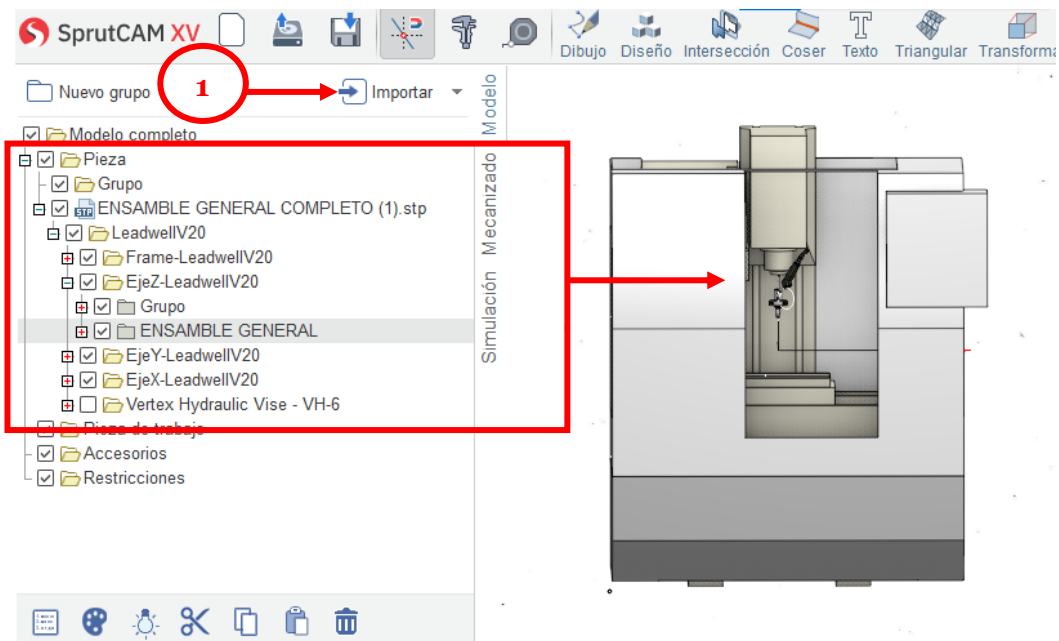
<p>Eje Z</p> <p>Subconjunto del eje Z unificado con soporte para antorcha de soldadura.</p>		
<p>Bancada</p>		

Fuente:[29]

Para realizar el simulador virtual del centro de mecanizado Leadwell V20i es necesario convertir los formatos de extensión. step de los subconjuntos de cada eje al formato de extensión .osd, generado por el *software* SprutCAM, que son compatibles con el *software* Machine Maker, ya que es un formato de imagen que puede procesar el software que finalmente desarrollará la máquina virtual. Para este proceso se realizan los siguientes pasos:

1. Una vez iniciado el *software* SprutCAM, se ubica la ventana de modelo y se importan los subconjuntos en formato con extensión. step en la opción de pieza como se observa en la Figura 4.2.

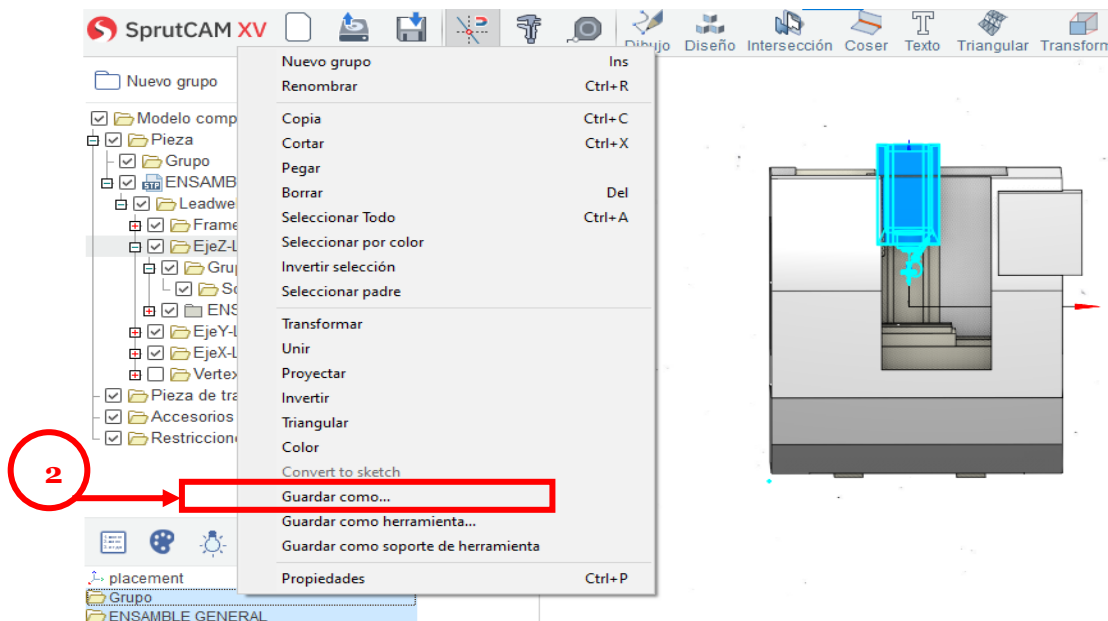
Figura 4.2. Importe de las piezas.



Fuente: Autor.

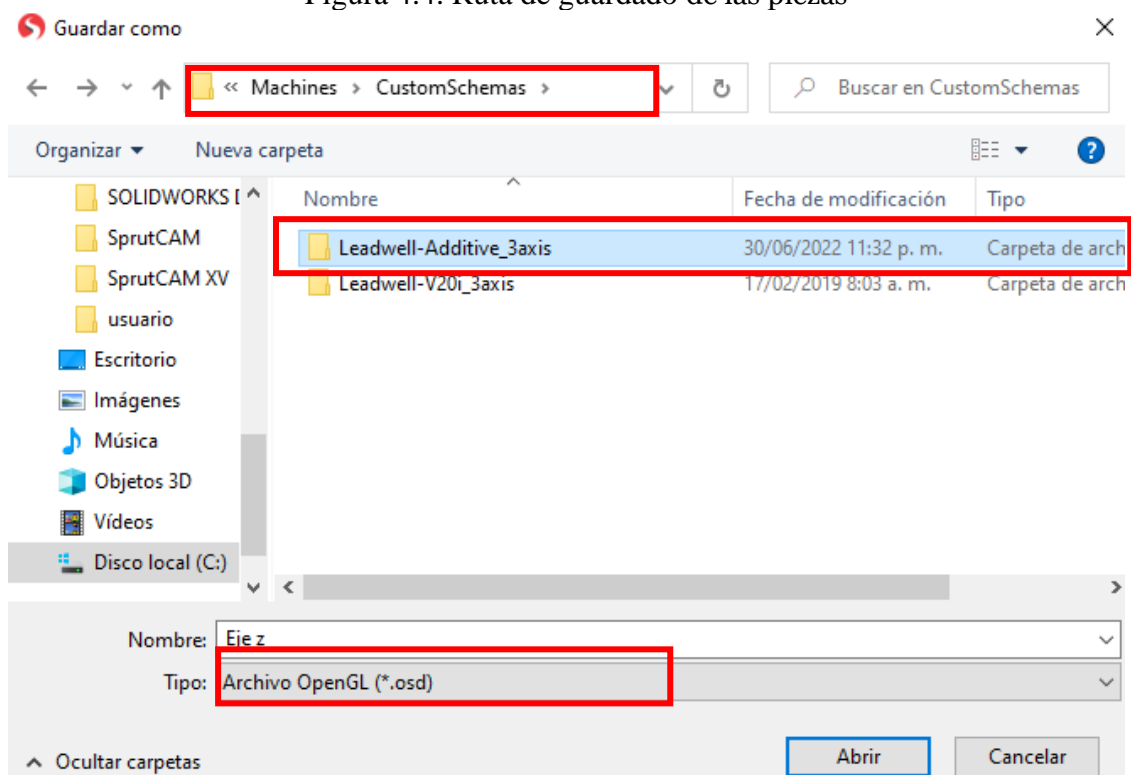
2. Se guarda cada subconjunto en formato con extensión .osd en la carpeta de ruta seleccionada para el simulador, como se observa en las Figuras 4.3 y 4.4.

Figura 4.3. Guardado de las piezas



Fuente: Autor.

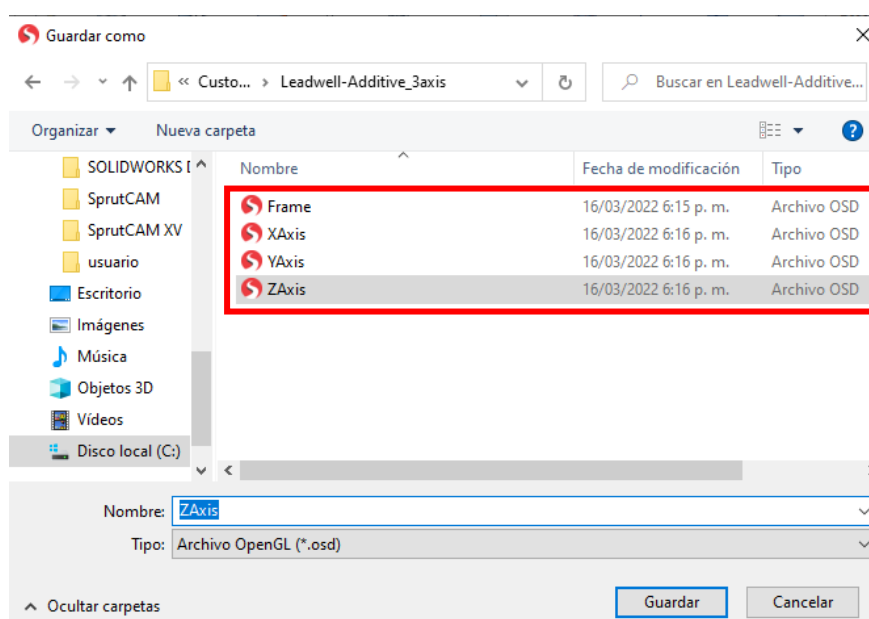
Figura 4.4. Ruta de guardado de las piezas



Fuente: Autor.

- Finalmente, se repite el procedimiento anterior con cada uno de los ejes lineales y la bancada del centro de mecanizado Leadwell V20i, quedando los archivos de la geometría necesarios en la ruta para el desarrollo del simulador como se muestra en la Figura 4.5.

Figura 4.5. Proceso finalizado de guardado de las piezas



Fuente: Autor.

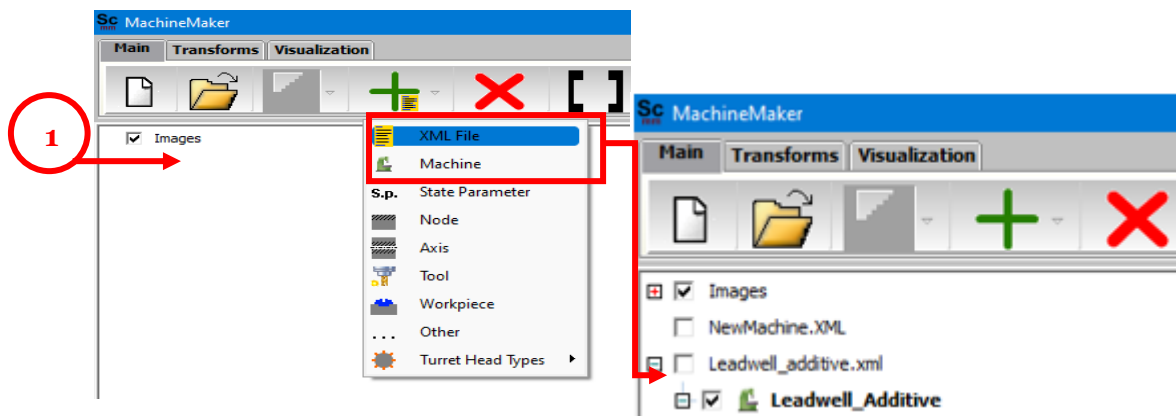


### 4.3. Virtualización del centro de mecanizado Leadwell V20i

La elaboración de un simulador está compuesta por características para tener en cuenta, como los parámetros de operación de funcionamiento, la definición cinemática de la maquina acorde al estudio de la arquitectura y la geometría. De esto depende la similitud entre la máquina virtual y la física en los siguientes aspectos: movimiento de los ejes, colisiones entre sus componentes, así como sus recorridos. La definición de la cinemática de la máquina del centro de mecanizado Leadwell V20i, como se mencionó anteriormente, se realiza con el *software* Machine Maker, siguiendo los siguientes pasos:

1. Para crear un nuevo proyecto se requiere ejecutar la opción “***XML File***” y así generar el archivo donde se almacena el código del simulador. Posteriormente se debe definir una maquina con el comando “***Machine***” y agregar todos los parámetros de función y operación de esta. Como se observa en la Figura 4.6.

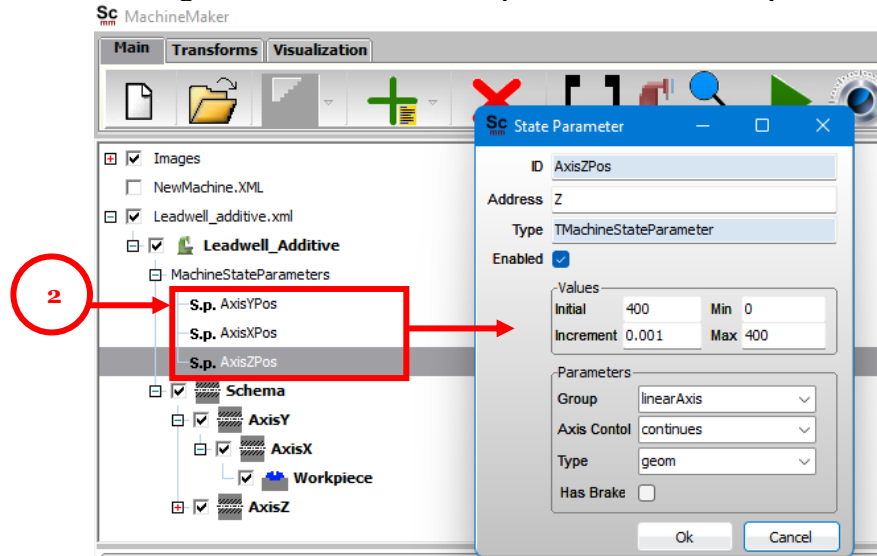
Figura 4.6. Proceso finalizado de guardado de las piezas



Fuente: Autor.

2. Se deben declarar las variables colocando el nombre, la dirección del eje y valores de los límites de los ejes de movimiento como se observa en la Figura 4.7 con ejemplo en el eje Z.

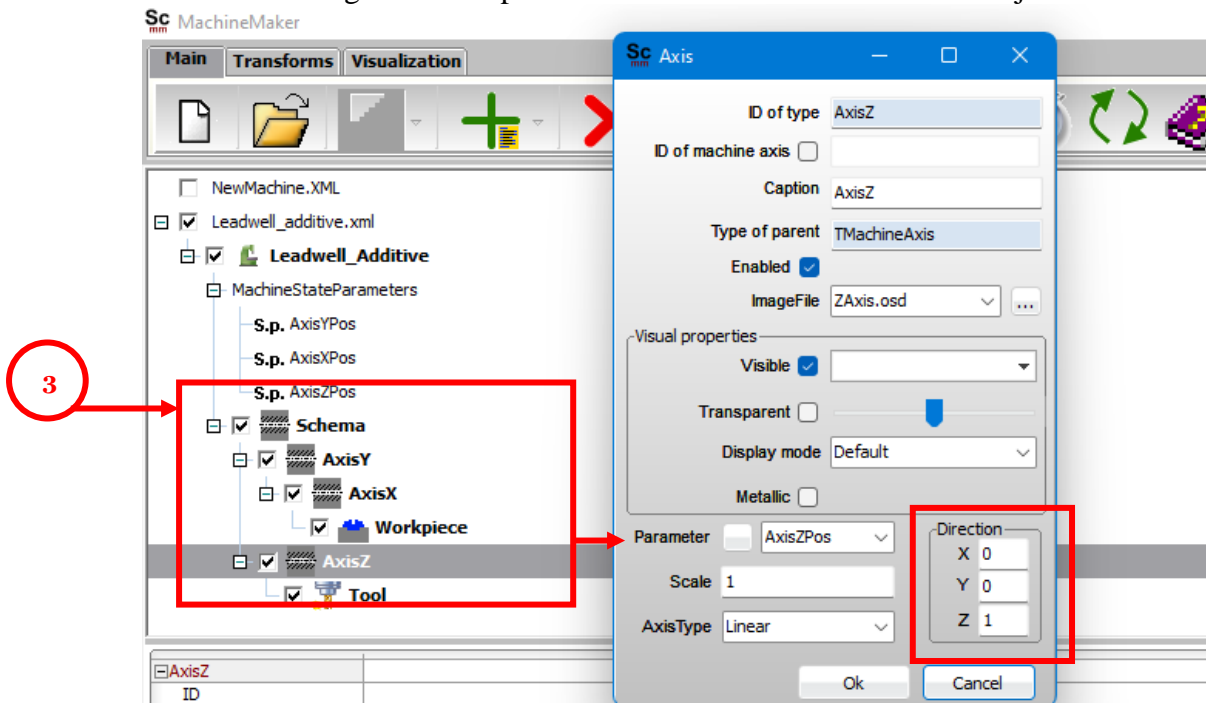
Figura 4.7. Declaración de parámetros de la máquina



Fuente: Autor.

- Una vez declaradas las variables, se define la cadena cinemática incluyendo el *Schema* como la bancada y cada eje lineal, en esta parte se agrega el archivo de imagen en el formato .osd respectivamente y se define si es un eje lineal o de rotación, como se muestra en la Figura 4.8.

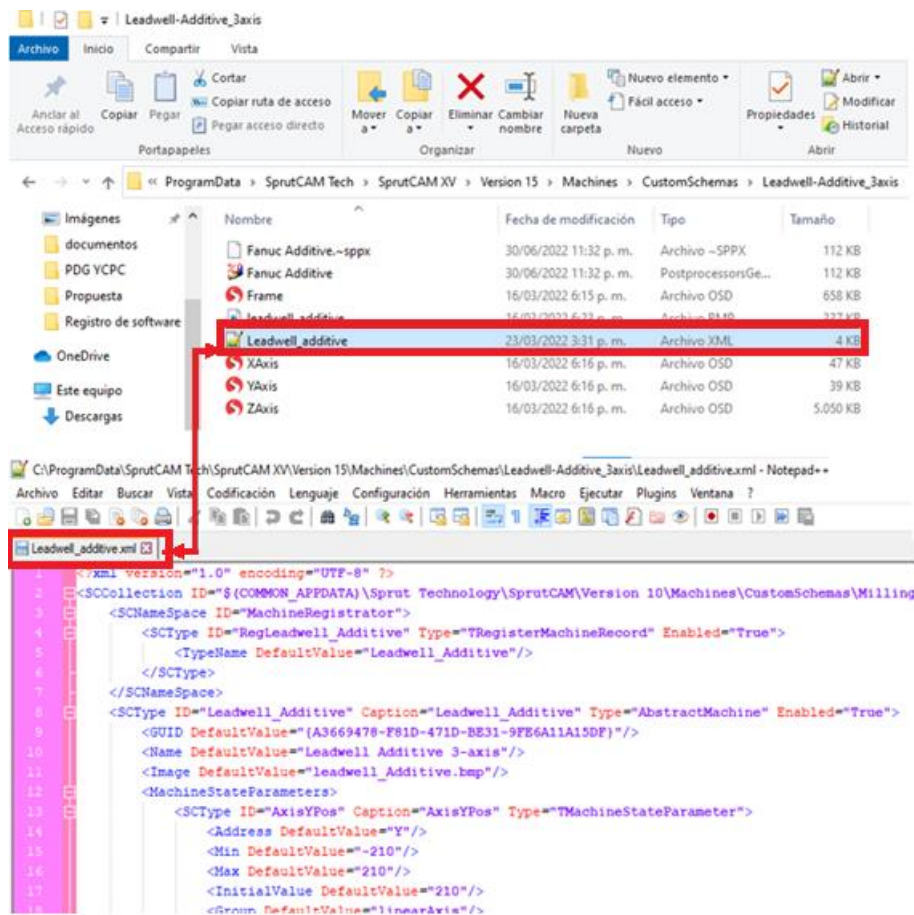
Figura 4.8. Implementación de la cinemática de cada eje



Fuente: Autor.

4. En el *software* Machine Maker, se genera el código .xml automáticamente correspondiente al simulador, como se observa en la Figura 4.9. En el Apéndice B se presentan los manuales de usuario con cada parte del código y las funciones de cada línea desarrolladas para el registro de *software* respectivo.

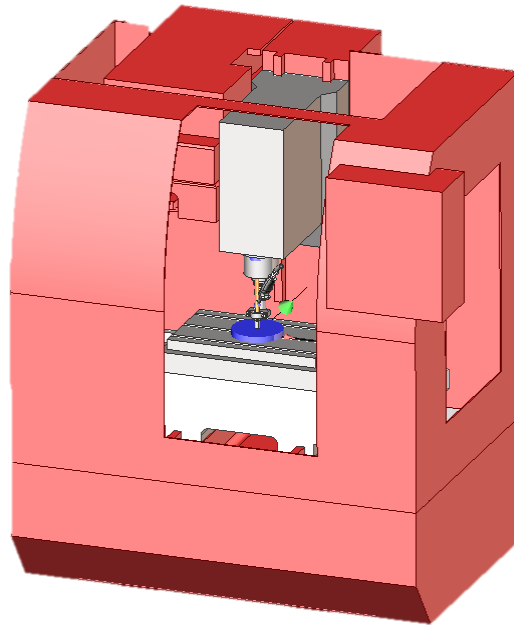
Figura 4.9. Generación del código .xml automáticamente.



Fuente: Autor.

5. Finalmente, el *software* Machine Maker permite visualizar el resultado de la máquina virtual, como se observa en la Figura 4.10. Donde se logra cumplir con los requerimientos del simulador de un centro de mecanizado Leadwell V20i para ser aplicado a manufactura aditiva que posteriormente será integrado al software SprutCAM.

Figura 4.10. Visualización Máquina CNC Virtual.



Fuente: Autor.

#### 4.4. Inclusión de la función del proceso de manufactura aditiva en el simulador

El *software* Machine Maker genera un código correspondiente a un centro de mecanizado, indistintamente a su función, por esta razón se debe determinar el tipo de herramienta que se va a utilizar. Para esta parte, se modifica la sección del código en la plantilla .xml correspondiente a un centro de mecanizado Leadwell V20i de arranque de viruta incluyendo la función del proceso de manufactura aditiva WAAM, en dicha estructura. Para su implementación se agrega al código la línea 73 y 74, como se observa en la Figura 4.11, que se refiere a la desactivación del MillTool y la activación de AdditiveTool.

Figura 4.11. Desactivación de las herramientas de fresado

```
68 <SCType ID="AxisZ" Caption="AxisZ" Type="TMachineAxis">
69   <ImageFile DefaultValue="ZAxis.osd"/>
70   <ParameterName DefaultValue="AxisZPos"/>
71   <SCType ID="Tool" Caption="Tool" Type="TMillToolHolder">
72     <SupportedToolTypes>
73       <MillTool DefaultValue="false"/>
74       <AdditiveTool DefaultValue="True"/>
75     </SupportedToolTypes>
76   </SCType>
77 </SCType>
```

Fuente: Autor.

Página dejada en blanco intencionalmente

## Capítulo 5

### **Adecuación del post-procesador para manufactura aditiva implementando el modelo virtual del centro de mecanizado Leadwell V20i**

Este capítulo presenta el proceso de adecuación del post-procesador, generado por el software SprutCAM, para su implementación en el centro de mecanizado Leadwell V20i para manufactura aditiva. Detallando la preparación virtual de la máquina establecida con Machine Maker, el modelo a trabajar, su importación, la asignación de trayectorias, simulaciones y la generación del código NC para posteriormente verificar con diferentes ejercicios la compatibilidad con el proceso de manufactura aditiva.

#### **5.1. Implementación del simulador para generar una trayectoria de manufactura aditiva**

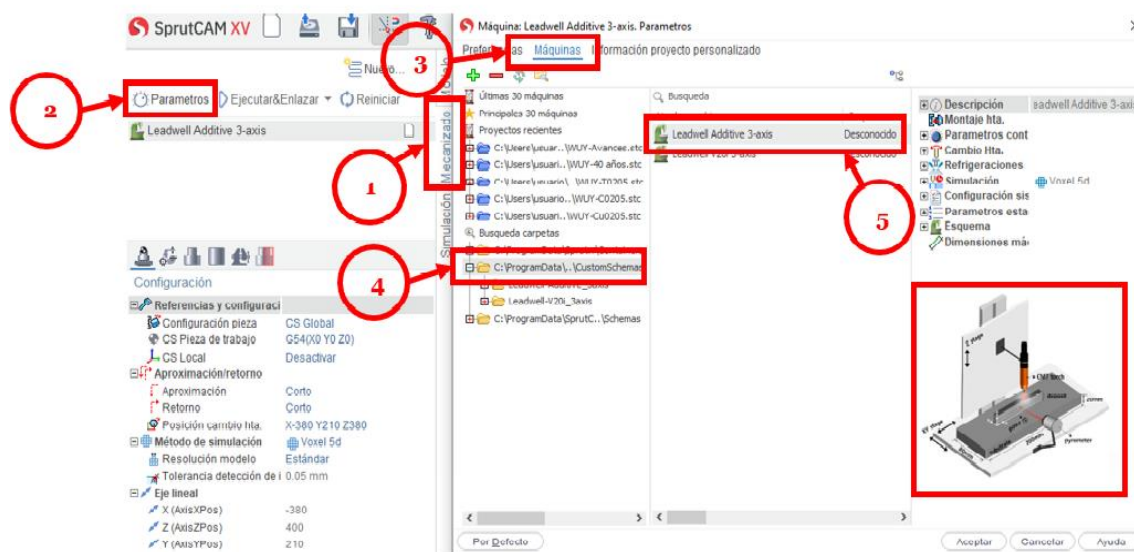
Un post-procesador permite traducir y convertir la información gráfica de las trayectorias del proceso de simulación en forma de código. Este código está basado en lenguaje NC de programación de la máquina y está conformado por códigos G y M, para que el controlador los pueda entender y ejecutar de manera correcta. El software a usar para el desarrollo de trayectorias y post-procesamiento es un *software* CAD/CAM que cuenta con un entorno de mecanizado CNC denominado SprutCAM.

Teniendo en cuenta que la plantilla del post-procesador usada inicialmente corresponde a un controlador FANUC series Oi-MD, se requiere una modificación para que este cumpla con los requerimientos de manufactura aditiva. En este proceso de adecuación se realiza la importación del CAD, selección de técnica de manufactura aditiva, generación de trayectoria y simulación. Para posteriormente post-procesar y conocer las características iniciales del código, identificando los parámetros que se deben modificar,

garantizando compatibilidad con el controlador y el proceso de manufactura aditiva.

Como anteriormente se menciona es necesario preparar el simulador en el *software* SprutCAM, siguiendo los pasos que se observan en la Figura 5.1. Mediante la opción de *Parámetros* se desglosa una ventana que permite seleccionar la ruta del simulador y traer la máquina del centro de mecanizado Leadwell V20i para manufactura aditiva.

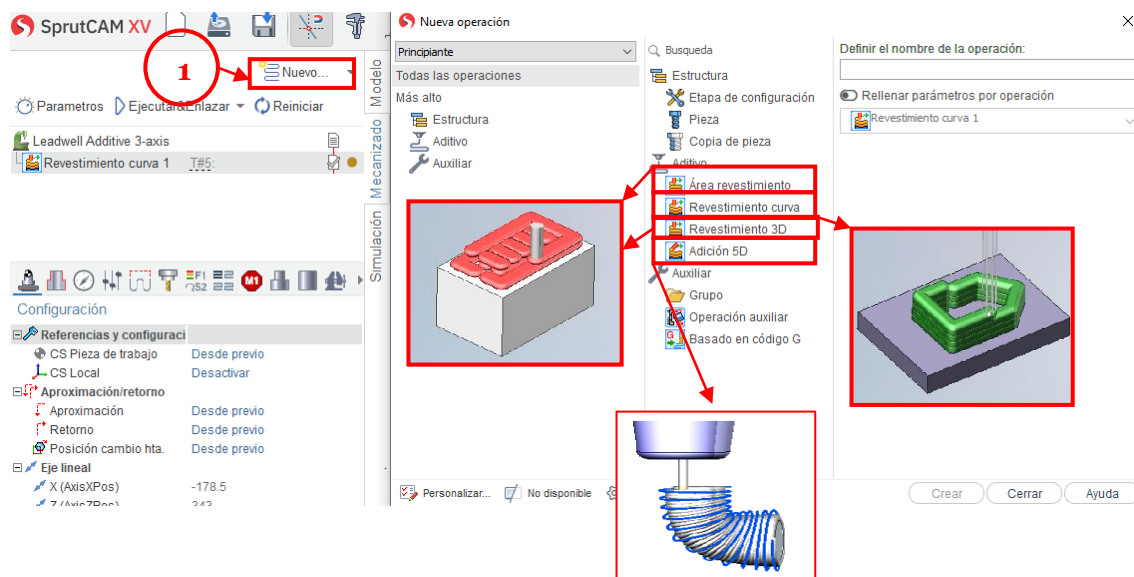
Figura 5.1. Importación de la maquina en SprutCAM



Fuente: Autor.

Al momento de generar nuevas trayectorias el *software* SprutCAM ofrece cuatro técnicas diferentes que se pueden usar en este proceso, como se observa en la Figura 5.2. Inicialmente se encuentra la opción de *Área de revestimiento* que corresponde a un recorrido completo en la superficie de la pieza, la segunda técnica es el *Revestimiento curva*, con este método se sigue un perfil de la pieza, en la tercera opción está el *Revestimiento 3D* que genera un recorrido completo en la superficie y un volumen de la pieza, por último la técnica de *Adición 5D*, en esta se implementa la manufactura aditiva multi eje el cual no se tendrá en cuenta para el proyecto.

Figura 5.2. Generación de trayectorias en SprutCAM



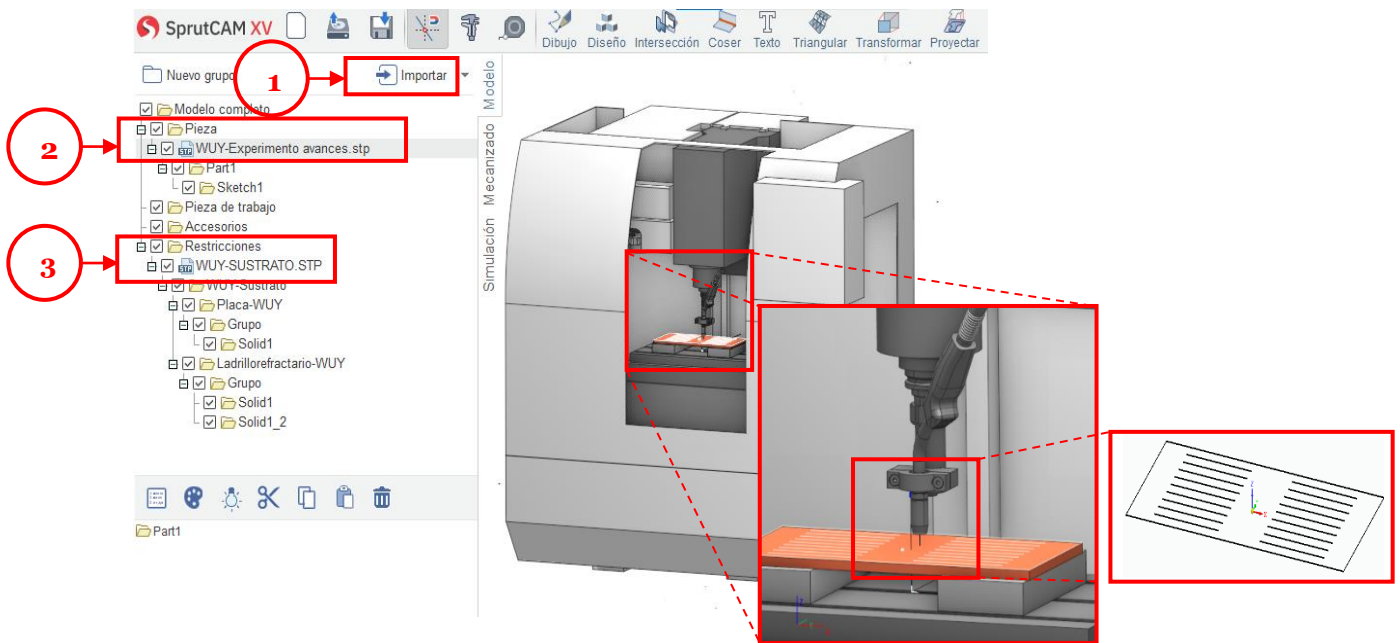
Fuente: Autor.

