

CIATEQ, A. C. Centro de Tecnología Avanzada
Gerencia de Posgrado



*Análisis de velocidad de soldadura robotizada para
proceso MIG en acero 1045 AISI*

TESIS QUE PRESENTA

Ing. Carlos Eduardo Hernández Acero
Asesor: Mtro. Ramón Alberto Luque Morales

Para obtener el grado de

Maestro en
Manufactura Avanzada

Aguascalientes, Aguascalientes
diciembre, 2022

CARTA DE LIBERACIÓN DEL ASESOR



Aguascalientes, Aguascalientes, 14 de noviembre del 2022.

Mtro. Geovany González Carlos
Gerencia de Posgrado
CIATEQ, A.C.

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del Ingeniero Carlos Eduardo Hernández Acero, una vez revisado su Proyecto Terminal de tesis/tesina, titulado "ANÁLISIS DE VELOCIDAD DE SOLDADURA ROBOTIZADA PARA PROCESO MIG EN ACERO1045 AISI" **autorizamos** que el citado trabajo sea presentado por el alumno para su revisión, con el fin de alcanzar el grado de **Maestro en manufactura avanzada**.

Sin otro particular por el momento, agradecemos la atención prestada.

Firma

Maestro Ramón Alberto Luque Morales
Asesor Académico

Firma

Ingeniero Jorge Cosío Gaggero
Asesor en Planta

CARTA DE LIBERACIÓN DEL REVISOR



Aguascalientes, Ags, 7 de Diciembre del 2022.

Mtro. Geovany González Carlos
Coordinador Académico
CIATEQ, A.C.

Por medio de la presente me dirijo a usted en calidad de Revisor del proyecto terminal del alumno **Carlos Eduardo Hernández Acero**, cuyo título es:

**"ANÁLISIS DE VELOCIDAD DE SOLDADURA ROBOTIZADA PARA
PROCESO MIG EN ACERO 1045 AISI"**

Después de haberlo leído, corregido e intercambiado información con el alumno, y realizado los cambios que le fueron sugeridos, puede ser autorizada su impresión, a fin de que se inicien los trámites correspondientes para su defensa.

Sin otro particular por el momento, y en espera de que mis sugerencias sean tomadas en cuenta en beneficio del estudiante y la Institución, agradezco la atención prestada.

Atentamente,

M.C. Víctor Hugo Tapia Ramírez

F31b Revisión: 01-Mar-2021

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de tesis a mi esposa Hilda, porque me apoyó siempre en la inversión de tiempo en este esfuerzo y sacrificio para realizar los estudios de posgrado, considerando las pruebas que tenemos en nuestra vida.

A mi madre Lupita quien siempre me ha alentado a salir adelante en todos los proyectos que he buscado y ser ejemplo de tenacidad. A mi padre Eduardo que me ha enseñado siempre a dar el valor necesario a las cosas y siempre se ha preocupado por su familia, siendo ejemplo de resiliencia. A ustedes dos que me formaron con reglas, amor y con la motivación para siempre salir a buscar mis anhelos.

A mi hijo Pablo, por su incansable alegría que me transmitía entusiasmo por realizar este trabajo, a mi hijo Gael por su lucha inacabable por salir adelante sin importar su condición y a mi hija Irune, por el amor que completa mi vida desde que llegó a este mundo.

Y finalmente a mi hermano Damián que, aunque lejos, siempre está al pendiente de su familia.

Este trabajo es dedicado a ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) le agradezco por la beca que me otorgó para cursar los estudios de esta maestría.

A Dios que me permitió terminar este trabajo cumpliendo con cada uno de los requerimientos, conservando la salud y pudiendo dar lo mejor de mi para la culminación de esta tesis.

A mi familia, por haber soportado mi ausencia y mi empeño por terminar este posgrado, sacrificando tiempo y energía en ello.

Agradezco infinitamente al maestro Ramon Alberto Luque Morales y al maestro Carlos Anaya Eredias por su apoyo en conocimiento para el desarrollo del proyecto de tesis, sin su valiosa aportación este trabajo no habría sido posible.

Un agradecimiento especial a la empresa Yaskawa Mexico S.A. de C.V. y a su gerente general Jorge Cosio Gaggero por su apoyo de disposición de materiales y equipos para llevar esta investigación a cabo.

* * *

RESUMEN

Esta investigación denominada “análisis de velocidad de soldadura robotizada para proceso MIG en acero 1045 AISI” busca el desarrollo de un modelo matemático que permita, mediante parámetros conocidos, el cálculo de la penetración de soldadura en piezas unidas con proceso *Metal Inert Gas* (MIG). El objetivo se centra en buscar la combinación de valores paramétricos para la velocidad de soldadura, el voltaje y la corriente, los que se obtienen mediante la aplicación de un diseño experimental, que, ejecutadas en el proceso, pueda lograr una penetración de soldadura aceptable para la unión de la pieza. El modelo de superficie de respuesta aplicado fue un diseño de experimentos 2^k con diseño central compuesto, y posteriormente el modelo se utilizó para estimar la velocidad de soldadura. Este diseño de experimentos se ejecutó por medio del programa estadístico Minitab versión 17. (Hernández Acero et al., 2022)

Una vez teniendo la penetración de soldadura deseada en la pieza, se puede calcular la velocidad de soldadura necesaria para el cálculo de tiempo ciclo y utilizar los parámetros definidos de corriente y voltaje. Los valores de estos factores serán útiles para comenzar la programación del robot ya con la celda funcional y reducir el tiempo de arranque en automático. (Hernández Acero et al., 2022)

Palabras clave: Soldadura MIG, Penetración, Tiempo ciclo, Velocidad de soldadura.