Como primer caso de estudio se plantea iniciar con una trayectoria representando líneas rectas que generen códigos NC de fácil identificación de su estructura. De esta manera permite asociar cada parte del código NC y entender los requerimientos para adecuarlo al proceso de manufactura aditiva. Para este caso se utiliza el CAD denominado *WUY-Avances* realizando cordones en línea recta de una longitud específica.

Teniendo claro el ejercicio anterior, se realiza el proceso de alistamiento en el *software* SprutCAM el cual incluye el sistema de restricciones y la pieza a fabricar como se observa en la Figura 5.3 en la ventana *Modelo*. Para ello debe existir un sustrato en el proceso de adición de material el cual está compuesto por dos bases y sobre ellas una lámina donde se realiza el proceso de manufactura aditiva, este debe ser ubicado en la carpeta de *Restricciones* en formato .step. De igual forma, se encuentra una carpeta denominada *Pieza* donde se debe importar el CAD del modelo a fabricar en formato .step, posicionando y orientando correctamente el CAD con ayuda de la herramienta *Transformar*.



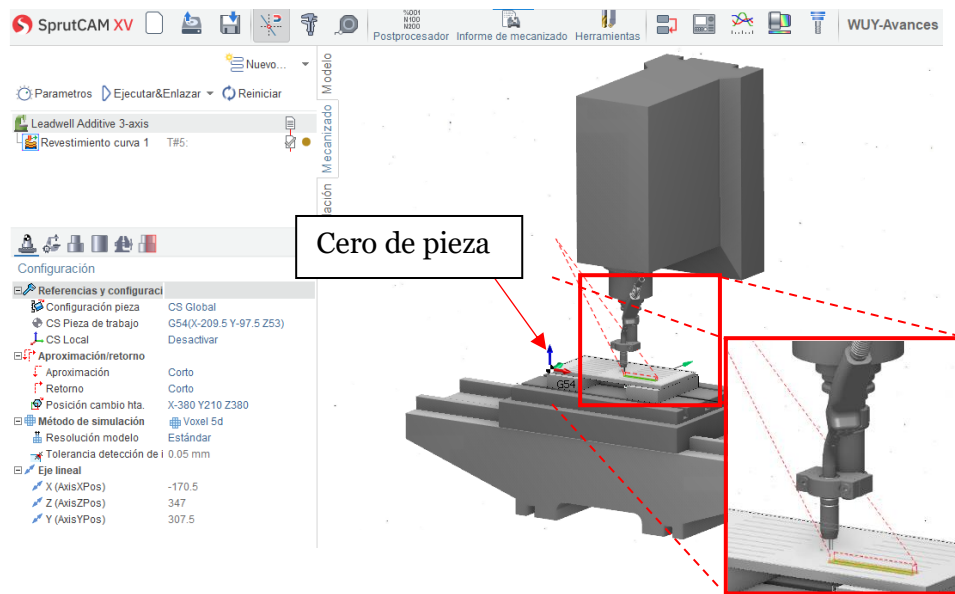
Figura 5.3. Importación del primer ejercicio a SprutCAM



Fuente: Autor.

Una vez posicionado el modelo a fabricar sobre el sustrato, se ubica el cero de pieza obteniendo así un sistema de referencia de la herramienta con respecto al inicio de su trayectoria del modelo a fabricar. Teniendo en cuenta que se trata de un proceso de adición donde el desplazamiento es ascendente el sistema de referencia se sitúa en la base del sustrato. La opción que permite realizar la ubicación del cero de pieza se encuentra en la *Configuración* de la ventana de *Mecanizado*. Depende de este procedimiento que el sistema de referencia quede de manera correcta en el plano y no genere colisiones en su ejecución y de esta manera culminar el alistamiento del modelo a fabricar, generando la trayectoria que corresponde a *Revestimiento curva* para el primer caso de estudio, como se muestra en la Figura 5.4.

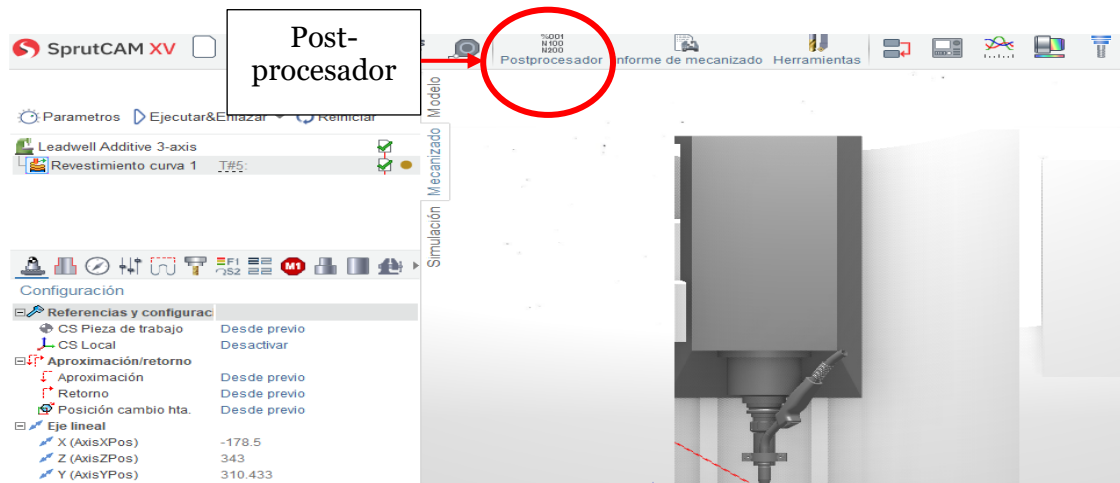
Figura 5.4. Visualización de la trayectoria en SprutCAM.



Fuente: Autor.

Al generar la trayectoria el usuario aprecia un acercamiento con lo que será el resultado final de la simulación obteniendo una validación de esta. El *software* SprutCAM, en su parte superior izquierda, muestra un indicador del estado de la trayectoria que puede presentarse de dos maneras: un signo de admiración en color rojo que indica algún error en la trayectoria y un indicador en color verde cuando no presenta colisiones y su validación sea correcta. Una vez validados los indicadores se procede a realizar la simulación para verificar la trayectoria en el entorno de la maquina y así generar el código utilizando la opción de post-procesador ubicado en la parte superior del *software*, como se observa en la Figura 5.5.

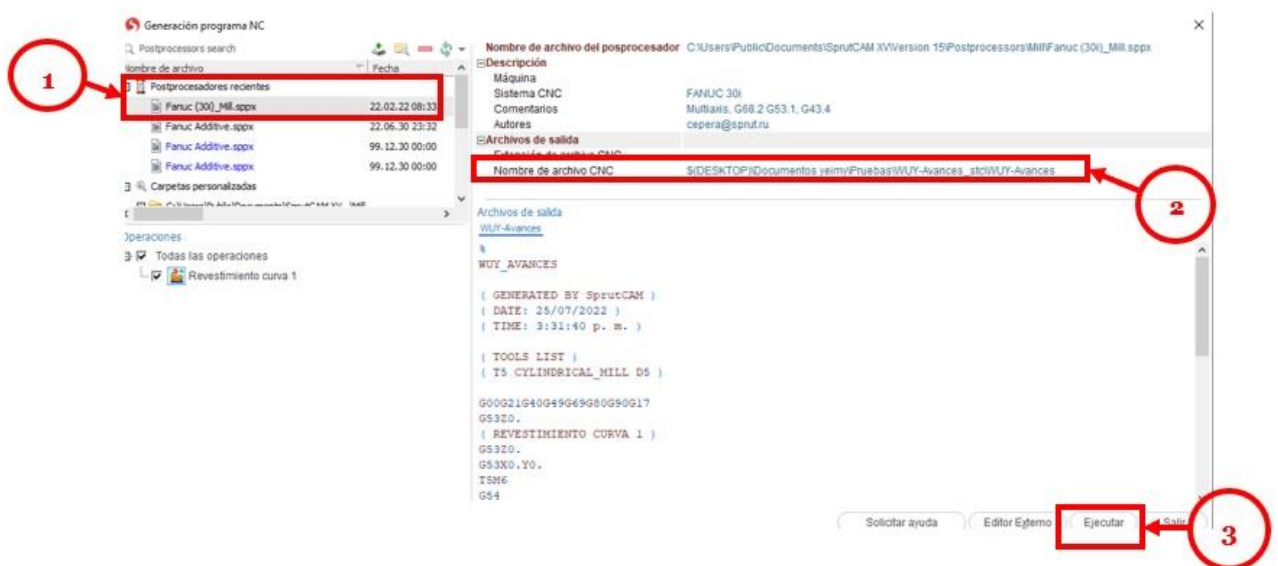
Figura 5.5. Visualización opción de Post-procesador en SprutCAM



Fuente: Autor.

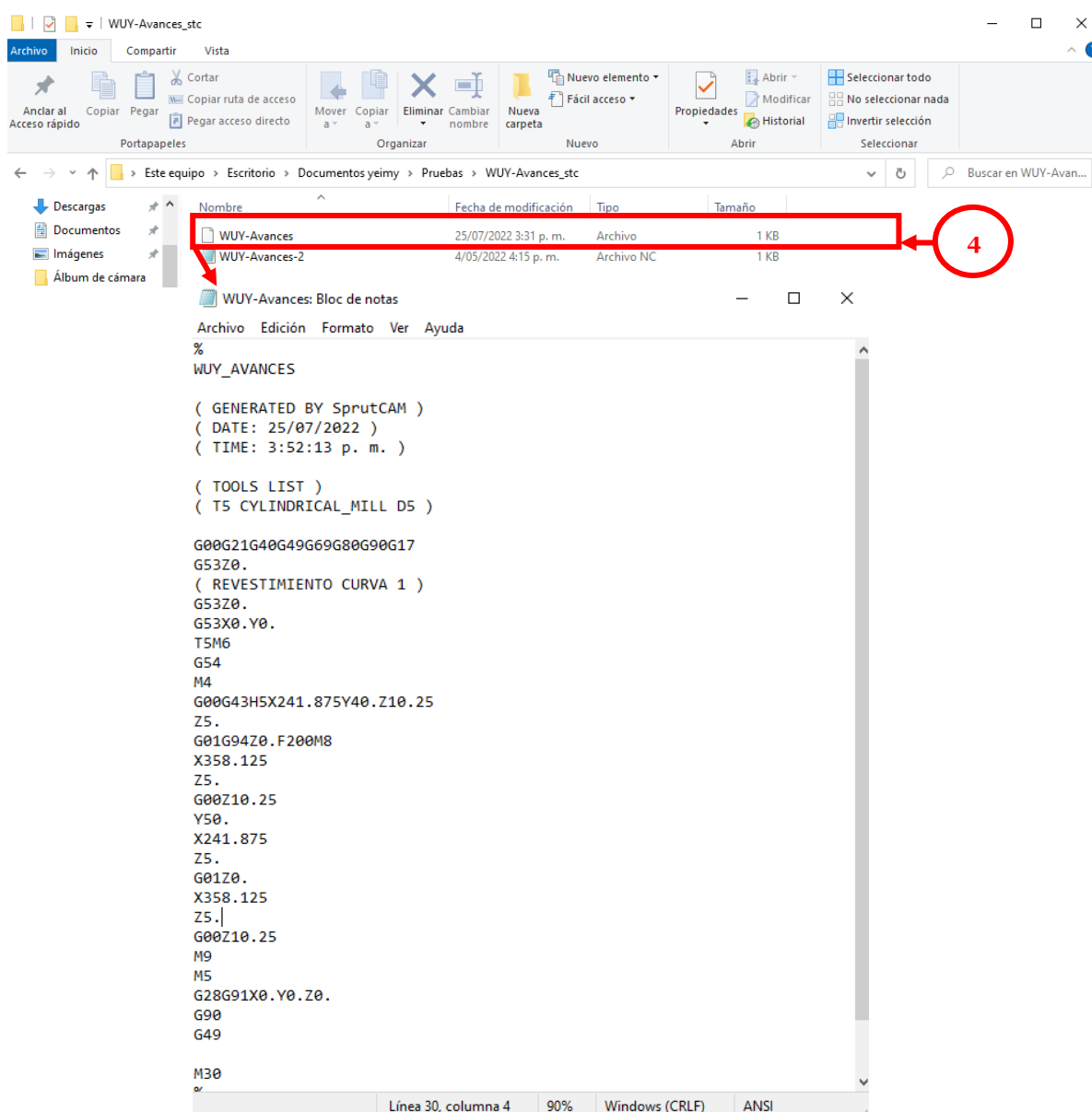
La opción del post-procesador despliega una ventana que permite generar el programa NC de la trayectoria asignada, como se observa en la Figura 5.6 y Figura 5.7. Para ello se debe seleccionar la plantilla del post-procesador compatible con el controlador FANUC Oi-MD en la parte izquierda de la ventana. De igual manera se debe seleccionar una ruta de salida en la parte derecha de la ventana y la opción *Ejecutar* para visualizar el código NC.

Figura 5.6. Generación del código NC en SprutCAM.



Fuente: Autor

Figura 5.7. Visualización del código NC en Bloc de notas.



Fuente: Autor.

De esta manera se culmina el proceso de generación de trayectorias y post-procesamiento para generar un código NC. Para replicar el procedimiento anterior se dispone del Apéndice C los manuales que contienen el paso a paso y su respectiva explicación.

## 5.2. Adecuación del post-procesador con base a una trayectoria de manufactura aditiva para ser utilizado en un centro de mecanizado Leadwell V20i

La comunicación que se presenta entre el Post-procesador del *software* SprutCAM y la máquina del centro de mecanizado Leadwell V20i, es por medio del código NC. Por este motivo es conveniente conocer los Códigos G y M usados en estos procesos. Las Tablas 5.1 y 5.2 presentan los códigos del centro de mecanizado, sin embargo, vale la pena resaltar que no son todos los usados. Para suplir esta información se crea un anexo A donde se encuentran todos los códigos G y M extraídos del manual de funciones del centro de mecanizado Leadwell V20i. [30]

### Códigos G

Los códigos G permiten tener una función preparatoria encargada de realizar la geometría y las condiciones derivadas de ella, como se observa en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Códigos G del Centro de mecanizado Leadwell V20i.

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b>G00</b>	Posicionamiento
<b>G01</b>	Interpolación lineal
<b>G17</b>	X y Y como planos seleccionados
<b>G21</b>	Sistema de medida en pulgadas
<b>G28</b>	Retorno a la posición de referencia
<b>G40</b>	Cancelación de la compensación de corte y tridimensional
<b>G49</b>	Cancelación de compensación de longitud de herramienta.
<b>G53</b>	Ajuste de sistema de coordenadas de la maquina
<b>G54</b>	Selección del sistema de coordenadas de la pieza de trabajo
<b>G69</b>	Cancelación de rotación en coordenadas
<b>G80</b>	Cancelación del ciclo conectado y operación externa.
<b>G90</b>	Comando absoluto
<b>G91</b>	Comando de incremento
<b>G94</b>	Alimentación por minuto

Fuente: Autor.

## Códigos M

Los códigos M permiten tener una función auxiliar en el proceso, cómo se observa en la Tabla 5.2.

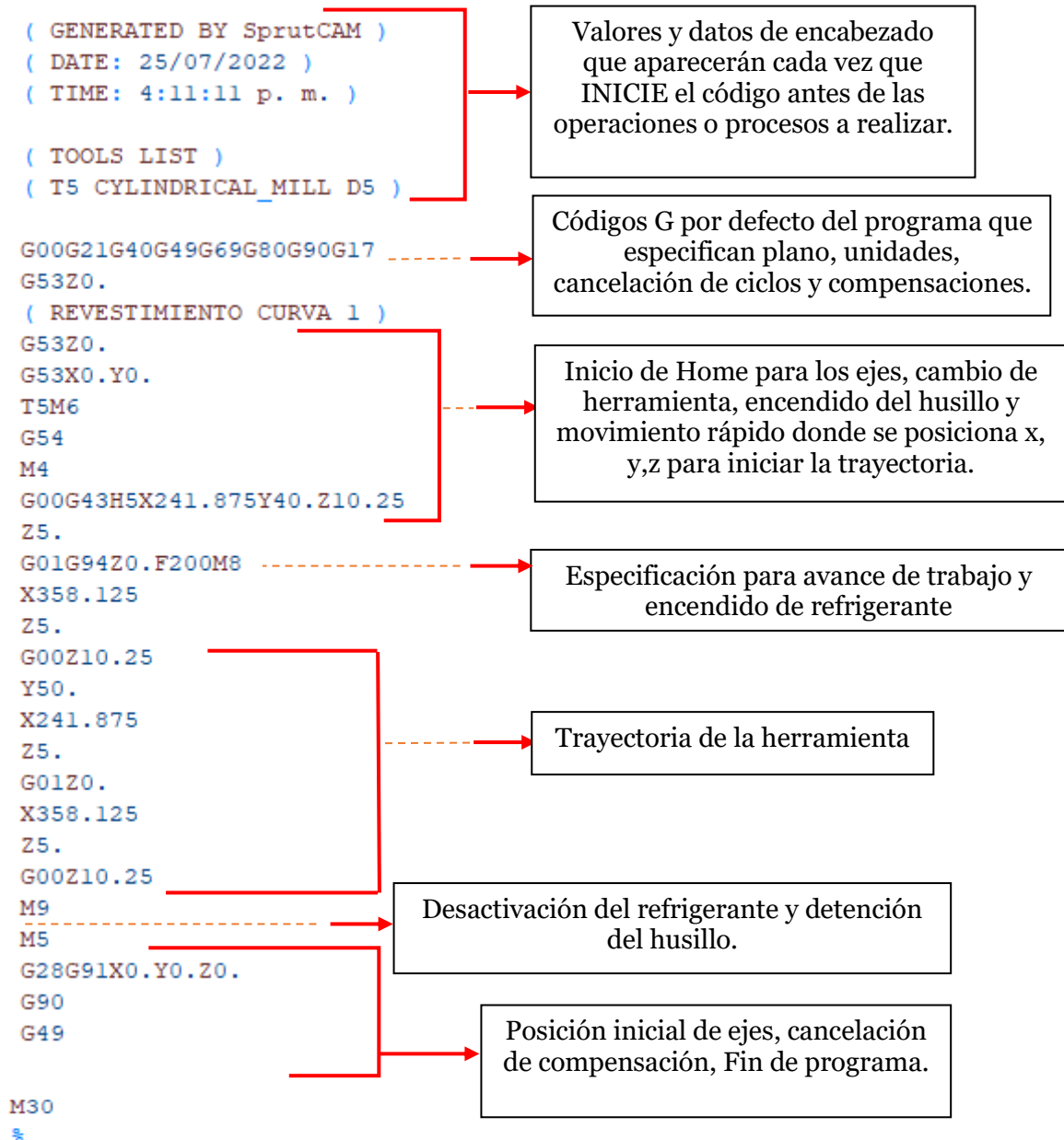
Tabla 5.2. Códigos M para Centro de mecanizado Leadwell V20i

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>
<b>M00</b>	Detención de programa
<b>M01</b>	Detención opcional del programa
<b>M02</b>	Fin del programa
<b>M05</b>	Detención del husillo
<b>M06</b>	Cambio de herramienta
<b>M08</b>	Activación del refrigerante
<b>M09</b>	Desactivación del refrigerante
<b>M11</b>	Giro del portador de herramientas hacia la derecha
<b>M12</b>	Giro del portador de herramientas hacia la izquierda
<b>M40</b>	Anclaje del cuarto eje
<b>M41</b>	Des anclaje del cuarto eje

Fuente: Autor.

El código NC cumple con una estructura que permite ver en un orden establecido las condiciones, trayectoria y demás aspectos que la maquina CNC ejecutará para la fabricación de cualquier pieza. Esta estructura se compone de los códigos G y M anteriormente nombrados, como se observa en la Figura 5.8 correspondiente al ejercicio de WUY-*Avances* realizado como primer caso. En la identificación de los diferentes componentes de la estructura inicial del código se pretende conocer las funciones a modificar para obtener un código NC compatible con el proceso aditivo.

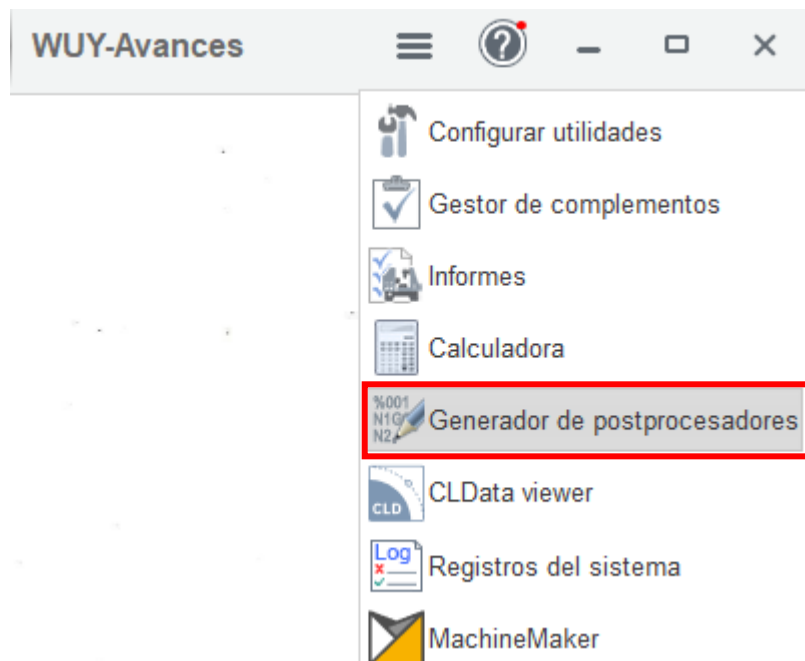
Figura 5.8. Estructura código NC.



Fuente: Autor.

Al usar la plantilla de un post-procesador para un controlador FANUC Oi-MD, el código NC generado por este contiene funciones características de un proceso de mecanizado sustractivo. Activando funciones de inicio como la del husillo y refrigerante, parámetros que en el proceso de manufactura aditiva no son requeridos. Para lograr compatibilidad del código NC con el proceso de manufactura aditiva se debe intervenir el post-procesador modificando los parámetros ya identificados mediante el uso del generador de post-procesadores que es un complemento del *software* SprutCAM como se observa en la Figura 5.9.

Figura 5.9. Generador de post procesadores.

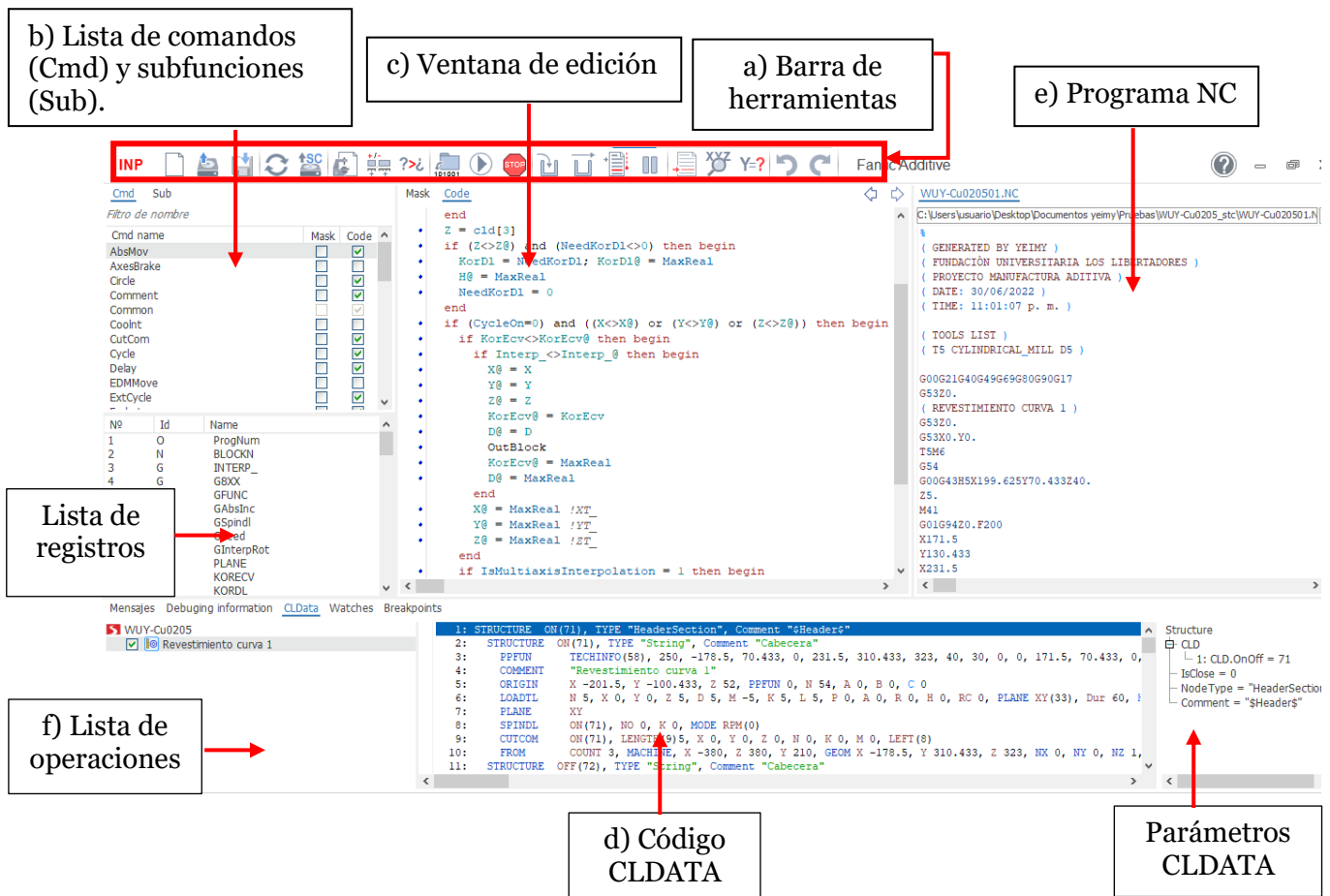


Fuente: Autor.

Al iniciar este complemento se desglosa la ventana principal del generador de post-procesadores que contiene las opciones para entender de forma ordenada su estructura y poder modificarla, como se muestra en la Figura 5.10. En la parte superior (a) de la ventana se encuentra la barra de herramientas que permiten interacción con el código como correrlo, importar y pausar entre otras herramientas. En el costado izquierdo (b) está la lista de comandos y subfunciones que generan el código post-procesado, al seleccionar alguno de estos se visualiza en la parte central (c) la ventana de edición del código correspondiente a cada comando o subfunción. En la parte inferior se muestra el código madre o CLDATA (d) que contiene la información de las operaciones y que posteriormente serán traducidas al lenguaje compatible con la CNC, este código NC (e) se encuentra en la parte derecha de la ventana.



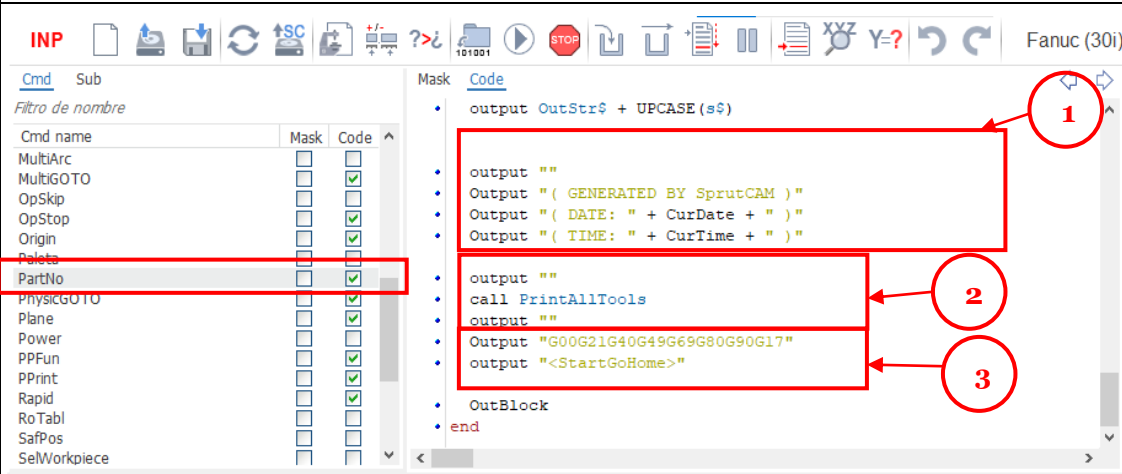
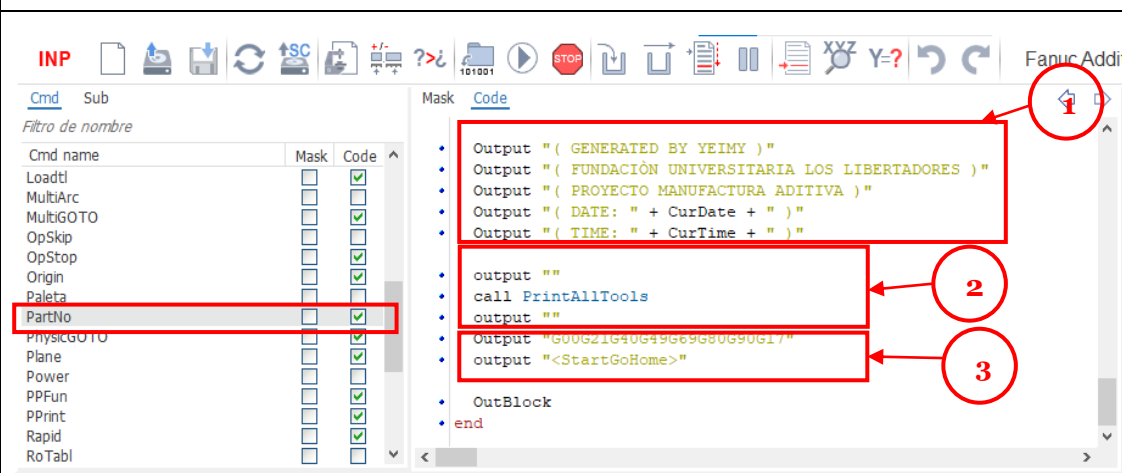
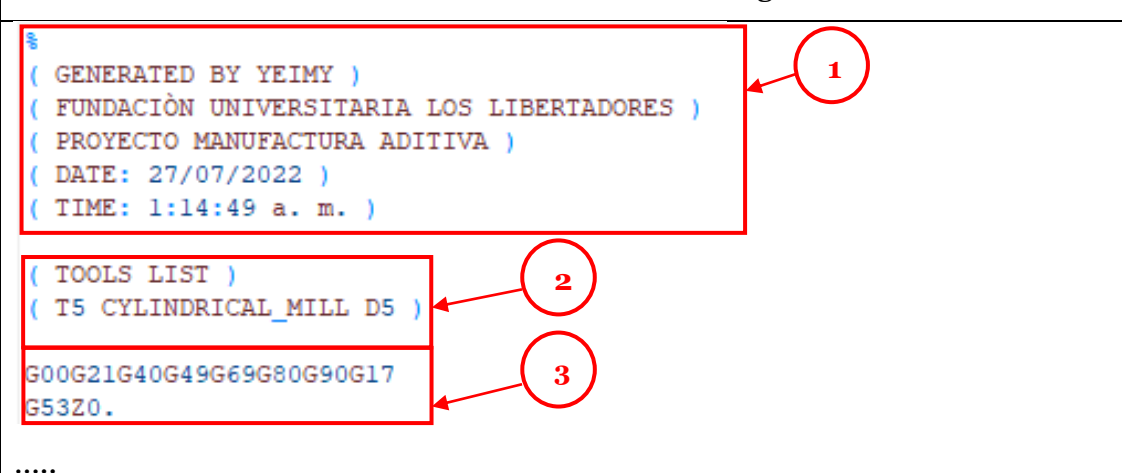
Figura 5.10 Ventana principal del post procesador.



Fuente: Autor.

Conociendo las secciones que componen el post-procesador, se inicia con las modificaciones correspondientes al encabezado del código NC para ofrecer información del proyecto y el tipo de proceso. Por esta razón se pretende personalizar el encabezado incluyendo el texto de quien lo desarrollo, el tipo de proceso y a la organización que pertenece el programa. Dicha modificación se logra interviniendo el post-procesador desde el comando *PartNo*, anexando las líneas de código para este encabezado como se observa en la Tabla 5.3.

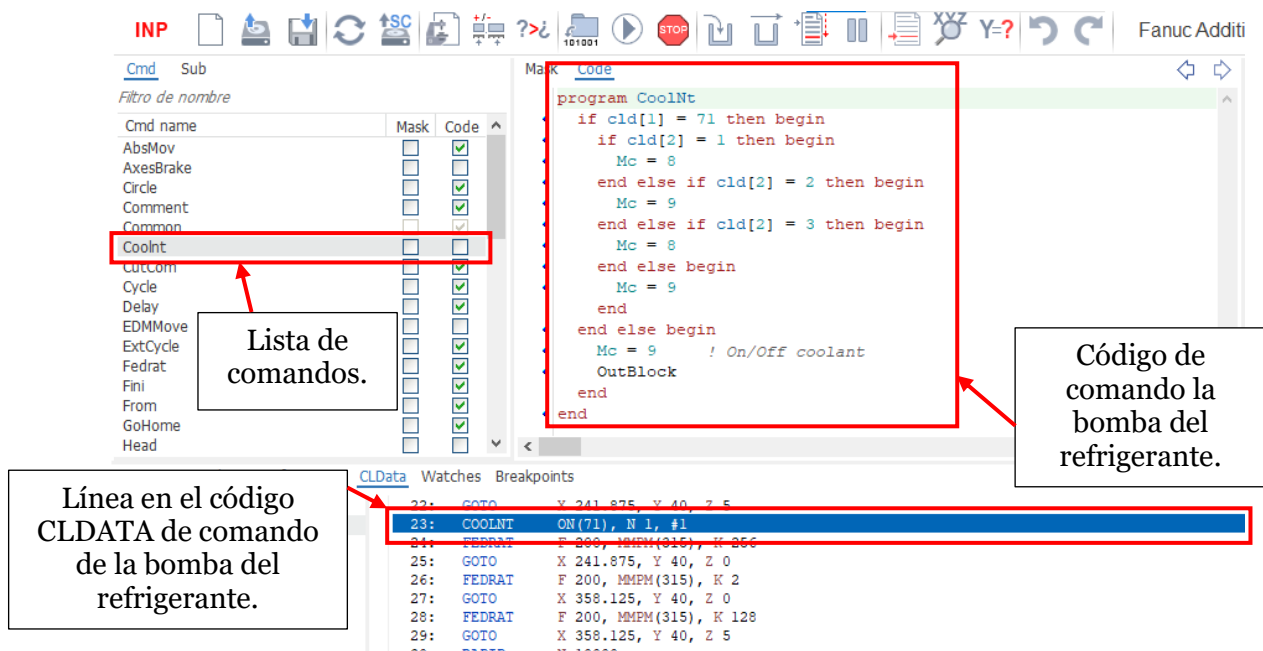
Tabla 5.3. Comparación del encabezado

Encabezado inicial	
	
Encabezado modificado	
	
Visualización encabezada en código NC	
 <pre> ( GENERATED BY YEIMY ) ( FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES ) ( PROYECTO MANUFACTURA ADITIVA ) ( DATE: 27/07/2022 ) ( TIME: 1:14:49 a. m. )  ( TOOLS LIST ) ( T5 CYLINDRICAL_MILL D5 )  G00G21G40G49G69G80G90G17 G53Z0.  ..... </pre>	

Fuente: Autor

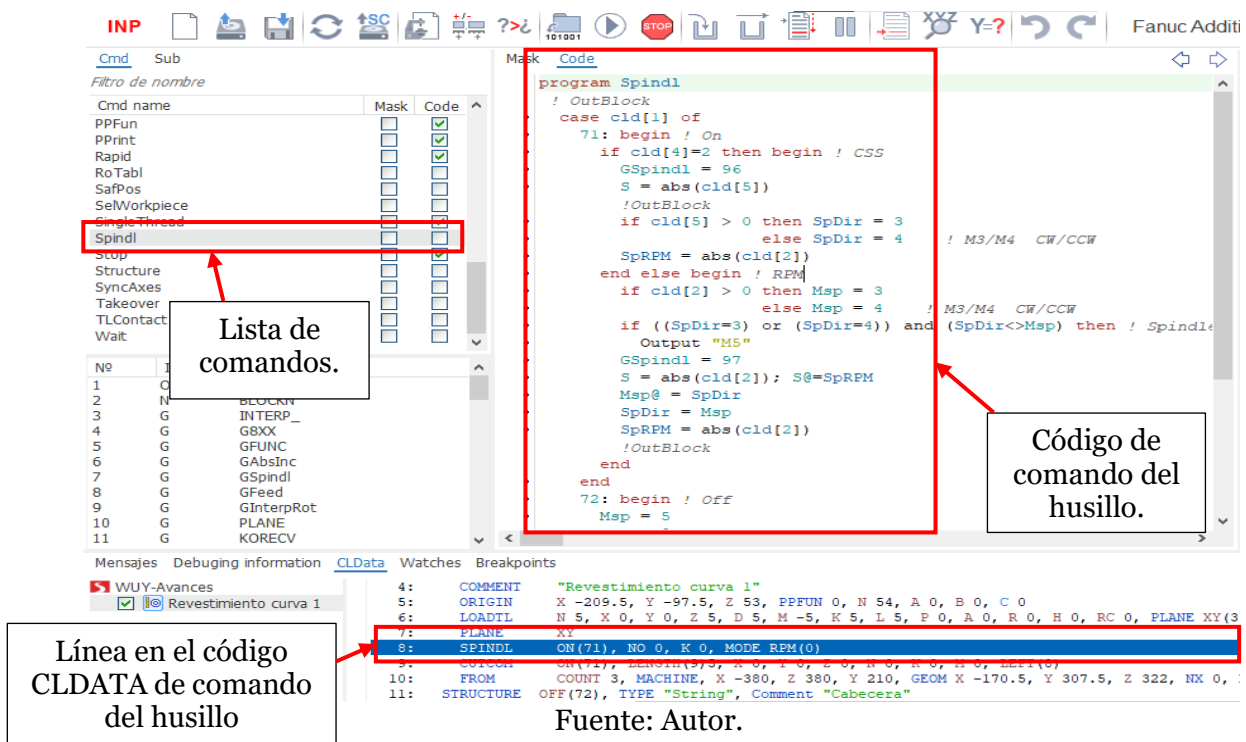
Continuando con el proceso de modificación de código NC es necesario remover aquellos comandos que puedan generar incompatibilidad con el proceso de manufactura aditiva como la activación y desactivación del husillo y la bomba del refrigerante necesarios para procesos de mecanizado sustractivo. En el proceso de adición de material es importante que la herramienta se mantenga en una posición fija para el correcto aporte de material sobre la superficie y de igual manera el proceso no necesita fluido de corte. Dando solución a lo anterior, se procede a modificar el post-procesador desactivando comando *Spindle* y el comando *Coolnt* respectivamente como se muestra en la Figura 5.11 y 5.12.

Figura 5.11 Desactivación comando de la bomba del refrigerante.



Fuente: Autor.

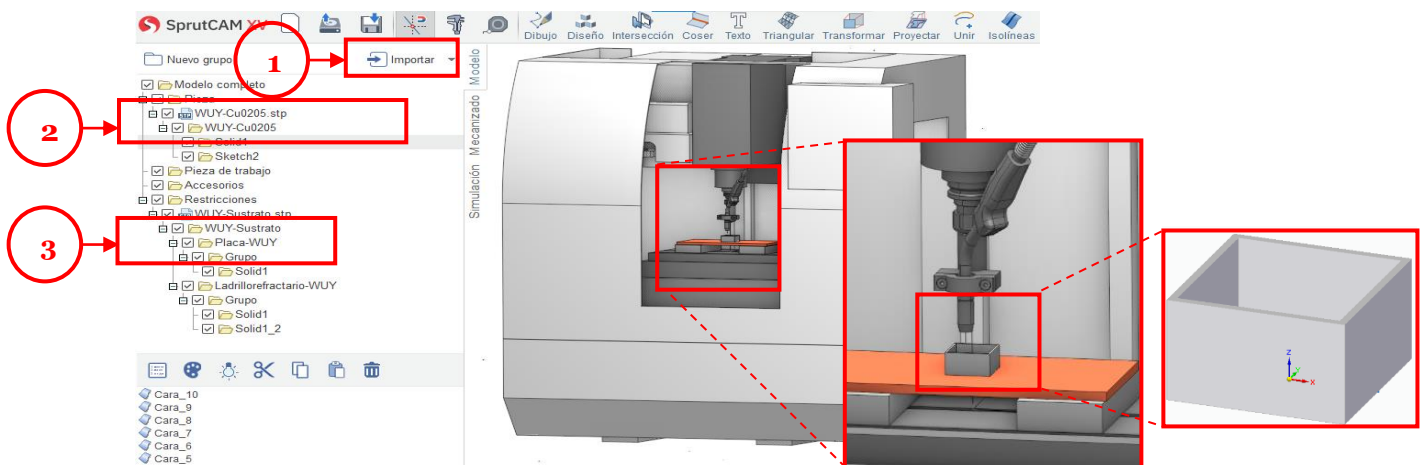
Figura 5.12 Desactivación comando del husillo.



Fuente: Autor.

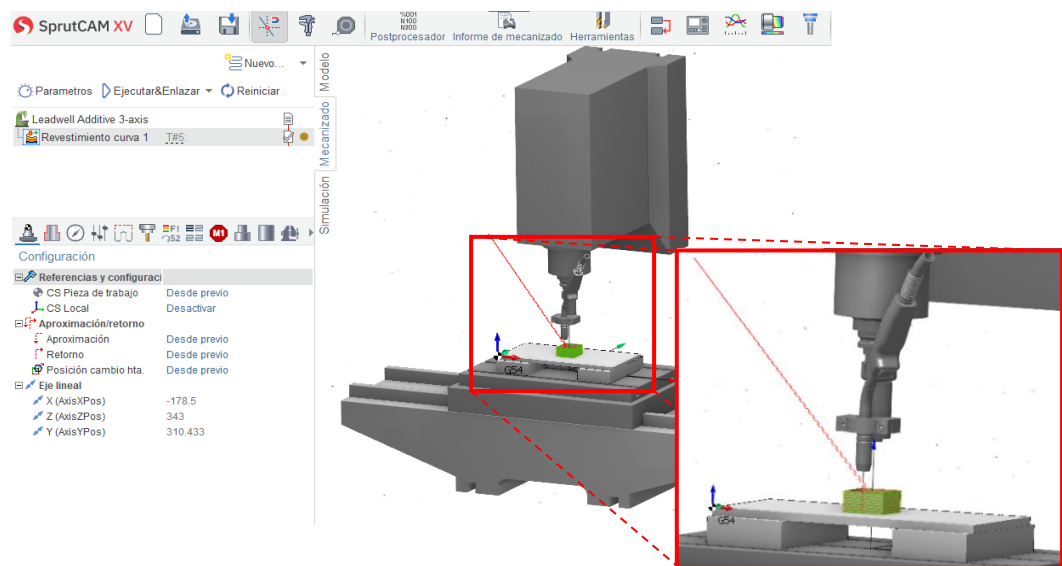
Al realizar y guardar los cambios del post-procesador se validan las modificaciones con un segundo ejercicio nombrado *WUY-Cu0205*. Se prepara el montaje virtual adecuando el sustrato y la pieza como se muestra en la Figura 5.13 y posteriormente se genera la trayectoria de manufactura aditiva como se observa en la Figura 5.14.

Figura 5.13. Alistamiento del montaje virtual en SprutCAM.



Fuente: Autor.

Figura 5.14. Visualización de la segunda trayectoria en SprutCAM.



Fuente: Autor.

Se evidencia que la función de activación y desactivación del husillo y la bomba del refrigerante ya no hacen parte de la estructura del código NC quedando deshabilitadas para el proceso de manufactura aditiva como se muestra en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Comparación de códigos NC

Primer código NC nombrado <i>Avances</i>	Segundo código NC nombrado <i>Cu0205</i>
<pre> ( GENERATED BY SprutCAM ) ( DATE: 25/07/2022 ) ( TIME: 4:11:11 p. m. )  ( TOOLS LIST ) ( T5 CYLINDRICAL_MILL D5 )  G00G21G40G49G69G80G90G17 G53Z0. ( REVESTIMIENTO CURVA 1 ) G53Z0. G53X0.Y0. T5M6 G54 M4 G00G43H5X241.875Y40.Z10.25 Z5. G01G94Z0.F200M8 X358.125 Z5. G00Z10.25 Y50. X241.875 Z5. G01Z0. X358.125 Z5. G00Z10.25 M9 M5 G28G91X0.Y0.Z0 G90 G49  M30 %</pre>	<pre> ( GENERATED BY SprutCAM ) ( DATE: 27/07/2022 ) ( TIME: 12:56:47 a. m. )  ( TOOLS LIST ) ( T5 CYLINDRICAL_MILL D5 )  G00G21G40G49G69G80G90G17 G53Z0. ( REVESTIMIENTO CURVA 1 ) G53Z0. G53X0.Y0. T5M6 G54 G00G43H5X199.625Y70.433Z40. Z5. G01G94Z0.F200 X171.5 Y130.433 X231.5 Y70.433 X201.5 X171.5Z0.5 Y130.433Z1.5  .... Z34.984 G00Z40. G28G91X0.Y0.Z0. G90 G49  M30 %</pre>

Fuente: Autor.

Para lograr un proceso automático donde no se requiera de la intervención manual en el proceso de manufactura aditiva como la activación de la antorcha de soldadura, se busca un código M que genere la función de activación y desactivación del aporte de material. Creando de esta manera una comunicación entre el controlador FANUC Oi-MD de la maquina CNC Leadwell V20i con el equipo de soldadura Lincoln Electric SPEEDTEC 200C. Para esta aplicación se usa el código M40 y M41 que pertenece a una función que cumple con la característica de una señal de activación y desactivación mediante una salida digital del controlador.

Con la información anterior se puede realizar la cuarta intervención del post-procesador, cumpliendo con los siguientes pasos: adicionar la variable correspondiente al estado de la antorcha de soldadura, esto se logra desde el comando *Common* como se observa en la Figura 5.15.

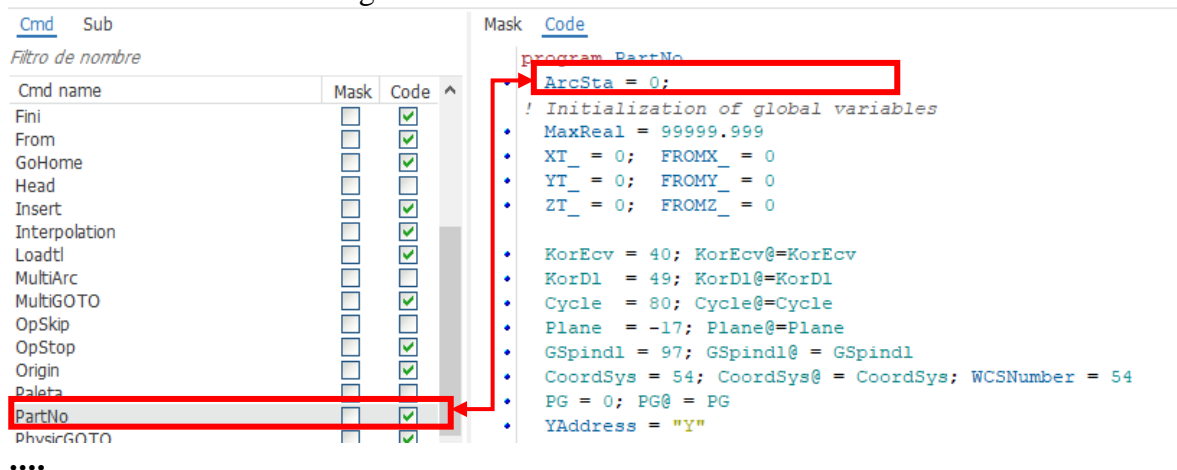
Figura 5.15 Adición de la variable



Fuente: Autor.

Posteriormente, se debe inicializar la variable en el comando *PartNo*, como se observa en la Figura 5.16.

Figura 5.16. Inicialización de variable

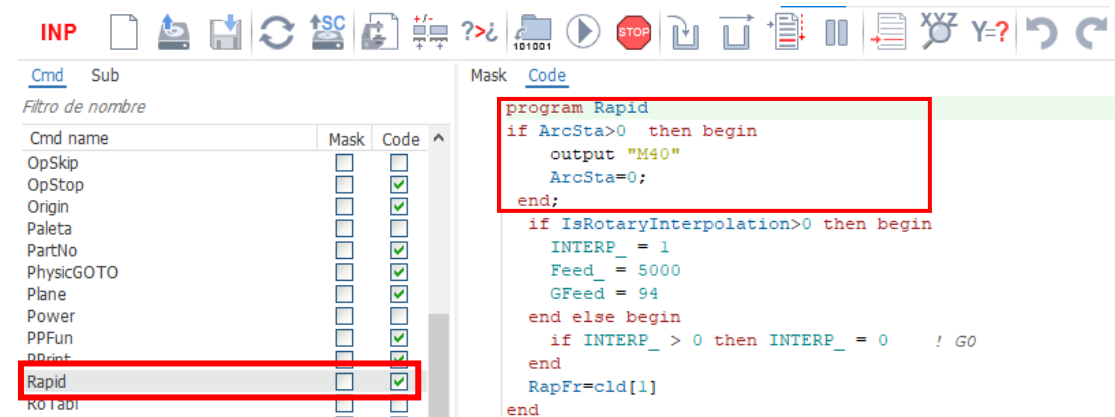


Fuente: Autor.

Una vez realizados los dos pasos anteriores se agrega la primera condición de la variable en el comando *Rapid* donde se permite la desactivación de la antorcha

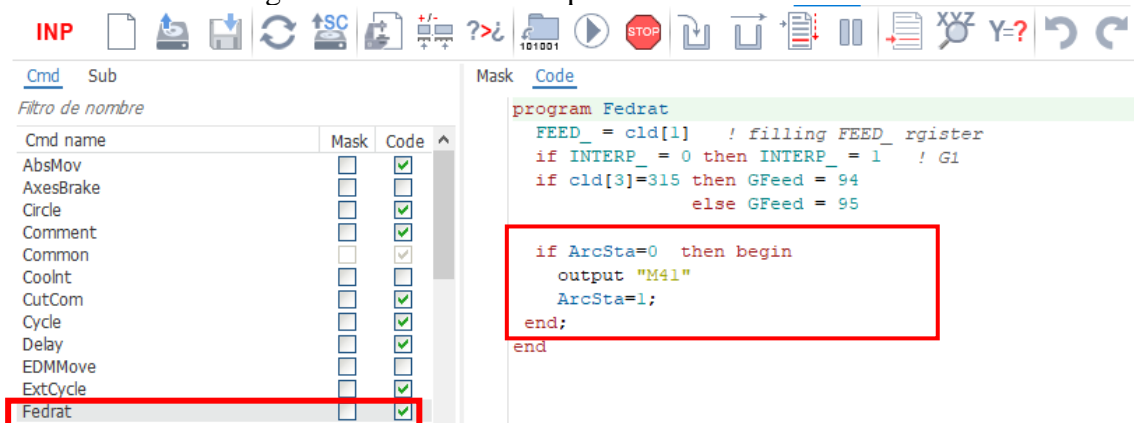
de soldadura, si está variable es **mayor que 0** y con la ejecución de la función M40 se desactivará, como se observa en la Figura 5.17. Por último, se agrega la segunda condición en el comando *Fedrat* donde se permite la activación de la antorcha de soldadura, si está variable es **igual que 0** y con la ejecución de la función M41 se activará como se observa Figura 5.18.

Figura 5.17. Condicional para desactivación de variable



Fuente: Autor.

Figura 5.18. Condicional para activación de variable

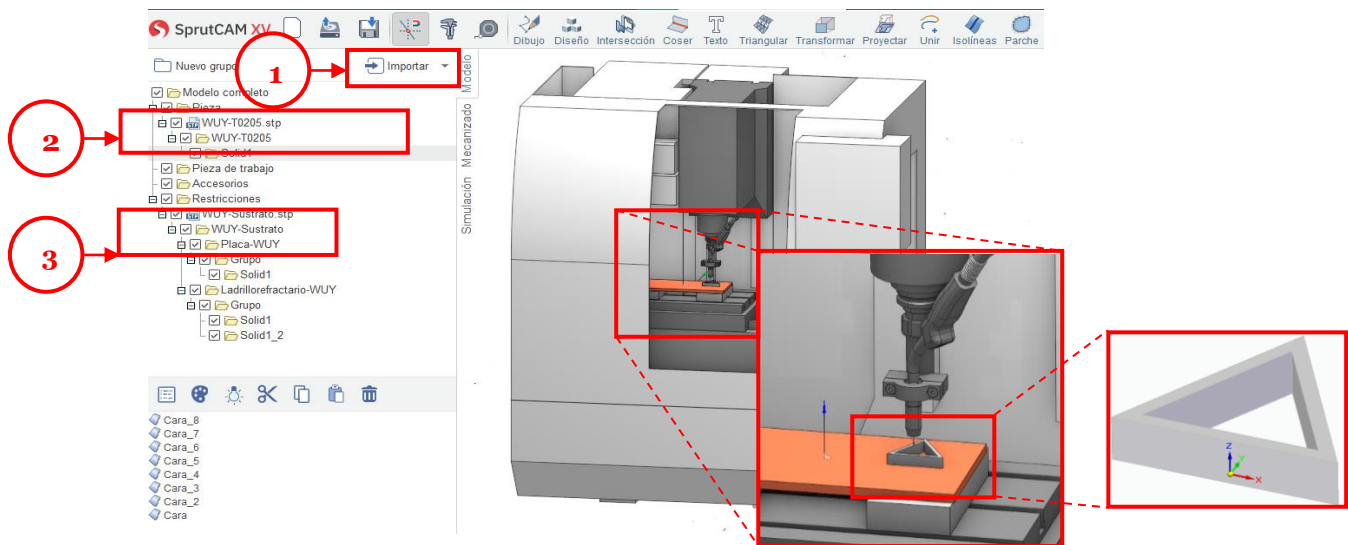


Fuente: Autor.

Culminado el proceso anterior se deben guardar los cambios del post-procesador para manufactura aditiva. Para validar la estructura del código NC con las modificaciones anteriores se utiliza un tercer ejercicio denominado *WUY-To205*. Se replica el proceso de alistamiento del montaje virtual y la generación de la trayectoria para su post-procesado teniendo en cuenta los cambios anteriormente nombrados como se observa en las Figuras 5.19 y 5.20.

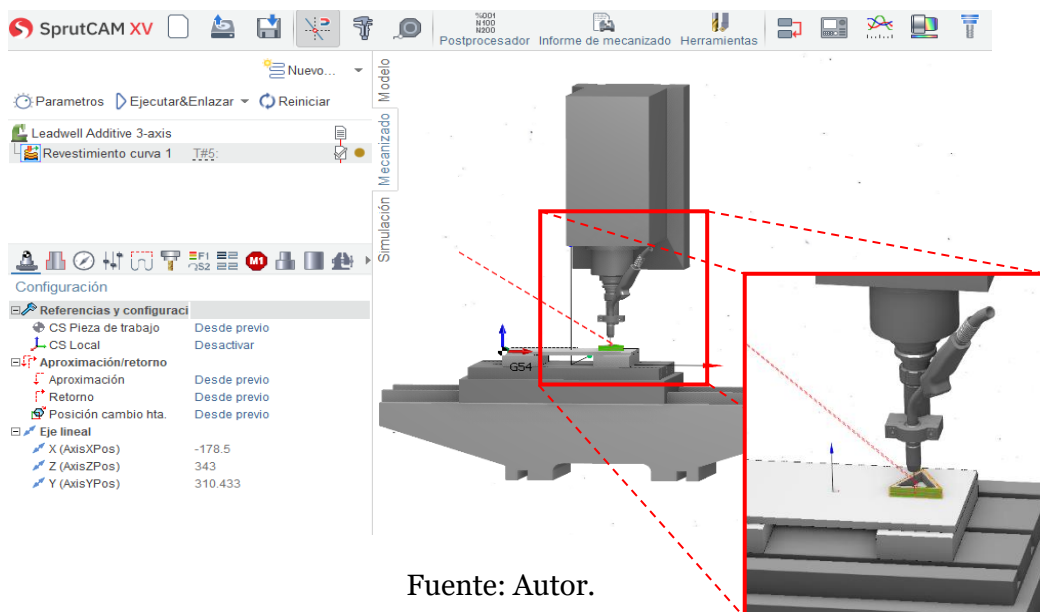


Figura 5.19. Importación de la tercera trayectoria a SprutCAM



Fuente: Autor.

Figura 5.20. Visualización del tercer ejercicio en SprutCAM.



Fuente: Autor.

Luego de realizar las pruebas anteriores, la estructura final del código NC, se conforma por las partes mostradas en la Tabla 5.5, teniendo en cuenta que la trayectoria variará dependiendo de la pieza a fabricar, no obstante, los parámetros modificados serán los mismos.

Tabla 5.5. Estructura del código NC para Centro de mecanizado Leadwell V20i para manufactura aditiva

<b>G-CODE LAYOUT</b>	
<b>Program Start Sequence</b>  (Valores que aparecerán cada vez que <b>INICIE</b> el código antes de las operaciones o procesos a realizar)	% (GENERATED BY YEIMY) (FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES) (PROYECTO MANUFACTURA ADITIVA) (DATE: 27/07/2022) (TIME: 3:17:33 p. m.)  (TOOLS LIST) (T5 CYLINDRICAL_MILL D5)  G00G21G40G49G69G80G90G17 G53Z0
<b>Operation Start Sequence</b>  (Valores o condiciones que aparecerán cada vez que <b>INICIE</b> una de las operaciones o procesos a realizar)	(REVESTIMIENTO CURVA 1) G53Z0. G53X0.Y0. T5M6 G54 G00G43H5X199.625Y70.433Z40. Z5.
<b>Tool Path</b>  (Valores o condiciones importantes <b>DURANTE</b> el recorrido de las trayectorias de corte o la ejecución de ciclos)	<b>M41</b> G01G94Z0.F200 X171.5 Y130.433 X231.5 Y70.433 X201.5 X171.5Z0.5 Y130.433Z1.5 X231.5Z2.5 .....
<b>Operation End Sequence</b>  (Valores o condiciones que aparecerán cada vez que <b>TERMINE</b> una de las operaciones o procesos a realizar)	..... Z34.984 <b>M40</b> G00Z40.
<b>Program End Sequence</b>  (Valores o condiciones que aparecerán cuando <b>TERMINE</b> el programa)	G28G91X0.Y0.Z0. G90 G49  M30 %

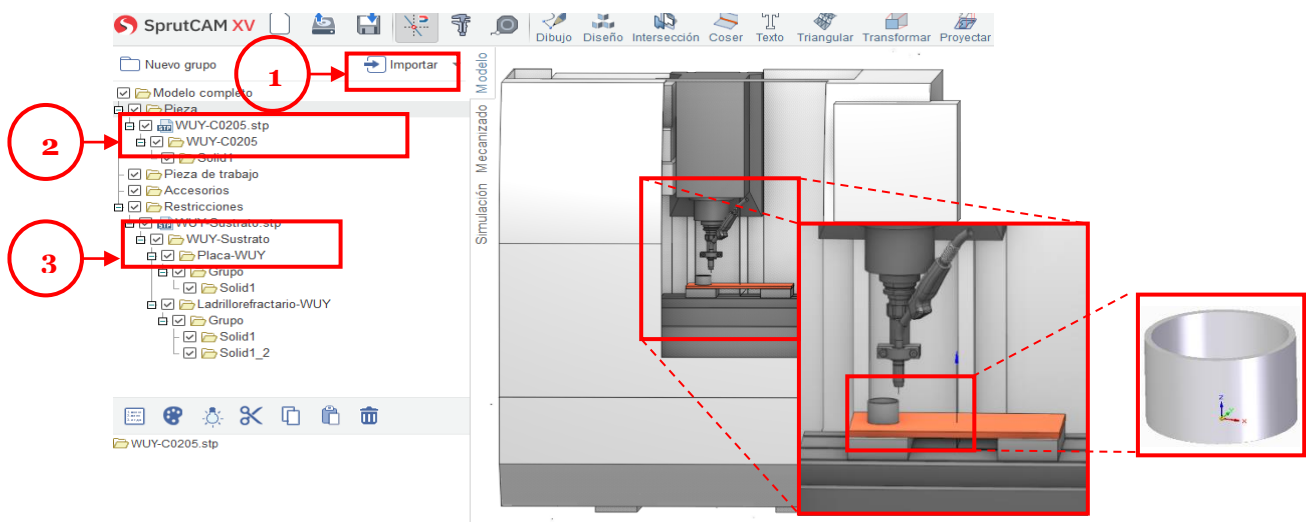
Fuente: Autor.

### 5.3. Comprobación del comportamiento del post-procesador con trayectorias continuas y discontinuas.

Para garantizar que los procesos de modificación cumplen con las necesidades de las diferentes trayectorias que se pueden generar con modelos importados al *software* SprutCAM. Se valida el comportamiento del post-procesador generando dos (2) ejercicios adicionales: el primero denominado *WUY-Co205* que se trata de un cilindro con una trayectoria continua y el segundo ejercicio se denomina Logo 40 con una trayectoria discontinua con motivo de la celebración de los 40 años de la Fundación Universitaria Los Libertadores.

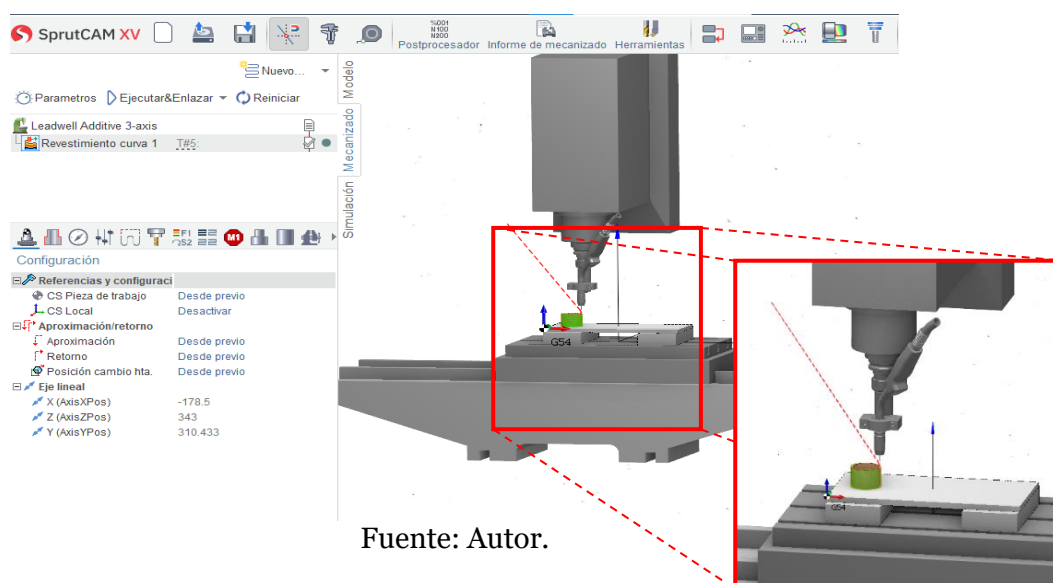
El ejercicio denominado *WUY-Co205* se programa mediante la operación de revestimiento curva, donde la activación de la función M41 se hará al inicio de la trayectoria del cilindro y la desactivación de la función M40 cuando esta finalice. Para la simulación del ejercicio se replica el procedimiento de alistamiento de la máquina virtual y la generación de las trayectorias, como se observa en las Figuras 5.21 y 5.22 respectivamente.

Figura 5.21. Importación del cuarto modelo a SprutCAM.



Fuente: Autor.