ABSTRACT

This research, named "robotic welding speed analysis for MIG process in 1045 AISI steel", seeks to develop a mathematical model that allow, through know parameters, the calculation of welding penetration in parts joined with Metal Inert Gas (MIG) process. The objective is focused on finding the combination of parametric values for robot welding speed, voltage and current, which are obtained through the application of a design of experiments, which, executed in the process, can achieve an acceptable welding penetration for the union of the part. The response surface model applied was a 2^k design of experiments with central composite design, and subsequently the model was used to estimate the welding speed. This design of experiments was obtained using the statistical software Minitab version 17. (Hernández Acero et al., 2022)

Once having the desired welding penetration in the part, it can calculate the welding speed necessary for the cycle time calculation and use the defined parameters of current and voltage to start programming the robot with the functional cell and reduce the time of startup. (Hernández Acero et al., 2022)

Keywords: MIG Welding, Penetration, Cycle time, Welding speed.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xii
GLOSARIO	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ANTECEDENTES	3
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	4
1.3. JUSTIFICACIÓN	6
1.4. OBJETIVOS.....	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. HIPÓTESIS.....	7
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. FUENTES DE SALIDA DE CORRIENTE CONSTANTE Y FUENTES DE SALIDA DE VOLTAJE CONSTANTE	12
2.2. EL EFECTO DE LA CORRIENTE SOBRE LA FUSION DEL METAL.....	13
2.3. EL EFECTO DEL VOLTAJE SOBRE LA LONGITUD Y ANCHO DEL ARCO	14
2.4. PENETRACIÓN DE LA SOLDADURA.....	15
2.5. COMPONENTES PARA SOLDADURA ROBOTIZADA	17
2.6. DISEÑO FACTORIAL 2^k CON PUNTOS CENTRALES COMPUESTO.....	19
3. PROCEDIMIENTO	23
3.1. OBTENCIÓN DE VALORES DE PUNTOS AXIALES	23
3.2. DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS USADOS Y USO DE VALORES PARAMETRICOS PREDEFINIDOS.....	25
3.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN PROGRAMA MINITAB.....	36
3.4. CORRIDAS DE DISEÑO EXPERIMENTAL CONFORME A LA TABLA 5.....	38
3.5. MEDICIÓN DE LA PENETRACIÓN DE SOLDADURA EN LAS PIEZAS	42
3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL.....	46
4. RESULTADOS	57
CONCLUSIONES	60

RECOMENDACIONES	61
APORTACIÓN DE LA TESIS.....	62
APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS.....	63
REFERENCIAS	64
ANEXOS	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de especificación de soldadura en dibujo de fabricación.....	10
Figura 2. Proceso de manufactura de celda robotizada.....	11
Figura 3. Geometría de un cordón de soldadura (vista transversal)	15
Figura 4. Representación geométrica del diseño factorial 2^3	20
Figura 5. Matriz de diseño para experimento 2^3	21
Figura 6. Representación de un diseño central compuesto de tres factores.....	22
Figura 7. Dimensiones y medidas de alcance del robot GP20HL	26
Figura 8. Características, rangos de movimiento y velocidades de ejes de robot GP20HL	26
Figura 9. Preparación de la posición de las piezas (unión a tope) para las pruebas preliminares.....	27
Figura 10. Equipo de corte de alambre a la posición determinada al terminar la soldadura del cordón. Se asegura la distancia del alambre en la tobera de la antorcha.	28
Figura 11. Prueba de robot y equipo de soldadura.....	29
Figura 12. Ejemplo de pantalla de ajuste de parámetros en receta de soldadura (ARC START CONDITION). Se observan las variables a modificarse en el experimento (voltaje, corriente y velocidad de avance del robot).....	30
Figura 13. La selección de los parámetros se realiza en la asignación mediante la línea 0001 – MILLER-PROG-SEL Wlder#:1 Prgm#1. Se indica que tomará la combinación #1 ingresada en el ARC START CONDITION.	31
Figura 14. Sistema de registro para la fijación de las piezas.	32
Figura 15. Pieza seccionada en los puntos donde se revisará la penetración de la soldadura.	33
Figura 16. Preparación de la superficie de la cara donde se realizará la medición de la penetración.	33
Figura 17. Preparación de la mezcla para el ataque químico en la superficie de la pieza, para la prueba rápida de penetración.....	34
Figura 18. Ataque químico por medio de la mezcla en la superficie de la pieza, para la prueba rápida de penetración.....	34

Figura 19. Pieza con aplicación de laca transparente en cara de pieza con penetración revelada.....	35
Figura 20. Medición de la distancia de penetración.....	35
Figura 21. Pantalla predeterminada de programa Minitab.....	37
Figura 22. Parámetros de la corrida número 1. Parámetros ingresados de manera manual para cada una de las corridas.	39
Figura 23. Parámetros de la corrida número 2.	40
Figura 24. Parámetros de la corrida número 20.	40
Figura 25. Marcas en la pieza con soldadura. Se marcan con tinta y con numero de golpe para facilidad de identificación en laboratorio.....	41
Figura 26. Piezas con soldadura aplicada según parámetros y marcadas con el orden establecido.....	41
Figura 27. Metales Base (Acero AISI 1045), unión a tope, zona de fusión y refuerzo.	42
Figura 28. Forma del corte de las probetas.	43
Figura 29. Resultado pieza pulida y ataque químico.	43
Figura 30. Medidas referenciales para valores de tabla 6.	45
Figura 31. Características del diseño central compuesto propuesto para el experimento, resumen de diseño experimental.....	46
Figura 32. Resultado del diseño central compuesto con los valores de resultado de penetración considerando parte lineal, parte cuadrática e interacciones en el modelo de regresión.....	47
Figura 33. Resultado del diseño central compuesto con los valores de resultado de penetración considerando parte lineal e interacciones en el modelo de regresión.	48
Figura 34. Resultado del diseño central compuesto con los valores de resultado de penetración considerando solo la parte lineal en el modelo de regresión.	49
Figura 35. Gráfica comparativa de penetración en el resultado experimental versus la predicción del modelo generado.	50
Figura 36. Gráficas de efectos principales para resultado de penetración. El voltaje esta dado en volts, corriente en amperes y velocidad de avance en cm/min. La penetración resultante está dada en mm.	50

Figura 37. Gráficas de superficie de respuesta (penetración) con respecto Corriente vs Voltaje (izquierda) y Velocidad de avance vs. Voltaje (derecha).....	51
Figura 38. Grafica de superficie de respuesta (penetración) con respecto a velocidad de avance vs corriente.....	52
Figura 39. Gráficas de residuos.....	53
Figura 40. Gráficas de residuos.....	55
Figura 41. Estadísticas del modelo de regresión generado retirando el factor voltaje.....	56
Figura 42. Gráfica comparativa de velocidad en el resultado experimental versus la predicción del modelo generado (ecuación 7).....	57
Figura 43. Gráfica de normalidad de los residuos (Ecuación 7).....	58
Figura 44. Proceso de manufactura de celda robotizada indicando donde el estimado de tiempo ciclo interviene.....	58
Figura A1. Robot GP20HL.....	1
Figura B1. Fuente Auto-Continuum 500 en uso automatizado o manual.....	2
Figura B2. Gráfico de ciclo de trabajo vs Corriente de soldadura.....	3
Figura B3. Instalación típica de una aplicación de soldadura robotizada.....	3
Figura C1. Composición química y equivalencia del acero 1045 en otras normas .	4
Figura C2. Características generales de acuerdo con el suministro.....	4

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de referencia bajos y altos (-1, 1).	23
Tabla 2. Valores de los parámetros en los niveles: $-\alpha$, -1, 0, 1, α	25
Tabla 3. Medición de la penetración.	36
Tabla 4. Orden de corridas para el diseño.	38
Tabla 5. Medidas características de la unión soldada en milímetros (mm) que aparece en la Figura 30.	44
Tabla 6. Tabla generada con medida de penetración en milímetros (mm).	45
Tabla 7. Tabla de observaciones descartando niveles $-\alpha$ y $+\alpha$ de cada parámetro.	54
Tabla 8. Tabla generada con la predicción de los parámetros.	55
Tabla 9. Tabla generada de la predicción de los valores descartando el voltaje.	57

GLOSARIO

Alambre de aporte: Es un alambre de material determinado para el proceso de soldadura con aporte, el cual al ser fundido rellena las partes que pudieran quedar vacías en la operación, llevando un control más preciso en la soldadura y garantizando la continuidad química de la pieza soldada.

Antorcha de soldadura MIG: Es un dispositivo en forma de pistola que se conecta a una manguera de alimentación de gas y a un conducto por el que avanza el alambre de aporte a un proceso de soldadura MIG. La manguera suministra el gas de protección hasta la tobera y el alambre llega hasta la punta de contacto, en donde el proceso de soldadura tendrá efecto.

Cálculo de tiempo ciclo: Es el estimado del tiempo requerido para realizar una tarea de manufactura en determinada pieza, desde el inicio del proceso especificado hasta el término de este, que generalmente es cuando la pieza está terminada y lista para pasar al siguiente proceso. Se consideran parte del estudio los intervalos de tiempo para la preparación de la pieza, la configuración del equipo, y los movimientos intermedios en la pieza para el ajuste del proceso.