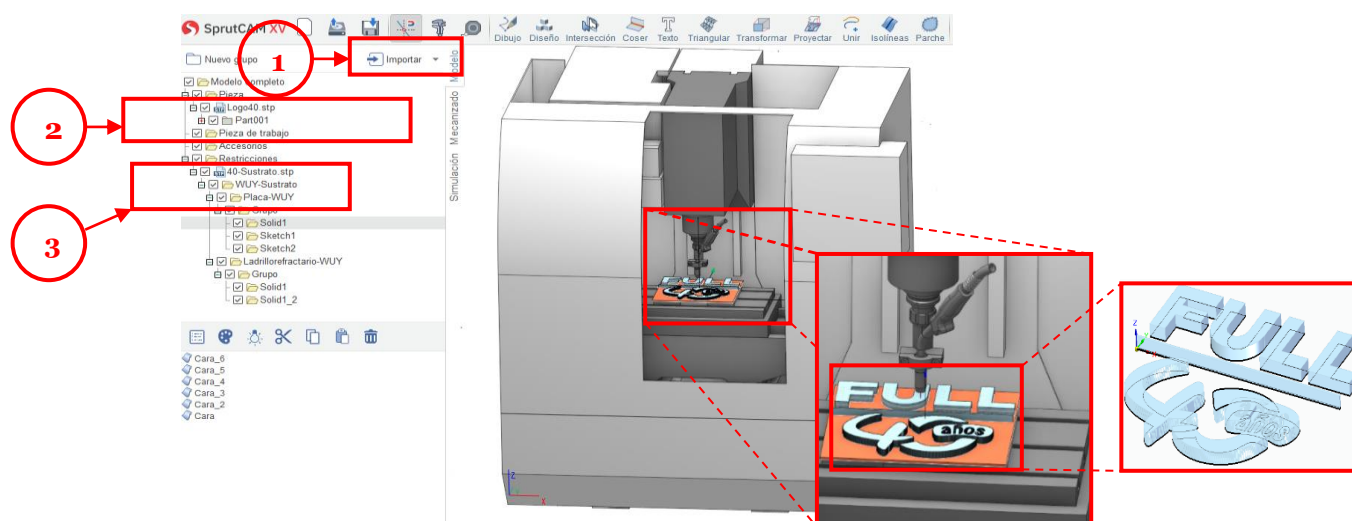
Figura 5.22. Visualización de la cuarta trayectoria en SprutCAM



Fuente: Autor.

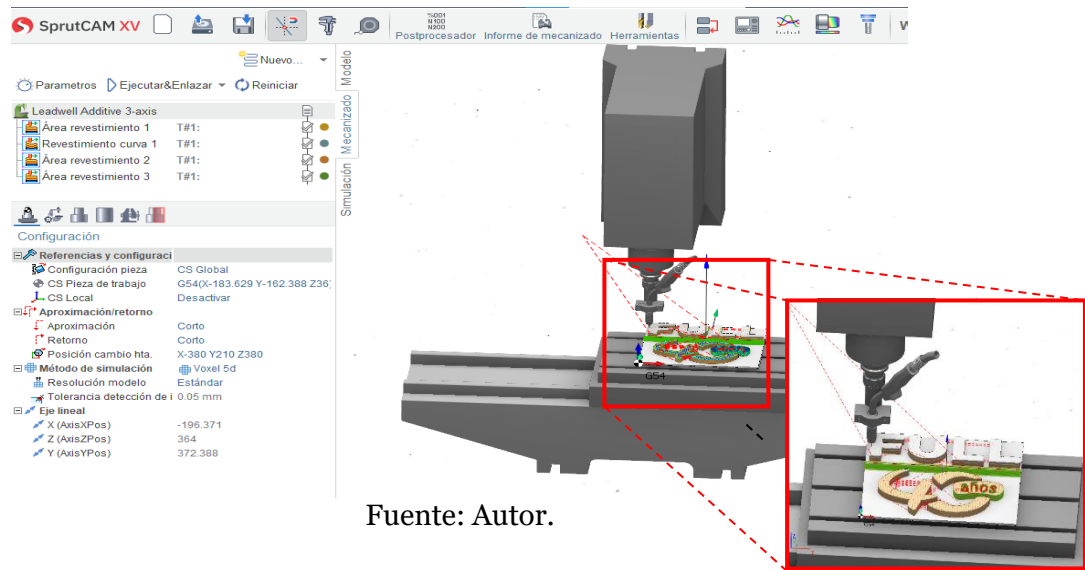
El ejercicio denominado *Logo 40* se programa mediante la operación de revestimiento curva para cada una de las trayectorias del modelo. Esto permite poner a prueba el post-procesador, ya que incluye la activación y desactivación de las funciones M40 y M41 que permiten crear por separado cada letra del modelo sin generar aporte de material en el desplazamiento entre ellas específicamente en los movimientos en vacío. Para la simulación del ejercicio se replica el procedimiento de alistamiento de la máquina virtual como se observa en la Figura 5.23 y la generación de las trayectorias como se observa en la Figura 5.24.

Figura 5.23. Importación del modelo a SprutCAM.



Fuente: Autor.

Figura 5.24. Visualización de la última trayectoria en SprutCAM.



Fuente: Autor.

Para el cumplimiento del objetivo del capítulo se adecuó el post-procesador para su implementación en el centro de mecanizado Leadwell V20i para manufactura aditiva. Se verificó a partir de diferentes ejercicios la compatibilidad del código contemplando las modificaciones del encabezado, la desactivación del husillo y la bomba del refrigerante, además de la implementación de una función M40 Y M41 que activa y desactiva el aporte de material por la antorcha de soldadura, cumpliendo con el requerimiento para el proceso de manufactura aditiva, como se observa en la Tabla 5.6.

Tabla 5.6. Últimos códigos NC generados.

Cuarto código NC nombrado <i>WUY-Co205</i>	Quinto código NC nombrado <i>Logo 40</i>
Archivos de salida <u>WUY-CO205.NC</u> % ( GENERATED BY YEIMY ) ( FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES ) ( PROYECTO MANUFACTURA ADITIVA ) ( DATE: 27/07/2022 ) ( TIME: 7:48:51 p. m. )  ( TOOLS LIST ) ( T5 CYLINDRICAL_MILL D5 )  G00G21G40G49G69G80G90G17 G53Z0. ( REVESTIMIENTO CURVA 1 ) G53Z0. G53X0.Y0. T5M6 G54 G00G43H5X91.171Y95.991Z50. Z5. M41 G01G94Z0.F200 X91.217Y96.322 G03X90.834Y94.147I-29.717J4.111 X90.834Y94.147Z4.I-29.334J6.286 X90.834Y94.147Z8.I-29.334J6.286 X90.834Y94.147Z12.I-29.334J6.286 X90.834Y94.147Z16.I-29.334J6.286 X90.834Y94.147Z20.I-29.334J6.286 X90.834Y94.147Z24.I-29.334J6.286 X90.834Y94.147Z28.I-29.334J6.286 X90.834Y94.147Z32.I-29.334J6.286 X90.834Y94.147Z36.I-29.334J6.286 X90.292Y92.007Z39.953I-29.334J6.286 G01X90.386Y92.327Z39.96  Z44.96 M40 G00Z50. G28G91X0.Y0.Z0. G90 G49  M30 %	Archivos de salida <u>WUY-40 años perfil01.NC</u> % ( GENERATED BY YEIMY ) ( FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES ) ( PROYECTO MANUFACTURA ADITIVA ) ( DATE: 27/07/2022 ) ( TIME: 8:10:03 p. m. )  ( TOOLS LIST ) ( T5 CYLINDRICAL_MILL D5 )  G00G21G40G49G69G80G90G17 G53Z0. ( REVESTIMIENTO CURVA 1 ) G53Z0. G53X0.Y0. T5M6 G54 G00G43H5X8.629Y272.763Z15. Z5. M41 G01G94Z0.F250 Y317.388 X82.629 Y294.388 X34.629 Y279.388 X77.629 Y257.388 X34.629 Y224.388 X8.629 Y269.013 Z5. M40 ( REVESTIMIENTO CURVA 2 ) G00X4.504Y193.388Z15. Z5. M41 G01Z0.F250 X344.754 Z5. M40 G00Z15. X4.504 Z7. M41 G01Z2. X344.754 Z7. M40 G00Z15. X4.504 Z9. M41 G01Z4. X344.754 Z9. M40 G00Z15. ( REVESTIMIENTO CURVA 3 )

Fuente: Autor.

De esta manera se culmina el proceso de modificación del post-procesado, para replicar el procedimiento anterior, se dispone del Apéndice D y E los manuales que contienen el paso a paso y su respectiva explicación.

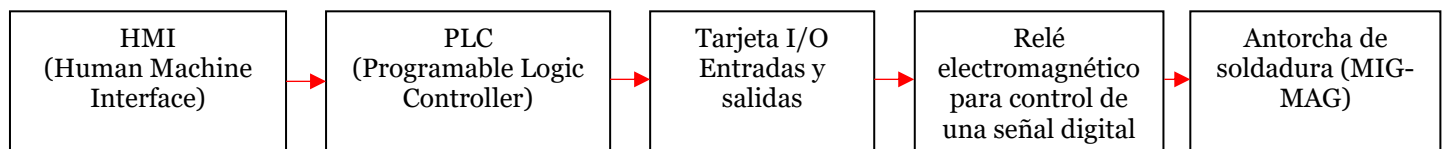
## Capítulo 6

# Integración del centro de mecanizado Leadwell V20i al equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C.

El sistema de deposición directa de energía que se usará en el proyecto es manufactura aditiva por soldadura por arco por sus siglas en inglés (WAAM), como se explica al inicio del documento. Para lograr dicho proceso se requiere de la integración y puesta a punto de la máquina CNC del centro de mecanizado Leadwell V20i con el equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C. Este proceso permitirá la comunicación entre ellas produciendo un aporte de material automático, según los códigos NC generados por el software SprutCAM que posteriormente se ingresarán al CNC.

Para lograr la comunicación entre maquinas se realiza el flujo de operaciones planteado en la Figura 6.1, donde el HMI de la maquina cargado con un código NC que contenga las funciones de activación (M41) y desactivación (M40) del aporte de material, envía al PLC la lógica de estas. Permitiendo tomar desde la tarjeta de entradas y salidas la señal de las funciones respectivamente, que serán controladas por un relé electromagnético, el cual enviará la orden a la antorcha de soldadura para que se active o desactive según corresponda.

Figura 6.1. Flujo de comandos y señales eléctricas para la integración del proceso WAAM.



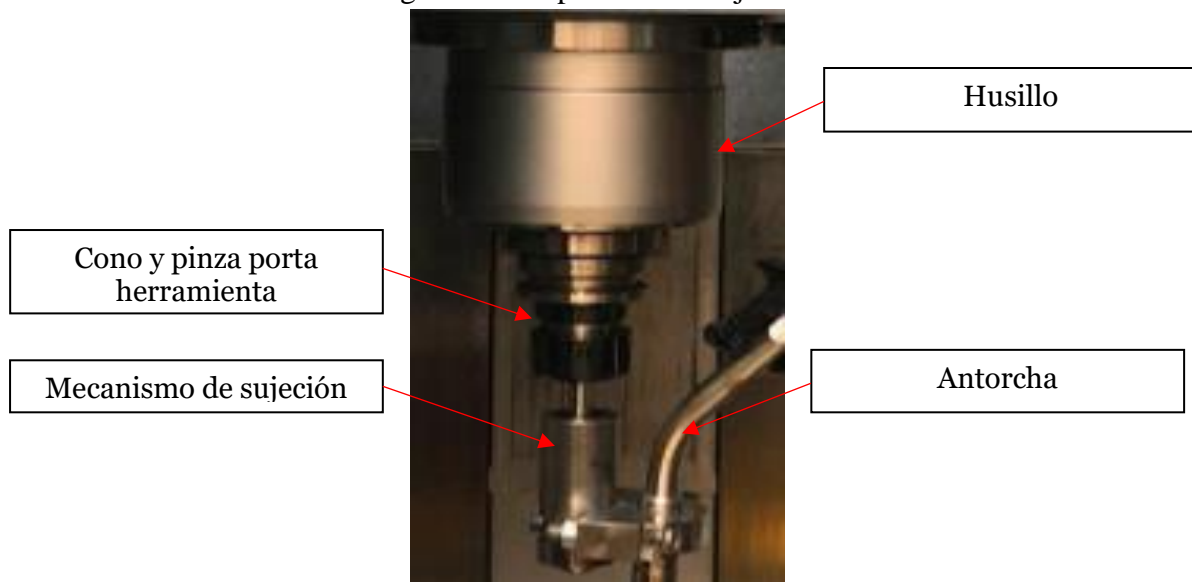
Fuente: Autor.



## 6.1. Análisis de los equipos y preparación para la adecuación de la conexión eléctrica entre ellos.

Para cumplir con el flujo mencionado anteriormente, se realiza una inspección de los elementos de las máquinas que requieren intervención. Iniciando con el centro de mecanizado Leadwell V20i, al cual en su eje Z se le agregará un mecanismo de sujeción para la antorcha de soldadura, como se muestra en la Figura 6.2.

Figura 6.2 Dispositivo de sujeción.



Fuente: Autor.

El mecanismo de sujeción fue diseñado para implementarse a un cono porta herramienta BT40 tradicional en los procesos sustractivos, donde el cono es adaptable al husillo del centro de mecanizado Leadwell V20i. Esto permite la flexibilidad de tener procesos de manufactura aditivo y/o sustractivo en la maquina mediante un cambio de herramienta. Agilizando los procesos de una manera segura y un ensamble de manera modular para su mantenimiento y reparación.

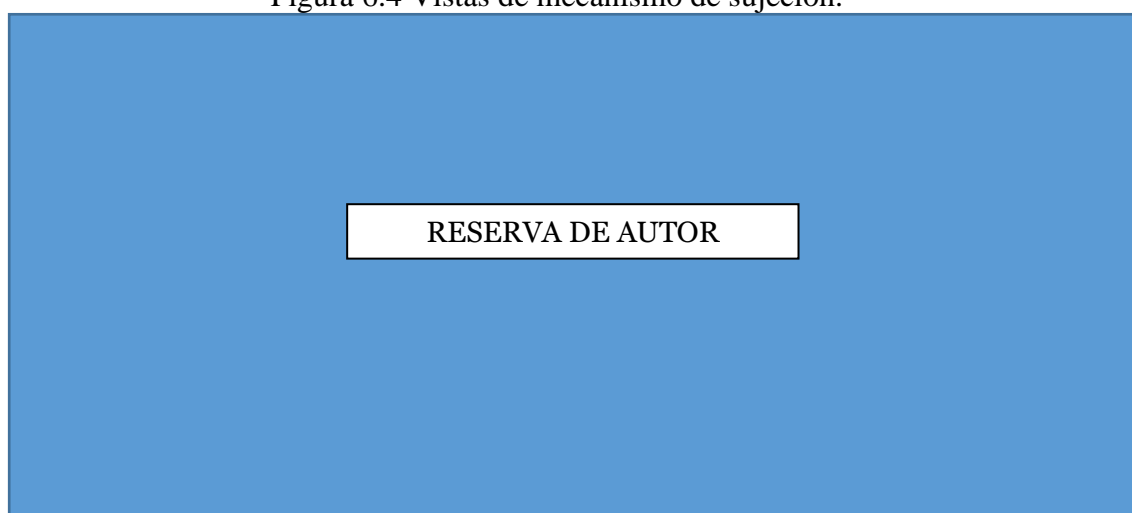
Figura 6.3 Mecanismo de sujeción.

Número de parte	Nombre de parte	Cantidad
1	As 1112 - M6 tipo 5	2
2	AS 1420 - 1973 - M6 X 35	2
3	Barra Herramienta	1
4	DIN 625 T1 - 6001 - 12 X 28 X 8	2
5	Eje Principal	1
6	Ensamble Antorcha	1
7	Placa De Sujeción 2	1
8	Placa De Sujeción 1	1
9	Porta Herramienta BT40	1
10	Tornillo - 3/8 X 1 3/4	2

Fuente: Autor.

El mecanismo de sujeción está conformado por 10 partes que se ensamblan de manera modular, como se observa en la Figura 6.3. Entre ellas, dos rodamientos que tienen como característica permitir un movimiento rotatorio en su propio eje, para evitar accidentes en caso de que se encienda el husillo. El sistema de sujeción es por medio de tornillos y tuercas que gradúan las placas que sujetan la antorcha de soldadura, permitiendo un acoplamiento adecuado, como se observa en la Figura 6.4.

Figura 6.4 Vistas de mecanismo de sujeción.



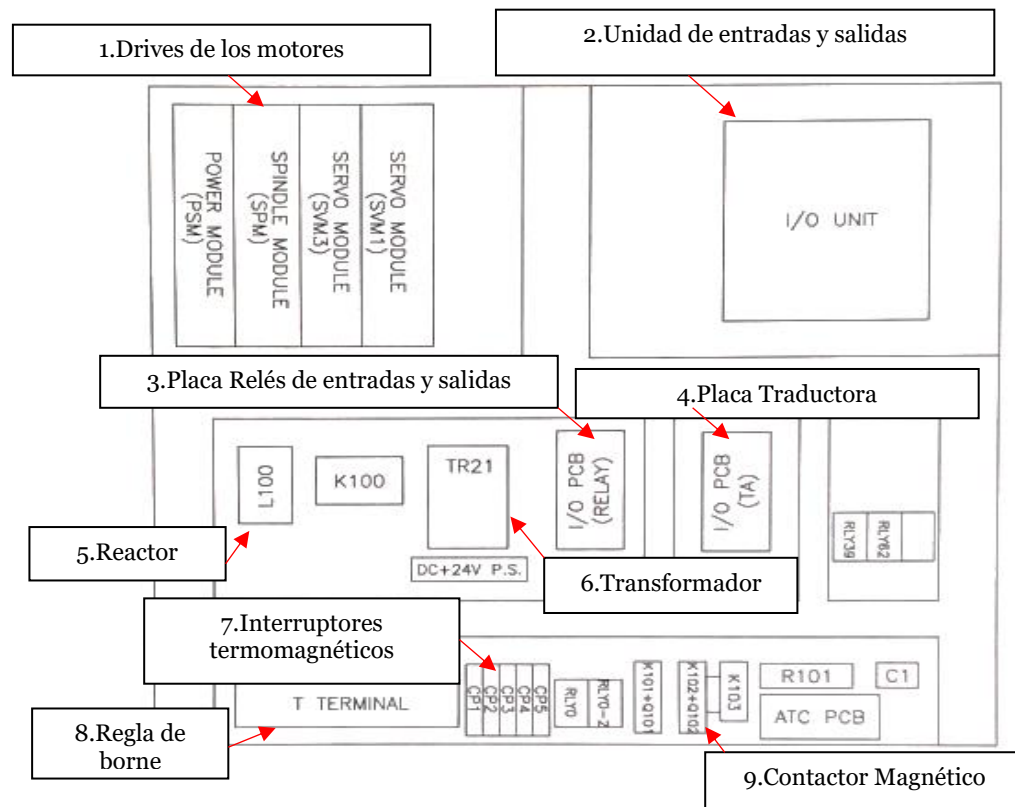
Fuente: Autor.

Con lo anterior se expone la manera en que la antorcha de soldadura queda ubicada para su funcionamiento durante el proceso de aditivo. En el Apéndice A se encuentran los planos correspondientes al mecanismo de sujeción. Ahora, se continua con el análisis de diseño del tablero de control. Esta área de la máquina contiene los sistemas eléctricos que permiten la correcta operación del centro de mecanizado Leadwell V20i. Las partes principales son las siguientes [31]:

1. Drives de los motores: estos energizan y comandan los servomotores de la máquina.
2. Unidad de entradas y salidas: dispositivo de conexión entre el PLC Y HMI.
3. Placa de relés de entradas y salidas: es una placa de circuito impreso con relés de uso general para controlar los dispositivos Misceláneos.
4. Reactor L100: protege al sistema eléctrico aumentando la impedancia del conjunto consiguiendo suavizar las distorsiones armónicas y evitando sobretensiones.
5. Transformador TR 21: es monofásico de mando y seguridad o separación, capaces de suministrar una gran potencia instantánea necesaria para el correcto funcionamiento de contactores y otros dispositivos de mando.
6. Interruptores termomagnéticos: interrumpen el paso de la corriente cuando se detecta que la misma sobrepasa ciertos límites, protegiendo así al circuito eléctrico de sobrecargas y cortocircuitos.
7. Regla de borne: es un dispositivo que tiene como principal función permitir la interconexión entre el equipamiento y el panel central.
8. Contactor Magnético: su función es abrir o cerrar circuitos eléctricos vinculados a motores eléctricos.

Por otra parte, en el tablero de control de la maquina se realizará una adición de la conexión eléctrica, por lo que se deben conocer sus partes principales como se muestra en la Figura 6.5.

Figura 6.5. Diseño tablero de control.



Fuente: [30]

Una vez se analizan los elementos del tablero de control, se deben identificar las señales de las funciones M40 y M41, se usa la tabla de relevadores que permite ver la ubicación de los relés de dichas funciones como se observa en la Figura 6.6. La cual indica que la función M40 está ubicada en el relé 9 (RLY9) que inicialmente se encuentra para el anclaje de las mordazas del 4 eje rotativo, y la función M41 está ubicada en el relé 10 (RLY10) el cual se encarga del des anclaje de las mordazas del 4 eje rotativo.

Figura 6.6. Tabla de relevadores.

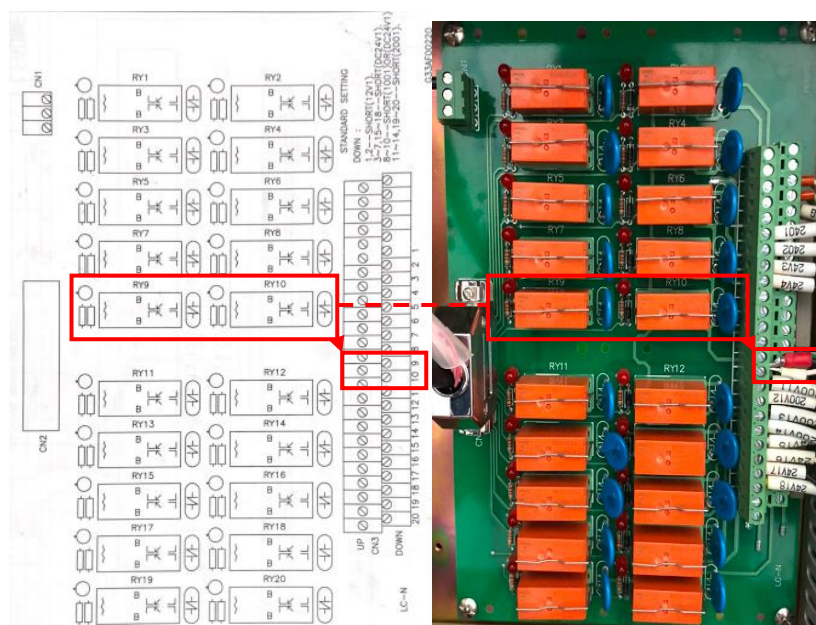
RELAY BOARD

1	RLY1-3,6	RLY1-4,5	CB106/Y04.0	ALARM LAMP (RED)
2	RLY2-3,6	RLY2-4,5	CB106/Y04.1	END LAMP (YELLOW)
3	RLY3-3,6	RLY3-4,5	CB106/Y04.2	SPINDLE AIR BLAST
4	RLY4-3,6	RLY4-4,5	CB106/Y04.3	TOOL UNCLAMP
5	RLY5-3,6	RLY5-4,5	CB106/Y04.4	DOOR OPEN
6	RLY6-3,6	RLY6-4,5	CB106/Y04.5	SPARE
7	RLY7-3,6	RLY7-4,5	CB106/Y04.6	SPARE
8	RLY8-3,6	RLY8-4,5	CB106/Y04.7	M30 POWER OFF
9	RLY9-3,6	RLY9-4,5	CB106/Y05.0	M40 (4TH CLAMP)
10	RLY10-3,6	RLY10-4,5	CB106/Y05.1	M41 (4TH UNCLAMP)
11	RLY11-3,6	RLY11-4,5	CB106/Y05.2	COOLANT MOTOR
12	RLY12-3,6	RLY12-4,5	CB106/Y05.3	AUTO LUBE
13	RLY13-3,6	RLY13-4,5	CB106/Y05.4	CHIP SCREW(A) CW.
14	RLY14-3,6	RLY14-4,5	CB106/Y05.5	CHIP SCREW(A) CCW.
15	RLY15-3,5	RLY15-4,5	CB106/Y05.6	MAGAZINE ON/CW.
16	RLY16-3,6	RLY16-4,5	CB106/Y05.7	MAGAZINE CCW.
17	RLY17-3,6	RLY17-4,5	CB105/Y02.0	MAGAZINE RIGHT
18	RLY18-3,6	RLY18-4,5	CB105/Y02.1	MAGAZINE DOWN
19	RLY19-3,6	RLY19-4,5	CB105/Y02.2	SUCK MOTOR
20	RLY20-3,6	RLY20-4,5	CB105/Y02.3	CTS. MOTOR

Fuente: [30]

Los relés que contienen la tabla anterior pertenecen a la placa de relevos de entradas y salidas misceláneas. En la Figura 6.7 es posible observar una relación de esta placa en el plano eléctrico del manual y la placa física en el tablero de control, indicando en color rojo la ubicación de los relés y su conexión a los bornes. Posteriormente se revisa el plano eléctrico Figura 6.8, denominado señales de salida de área de control, para conocer la ruta eléctrica correspondiente a las señales de las funciones M40 y M41 estableciendo así su terminal y alimentación correcta.

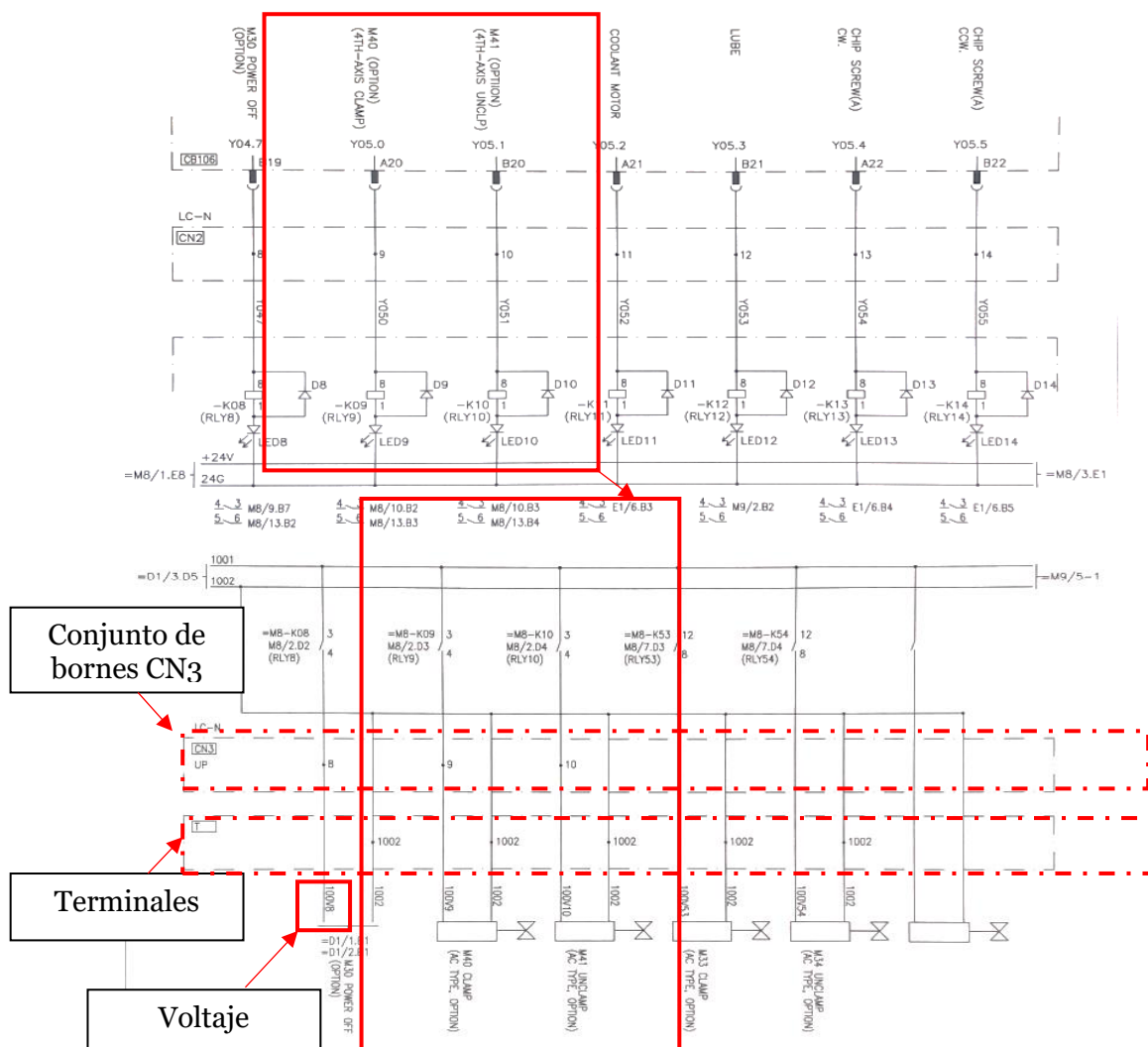
Figura 6.7. Diseño de placa de relevos de entradas y salidas.



Fuente: [30]

La interpretación del plano eléctrico es importante para lograr una conexión correcta y segura, como se observa en la Figura 6.8 existe una simbología que permite entender la ruta eléctrica de las señales. Se interpreta de esta simbología que el conector que se dirige al diagrama del relé está conectado a una fuente de 24 VCC en la placa de señales de entradas y salidas, continuando con la línea del plano hasta una terminal identificada con el número 1002 en la regla de borne alimentada con 110 VCA. Con los parámetros definidos se culmina el proceso de análisis de centro de mecanizado Leadwell V20i donde se identificó como será el soporte de la antorcha de soldadura y de donde serán intervenidas las señales de las funciones M40 y M41.

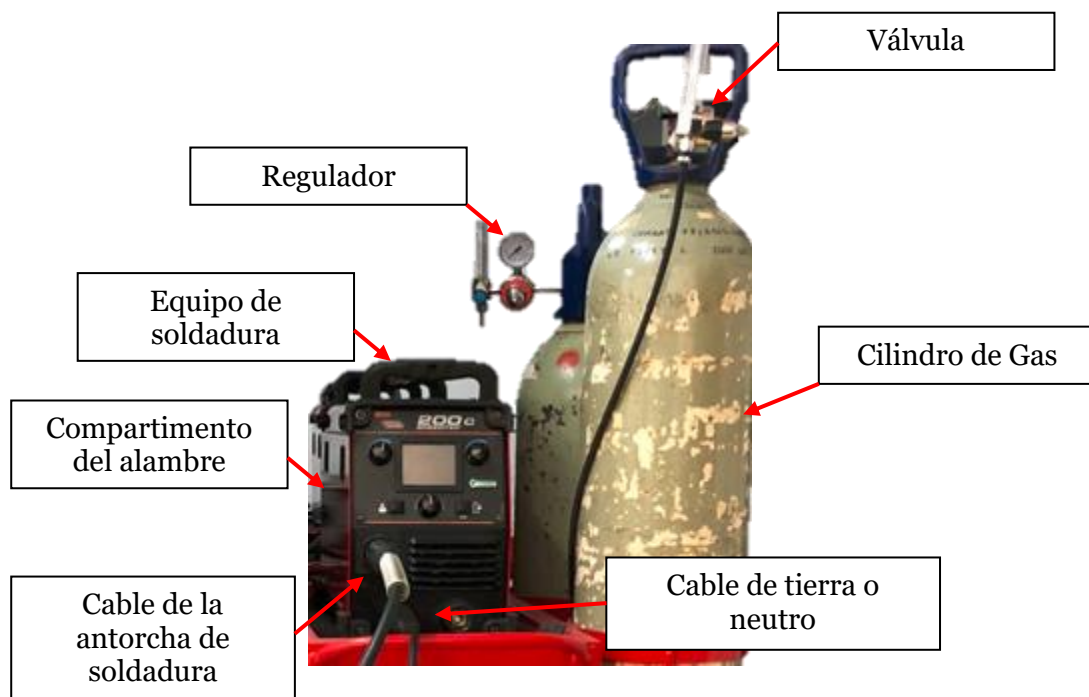
Figura 6.8 Plano eléctrico de señales de salida de área de control.



Fuente: [30]

Una vez conocidas las partes a intervenir del centro de mecanizado Leadwell V20i, se continua con el equipo de soldadura de referencia Lincoln Electric SPEEDTEC 200C. Esta es una unidad multiprocesos que ofrece modos de soldadura con Electrodo, GMAW o TIG está conectada a una alimentación monofásica de 220V. Para la técnica WAAM se implementa la antorcha de soldadura de GMAW dependiendo el gas a usar ya que en MIG la soldadura queda protegida de la atmósfera por un gas inerte, mientras que en la soldadura MAG queda protegida por un gas activo. En la Figura 6.9 se observan las partes del equipo de soldadura usado para el proyecto.

Figura 6.9 Partes del equipo de soldadura.



Fuente: Autor.

En la anterior Figura se observa la válvula del cilindro que permite el paso del flujo de gas, el elemento de regulación del flujo (regulador), el equipo de soldadura que contiene al lado derecho el compartimiento del rollo de alambre de soldadura, la conexión de la antorcha de soldadura GMAW y la conexión de la puesta a tierra.

El elemento a intervenir del equipo es la antorcha de soldadura ya que en ella se encuentra el pulsador que permite el paso del alambre para generar arco eléctrico, su estado inicial se observa en la Figura 6.10. Teniendo en cuenta que la intención es crear automatización en el proceso de manufactura aditiva, se interviene el pulsador quedando inactivo y conectando la señal directa desde el relé que controla las funciones M40 Y M41.