Celda robotizada: Es un conjunto de elementos que forman una estación de trabajo completa que incluye sistemas robóticos para realizar un proceso determinado. Estas deben incluir robots, equipos de proceso de manufactura automáticos, sistemas de seguridad para los operadores humanos, sistemas de monitoreo del proceso y puntos de carga/descarga de piezas.

Cordón de soldadura: Es el efecto del proceso de soldadura en una unión realizada. Se constituye por los materiales base y el alambre de aporte fundido. Al finalizar el proceso puede incluir escoria, que es el resultado de impurezas superficiales generadas durante el proceso de solidificación, con el fin de evitar re-oxidación y formación de inclusiones. Finalmente, las escorias son eliminadas mecánicamente de la unión por procesos manuales de limpieza.

Corriente eléctrica: Es la velocidad a la que un flujo de electrones pasa por un punto de un circuito eléctrico, cuya unidad de medida es el Ampere. En la ley de ohm se representa con la letra I.

Diseño factorial: Es un experimento que consta del estudio de la influencia simultanea de dos o más factores y busca comprender el efecto de estos sobre una variable de respuesta determinada.

Factor: Es una variable del proceso que puede adquirir un número finito de valores. Estos pueden ser cualitativos o cuantitativos.

Fiabilidad: Estabilidad y repetitividad en los resultados obtenidos bajo condiciones dadas.

Fuente de soldadura: Equipo de proceso destinado a la realización de las tareas de soldadura en un proceso. Estas pueden ser automáticas o manuales y tienen características como el control de los parámetros de proceso (voltaje, corriente y velocidad de alimentación de alambre).

Modelo matemático: Es una representación a través de ecuaciones matemáticas de un fenómeno o una relación entre una o más variables. Dependiendo del objetivo buscado y del diseño de este, pueden servir para predecir el valor de variables en el futuro, hacer hipótesis y evaluar los efectos de un suceso.

Probeta: Elemento sujeto a una prueba de experimentación, emulando las características del elemento final del proceso que se desea estudiar.

Réplica: Es una repetición de un experimento que busca obtener el error experimental y poder calcular una respuesta más precisa del efecto estudiado. Un mayor número de réplicas realizada puede conducir a una mejor precisión en el resultado.

Robot: Máquina automática programable capaz de realizar operaciones determinadas en una aplicación y así sustituir a los seres humanos en tareas pesadas, peligrosas o repetitivas. Estos pueden incluir sensores capaces de hacer que el robot se adapte a las condiciones cambiantes de un proceso.

Soldadura MIG: Proceso de fusión por arco de una o varias piezas por medio de un alambre metálico de aporte y un gas de protección inerte (del inglés *Metal Inert Gas*).

Velocidad del robot: Es la relación que se establece entre el espacio recorrido por los ejes del robot para llegar a un punto específico en un determinado tiempo que se lleva en hacerlo.

Voltaje: También conocido como potencial eléctrico, es la magnitud física que indica la diferencia de tensión eléctrica entre dos puntos de un circuito eléctrico. Esto indica la energía o trabajo necesario para separar cargas eléctricas de signo opuesto. Su unidad de medida es el Volt y se representa en la ley de ohm con la letra V.

1. INTRODUCCIÓN

La conceptualización de celdas robotizadas implica la resolución de un área de oportunidad en algún proceso de manufactura determinado, mediante el uso y aplicación de tecnología automatizada. Estas incluyen, entre otras cosas, un robot, un dispositivo de proceso (dirigido a modificar las características de cierto proceso), y la propia celda de manufactura, que incorpora sistemas de seguridad y de control. Entre las áreas de oportunidad que se cubren con el uso de celdas de manufactura robotizada se incluyen:

- Calidad del proceso de manufactura.
- Rapidez con la que el proceso se ejecuta.
- Repetibilidad del proceso.
- Problemas de ergonomía.
- Peligrosidad en la ejecución del proceso.
- Control en los parámetros de proceso.

En los procesos de soldadura realizados en la industria manufacturera, dependiendo de la pieza y su uso, se pueden requerir ciertas características en sus propiedades físicas, en las que se encuentran:

- Penetración de soldadura especificada.
- Apariencia correcta del cordón.
- Poca presencia de escoria.
- Baja presencia de porosidad.

Para ello, la calidad en estos parámetros representa un punto crítico para la aceptación de las uniones soldadas. De manera directa, la penetración de la soldadura en piezas dedicadas a la seguridad personal o de sistemas complejos es una característica que debe ser cubierta de acuerdo con la especificación de diseño. La penetración es un requerimiento mecánico para dar fortaleza a la unión y el logro mediante la optimización de parámetros establecidos de ingeniería. Este valor de penetración de soldadura tiene que estar bajo control por parte del fabricante de la pieza manufacturada y es exigida a los equipos de manufactura

dedicados a la transformación o modificación de los materiales, en cuyo caso, muchas ocasiones son celdas de soldadura robotizada.

Un reto común en la industria de la manufactura que implica procesos de soldadura es el control de los parámetros que aseguren la unión de partes bajo normas o especificaciones requeridas por el diseñador. Para hacerlo, se han aplicado métodos de prueba y error que consumen tiempo. De manera recurrente las soldaduras son examinadas para conocer si la unión cumple el requerimiento o no. Finalmente, los parámetros de entrada aplicados al proceso de soldadura pueden ser elegidos para producir una unión de soldadura que cumpla la especificación y/o normas de unión requerida. (Mahesh, 2017)

El estudio de tiempo ciclo de una celda de soldadura robotizada es calculado basándose en estos parámetros de entrada en los diferentes procesos de manufactura. En específico, la velocidad de avance de un robot en el proceso de soldadura MIG está definido por la penetración aceptable, de acuerdo a la especificación solicitada por el cliente, a la cual se requiere llegar en cierta unión de piezas (Ríos Vargas, 2017). Las velocidades calculadas para estos procesos representan el punto de partida para el diseño de una celda de soldadura, desde su etapa de conceptualización y cotización, hasta su programación para producción, ya que es el principal valor para determinar el tiempo ciclo y el porcentaje de utilización de una celda de soldadura robotizada. Al aplicar un esquema de prueba y error, se recurre a pruebas específicas donde el parámetro correcto es resultante de una serie de ensayos destructivos que consumen tiempo y recursos, que, en muchas ocasiones, no se tienen disponibles.

En el capítulo 1 de esta investigación se mencionan los antecedentes y la problemática sobre la cual se realiza este trabajo, además de la justificación, objetivos e hipótesis. En el capítulo 2 se encuentra lo relacionado al marco teórico, involucrando los tipos de equipos utilizados para soldadura con sus características, y lo concerniente al tipo de experimento que se realiza para analizar la respuesta del proceso al ajuste de las variables. En la sección del capítulo 3 se aborda el procedimiento utilizado, cómo se obtuvieron los valores para el experimento, el

análisis de los datos generados en la superficie de respuesta del modelo. Finalmente, el capítulo 4 contiene los resultados de la investigación.

1.1. ANTECEDENTES

La soldadura MIG es un proceso automático o semiautomático en el cual un alambre consumible y continuo, acompañado de un gas de protección, son alimentados a través de una antorcha de soldadura (Hooda et al., 2012). Combina ciertas variables en su aplicación, desde gases protectores mezclados (generalmente Argón y CO₂ en diferentes concentraciones), hasta parámetros de entrada como la voltaje y corriente implementados, para obtener las propiedades mecánicas favorables para la unión de piezas metálicas.

El proceso de soldadura tiene como objetivo la unión permanente de materiales generalmente metálicos, donde se funden dos o más superficies de contacto por medio de calor o presión, haciendo muy complicado la separación de ambas posteriormente. (Contreras et al., 2018)

Originalmente desarrollado para soldadura de aluminio y otros materiales no ferrosos en la década de 1940, el proceso de soldadura GMAW (*Gas Metal Arc Welding*, el cual incluye a la soldadura MIG) fue aplicado también en aceros porque permitía un tiempo de soldadura menor comparado a otros procesos de unión. Hoy en día, el GMAW es el proceso de soldadura más común en la industria, preferido por su versatilidad, velocidad y relativa facilidad de adaptación al proceso de automatización robotizada. (Hooda et al., 2012)

Esta investigación se enfoca en el desarrollo de un modelo matemático, mediante un diseño experimental, que permita, mediante parámetros conocidos, el cálculo de la penetración de soldadura en piezas unidas con proceso MIG (*Metal Inert Gas*). Esto ayudará en el proceso de cálculo de tiempo ciclo que oriente a conceptualizar un escenario acercado a la realidad y que permita mejorar las propuestas realizadas a los clientes potenciales de la empresa.

En algunas investigaciones realizadas previamente, se ha comprobado que existe correlación entre las variables de entrada en el proceso. En procesos de soldadura

de acero al carbono se ha estudiado el modelo de comportamiento de la soldadura con variables de entrada como el caudal de Gas, la velocidad del hilo, el voltaje y la posición de la antorcha, donde se ha generado un modelo de respuesta para el valor óptimo de la misma. (Martinez et al., 2011)

La predicción de la variable de penetración ha sido también estudiada según aprendizaje a fondo, por medio de la detección de las transiciones en el proceso, con la fundición completa del metal base, la presencia del metal líquido en la pieza y la luminosidad del material en el proceso. Con ello, toda la información de las variables observadas en la superficie de la pieza son procesadas mediante redes neuronales de convolución y residuales. El modelo predice los resultados mediante un enfoque de aprendizaje profundo de extremo a extremo y un aprendizaje de transferencia se utilizó para mejorar el rendimiento del modelo (Wenhua et al., 2020). El sistema de predicción proporciona un método simple para predecir el estado de la penetración sin involucrar las variables ajustadas en la fuente de soldadura, sino de manera visual.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente en la empresa Yaskawa Mexico S.A. de C.V., se presenta la problemática en el cálculo erróneo del estimado del tiempo ciclo, debido a consideraciones incorrectas en el parámetro de velocidad de soldadura del robot. Al tener como base un valor de velocidad estimada considerado de manera empírica y obtenido de la experiencia de procesos similares, el principal riesgo es que la celda de manufactura no producirá el volumen requerido de piezas unidas mediante soldadura robotizada. Como respuesta, el volumen queda por debajo del requerimiento del cliente final y, por consiguiente, la necesidad de una contramedida emergente, donde se involucra a la empresa encargada de la conceptualización y construcción de la celda en cuestión.