Figura 6.10 Antorcha de soldadura.



Fuente: Autor.

En la anterior imagen se observa la conexión inicial de la antorcha de soldadura donde las dos terminales van directamente al pulsador.

Teniendo en cuenta el estudio de los elementos a intervenir para la conexión eléctrica del centro de mecanizado Leadwell V20i, los cuales son la cabina de control, en específico la tarjeta de relevos de entradas y salidas, la regla de borne y el eje Z y en el equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C la antorcha de soldadura, se da paso a la instalación de la conexión eléctrica entre maquinas.

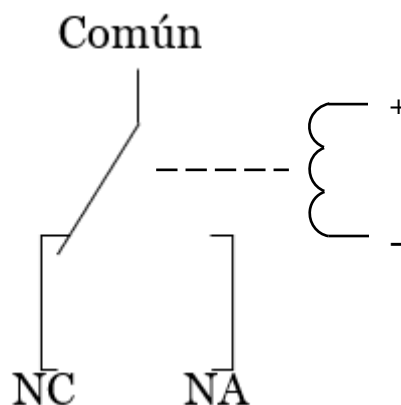


## 6.2. Adecuación de la conexión eléctrica.

Para la conexión eléctrica es necesario contar con un elemento para comandar un dispositivo que realice el papel de intermediario para regular las tensiones de entrada y salida de diferentes elementos. En este caso la placa de relevos de entradas y salidas alimentada con una tensión de 24 V y una terminal con una tensión de 110V. Para esto se usará un relé electromagnético de 24 V que comande un contacto con una bobina de 110V; y a su vez el contacto comande la función M40 y M41.

El relé electromagnético es un interruptor que cambia de estado sus contactos por la acción de un electroimán [32]. Se caracterizan por tener contactos inversores como se muestra en la Figura 6.11 el contacto normalmente abierto (NA) y normalmente cerrado (NC) con un punto en común. Cuando se alimenta la bobina el contacto cambia de estado donde abre el NC y cierra el NA.

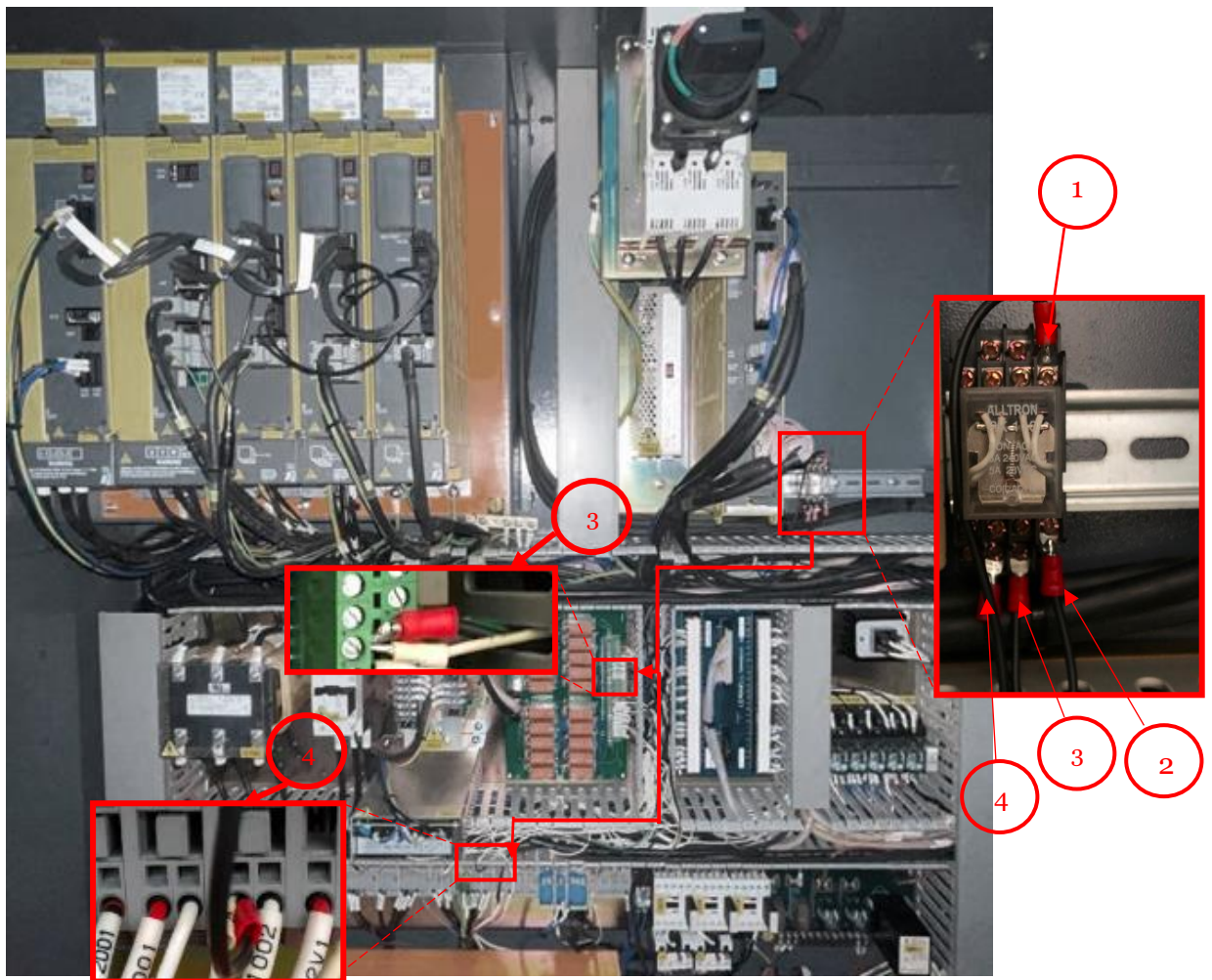
Figura 6.11. Diagrama de relé electromagnético



Fuente: [32]

Para ubicar el relé electromagnético en el tablero de control se instala un riel Din y sobre él, la base del relé que es denominada zócalo donde se realizará el cableado del relé en sus bornes. Como se observa en la Figura 6.12 el relé electromagnético tiene cuatro contactos los cuales solo se usarán dos de ellos, la conexión queda de la siguiente manera: 1) Activación antorcha de soldadura, 2) Desactivación antorcha de soldadura, 3) Señal tarjeta de entradas y salidas, 4) Terminal de la señal.

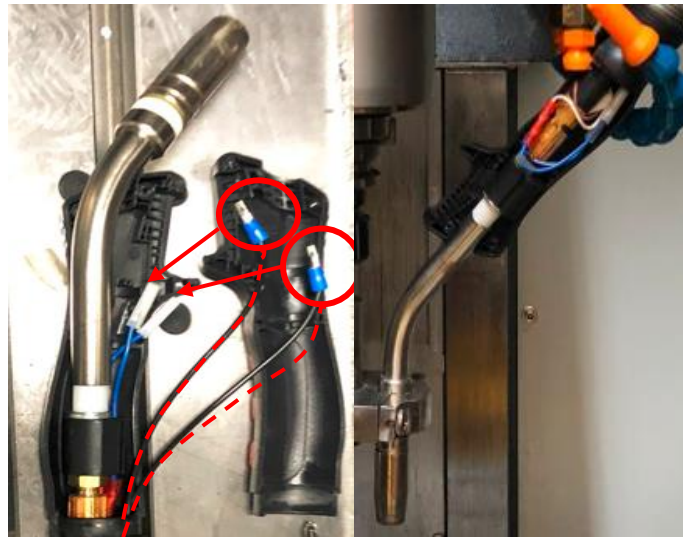
Figura 6.12 Antorcha de soldadura.



Fuente: Autor.

Para asegurar la correcta conexión se implementan puntas tipo tenedor para los bornes del relé y tipo espada para las terminales, soldadas con estaño para evitar falso contacto. Luego de la conexión del relé con la placa de entradas y salidas y la terminal en la regla de borne en el tablero de control, se deben conectar las terminales correspondientes a la antorcha de soldadura que van desde el contacto del relé electromagnético como se observa en la Figura 6.13.

Figura 6.13 Antorcha de soldadura.



Fuente: Autor.

Con lo anterior se cumple con el objetivo del capítulo de obtener conexión entre el centro de mecanizado Leadwell V20i y el equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C. Para efectuar de manera automática según el código NC las funciones M40 y M41 para proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco, como se observa en la Figura 6.14. Para la verificación, validación del simulador y conexión eléctrica se realizan pruebas físicas como se evidencia en el capítulo 7.

Figura 6.14 Montaje para proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco.



Fuente: Autor.

Página dejada en blanco intencionalmente

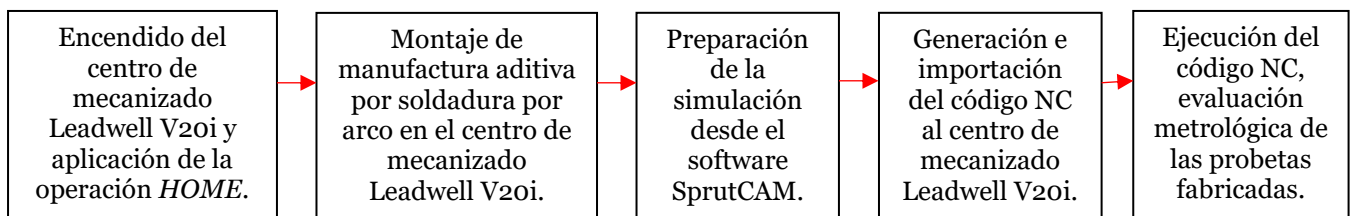
# Capítulo 7

## Pruebas Físicas

El objetivo de este capítulo es verificar y validar por medio de pruebas experimentales el correcto funcionamiento de los procesos anteriormente citados, tales como: el funcionamiento del simulador para el centro de mecanizado Leadwell V20i para ser implementado en manufactura aditiva, la correcta generación del código NC a partir de las simulaciones en el *Software* SprutCAM por el post-procesador cumpliendo con las características de un proceso de aditivo y por último la conexión eléctrica entre el centro de mecanizado Leadwell V20i con el equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C generando así un proceso de manufactura aditiva automático.

Para la puesta a punto del proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco se realiza el flujo de operaciones planteado en la Figura 7.1, iniciando con el encendido y preparación del centro de mecanizado Leadwell V20i para este tipo de proceso de aditivo junto con el equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C. Posteriormente se preparará la simulación con los parámetros respectivos y se ejecutará el código NC en la máquina, finalizando con la evaluación metrológica de las probetas realizadas.

Figura 7.1 Flujo de operación para puesta a punto de proceso WAAM.



Fuente: Autor.

Como se mencionó anteriormente, el primer paso para el proceso de experimentación es el alistamiento del centro de mecanizado Leadwell V20i. Para esto se enciende la máquina y se ejecuta la opción *HOME*, esta opción permite que la maquina esté orientada en sus posiciones programadas, se debe ejecutar

al iniciar la maquina ya que no es un proceso automático, el paso a paso de este proceso se encuentra en el Apéndice G. Posteriormente se posiciona el sustrato sobre el eje lineal X para la deposición del material, el cual está conformado por una placa de acero estructural de diferentes espesores, la placa se encuentra sobre dos ladrillos refractarios para evitar el contacto eléctrico y térmico con el centro de mecanizado Leadwell V20i como se observa en Figura 7.2.

Figura 7.2 Posición del sustrato en el eje lineal X y ubicación del cero de pieza.



Fuente: Autor.

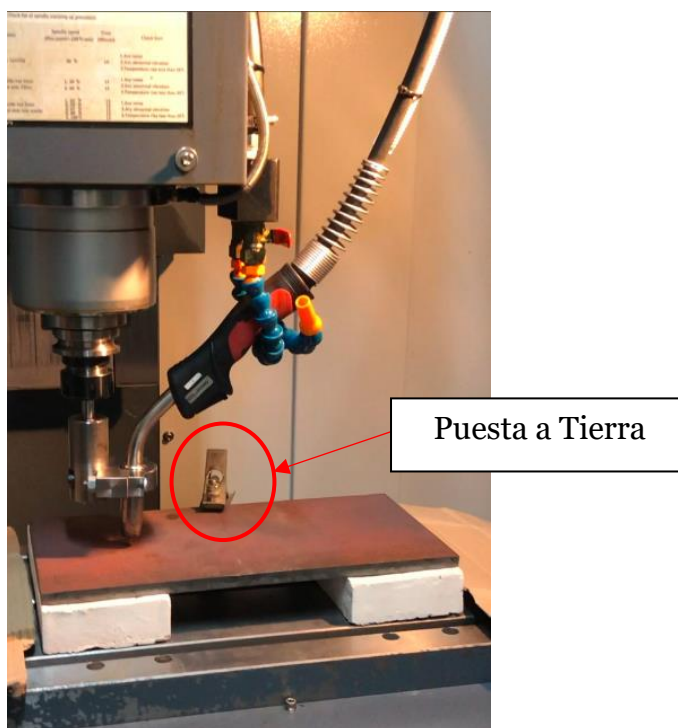
Adicionalmente, se debe posicionar el cero de pieza, hallando en primera instancia la posición del eje Z con la herramienta patrón de la máquina, posteriormente las posiciones de los ejes X y Y se hallan con la herramienta de la antorcha de soldadura y finalmente medir la diferencia en altura de esta en el eje Z, modificando así su medida en la tabla de compensaciones de las herramientas. Para realizar el paso a paso de este proceso se presentan en el Apéndice G el manual correspondiente.

Una vez culminado el proceso de alistamiento del centro de mecanizado Leadwell V20i, se inicia el alistamiento del equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C.



Para esto se enciende y se selecciona el modo de soldadura correspondiente a GMAW, verificando que la válvula de gas esté abierta y tenga material de aporte en el compartimiento del alambre. Posteriormente se conecta el cable de la puesta a tierra en el sustrato para generar arco eléctrico como se observa en la Figura 7.3.

Figura 7.3 Posición de la puesta a tierra.



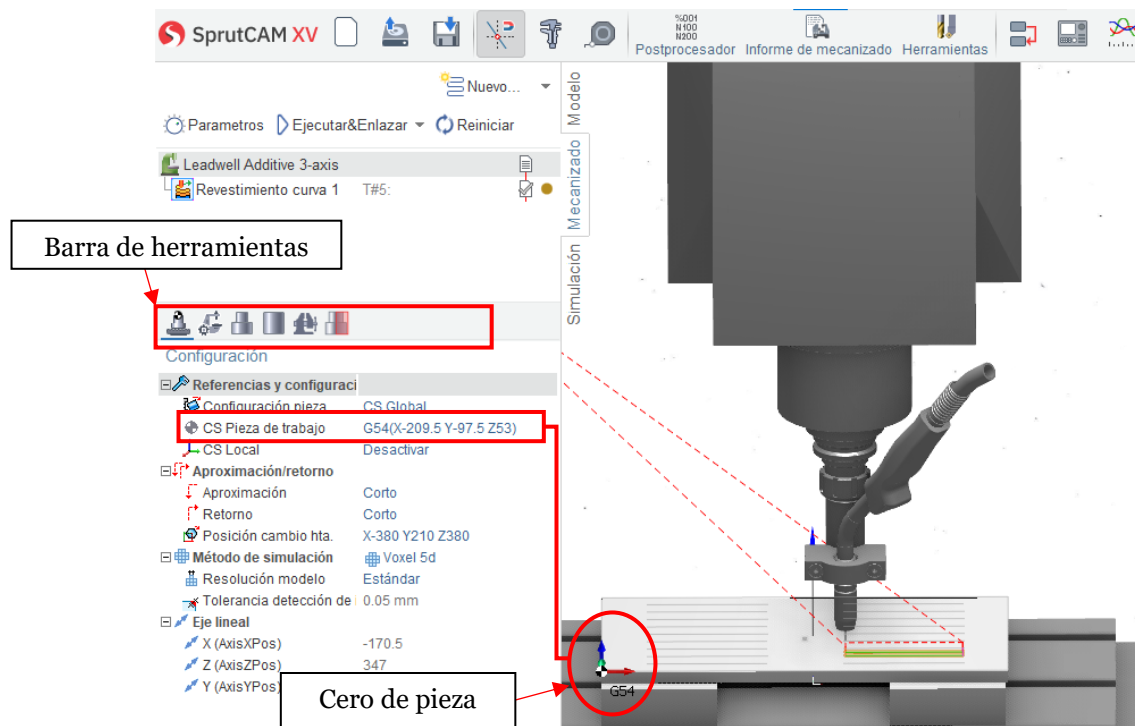
Fuente: Autor.

Terminado el proceso de alistamiento para ambos equipos se da inicio al proceso de simulación y post-procesamiento en el *software* SprutCAM de cada ejercicio desarrollado en el capítulo 5. Iniciando con el ejercicio denominado *Avances*, el cual tiene como propósito realizar cordones de soldadura variando el avance de trabajo y de esta manera determinar el resultado más favorable para poder implementar el parámetro en ejercicios posteriores.

En la Figura 7.4 se observa como primer paso el revestimiento de curva a realizar en el ejercicio, el cual se importó y se creó la trayectoria con el proceso indicado en el capítulo 5. Al iniciar una simulación se debe posicionar el cero de pieza en el *software* usando la opción de *configuración* en la barra de herramientas. Para que exista coherencia entre el simulador y la máquina se debe posicionar el cero

de pieza sobre el sustrato virtual de la misma manera como se ubicó en el sustrato de la máquina.

Figura 7.4 Parámetros de la máquina.



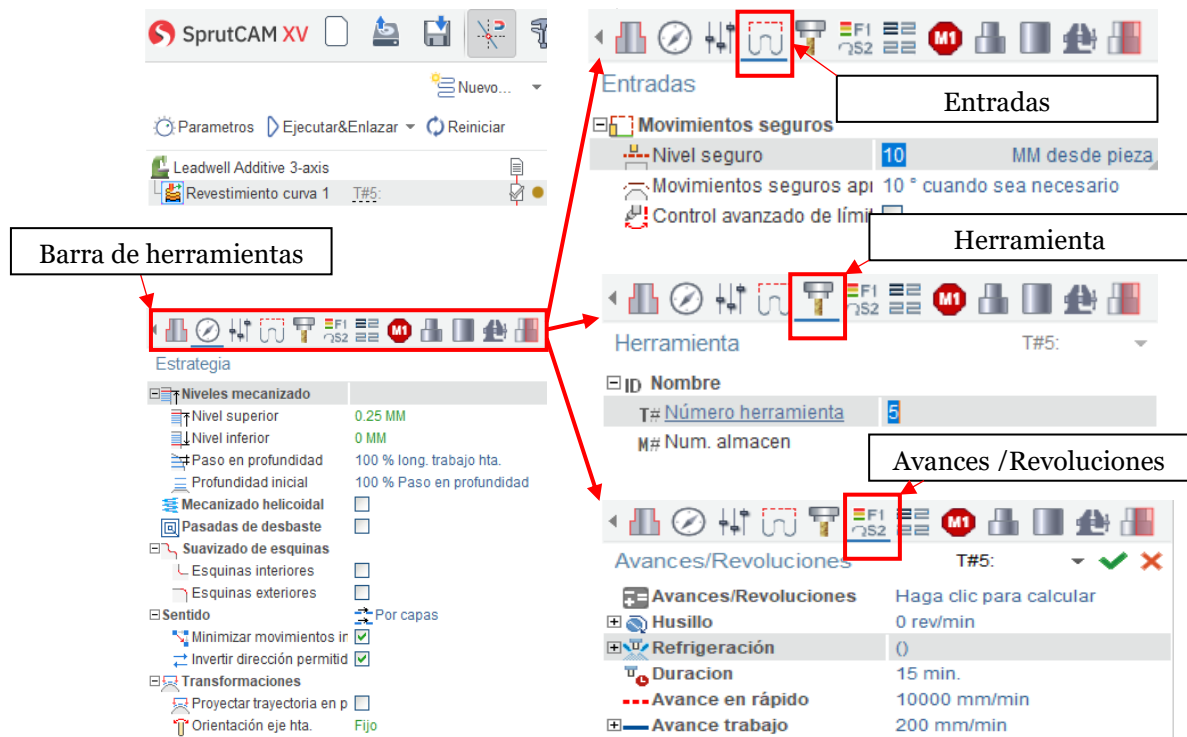
Fuente: Autor.

Una vez posicionado el cero de pieza se deben ajustar los parámetros de la simulación. Para esto se selecciona sobre revestimiento de curva y esta generará una barra de herramientas, como se observa en la Figura 7.5. Algunos de los parámetros a modificar son:

1. Los niveles de mecanizado en la opción de *Estrategia*, estos serán los límites inferior y superior del aporte de material.
2. Movimientos seguros en la opción de *Entradas*, este será el indicador de llegada para movimientos rápidos.
3. Número de herramienta en la opción de *Herramientas*, ya que la antorcha de soldadura se ubica en la posición 5, esta se debe seleccionar para evitar cambios erróneos de herramienta durante el proceso.
4. En la opción de *Avances/Revoluciones* se modifican parámetros como: valor de las revoluciones del husillo que serán igual a cero (0) rev/min, adicionalmente se cancelan las funciones de refrigeración por seguridad y finalmente el parámetro de avance de trabajo.



Figura 7.5 Parámetros de la simulación



Fuente: Autor.

El parámetro de *avance de trabajo* se cambiará desde el *software* SprutCAM en cada cordón de soldadura a realizar durante el ejercicio. Además, el rango de velocidad de alimentación de hilo (WFS) y la tensión (V) serán modificados desde el equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C y por defecto la corriente (A) variará ya que son dependientes con la tensión (V).

Para realizar las pruebas experimentales se tendrán en cuenta condiciones definidas por el proveedor del equipo de soldadura como se observa en la Tabla 7.1. que especifica el diámetro de hilo, corriente, tensión, velocidad de alimentación de hilo, gas de protección y caudal, estos parámetros corresponden al material de la placa a usar en el sustrato. Al finalizar las pruebas físicas se pretende llegar a valores cercanos a los especificados en las condiciones del proveedor.

Tabla 7.1 Condiciones de soldadura especificados en el manual.

Uso típico de gas para equipos MIG/MAG:

Tipo de material	Diámetro del hilo [mm]	DC electrodo positivo		Alimentación del hilo [m/min]	Gas de protección	Caudal de Gas [l/min]
		Corriente [A]	Tensión [V]			
Carbono, acero de baja aleación	0,9 ÷ 1,1	95 ÷ 200	18 ÷ 22	3,5 – 6,5	Ar 75%, CO <sub>2</sub> 25%	12
Aluminio	0,8 ÷ 1,6	90 ÷ 240	18 ÷ 26	5,5 – 9,5	Argón	14 ÷ 19
Acero inoxidable austenítico	0,8 ÷ 1,6	85 ÷ 300	21 ÷ 28	3 - 7	Ar 98%, O <sub>2</sub> 2% / He 90%, Ar 7,5% CO <sub>2</sub> 2,5%	14 ÷ 16
Aleación de cobre	0,9 ÷ 1,6	175 ÷ 385	23 ÷ 26	6 - 11	Argón	12 ÷ 16
Magnesio	1,6 ÷ 2,4	70 ÷ 335	16 ÷ 26	4 - 15	Argón	24 ÷ 28

Fuente: [32]

Adicional a la información anterior, el manual del equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C especifica unos valores de salida nominal para el proceso a trabajar, en este caso, soldadura por arco bajo gas protector (GMAW). Dependiendo del ciclo de trabajo varían dichos valores, como se observa en la Tabla 7.2, ya que se desea trabajar un ciclo de trabajo completo al 100% la corriente sugerida es de 110 amperios y la tensión es de 19,5 voltios.

Tabla 7.2 Valores salida nominal

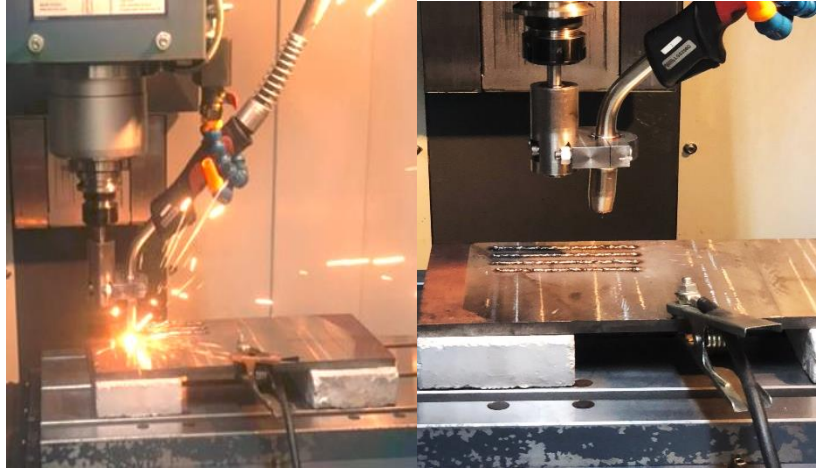
SALIDA NOMINAL				
Equipo de soldadura	Proceso	Ciclo de trabajo %	Corriente de salida (A)	Tensión de salida (Vcc)
200 C	GMAW	100	110	19,5
		25	200	24

Fuente: [33]

Una vez modificados los parámetros correspondientes a la simulación y conociendo las condiciones de soldadura, se debe post-procesar el código NC desde el *software* SprutCAM para ser importado al centro de mecanizado Leadwell V20i por medio del puerto USB. El manual ubicado en el Apéndice F contiene el paso a paso del proceso de importación y ejecución del código NC al centro de mecanizado Leadwell V20i. Culminado el proceso de importación y ejecución del código NC correspondiente al ejercicio de *Avances*, se realizan pruebas iniciales en vacío para verificar que la máquina opere sin colisiones ni errores. Terminada la prueba en vacío se da paso a la primera impresión por

soldadura por arco como se muestra en la Figura 7.6, evidenciando el primer grupo de cordones de soldadura.

Figura 7.6 Impresión ejercicio de *Avances*



Fuente: Autor.

Al finalizar el código NC del ejercicio la herramienta se ubica en la posición de nivel seguro dejando de hacer arco eléctrico. En la Tabla 7.3 se presentan los valores tomados de velocidad de aporte de hilo, avance de trabajo, tensión y corriente. Estos valores se implementaron en cinco grupos de cordones de soldadura para el primer ejercicio experimental denominado *Avances*.

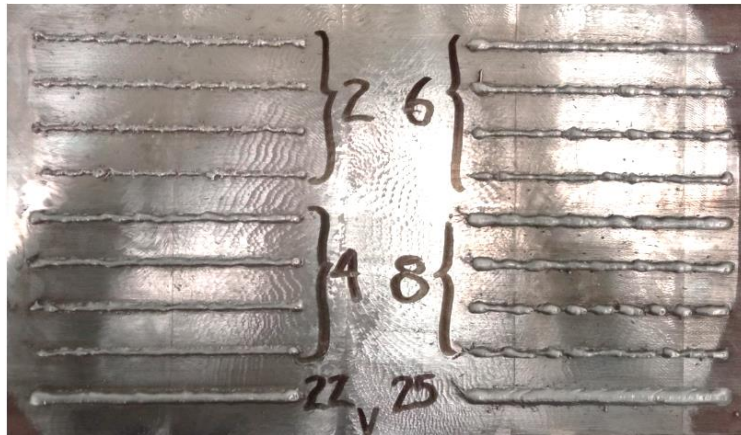
Tabla 7.3 Valores del ejercicio *Avances*.

WFS(m/min)	Avance de trabajo (mm/min)	Tensión (V)	Corriente (A)
2.0	250	29,9	27-40
	350		
	450		
	550		
4.0	250	29,9	50-63
	350		
	450		
	550		
6.0	250	18,5-29,9	70-90
	350		
	450		
	550		
8.0	250	26,7	100-118
	350	29,9	87-109
	450		
	550		
6.0	200	22	79-91
	250	25,9	83-100

Fuente: Autor.

Cada grupo tiene una velocidad de alimentación de hilo diferente, además cuatro de ellos están formados por cuatro cordones de soldadura donde varía su avance de trabajo y el quinto grupo está formado por dos cordones de soldadura variando su tensión en específico. La Figura 7.7 presenta los resultados de cada cordón de soldadura variando los parámetros como se indicó anteriormente.

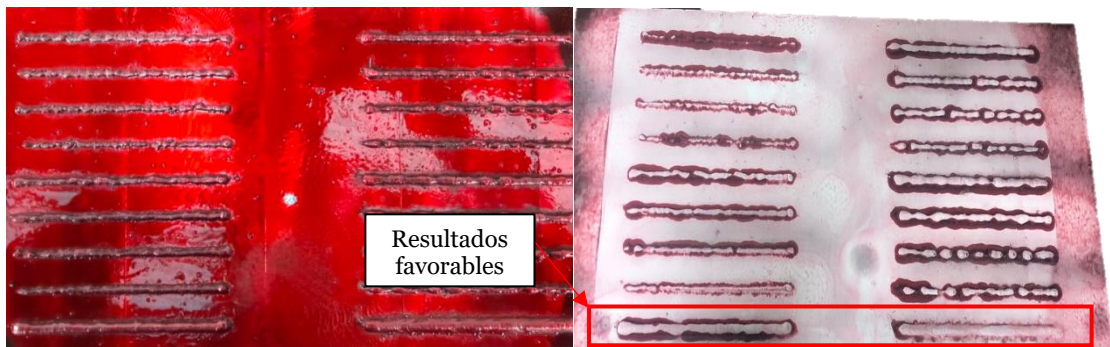
Figura 7.7 Resultado del primer ejercicio



Fuente: Autor.

Para evaluar la calidad del cordón de soldadura se implementa un ensayo no destructivo denominado líquidos penetrantes que permite detectar imperfecciones superficiales no porosas en este caso para materiales metálicos[35]. Este ensayo consiste en la aplicación de un líquido que tiene un alto grado de humectabilidad sobre una superficie y por efecto de capilaridad este penetrará en las discontinuidades de dicha superficie, como se observa en la Figura 7.8.

Figura 7.8 Ensayo de líquidos penetrante.

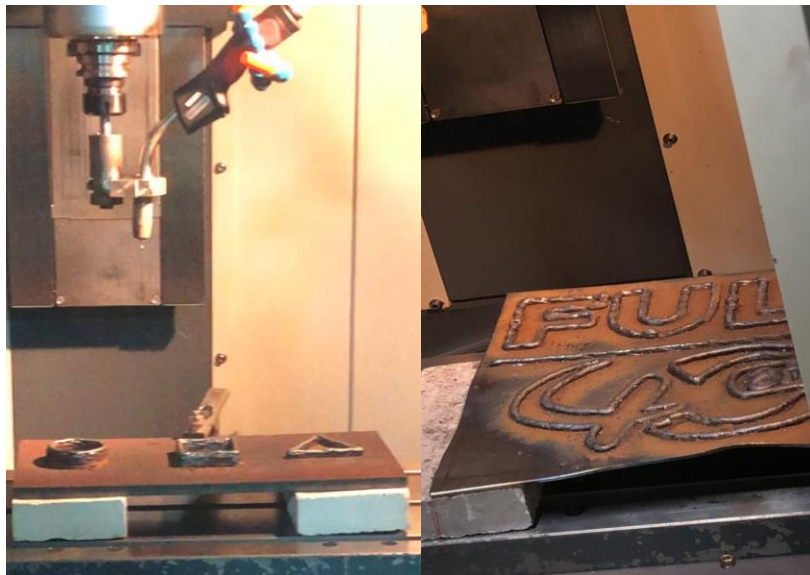


Fuente: Autor.

En el proceso anterior se evidencia una mejor compatibilidad del cordón de soldadura con la superficie en los ensayos del grupo cinco. Teniendo como parámetros de tensión 22 y 25 voltios, una corriente no superior a 100 amperios, un avance de trabajo de 200 y 250 mm/min y una velocidad de alimentación de hilo de 6.0 m/min. Estos cordones presentan continuidad y no hay mayor penetración de los líquidos del ensayo no destructivo, cumpliendo con las condiciones de soldadura planteadas por el proveedor del equipo de soldadura.

Determinando los parámetros anteriores se continua con las pruebas experimentales teniendo en cuenta dichos valores. Se presentan cuatro ejercicios adicionales que constan de un círculo, un cuadrado, un triángulo y un logo conmemorando los 40 años de la Fundación de la Institución. Los cuales se importaron y se crearon las trayectorias con el proceso evidenciado en el capítulo 5, además se genera el código NC, se importa y se ejecuta siguiendo los pasos de los anexos YU. En la Figura 7.9 se observa los resultados de los ejercicios respectivamente.

Figura 7.9 Resultado pruebas experimentales.



Fuente: Autor.