Esto puede provocar las siguientes contramedidas que son similares a las que se presentarán al cliente potencial:

- Uso de tiempo adicional al originalmente planeado para la manufactura de las piezas (por ejemplo, utilizar la celda horas, turnos, o días adicionales, con la implicación de usar personal y recursos adicionales para la operación de la celda).
- Requerimiento de equipos adicionales para lograr la producción deseada (compra de celdas con robots adicionales o convertir ciertos procesos considerados a ejecutarse en la celda robotizada en operaciones manuales para desahogar tiempo de trabajo al robot).
- Envío de piezas con proveedores externos para la ejecución del proceso de soldadura robotizada para cumplir con el volumen de producción requerido.

Estas contramedidas requieren de gastos adicionales de capital que provocan la reducción del margen de ganancia por pieza, uso de área de producción adicional requerida para nuevos equipos y/o contratación de operadores de dichas celdas de manufactura. Todos estos puntos no considerados en la inversión inicial planeada por el comprador de la celda de manufactura en la etapa de cotización pueden provocar una pérdida monetaria importante a las empresas que adquieren este tipo de celdas robotizadas de manufactura. Para el caso de la empresa Yaskawa México este tipo de errores en el cálculo representa la inversión monetaria de equipos adicionales no considerados en la propuesta inicial (y por consiguiente en la venta realizada), reduciendo el margen de ganancia o incluso, teniendo pérdidas por la inclusión de elementos adicionales. En ocasiones estas pérdidas son referidas por penalizaciones en los contratos de compra-venta de hasta un 20% del monto total del proyecto.

Para la estimación con un mínimo de error de la velocidad de soldadura, se considera el uso de un modelo matemático que relacione los parámetros fundamentales del proceso de soldadura. Estos serían la velocidad del robot, la corriente, el voltaje del proceso y la penetración de la soldadura deseada en la unión. Dichos parámetros tal que sean un punto de partida en el cálculo de tiempo ciclo de una celda de soldadura robotizada, con la cual, la conceptualización sea

efectiva y establezca la solución cercana a la necesidad de una empresa para la producción de una pieza de acero 1045.

Con el modelo matemático se busca controlar los parámetros de entrada en las variables de control (voltaje, corriente y velocidad de soldadura) y así obtener el valor de velocidad requerida para la estimación del tiempo ciclo.

Adicionalmente, la investigación y obtención de un modelo que ayude con la estimación de la velocidad contribuirá con la obtención de valores iniciales de programación para la puesta en marcha de la celda, y una vez que se encuentre construida y habilitada, se reducirá el tiempo de implementación con respecto al método de prueba y error, reduciendo así el material requerido para dichas pruebas.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Durante la etapa comercial en un proyecto se requiere el cálculo estimado del tiempo ciclo, donde se busca visualizar las características que tendrá el proceso. Este estimado, en el que se involucra el parámetro de velocidad del robot de soldadura es indispensable ingresarlo en la simulación, para así definir un tiempo ciclo completo del proceso en la pieza. La finalidad es incluir el resultado de este estimado en la oferta comercial, para así asegurar que la celda robotizada produzca las piezas requeridas en el tiempo especificado.

Este estudio busca contribuir al desarrollo de una base comprobada, en la cual, las personas responsables de realizar el estudio de tiempo ciclo para el diseño de una celda, y el equipo de programación del proceso robótico de soldadura, partirán de un punto base hacia el desarrollo final de la solución. Con ello se obtendrá un parámetro confiable de velocidad de soldadura a usar en la conceptualización de una o varias celdas robotizadas, así como una disminución del tiempo de conceptualización (al no hacer pruebas para cada caso en específico para este material) y la disminución en tiempo de programación, ayudando a la mejora de tiempos de entrega de una celda funcional.

El estudio se realiza utilizando acero 1045 AISI debido a que es un material utilizado ampliamente en los proyectos para celdas de soldadura robotizada en la industria automotriz y de la agricultura.

Para esta investigación, se considera el estudio tomando como alcance el analizar únicamente la soldadura en uniones biseladas tipo 1G, ya que representa el mayor porcentaje de uniones solicitadas en las aplicaciones con soldadura robotizada destinadas en la empresa contra el total de uniones requeridas. Cabe destacar que uniones diferentes también son solicitadas, pero con respecto al tipo de posición de soldadura estudiada, son requeridas en menor frecuencia.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Con esta investigación se desea obtener un modelo matemático, mediante un diseño experimental, que permita evaluar velocidades estándar para un robot ejecutando cordones de soldadura MIG que, en conjunto con el parámetro aceptable de penetración dada por el cliente, se utilizarán para calcular tiempos de ciclo y al mismo tiempo se tomen como base de inicio de programación para un robot.

1.4.2. Objetivos específicos

Estimar el parámetro de velocidad de soldadura en la cual la penetración de la soldadura pueda ser calculada para la unión de ciertas piezas de acero 1045 AISI en cordones planos y horizontales, que representen una tendencia y un punto de partida para el cálculo de tiempo ciclo teórico.

1.5. HIPÓTESIS

Sobre la base de un diseño experimental realizado con soldadura MIG robotizada y placa de acero 1045 AISI, es factible obtener un modelo matemático que conduzca a la generación de una base de datos (por medio de una ecuación

referencial) con la cual, partiendo de parámetros propios del proceso (voltaje y corriente), espesor del material y penetración aceptable de soldadura en cordones planos y horizontales, se pueda estimar la velocidad de soldadura y permita tener confianza en los cálculos de tiempo ciclo para el diseño de la celda y establezcan una base en la etapa inicial de programación del proceso de soldadura MIG robotizada para procesos con Acero 1045.

2. MARCO TEÓRICO

De acuerdo con la investigación realizada, la penetración de la soldadura depende de varios factores a considerar en el producto final, como la resistencia requerida en el producto soldado. El requerimiento, entonces, se basa en la característica deseada para la pieza.

El proceso de conceptualización de una celda robotizada para soldadura se describe a continuación:

- Se recibe la información técnica por parte del cliente, que incluye como mínimo los siguientes datos y documentos:
 - Dibujos y/o planos de fabricación de la pieza requerida en 2D indicando la especificación de soldadura.
 - Modelos 3D.
 - Materiales para utilizar en el ensamble completo (tipo de material, espesor, tratamientos).
 - Preferencias en marcas y modelos de alambre y especificación de gas para proceso MIG.
 - Cantidad de piezas requeridas a producir.
 - Tiempo disponible para trabajar en la celda.
 - Área disponible para la celda de soldadura robotizada.
- Se realiza el análisis de la pieza y totalidad de cordones de soldadura según especificación de dibujos de manufactura, como se muestra en la Figura 1.
- Se establecen las actividades que el robot realiza a lo largo del proceso de soldadura, como movimientos en vacío para reubicación de cordones, movimientos de entrada y salida hacia la pieza, y el proceso de la limpieza automática de tobera de antorcha.
- Se agregan las longitudes de soldadura y la cantidad de cordones en el archivo del cálculo de tiempo ciclo.
- De acuerdo con el tamaño de cordón y sus características, se establece (según experiencias previas) una velocidad de avance estimada para el robot de soldadura.

- Estos datos son incluidos en un archivo de Excel donde se realiza un cálculo del estimado de tiempo ciclo, agregando tiempos de carga y descarga de pieza, tiempo de limpieza de la antorcha (según longitud de soldadura aplicada) y eficiencia requerida en el sistema (abajo del 90%).
- Finalmente, basado en el resultado del estimado de tiempo ciclo, se conceptualiza la solución con la cantidad de celdas y robots adecuados para la producción requerida.

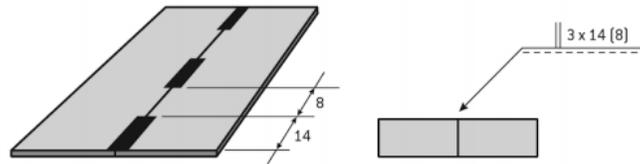


Figura 1. Ejemplo de especificación de soldadura en dibujo de fabricación
(Alonso Marcos, 2021)

Con los pasos anteriores se obtiene el estimado de tiempo ciclo, y el resultado es incluido en la propuesta técnica y económica ofrecida por la empresa para la celda requerida.

Una vez que el concepto es aprobado y el cliente genera la orden de compra del proyecto, se finaliza la etapa comercial y comienza con el proceso de ejecución, donde la celda es fabricada y ensamblada. Los equipos robóticos y comerciales son adquiridos e integrados a la celda de soldadura robotizada. Estos incluyen los propios robots, posicionadores de la pieza, dispositivos herramientales para sujeción de la pieza, rejas perimetrales, dispositivos de seguridad y de control, controladores lógicos programables y paneles de operador (Interfaces humano-máquina).

Cuando se termina el proceso de ejecución y la celda robotizada está instalada en la planta del cliente, se lleva a cabo el proceso de aceptación del equipo, evaluando el funcionamiento y que el pronóstico de producción de la celda se cumpla, referenciando al estimado del tiempo ciclo elaborado al inicio de la propuesta técnica. El proceso completo de creación de la celda se muestra en la

Figura 2, donde el tiempo de cálculo de tiempo ciclo estimado se involucra en los procesos marcados en naranja.