Una vez finalizado cada ejercicio experimental se realizan actividades posteriores a la impresión como se observa en la Figura 7.10. Donde se toma la temperatura para llevar un control de dichos valores que obtienen las probetas luego del proceso, limpieza de superficie para evitar la inclusión de escoria de soldadura



que afecte la uniformidad de las pruebas y la limpieza de la boquilla de la antorcha de soldadura evitando la acumulación de material dentro de la misma.

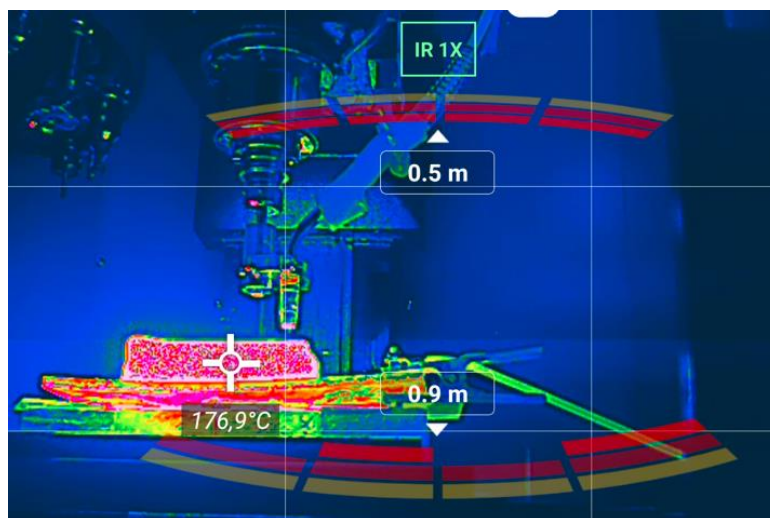
Figura 7.10 Tareas posteriores a la impresión.



Fuente: Autor.

Con el fin de reforzar la toma de datos y análisis se implementa un ensayo no destructivo adicional nombrado termografía infrarroja (IRT), el cual la energía térmica radiante y su distribución es la base para la medición. Esto con el fin de generar un mapa de diferencias de intensidad de radiación y poder conocer si existe un alto rango de esta entre el sustrato donde está siendo depositado el material de aporte y el centro de mecanizado Leadwell V20i. Con esto es posible conocer la temperatura que alcanza la probeta justo después de terminar el proceso de impresión. Como se muestra en la Figura 7.11.

Figura 7.11 Ensayo de termografía.

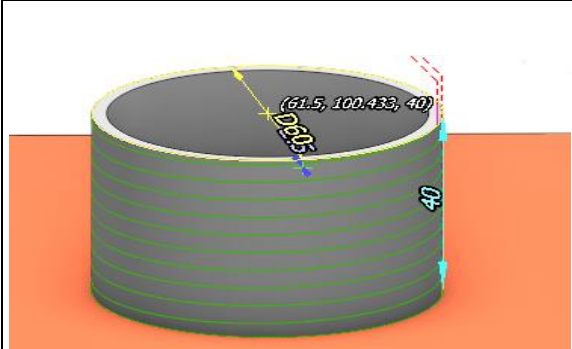

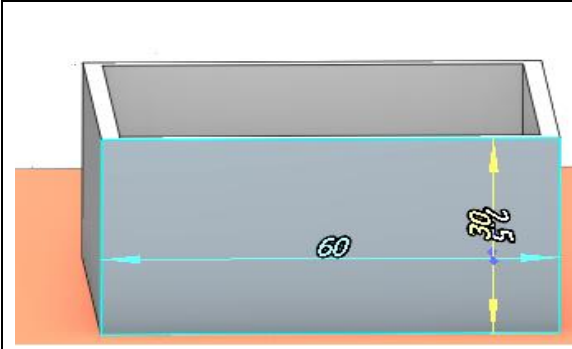
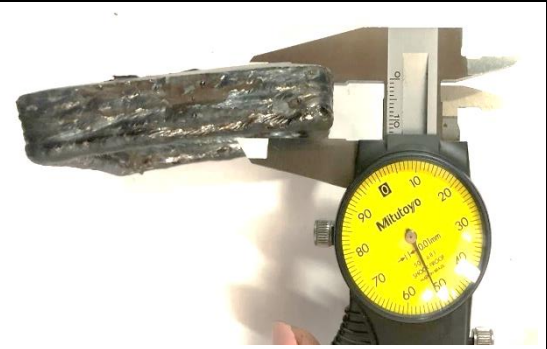


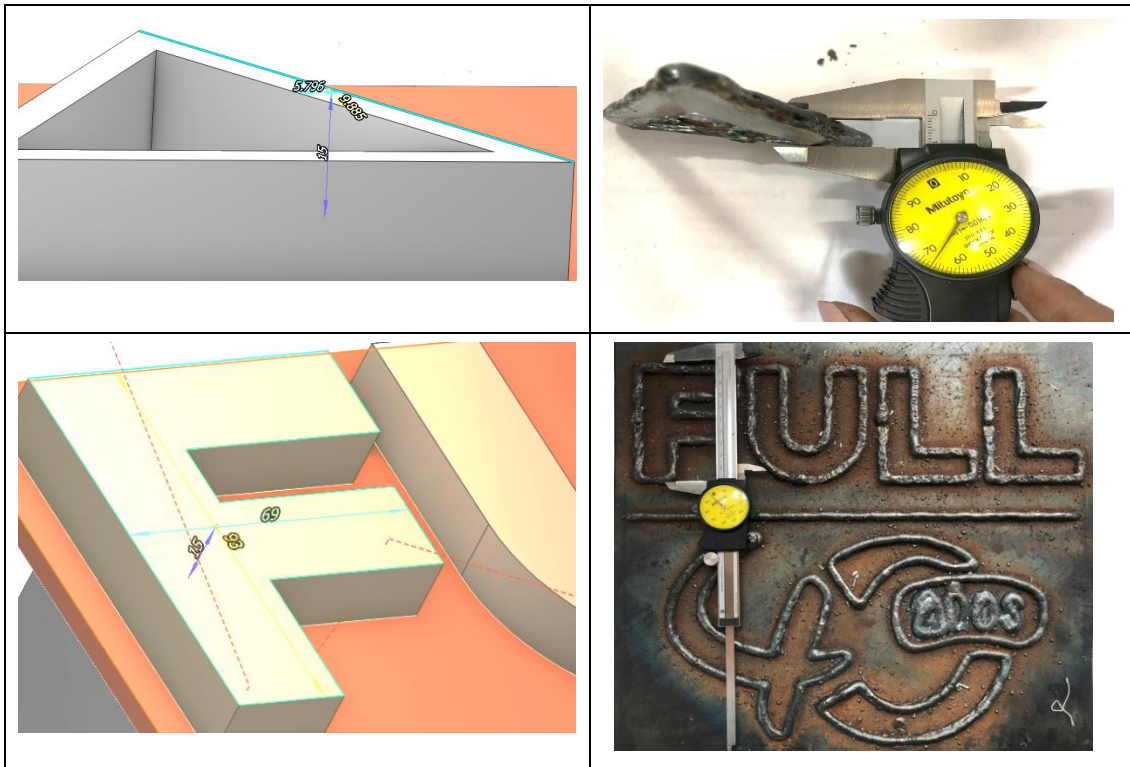
Fuente: Autor.

La ejecución del ensayo no destructivo mostrado anteriormente se realiza con un *drone Mavic 2 Enterprise Advanced* que posee una cámara térmica M2EA con un rango de escena-40 °C a 550 °C [36]. En el ensayo termográfico se evidencio un rango de temperatura en las probetas luego de la impresión de 177 °C a 250°C. Adicionalmente se observa que lo ladrillos refractarios aíslan por completo la temperatura del sustrato al centro de mecanizado Leadwell V20i protegiendo de esta manera la máquina.

Al culminar las pruebas experimentales se genera un tiempo de enfriamiento a temperatura ambiente de las probetas. Posteriormente se retiran las probetas de la superficie de la placa usando como herramienta una pulidora. Finalizado el proceso de corte se genera un procedimiento de metrología para las probetas, usando como herramienta un calibrador analógico de caratula como se observa Tabla 7.4 comparando con el diseño CAD importado al software SprutCAM.

Tabla 7.4 Ensayo Metrológico

Medidas de diseño	Medidas de las probetas
	
	



Fuente: Autor.

Una vez finalizado el ensayo metrológico de las probetas se evidencia una disminución de las medidas diseñadas en el CAD de cada ejercicio con respecto a cada probeta. Esto se debe a la fundición que existe entre los cordones ya que al pasar uno sobre otro no hay tiempo de enfriamiento entre ellos a causa de las trayectorias cortas que se trabajaron. Por lo anterior se debe implementar un método de enfriamiento o un tiempo en el proceso para hacer pausas y verificar la temperatura de la probeta para evitar estos casos.

Con lo anterior se cumple el objetivo de verificación y validación del proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco. Ya que al finalizar las pruebas experimentales se evidenció un correcto funcionamiento del simulador y post-procesador en la ejecución de los ejercicios trabajados. Además, la activación y desactivación del aporte de material no presentó errores durante el proceso de impresión. Finalmente se desarrolló un simulador de manufactura aditiva por soldadura por arco (WAAM) para el centro de mecanizado Leadwell V20i funcional.



## Capítulo 8

### Resultados y Discusión

Este trabajo de grado planteó el desarrollo para la puesta a punto del proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco en la Fundación Universitaria Los Libertadores logrando la unificación de un centro de mecanizado Leadwell V20i con un equipo de soldadura Lincoln SPEEDTEC 200C. Este trabajo inició con el estudio del estado de arte en los temas de interés, de esta manera adquiriendo los soportes necesarios para iniciar con la ejecución del proceso. En principio se usó uno de los complementos del *software* SprutCAM denominado Machine Maker donde se pudo identificar y determinar la cinemática de la máquina del centro de mecanizado Leadwell V20i, generando un simulador y modificando su código XML para que fuera compatible con el proceso de manufactura aditiva. Posteriormente se importó el simulador de la máquina generado desde el *software* SprutCAM donde por medio de simulaciones se evidenció el estado del post-procesador y se procedió a modificarlo con ayuda del complemento del *software* llamado Generador de Post procesadores, para así poder cumplir con las necesidades de un proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco. Finalmente se realiza la conexión eléctrica entre ambos equipos, este proceso permitió tener una máquina de control numérico computarizado conectada a un equipo de soldadura que brinda aporte de material automático. Los anteriores procedimientos fueron verificados por medio de pruebas experimentales, donde se permitió ver un resultado satisfactorio de aporte de material en las probetas realizadas.

Los principales aportes del trabajo de grado pueden ser resumidos en los siguientes puntos:

1. Se ha desarrollado un simulador útil para el proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco que permite crear simulaciones con los parámetros deseados teniendo una vista preliminar a la impresión.
2. Se ha realizado la integración de un equipo de soldadura Lincoln SPEEDTECCC 200C al centro de mecanizado Leadwell V20i y todo a lo

- que conlleva a nivel de control.
3. Se ha desarrollado una metodología de trabajo que permite la fabricación automática de piezas mediante el proceso WAAM.
  4. Se ha implementado el proceso WAAM llegando a fabricar piezas de forma automática, logrando una penetración de soldadura al sustrato en la primera capa de forma favorable, cumpliendo con los parámetros establecidos por el proveedor del equipo de soldadura.

Se plantean a continuación líneas futuras de investigación teniendo en cuenta que: lo trabajado en el presente proyecto se encuentra en la frontera del conocimiento y la implementación del montaje para la ejecución de la tecnología WAAM en la Fundación Universitaria Los Libertadores no se había trabajado anteriormente, dando como punto de partida para trabajos futuros los siguientes puntos a considerar:

1. Controlar la temperatura en el sustrato, teniendo en cuenta que en los experimentos trabajados se flectaron considerablemente los sustratos donde se depositó el material de aporte. Se propone implementar un sistema de refrigeración para el proceso y un sistema de sujeción para el sustrato.
2. Explorar diferentes estrategias de deposición de material, que puedan ayudar a reducir tiempos de fabricación, así como el estudio del mecanizado para las probetas fabricadas con la técnica WAAM.
3. Controlar los parámetros del proceso de aporte de metal por soldadura por arco garantizando estabilidad dimensional, presentación de acabado y propiedades mecánicas. Para tener un acercamiento más profundo del proceso WAAM.

# Capítulo 9

## Conclusiones

Este proyecto de grado generado a partir de la necesidad del cambio de metodología de aprendizaje de los procesos de manufactura en la Fundación Universitaria Los Libertadores, realiza una propuesta para la implementación de un simulador para manufactura aditiva. Por lo anterior, se presenta como se describe en el objetivo general el desarrollo de un sistema de simulación y verificación virtual del centro de mecanizado *Leadwell V20i* para manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM.

Para dar cumplimiento a lo anterior se produjo un modelo virtual del centro de mecanizado *Leadwell V20i* para implementar el proceso de manufactura aditiva por soldadura por arco, presentado en el capítulo 4 - Virtualización del centro de mecanizado *Leadwell V20i* para manufactura aditiva por soldadura por arco WAAM.

Se generó el ajuste del post procesador y fue validado el modelo con simulaciones para generar el código NC basado en el centro de mecanizado vertical *Leadwell V20i* para manufactura aditiva por soldadura por arco, presentado en el capítulo 5 - Adecuación del post-procesador para manufactura aditiva implementando el modelo virtual del centro de mecanizado *Leadwell V20i*.

Se realizó la integración del centro de mecanizado *Leadwell V20i* y el equipo de soldadura *Lincoln SPEEDTEC 200C* generando un proceso automático, presentado en el capítulo 6 - Integración del centro de mecanizado *Leadwell V20i* al equipo de soldadura *Lincoln SPEEDTEC 200C*.

Se validó y corroboró la eficacia del simulador y post-procesador con pruebas físicas presentado en el capítulo 7 - Pruebas físicas. para así dar cumplimiento al último objetivo específico.

Página dejada en blanco intencionalmente

# Capítulo 10

## Referencias

- [1] ATIGA, *Oportunidades industria 4.0 en Galicia* (Estado del arte de fabricación aditiva). <https://www.atiga.es/web/wp-content/uploads/2017/03/Estado-del-Arte-Fabricaci%C3%B3n-Aditiva.pdf>, 2017.
- [2] S. L. U. Fronius España, "IMPRESIÓN 3D - FABRICACIÓN ADITIVA," ed. <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/259452-Fabricacion-aditiva-mediante-WAAM-impresion-3D-en-metal-rentable.html>, 2020.
- [3] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, and J. P. Oliveira, "Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)," *Materials*, vol. 12, no. 7, p. 1121, 2019.
- [4] *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*, ASTM, <https://web.mit.edu/2.810/www/files/readings/AdditiveManufacturingTerminology.pdf>, 2013.
- [5] H. Bhadeshia, "Additive manufacturing," vol. 32, ed: Taylor & Francis, 2016, pp. 615-616.
- [6] T. Artaza Orlando, "Desarrollo de la tecnología aditiva PAW para aleaciones aeronáuticas," 2021.
- [7] REPSOL. "Tecnologías disruptivas Avances que nos cambian la vida." (accessed 09/08/2022, 2022).
- [8] A. B. Calvo, M. d. M. E. Escudero, and M. D. Somonte, "Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos," *Lámpsakos*, no. 19, pp. 47-54, 2018.
- [9] S. Ford and M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," *Journal of Cleaner Production*, vol. 137, pp. 1573-1587, 2016/11/20/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.150>.
- [10] Deloitte, "Challenges of additive manufacturing / Why companies don't use additive manufacturing in serial production," [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/operations/Deloitte\\_Challenges\\_of\\_Additive\\_Manufacturing.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/de/Documents/operations/Deloitte_Challenges_of_Additive_Manufacturing.pdf), 2019.
- [11] S. C. Altıparmak, V. A. Yardley, Z. Shi, and J. Lin, "Challenges in additive manufacturing of high-strength aluminium alloys and current developments in hybrid additive manufacturing," *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol. 4, no. 2, pp. 246-261, 2021/06/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.12.004>.
- [12] M. Megahed, H.-W. Mindt, N. N'Dri, H. Duan, and O. Desmaison, "Metal additive-manufacturing process and residual stress modeling," *Integrating Materials and Manufacturing Innovation*, vol. 5, no. 1, pp. 61-93, 2016/12/01 2016, doi: 10.1186/s40192-016-0047-2.
- [13] S. Damgaard. "IMPRESIÓN 3D - FABRICACIÓN ADITIVA." <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/256465-La-fabricacion-aditiva-en-la-guerra-por-el-talento.html> (accessed).
- [14] OWSD. "OWSD National Chapter COLOMBIA." <https://owsd.net/about-owsd/what-owsd> (accessed 2022).
- [15] F. Morales, "Conozca 3 tipos de investigación: Descriptiva, Exploratoria y Explicativa," p. 48
- [16] J. C. C. García, "Tecnología avanzada del diseño y manufactura asistidos por

- computador-CAD/CAM," *Prospectiva*, vol. 4, no. 1, pp. 75-81, 2006.
- [17] S. T. Ltd. "SprutCAM — software CAD/CAM." <https://sprutcam.com/es/sprutcam/> (accessed).
- [18] G. América. "El Post-Procesador para trabajos CNC." <https://genus-america.com/el-post-procesador-compilador-en-maquinados-cnc/> (accessed).
- [19] M. Corporation's. "Introducción a XML." [https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/XML/XML\\_introduction](https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/XML/XML_introduction) (accessed 2022).
- [20] O. Yilmaz and A. A. Ugla, "Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 230, no. 10, pp. 1781-1798, 2016.
- [21] A. Dass and A. Moridi, "State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design," *Coatings*, vol. 9, no. 7, p. 418, 2019.
- [22] B. Ralph, "Method of making decorative articles," 1920. [Online]. Available: <https://patents.google.com/patent/US1533300A/en>
- [23] K. Derekar, "A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium," *Materials science and technology*, vol. 34, no. 8, pp. 895-916, 2018.
- [24] H. Shockey, "Machine for reclaiming worn brake drum," *ACM SIGGRAPH Comput. Graph*, vol. 28, pp. 131-134, 1930.
- [25] Z. Pan, D. Ding, B. Wu, D. Cuiuri, H. Li, and J. Norrish, "Arc welding processes for additive manufacturing: a review," *Transactions on intelligent welding manufacturing*, pp. 3-24, 2018.
- [26] B. Wu *et al.*, "A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 35, pp. 127-139, 2018.
- [27] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire+ arc additive manufacturing," *Materials science and technology*, vol. 32, no. 7, pp. 641-647, 2016.
- [28] LEADWELL OPERATION MANUAL VERTICAL HORIZONTAL FAUNC Oi-SERIES/18i, [www.leadwell.com.tw](http://www.leadwell.com.tw), NO:P2oADEVOO3.
- [29] X. S.A.S. "XMARTPLM S.A.S Colombia." (accessed 2022).
- [30] LEADWELL ELECTRICAL MANUAL V-2oi SERIES DRUM-ATC, [www.leadwell.com.tw](http://www.leadwell.com.tw), NO:PE2oiDo41.
- [31] LEADWELL PARTS LIST V-2oi, [www.leadwell.com.tw](http://www.leadwell.com.tw), NO:PPSV2oi000.
- [32] L. E. Bester. *SPEEDTEC 180C & 200C MANUAL DE INSTRUCCIONES*, [www.lincolnelectric.eu](http://www.lincolnelectric.eu), Jana III Sobieskiego 19A, 58-263 Bielawa, Poland, 2020.
- [33] *SPEEDTEC 180C & 200C* MANUAL DE INSTRUCCIONES, [www.lincolnelectric.eu](http://www.lincolnelectric.eu), Jana III Sobieskiego 19A, 58-263 Bielawa, Poland IM3039 / 02/2013 - REV3, 2013.
- [34] *SPEEDTEC 180C & 200C* MANUAL DE INSTRUCCIONES, [www.lincolnelectric.eu](http://www.lincolnelectric.eu), Jana III Sobieskiego 19A, 58-263 Bielawa, Poland IM3039 / 02/2013 - REV3, 2013.
- [35] R. Echeverria, "Líquidos penetrantes," *UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CAMAHUE, Facultad de Ingeniería, Laboratorio de Ensayos No Destructivos*, p. 70, 2003.
- [36] DJI. "Mavic 2 Enterprise Advanced - Dual Imaging, Reimagined." <https://www.dji.com/mavic-2-enterprise-advanced> (accessed).

## Apéndice A (Plano)

Se incluirá en este Apéndice A, el plano realizado del sistema de sujeción para la antorcha de soldadura.



RESERVA DE AUTOR

# Apéndice B (Manual)

Se incluirá en este Apéndice B, el código XML usado para la elaboración del simulador, describiendo cada línea de código con su respectiva función.

## MANUAL DE DESARROLLO



### Paso 1

Encabezado de programa, se definen elementos habituales de programación.

1.GUID (global unique identifier).

### Online GUID / UUID Generator

How many GUIDs do you want (1-2000):

Format: ☒ Uppercase ☐ Braces ☒ Hyphens

Encoding: ☐ Base64 ☐ RFC 7515 ☐ URL encode

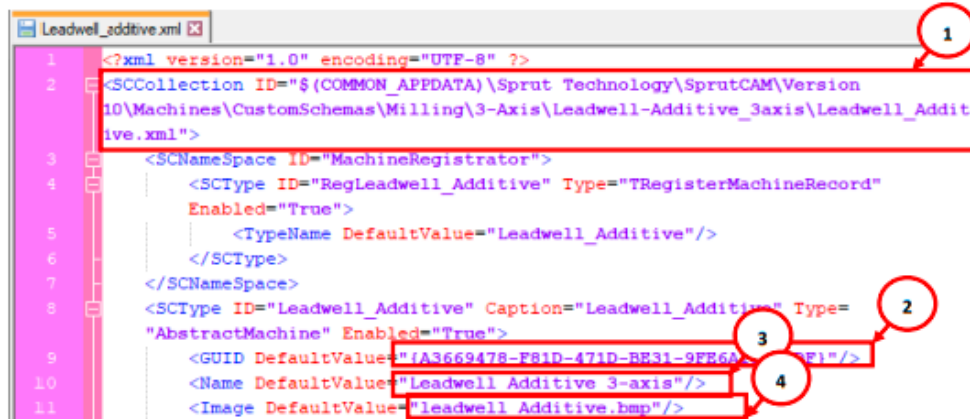
Results:

7DEF9D0-839D-4802-8BFD-B130CD1EA2E9

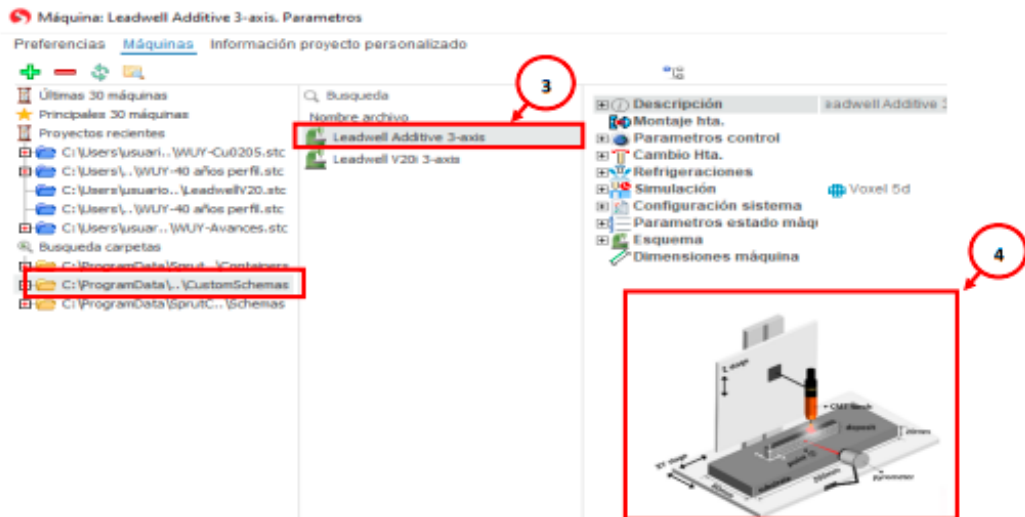
Use these GUIDs at your own risk! No guarantee of their uniqueness or suitability is given or implied.

2.Nombre del simulador en la librería.

3.Imagen representativa en la librería del software.







## Paso 2

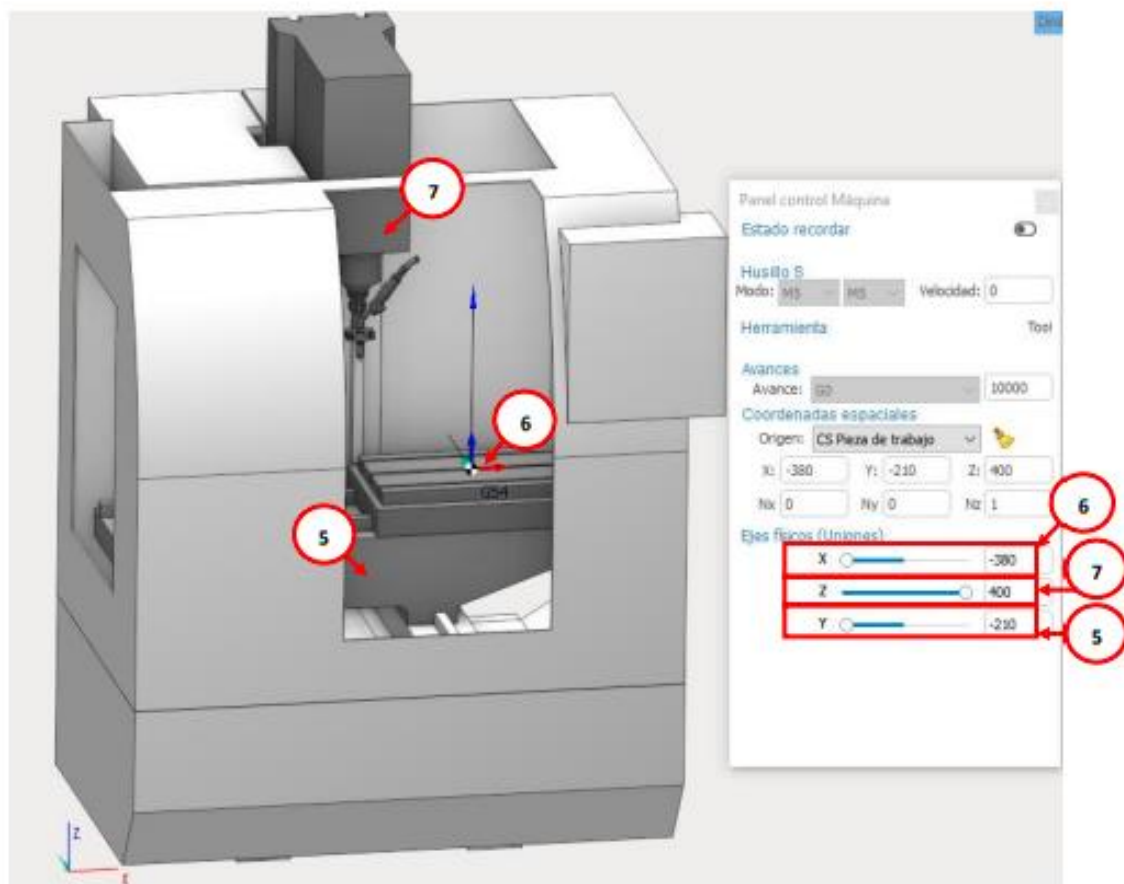
Límites de los ejes de movimiento del simulador.

5. Valores límite de desplazamiento positivos y negativos correspondientes al eje Y, y su definición como eje lineal.
6. Valores límite de desplazamiento positivos y negativos correspondientes al eje X, y su definición como eje lineal.
7. Valores límite de desplazamiento positivos y negativos correspondientes al eje Z, y su definición como eje lineal.

```

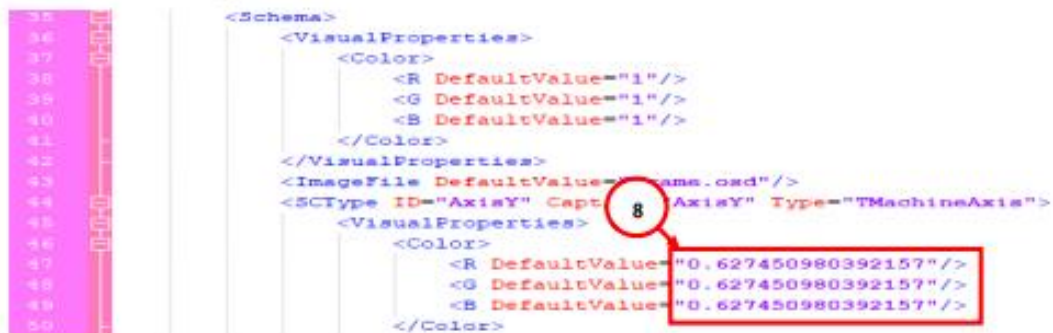
12 <MachineStateParameters>
13   <SCType ID="AxisYPos" Caption="AxisYPos" a=
14     "TMachineStateParameter">
15     <Address DefaultValue="Y"/>
16     <Min DefaultValue="-210"/>
17     <Max DefaultValue="210"/>
18     <InitialValue DefaultValue="210"/>
19     <Group DefaultValue="linearAxis"/>
20   </SCType>
21   <SCType ID="AxisXPos" Caption="AxisXPos" e=
22     "TMachineStateParameter">
23     <Address DefaultValue="X"/>
24     <Min DefaultValue="-380"/>
25     <Max DefaultValue="380"/>
26     <InitialValue DefaultValue="-380"/>
27     <Group DefaultValue="linearAxis"/>
28   </SCType>
29   <SCType ID="AxisZPos" Caption="AxisZPos" =
30     "TMachineStateParameter">
31     <Address DefaultValue="Z"/>
32     <Min DefaultValue="0"/>
33     <Max DefaultValue="400"/>
34     <InitialValue DefaultValue="400"/>
35     <Group DefaultValue="linearAxis"/>
36   </SCType>
37 </MachineStateParameters>

```



### Paso 3

8. Colores seleccionados para simulador.



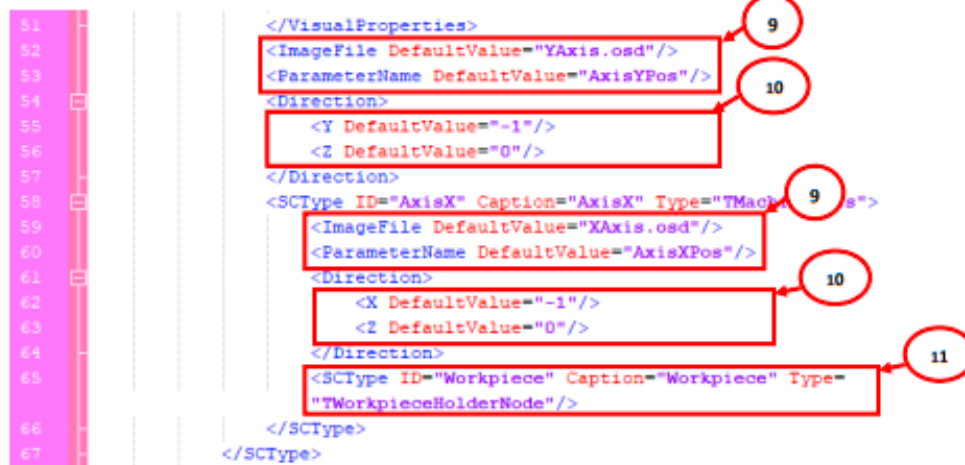
#### Paso 4

9. Asignar las imágenes que corresponden a los movimientos mecánicos de la máquina en eje Y, X y como es nombrado.

10. Dirección de los ejes X, Y, Z.

11. Relación eje X, Y, donde existe la pieza de trabajo.

```
51 </VisualProperties>
52 <ImageFile DefaultValue="YAxis.osd"/>
53 <ParameterName DefaultValue="AxisYPos"/>
54 <Direction>
55 <Y DefaultValue="-1"/>
56 <Z DefaultValue="0"/>
57 </Direction>
58 <SCType ID="AxisX" Caption="AxisX" Type="TMachineAxis">
59 <ImageFile DefaultValue="XAxis.osd"/>
60 <ParameterName DefaultValue="AxisXPos"/>
61 <Direction>
62 <X DefaultValue="-1"/>
63 <Z DefaultValue="0"/>
64 </Direction>
65 <SCType ID="Workpiece" Caption="Workpiece" Type="TWorkpieceHolderNode"/>
66 </SCType>
67 </SCType>
```



#### Paso 5

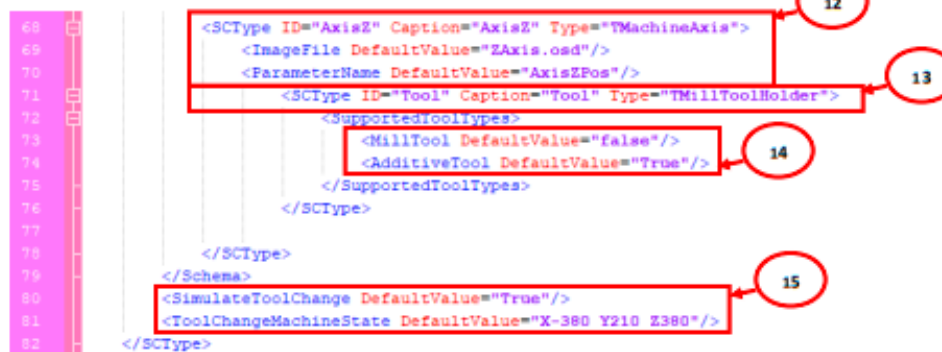
12. Asignar las imágenes que corresponden a los movimientos mecánicos de la máquina en eje Z y como es nombrado.

13. Relación eje Z, como eje portador de la herramienta.

14. Activación módulo de manufactura aditiva del simulador.

15. Posición segura de cambio de herramienta.

```
68 <SCType ID="AxisZ" Caption="AxisZ" Type="TMachineAxis">
69 <ImageFile DefaultValue="ZAxis.osd"/>
70 <ParameterName DefaultValue="AxisZPos"/>
71 <SCType ID="Tool" Caption="Tool" Type="TMillToolHolder">
72 <SupportedToolTypes>
73 <MillTool DefaultValue="false"/>
74 <AdditiveTool DefaultValue="True"/>
75 </SupportedToolTypes>
76 </SCType>
77 </SCType>
78 </Schema>
79 <SimulateToolChange DefaultValue="True"/>
80 <ToolChangeMachineState DefaultValue="X-380 Y210 Z380"/>
81 </SCType>
82 </SCType>
```



# Apéndice C (Manual)

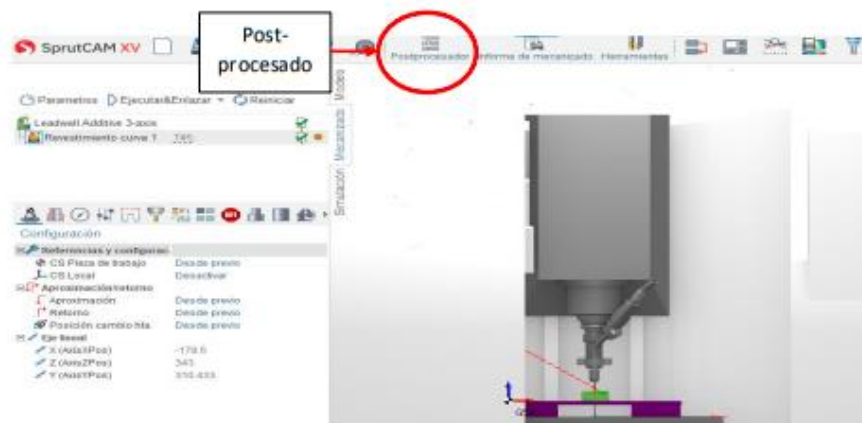
Se incluirá en este Apéndice C, el manual de como generar el código NC desde el software SprutCAM.



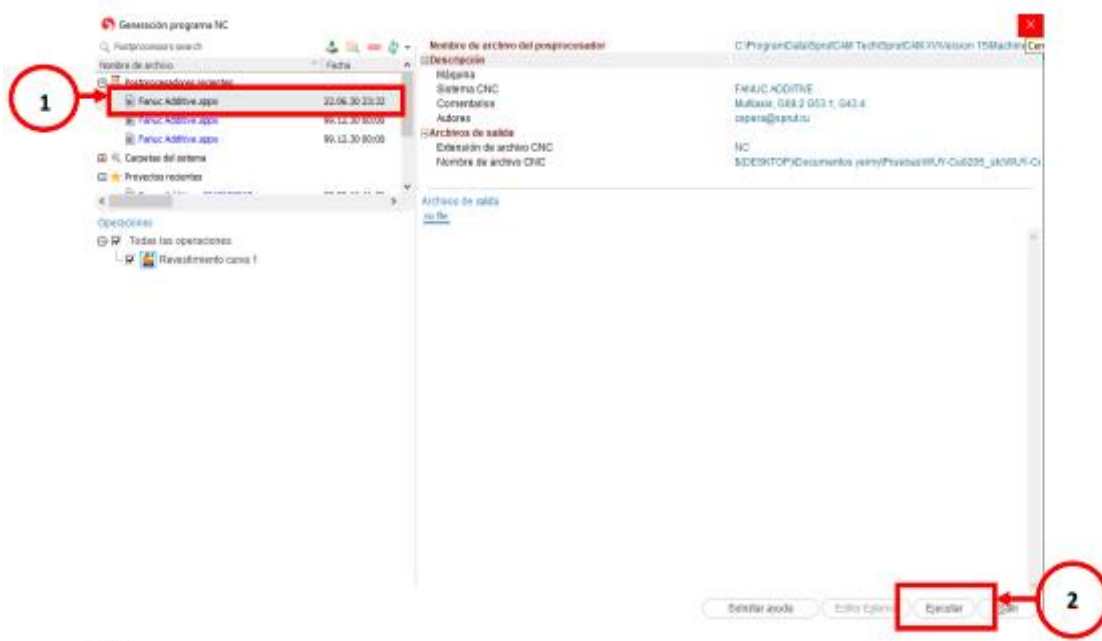
## Manual Usuario POST-PROCESADOR

Para generar programa NC que posteriormente será dirigido a la CNC para hacer el proceso, se deben tener en cuenta los siguientes pasos:

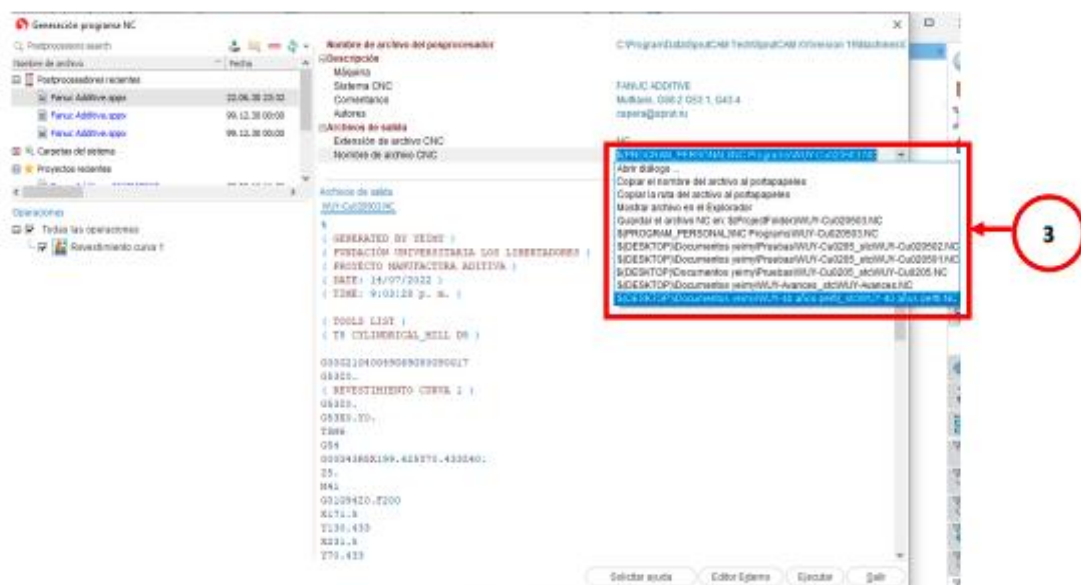
1. Dirigirse a la pestaña de post-procesador que se encuentra en el menú superior de la ventana de mecanizado **imagen 1**.
2. Luego de seleccionar la opción anterior se procede a escoger el post-procesador que se indica en la parte izquierda que son los modificados para el proceso de MA y para finalizar se indica ejecutar. **imagen 2**.
3. Una vez se genera el programa CN donde muestra la operación a realizar. Para terminar, se escoge el lugar donde será guardado, este archivo se guardará en un block de notas. **imagen 3**.
4. Luego de guardar el código CN se abre en el block de notas correspondiente y se verifica. **imagen 4**.
5. Una vez se termina la verificación se continua con el proceso de importar el código CN a la CNC por medio de una USB. **imagen 5**.



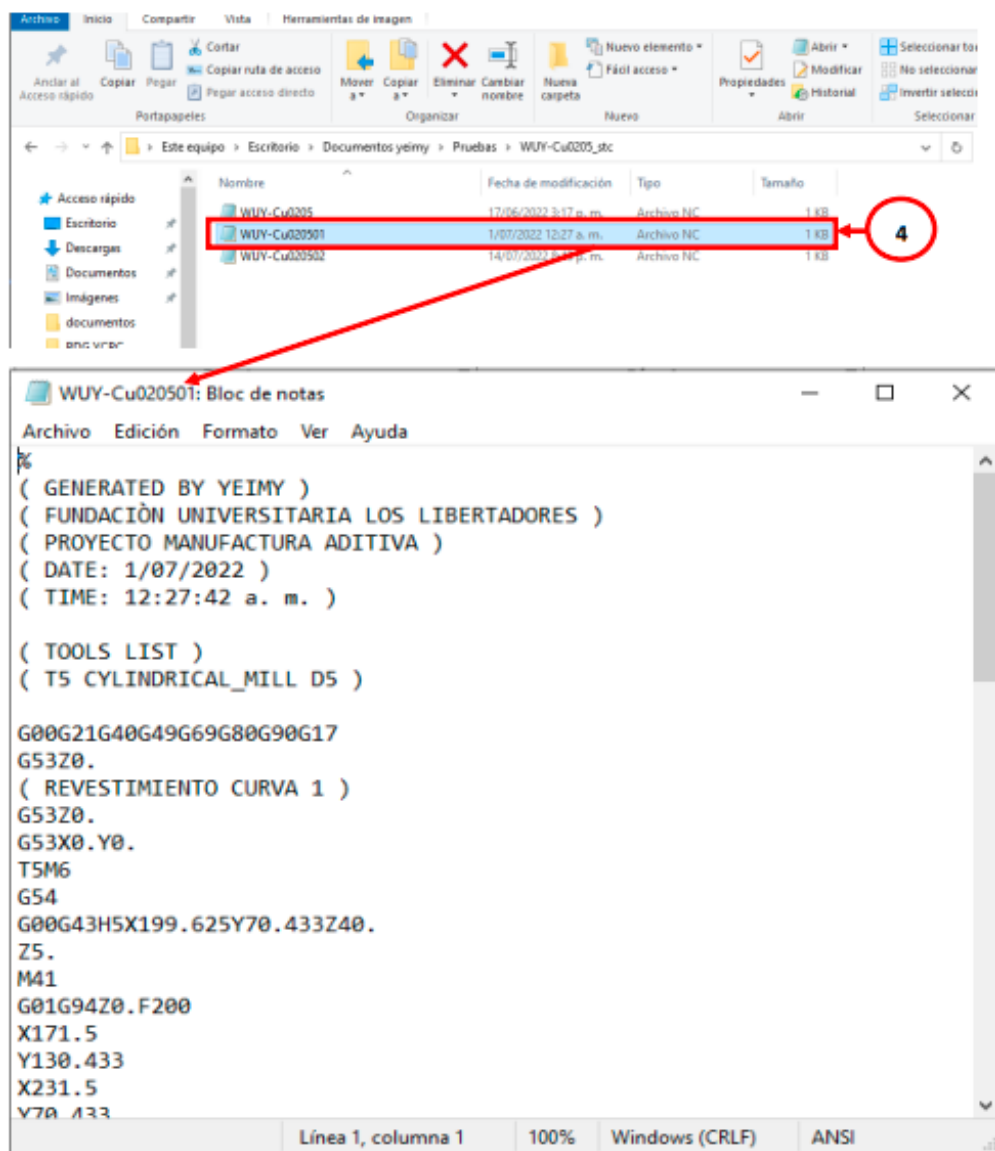
**imagen 1. Opción post-procesador.**



**imagen 2. Ejecutar programa CN.**



**Imagen 3. Proceso de guardado código CN.**



**imagen 4. Codigo CN-Block de notas.**



*imagen 5. Importar código CN a CNC.*



# Apéndice D (Manual)

Se incluirá en este Apéndice D, el manual de como importar la maquina virtual al software SprutCAM y generar trayectorias de los ejercicios.

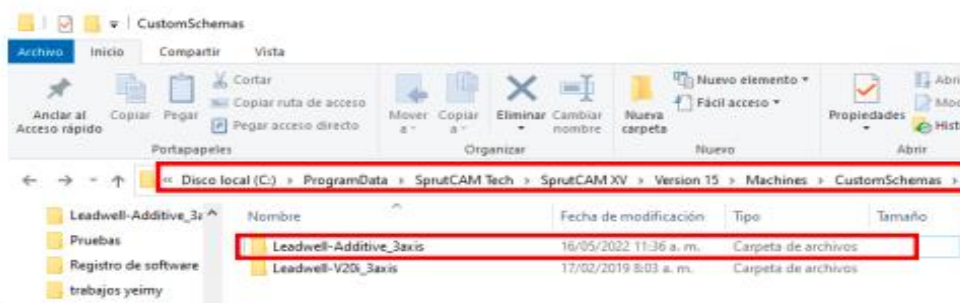


LOS LIBERTADORES  
FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

## MANUAL DE USUARIO

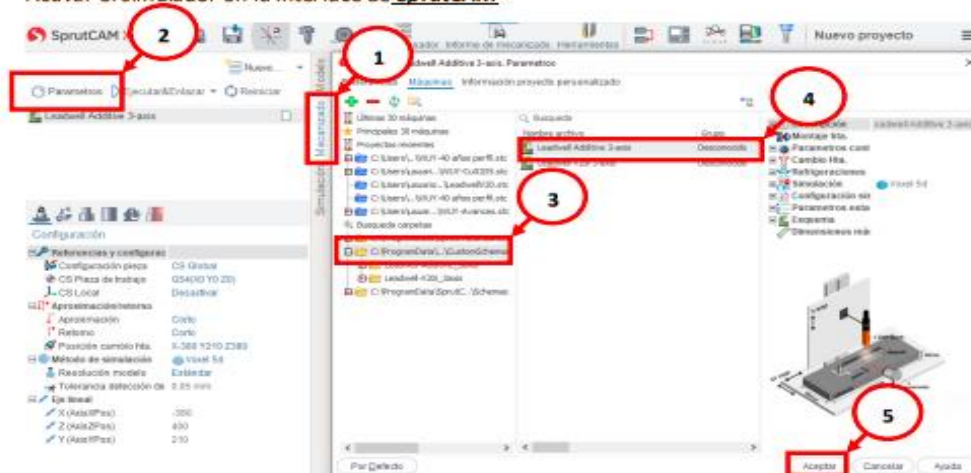
### Paso 1

Copiar la carpeta Leadwell-Additive\_3axis en la ruta C:\ProgramData\SprutCAM Tech\SprutCAM XV\Version 15\Machines\CustomSchemas.



### Paso 2

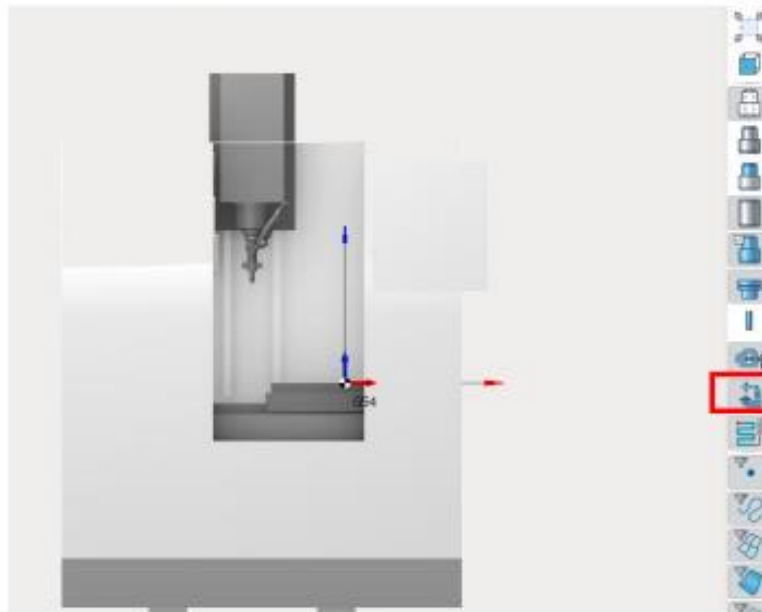
Activar el simulador en la interface de SprutCAM





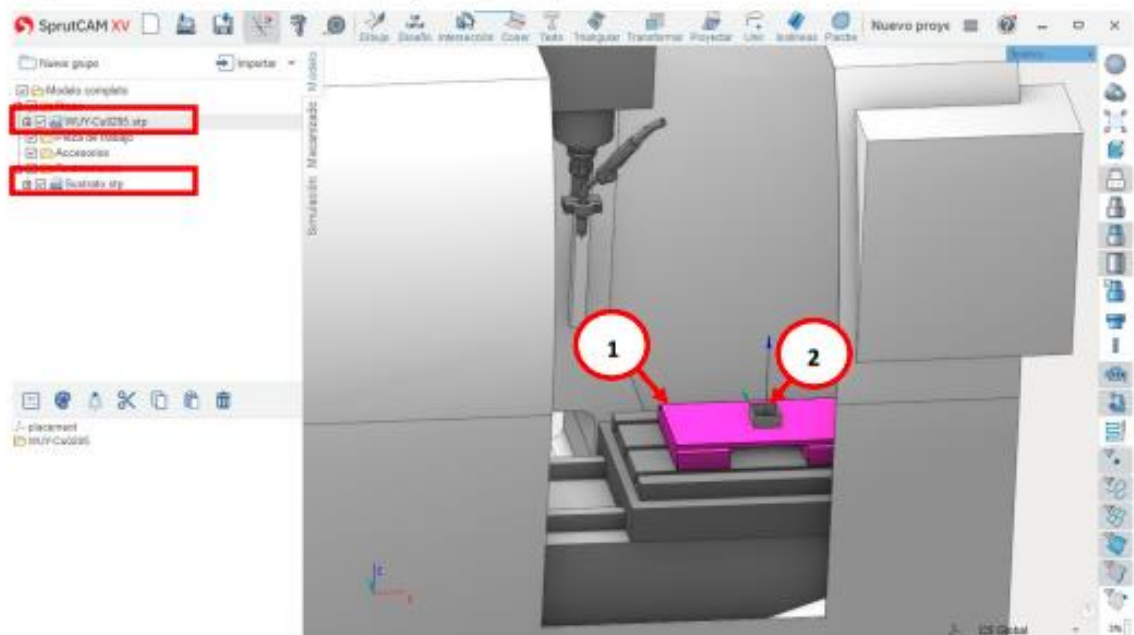
### Paso 3

Activar la visualización de la máquina.



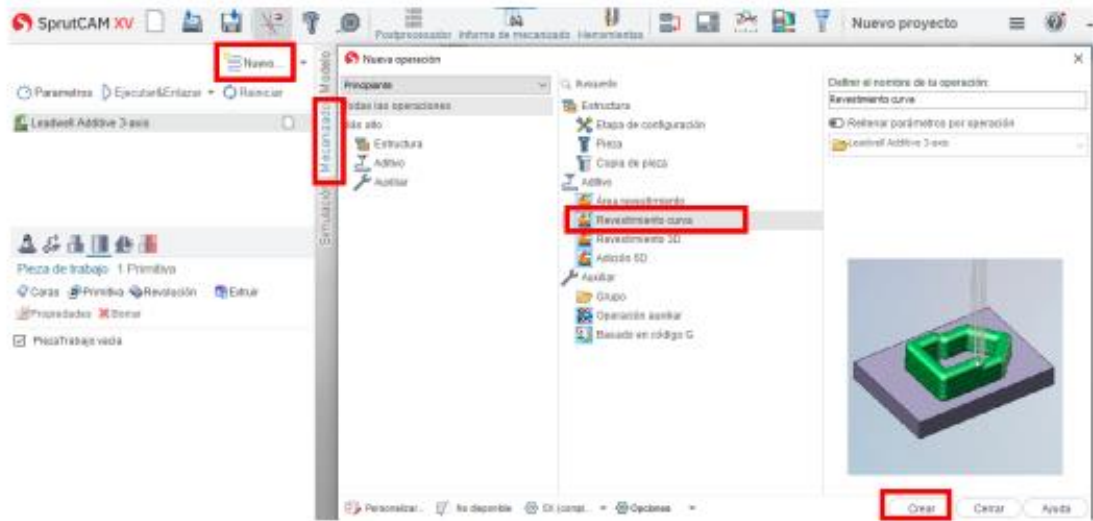
### Paso 4

Importar la geometría del sustrato y la pieza para el proceso aditivo.

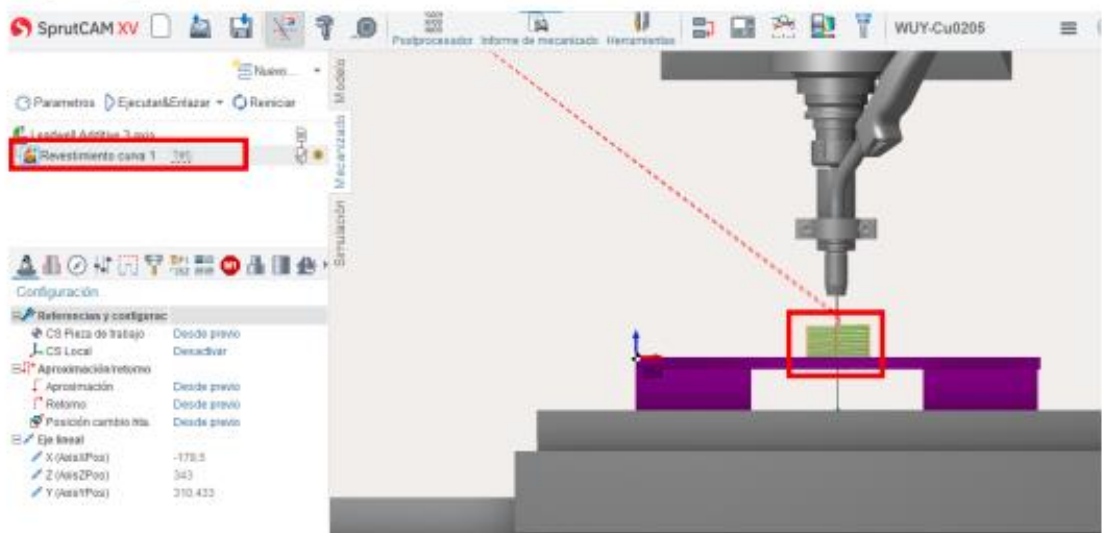


## Paso 5

Generar trayectoria para proceso aditivo.

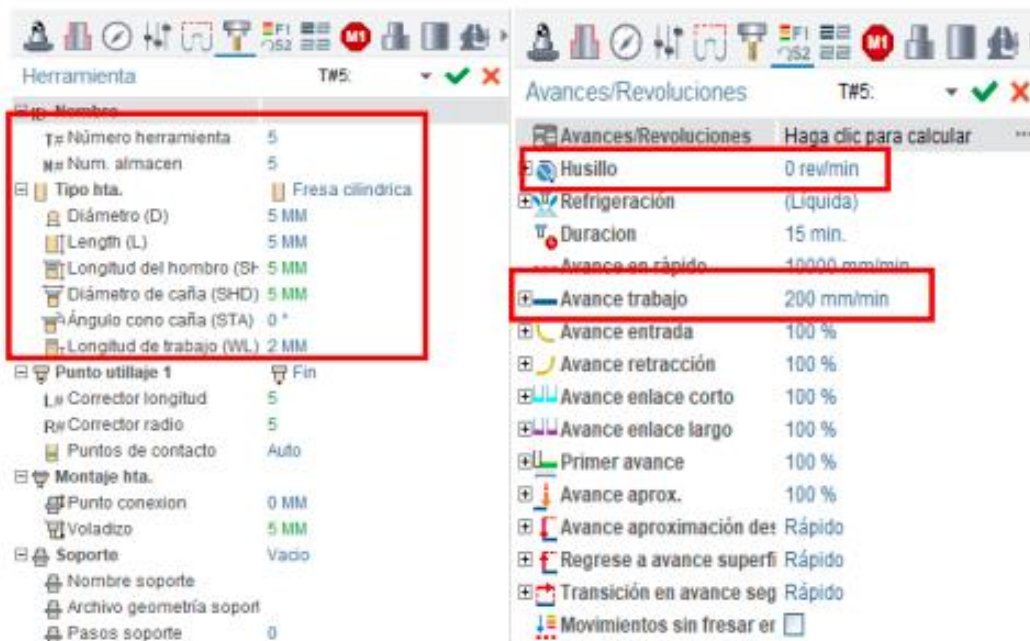


Trayectoria generada



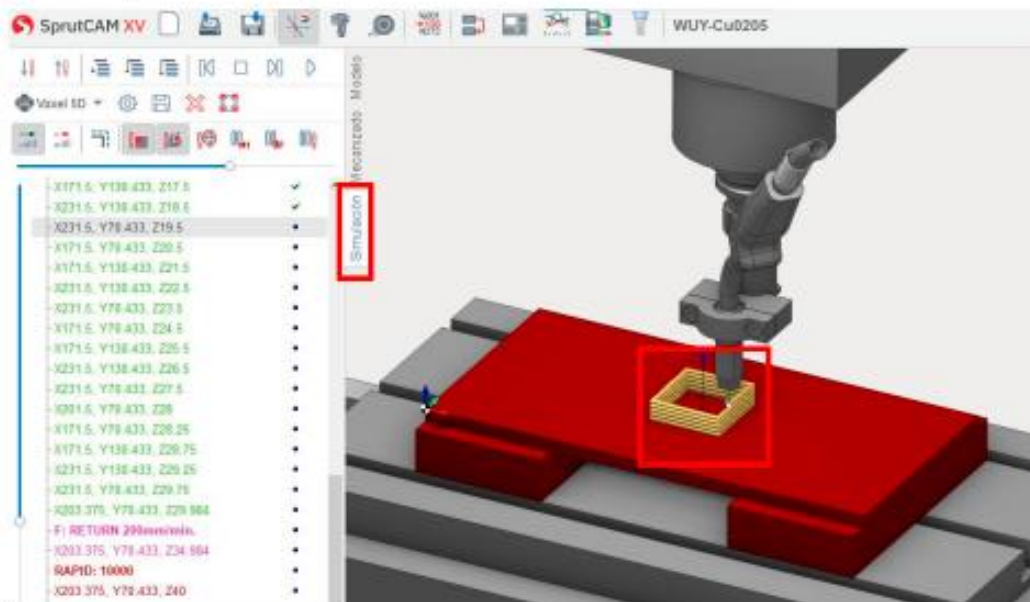
## Paso 6

Configuración de parámetros para simulación.



## Paso 7

Validación y verificación de proceso aditivo en el simulador.

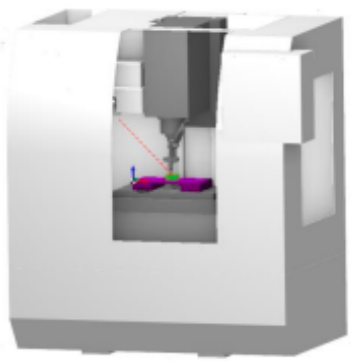


## Apéndice D (Manual)

Se incluirá en este Apéndice D, una tabla con el código final para el proceso .



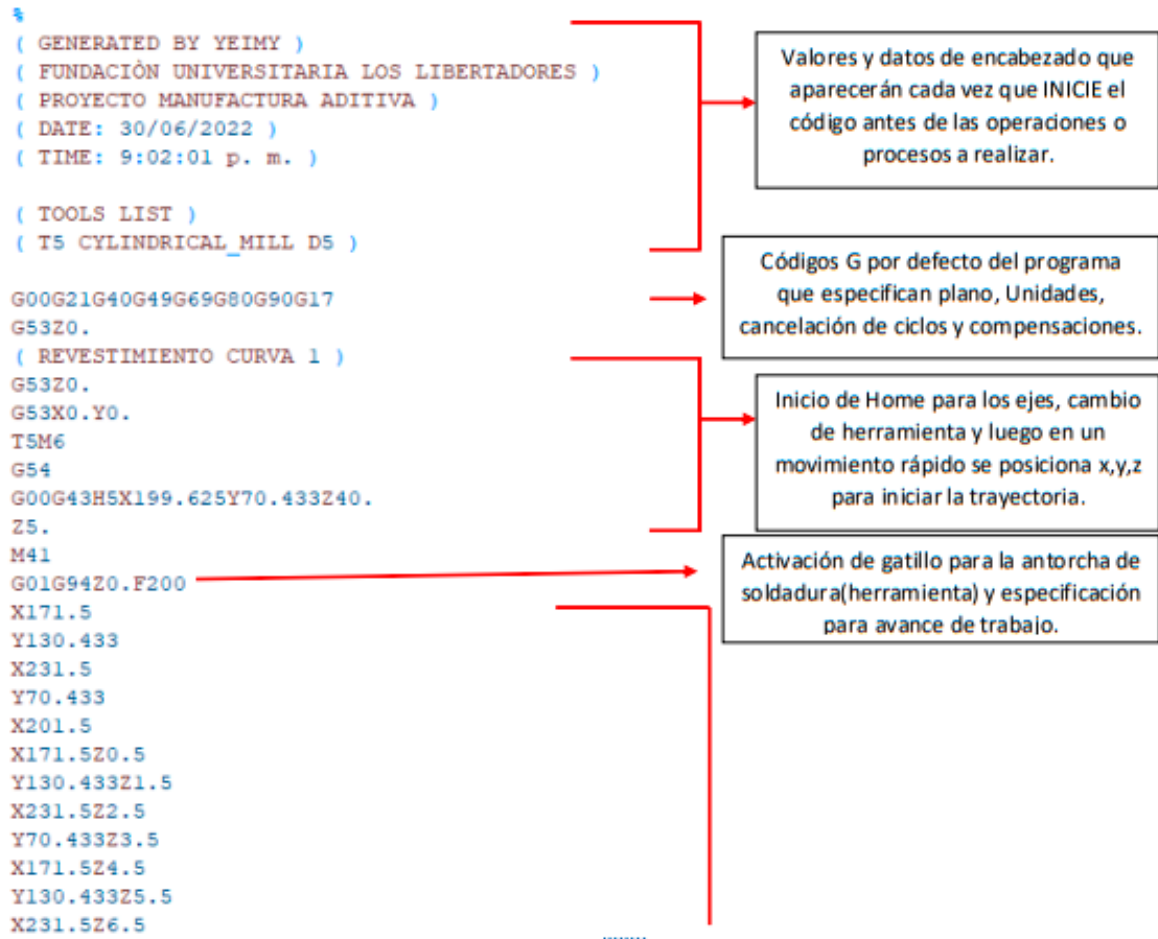
### Manual de Desarrollo Post-Procesador

COMPAÑÍA:		
Modelo del Equipo	LEADWELL V20i	
Controlador	Fanuc Series Oi-MD	
Tipo de Maquina (Centro, Torno Bi-axial, Torno-Fresador, Torno Suizo, etc.)	Centro de Mecanizado	
Ejes de la Maquina	3	
Unidades de Salida mm/ in	mm	
Extensión de salida NC (.nc, .ptp, etc.)	.nc	

G-CODE LAYOUT	
Program Start Sequence	
<i>(Valores que aparecerán cada vez que <b>INICIE</b> el código antes de las operaciones o procesos a realizar.)</i>	<pre>% (GENERATED BY YEIMY) (FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES) (PROYECTO MANUFACTURA ADITIVA) (DATE: 17/06/2022) (TIME: 3:17:33 p. m.)  (TOOLS LIST) (T5 CYLINDRICAL_MILL D5)  G00G21G40G49G69G80G90G17 G53Z0.</pre>

<b>Operation Start Sequence</b>  <i>(Valores o condiciones que aparecerán cada vez que <b>INICIE</b> una de las operaciones o procesos a realizar.)</i>	(REVESTIMIENTO CURVA 1) G53Z0. G53X0.Y0. T5M6 G54 G00G43H5X199.625Y70.433Z40. Z5.
<b>Tool Path</b>  <i>(Valores o condiciones importantes <b>DURANTE</b> el recorrido de las trayectorias de corte o la ejecución de ciclos.)</i>	M41 G01G94Z0.F200 X171.5 Y130.433 X231.5 Y70.433 X201.5 X171.5Z0.5 Y130.433Z1.5 X231.5Z2.5 .....
<b>Operation End Sequence</b>  <i>(Valores o condiciones que aparecerán cada vez que <b>TERMINE</b> una de las operaciones o procesos a realizar.)</i>	..... Z34.984 M40 G00Z40.
<b>Program End Sequence</b>  <i>(Valores o condiciones que aparecerán cuando <b>TERMINE</b> el programa.)</i> .	G28G91X0.Y0.Z0. G90 G49  M30 %

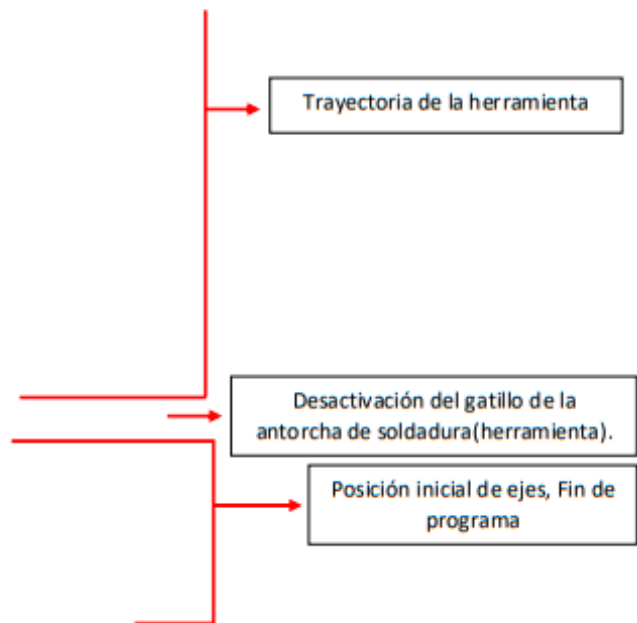
**CÓDIGO NC GENERADO POR EL POST-PROCESADOR PARA MANUFACTURA ADITIVA POR  
SOLDADURA POR ARCO PARA IMPRESION DE UN CUADRADO.**



```

Y130.433Z21.5
X231.5Z22.5
Y70.433Z23.5
X171.5Z24.5
Y130.433Z25.5
X231.5Z26.5
Y70.433Z27.5
X201.5Z28.
X171.5Z28.25
Y130.433Z28.75
X231.5Z29.25
Y70.433Z29.75
X203.375Z29.984
Z34.984
M40
G00Z40.
G28G91X0.Y0.Z0.
G90
G49

M30
%
```





# Apéndice E (Manual)

Se incluirá en este Apéndice C, manual de la ventana principal del post-procesador.



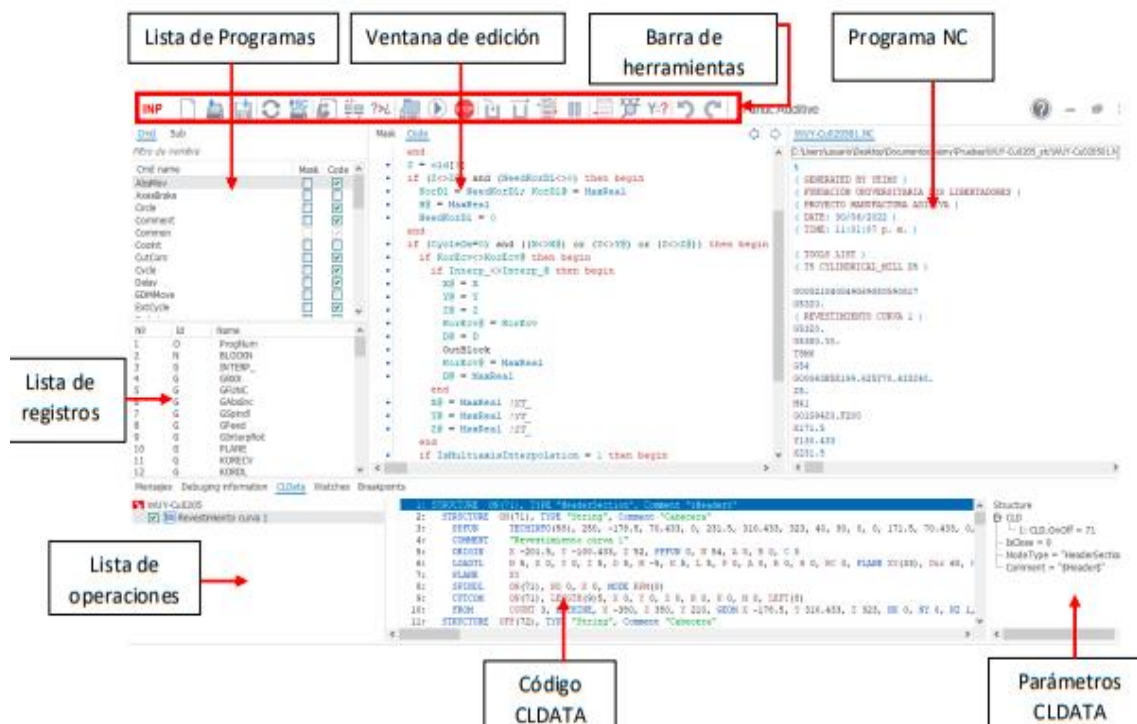
## VENTANA PRINCIPAL POST-PROCESSORS GENERATOR.

Para generar cambios y programar un Post-procesador del software *SprutCAM* es necesario hacerlo desde el generador del post-procesador. Cuando ingresemos a esta ventana se encontrará las siguientes funciones **imagen 1**.

Luego de realizar una operación en el software se va a generar un código llamado *CLDATA* donde se encuentra la información del proceso a realizar en este caso de manufactura aditiva por soldadura por arco. **imagen 2**.

Teniendo claridad en lo anterior a continuación se evidencia los cambios que se realizaron dentro de post-procesador para lograr implementar la tecnología de manufactura aditiva por soldadura por arco donde se implementaron los siguientes pasos:

1. Se desactiva por seguridad la opción de Spindle para evitar su giro y que se enrede el cable de la antorcha de soldadura ya que ella debe permanecer fija. **imagen 3**.
2. Adicionar variable correspondiente al estado de la antorcha de soldadura esto se logra desde el programa *Common*. **imagen 4**.
3. Inicializar la variable en el programa *PartNo*. **imagen 5**.
4. Se agrega condicional en el programa *Rapid* donde se permite la desactivación de la antorcha de soldadura si está variable es mayor que 0 y con el comando M40 se desactivará. **imagen 6**.
5. Se agrega condicional en el programa *Fedrat* donde se permite la activación de la antorcha de soldadura si está variable es igual que 0 y con el comando M41 se activará. **imagen 7**.





**imagen 1. Ventana principal post-processors generator.**

```

1: STRUCTURE ON(71), TYPE "HeaderSection", Comment "Header1"
2: STRUCTURE ON(71), TYPE "String", Comment "Cabecera"
3: PPFUN TECHINFO(58), 250, -178.5, 70.433, 0, 231.5, 310.433, 323, 40, 30, 0, 0, 171.5, 70.433, 0, 231.5,
4: COMMENT "Revestimiento curva 1"
5: ORIGIN X -201.5, Y -100.433, Z 52, PPFUN 0, H 54, A 0, B 0, C 0
6: LOADIL H 5, X 0, Y 0, Z 5, D 5, M -5, K 5, L 5, P 0, A 0, R 0, H 0, RC 0, PLANE XY(33), Dur 60, MID 0, 1
7: PLANE XY
8: SPINDL ON(71), NO 0, K 0, MODE RPM(0)
9: CUTCOM ON(71), LENGTH(9)5, X 0, Y 0, Z 0, H 0, K 0, M 0, LEFT(8)
10: FROM COUNT 3, MACHINE, X -380, Z 380, Y 210, GCON X -178.5, Y 310.433, Z 323, MX 0, MY 0, MZ 1, MW 0,
11: STRUCTURE OFF(72), TYPE "String", Comment "Cabecera"
12: STRUCTURE ON(71), TYPE "String", Comment "Aproximación"
13: STRUCTURE ON(71), TYPE "Approach", Comment "Aproximación"
14: RAPID N 10000
15: MULTIGOTO COUNT 3, MACHINE, X 199.625, Z 40, Y 70.433, GCON X 199.625, Y 70.433, Z 40, MX 0, MY 0, MZ 1,
16: STRUCTURE OFF(72), TYPE "Approach", Comment "Aproximación"
17: STRUCTURE OFF(72), TYPE "String", Comment "Aproximación"
18: STRUCTURE OFF(72), TYPE "HeaderSection", Comment "Header1"
19: STRUCTURE ON(71), TYPE "BodySection", Comment "Body1"
20: RAPID N 10000
21: GOTO X 199.625, Y 70.433, Z 40
22: GOTO X 199.625, Y 70.433, Z 5
23: COOLANT ON(71), M 1, #1
24: FEEDRAT F 200, MMFM(315), K 254
25: GOTO X 199.625, Y 70.433, Z 0
26: FEEDRAT F 700, MMFM(315), K 7

```

**imagen 2. Código CLDATA.**

Cmd name	Mask	Code
Paleta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
PartNo	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PhysicGOTO	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Plane	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Power	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PPFun	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
PPrint	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Rapid	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
RoTabl	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SafPos	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SeWorkpiece	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SingleThread	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Spindl	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Stop	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Structure	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SyncAxes	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

**imagen 3. Desactivación Spindl.**



Imagen 4. Creación de variable.

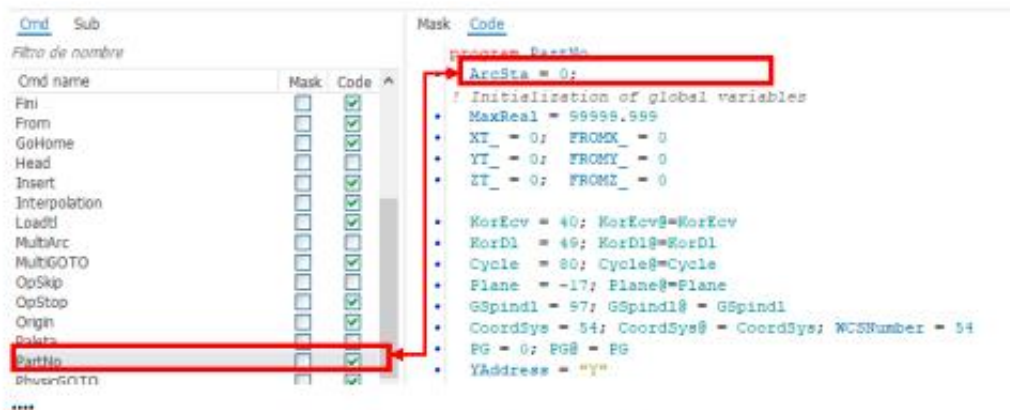
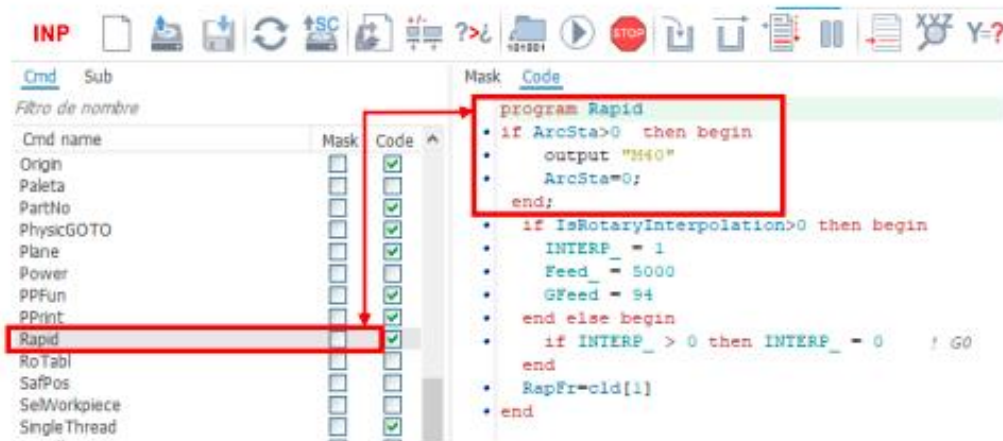
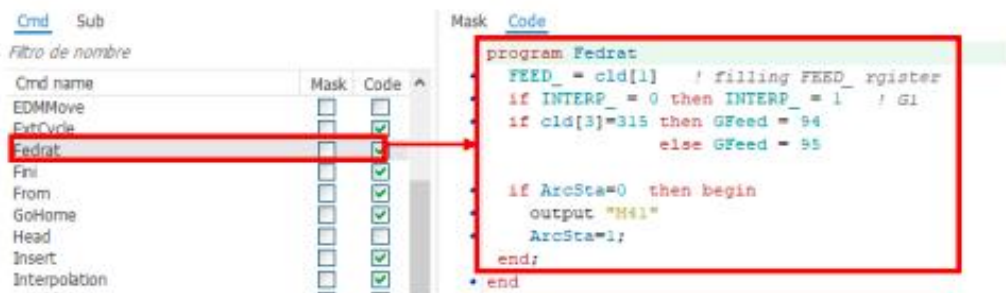


Imagen 5. Inicialización de variable.



**imagen 6. Condición de desactivación de la antorcha.**



**imagen 7. Condición de Activación de la antorcha.**

## Apéndice F (Manual)

Se incluirá en este Apéndice F, el manual correspondiente a la importación y ejecución del código CN a la máquina.



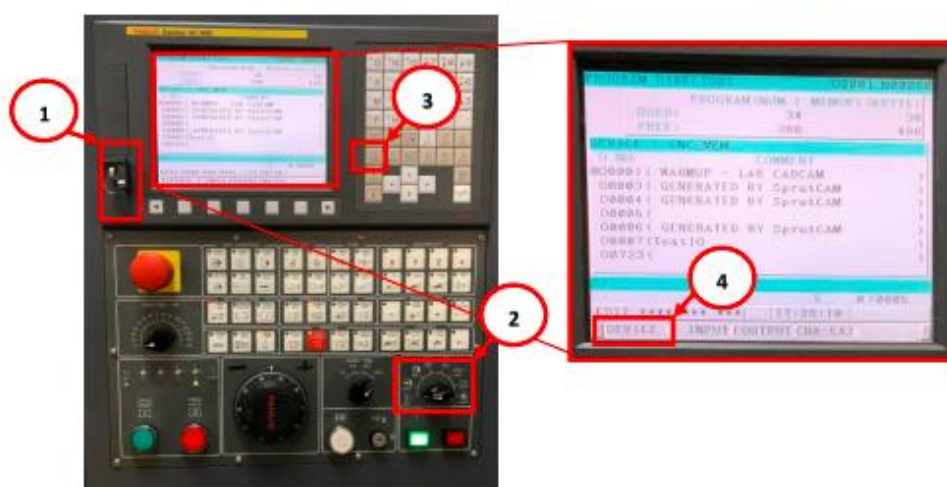
### MANUAL DE USUARIO

(Importación y ejecución del código NC a la máquina)

#### Paso 1

Como se conoce el código NC post-procesado que arroja el software SprutCAM queda guardado en block de notas y este archivo es pasado a una USB. Para posteriormente ejecutarlo desde el HMI desde el centro de mecanizado Leadwell V20i, como se observa en la Figura 1. Se debe colocar la perilla de MODOS en el MODO EDIT y luego desde el botón PROGRAM el HMI nos permite ver el listado de programas desde la opción PROGRAM DIRECTORY que se encuentran cargados en el centro de mecanizado Leadwell V20i y la posición que poseen.

Figura 1. Puerto USB y verificación de programas cargados en la máquina.



Fuente: Autor

Se debe verificar que número se encuentra disponible para en esa posición cargar el código NC, si por el contrario no hay ninguno disponible se debe borrar un programa para crear el espacio. Como se observa en la Figura 1 se encuentra libre la posición "O2". Luego se debe seleccionar la opción de *DIVICE* para inicial el proceso de importación como se explica a continuación.



### Paso 2

Una vez se conoce la posición donde se va a importar el código NC se selecciona la opción *DIVICE* como se nombró anteriormente, al seleccionar esta opción se debe buscar con ayuda de la flecha la opción *USB MEM* como se observa en la Figura 2.

Seleccionada la anterior opción de *USB MEM*, se desglosará el listado de los programas que contiene la *USB*.

Figura 2. Visualización de directorio de la *USB*.



Fuente: Autor

### Paso 3

Ahora se debe seleccionar el código NC que deseemos ejecutar en este caso es un ejercicio denominado *Avances*. Para seleccionar el código se debe colocar la opción *INPUT*, luego nos desplazamos con la flecha a la derecha y seleccionar la opción *NAME* y de esta manera ya lo tomara como el programa a ejecutar. Como se observa en la Figura 3.

Posteriormente se digita la posición que tomara, como se dijo anteriormente el lugar "O2" esta disponible por lo que será el usado en este ejemplo. Una vez se digite los valores "O2" se selecciona la opción *OSET* y para finalizar se selecciona *EXEC* que hace referencia a la ejecución final del código.

Figura 3. Visualización de directorio de la USB



Fuente: Autor

#### Paso 4

Para finalizar se debe colocar la perilla de MODOS en el modo AUTO y se visualizara en el HMI el programa ya cargado y listo para ejecutar con el botón CYCLE START.

Figura 4. Ejecución del código NC.



# Apéndice G (Manual)

Se incluirá en este Apéndice G, el manual correspondiente al proceso de llevar la máquina a HOME y posicionar el cero la misma.



## MANUAL DE USUARIO

### (HOME de la máquina y posición de cero de pieza)

#### HOME de la máquina:

##### Paso 1

Encender el Centro de Mecanizado Leadwell V20i y esperar a que cargue por completo el HMI de la máquina para posteriormente realizar HOME como se observa en la Figura 1. Para esto se debe verificar que no haya ningún elemento sobre los ejes que se pueda chocar o caer durante el procedimiento.

Figura 1. Inicio HMI



Fuente: Autor.

##### Paso 2

Colocar el indicador de MODOS en el modo HOME, luego seleccionar en la sección de AXIS SELECT los ejes X, Y, Z y 4 (eje) posteriormente se selecciona el botón HOME y una velocidad +100. Como se observa en la Figura 2.

Al finalizar los pasos anteriores los ejes se desplazarán a sus posiciones programadas, cuando esta acción termine se debe esperar que los indicadores de cada eje que se encuentran en la parte inferior izquierda del tablero se estabilicen.

#### Nota:

Si no es seleccionada la velocidad +100 se producirá un error con el 4 eje.



Figura 2. Selección de ejes.



Fuente: Autor.

Con el paso anterior se culmina el proceso de *HOME* para el centro de mecanizado Leadwell V20I, esto nos permitirá operar la maquina sin presentar alarmas de posición de ejes inicial.

#### Posición de cero de pieza:

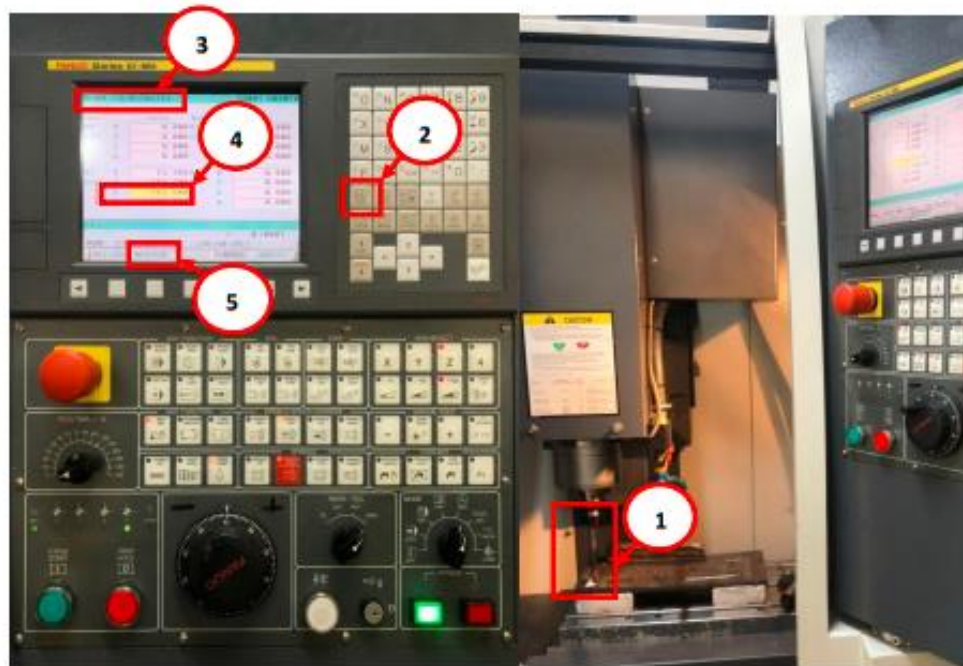
##### Paso 1

Se debe seleccionar la herramienta No 1 ya que es la herramienta patrón de la máquina. Esto se logra desde el *MODO MDI* ejecutando el cambio de herramienta insertando el código (M6T1;) y dando *START CYCLE*. Una vez se seleccione la herramienta No1 con ella se hallará la posición Z.

Es decir, se debe posicionar sobre el sustrato la herramienta donde será la altura en el eje Z, luego en el HMI en la opción *WORK COORDINATES* se digita el eje y el cero dando indicación que será la posición cero de ese eje (ejemplo: Y0) y luego se selecciona la opción *MEASUR* para que esta ya sea establecida. Como se observa en la Figura 3.



Figura 3. Cero de pieza eje Z con herramienta patrón.



Fuente: Autor.

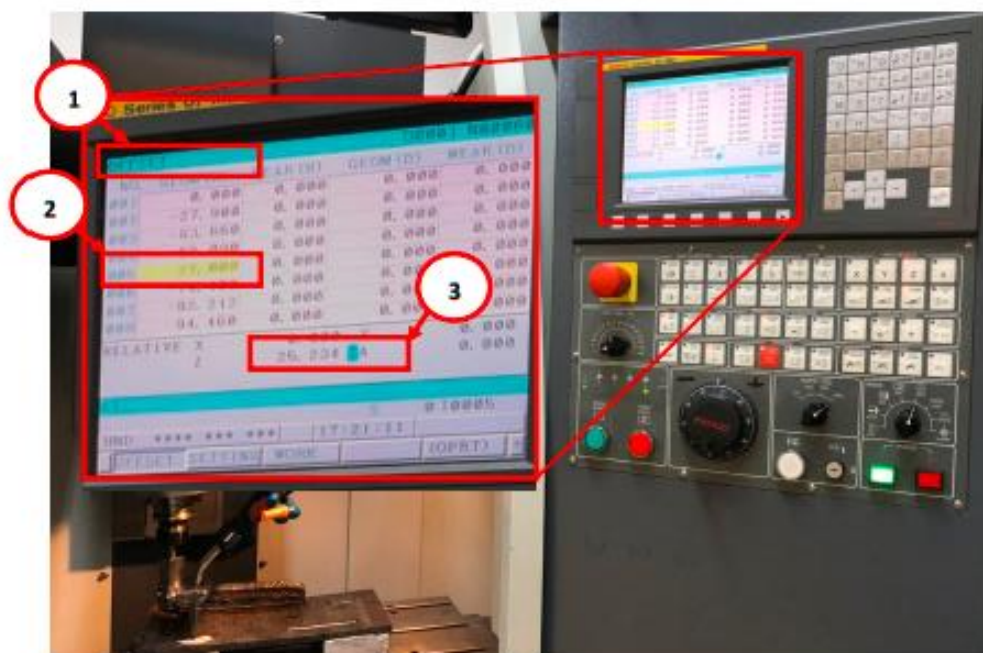
## Paso 2

Una vez se obtenga con la herramienta patrón la posición del eje Z, se debe hallar la posición del eje X y Y con la herramienta 5 que hace referencia a la antorcha de soldadura. Para esto se genera un cambio de herramienta insertando desde el *MODO MDI* el código (M6T5;) y dando *START CYCLE*.

Es decir, se debe posicionar sobre el sustrato la herramienta de la antorcha de soldadura donde será la posición cero del eje X y Y, luego en el HMI en la opción *WORK COORDINATES* se selecciona la opción medir para que estas ya sean establecidas como se realizó anteriormente con el eje Z.

Ahora, como se observa en la Figura 4 en la opción *OFFSET* del HMI de la máquina aparece la compensación de todas las herramientas, pero al seleccionar la herramienta No 5. Donde se encuentra la antorcha de soldadura en la parte inferior de la pantalla aparece un número diferente que hace referencia a la coordenada relativa por lo cual se debe tomar ese valor como posición cero de la herramienta 5 en su eje Z quedando así compasada dicha herramienta.

Figura 4. Compensación eje Z.



Fuente: Autor.

Nota: En caso de que se desee tener una salida de alambre para facilitar la posición del cero, se digita en el modo *MDI PROGRAM* el código que se observa en la Figura 5 que hace referencia a los comandos de activación y desactivación de la antorcha de soldadura con un temporizador. Al seleccionar *START CYCLE* se ejecutará el código, permitiendo la salida de alambre hasta el tiempo que se especifica en el temporizador.

Figura 5. Código para activación y desactivación de la antorcha de soldadura con temporizador.



Fuente: Autor.

Con lo anterior se finaliza el manual de como realizar HOME al centro de mecanizado Leadwell V20i y como realizar el cero de pieza y compensación de la herramienta de soldadura en el eje Z.

# Anexo A (Manual)

Se incluirá en este Anexo A, el listado de códigos G y M existentes en el manual del centro de mecanizado Leadwell V20i.

G CODE LIST				S : STANDAR    O : OPTION	
G CODE	GROUP	DESCRIPTION	S/O		
G37	01	Automatic tool length measurment	O		
G39		Corner offset circular interpolation	O		
G40	07	Cutter compensation cancel / Three dimensional compensation cancel	S		
G41		Cutter compensation left / Three dimensional compensation	S		
G42		Cutter compensation right	S		
G40.1(G150)	19	Normal direction control cancel mode	O		
G41.1(G151)		Normal direction control left side on	O		
G42.1(G152)		Normal direction control right side on	O		
G43	08	Tool length compensation + direction	S		
G44		Tool length compensation + direction	S		
G45	00	Tool offset increase	O		
G46		Tool offset decrease	O		
G47		Tool offset double increase	O		
G48		Tool offset double decrease	O		
G49	08	Tool length compensation cancel	S		
G50	11	Scaling cancel	O		
G51		Scaling	O		
G50.1	22	Programmable mirror image cancel	S		
G51.1		Programmable mirror image	S		
G52	00	Local coordinate system setting	S		
G53		Machine coordinate system selection	S		
G54	14	Workpiece coordinate system 1 selection	S		
G54.1		Additional workpiece coordinate system selection	O		
G55		Workpiece coordinate system 2 selection	S		
G56		Workpiece coordinate system 3 selection	S		
G57		Workpiece coordinate system 4 selection	S		
G58		Workpiece coordinate system 5 selection	S		
G59		Workpiece coordinate system 6 selection	S		
G60	00	Single direction positioning	O		
G61	15	Exact stop mode	S		
G62		Automatic corner override	O		
G63		Tapping mode	O		
G64		Cutting mode	O		

MACHINE  
V-20  
01/MC

DESIGNER  
DANIEL  
2008/05/28

DRAWER  
GARY  
2008/05/28

DESCRIPTION  
G CODE LIST

VER  
01

PAGE  
= XS-2

LEADWELL®



G CODE LIST					S : STANDAR O : OPTION		LEADWELL®
G CODE	GROUP	DESCRIPTION			S/O		
G65	00	Macro call			S		
G66	12	Macro model call			S		
G67		Macro model cancel			S		
G68	16	Coordinate rotation			O		
G69		Coordinate rotation cancel			O		
G73	09	Peck drilling cycle			S		
G74		Counter tapping cycle			S		
G75	01	Plunge grinding cycle (for grinding machine)			O		
G76	09	Fine boring cycle			S		
G77	01	Direct constant – dimension plunge grinding cycle (for grinding machine)			O		
G78		Continuous – feed surface grinding cycle (for grinding machine)			O		
G79		Intermittent – feed surface grinding cycle (for grinding machine)			O		
G80	09	Conned cycle cancel / external operation function cancel			S		
G81		Drilling cycle, spot boring cycle or external operation function			S		
G82		Drilling cycle or counter boring cycle			S		
G83		Peck drilling cycle			S		
G84		Tapping cycle			S		
G85		Boring cycle			S		
G86		Boring cycle			S		
G87		Back boring cycle			S		
G88		Boring cycle			S		
G89		Boring cycle			S		
G90	03	Absolute command			S		
G91		Increment command			S		
G92	00	Setting for work coordinate system or clamp at maximum spindle speed			S		
G92.1		Workpiece coordinate system preset			O		
G94	05	Feed per minute			S		
G95		Feed per rotation			S		
G96	13	Constant surface speed control			O		
G97		Constant surface speed control cancel			O		
G98	10	Return to initial point in canned cycle			S		
G99		Return to R point in canned cycle			S		
G160	20	In – feed control function cancel (for grinding machine)			O		
G161		In – feed control function (for grinding machine)			O		

MACHINE	DESIGNER	DRAWER	DESCRIPTION	VER	PAGE
V-20	DANIEL	GARY	G CODE LIST	01	
OI/MC	2008/05/28	2008/05/28			= XS-3

M FUNCTION CODE LIST			S:STANDARD O:OPTION		LEADWELL®	
CODE	FUNCTION	S/O			VER	PAGE
M00	PROGRAM STOP	S			01	= X4-1
M01	PROGRAM OPTIONAL STOP	S				
M02	END OF PROGRAM	S				
M03	SPINDLE C.W.	S				
M04	SPINDLE C.C.W.	S				
M05	SPINDLE STOP	S				
M06	TOOL CHANGE	S				
M07	C.T.S. COOLANT ON	O				
M08	COOLANT ON	S				
M09	COOLANT OFF	S				
M10	CHIP CLEAN	O				
M11	<i>Gicar Magazine hacia adelante</i>					
M12	<i>Grues Magazine hacia atras</i>					
M13	SPINDLE C.W. & COOLANT ON	O				
M14	SPINDLE C.C.W. & COOLANT ON	O				
M15						
M16						
M17						
M18						
M19	SPINDLE ORIENTATION	S				
M20						
M21	MAGAZINE RIGHT	S				
M22	MAGAZINE LEFT	S				
M23	MAGAZINE UP	V-20:S				
M24	MAGAZINE DOWN	V-20:S				
M25	TOOL CLAMP	S				
M26	TOOL UNCLAMP	S				
M27	RENISHAW ON	O				
M28	RENISHAW OFF	O				
M29	RIGID TAPPING	O				
M30	PROGRAM REWIND	S				
M31						
M32						
			1	2	3	4
			MACHINE	DESIGNER	DRAWER	DESCRIPTION
			V-20	GARY	GARY	M CODE LIST
			01/MC	2008/05/28	2008/05/28	

S:STANDARD O:OPTION

CODE	FUNCTION	S/O
M33	M33: ON, M34: OFF	O
M34	M34: ON, M33: OFF	O
M35	PROGRAMMABLE NOZZLE HOME	O
M36	PROGRAMMABLE NOZZLE C.W.	O
M37	PROGRAMMABLE NOZZLE C.C.W.	O
M38	COOLANT THROUGH TOOL	O
M39		
M40	4TH AXIS CLAMP	O
M41	4TH AXIS UNCLAMP	O
M42		
M43		
M44		
M45	CHIP CONVEYOR ON	O
M46	CHIP CONVEYOR OFF	O
M47	PROGRAMMABLE AIR BLAST ON	O
M48	PROGRAMMABLE AIR BLAST OFF	O
M49		
M50		
M51		
M52		
M53		
M54		
M55		
M56	ATLM. AIR BLAST ON	O
M57	ATLM. AIR BLAST OFF	O
M58		
M59		
M60		
M61	MIRROR IMAGE X OFF	S
M62	MIRROR IMAGE Y OFF	S
M63		
M64	MIRROR IMAGE 4 OFF	O
M65		



S:STANDARD O:OPTION

CODE	FUNCTION	S/O
M66		
M67		
M68		
M69		
M70		
M71	MIRROR IMAGE X ON	S
M72	MIRROR IMAGE Y ON	S
M73		
M74	MIRROR IMAGE 4 ON	O
M75		
M76		
M77	SPINDLE LOAD UP ON	O
M78	SPINDLE LOAD DETECT OFF	O
M79	SPINDLE LOAD DOWN ON	O
M80		
M81	ON/OFF MOMENTARY	O
M82	ON/OFF MOMENTARY	O
M83	M83: ON, M84: OFF	O
M84	M84: ON, M83: OFF	O
M85	ON—FINISH--OFF	O
M86	ON—FINISH--OFF	O
M87	ON—FINISH--OFF	O
M88	ON—FINISH--OFF	O
M89	ON—FINISH--OFF	O
M90		
M91		
M92		
M93		
M94		
M95	PART COUNTER	S
M96		
M97		
M98	CALLING OF SUBPROGRAM	S
M99	MAIN PROGRAM RETURN	S

**GRACIAS.**