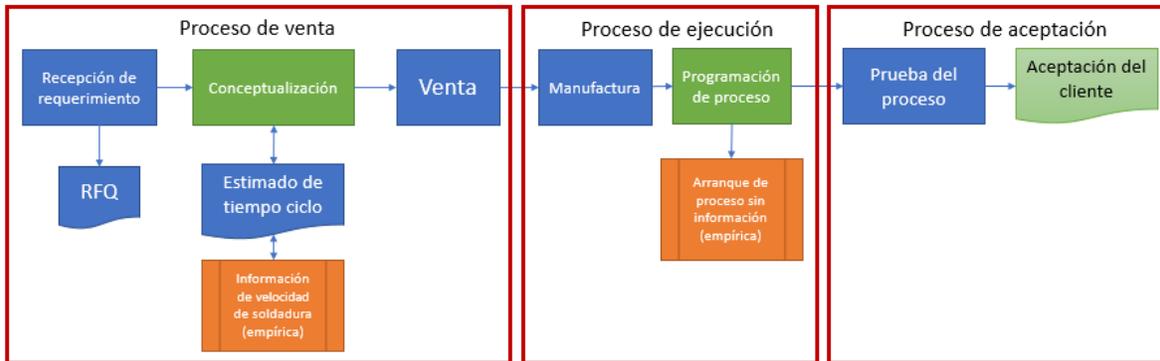


Figura 2. Proceso de manufactura de celda robotizada.

Elaboración propia

Es de gran importancia que el equipo produzca lo más cercano al estimado entregado, ya que, de lo contrario, pueden surgir dos escenarios cuando el usuario final lo evalúa y que pueden representar áreas de oportunidad:

- Que el equipo está **subutilizado** y produce las piezas requeridas en muy poco tiempo, quedando la mayor parte del mismo sin utilizarse.
- Que el equipo está **sobre utilizado**, no cumpliendo la cantidad de piezas requeridas para producir, y necesita más tiempo para llegar a la meta de producción. En el peor de los casos, el usuario final requerirá equipo adicional para llegar a su objetivo (necesidad de invertir dinero adicional en los equipos, que el destinado inicialmente en el proyecto).

En algunas ocasiones, el cliente solicita una simulación para revisar las características del proceso y la estimación del entorno de este. Las variables como el tiempo ciclo son estudiadas bajo este concepto, esperando que el proceso físico se apege lo más cercano a lo que se estima en la simulación. En el caso de los procesos de soldadura, el parámetro de velocidad del robot aplicando soldadura es indispensable ingresarlo en la simulación, para así definir un tiempo ciclo estimado.

Al basarse en información empírica para el cálculo de tiempo ciclo se presenta un riesgo potencial de no cumplir el objetivo de la celda robotizada.

2.1. FUENTES DE SALIDA DE CORRIENTE CONSTANTE Y FUENTES DE SALIDA DE VOLTAJE CONSTANTE

Desde el punto de vista del diseño, las fuentes de soldadura se pueden clasificar en fuentes de poder de soldadura con salida de voltaje constante y fuentes de poder de soldadura con salida de corriente constante. Las fuentes de poder multiproceso pueden incluir ambas características, ya que incorporan circuitos y componentes que permiten el control de ambos parámetros dependiendo del modo seleccionado. La selección del tipo de fuente de poder a utilizar se determina mediante el nivel de automatización del proceso. (The Lincoln Electric Company, 2022b)

En los procesos de soldadura por arco de metal protegido (SMAW) y de soldadura por arco de tungsteno con gas (TIG) en el que la aplicación es manual, las variables son controladas por la habilidad del soldador, es decir, a mano. La velocidad de aplicación, el ángulo de trabajo, la longitud del arco y la velocidad a la que se introduce el electrodo en la articulación es realizado por el operador. El tipo preferido de fuente de poder para estas aplicaciones es de corriente constante. La corriente afecta la velocidad de fusión o la velocidad de consumo del material de aporte, ya sea un electrodo de varilla o un electrodo de alambre. Si el nivel de corriente es alto, más rápido se funde el electrodo o mayor es la velocidad de fusión, medida en libras por hora (lbs/h) o kilogramos por hora (kg/h). Si la corriente es menor, disminuirá la velocidad de fusión del electrodo. (The Lincoln Electric Company, 2022b)

Para el caso del proceso de soldadura por arco metálico con gas (GMAW) (también conocido como MIG) y el proceso de soldadura por arco con núcleo de fundente (FCAW) se consideran procesos semiautomáticos o automáticos. En estos se puede controlar el ángulo de desplazamiento, el ángulo de trabajo, la velocidad de desplazamiento y la distancia entre la punta de contacto y la pieza a soldar. Sin

embargo, la velocidad a la que el electrodo se introduce en la antorcha (conocida como velocidad de alimentación de alambre) se controla automáticamente con un alimentador de alambre de velocidad constante. Con los procesos GMAW y FCAW (semiautomáticos), la fuente de poder de voltaje constante es la configuración preferida. (The Lincoln Electric Company, 2022b)

Para el caso de los procesos automáticos se incorporan tecnologías donde las fuentes multiproceso son añadidas a un brazo robótico. En el proceso se pueden controlar tanto las velocidades de aplicación, como el voltaje y la corriente necesarios para obtener un arco estable. En algunos casos, donde los procesos son avanzados, algunas opciones son adicionadas para obtener retroalimentación del proceso en tiempo real y así ajustar los parámetros para lograr un resultado determinado.

2.2. EL EFECTO DE LA CORRIENTE SOBRE LA FUSION DEL METAL

La corriente en el proceso de soldadura es un parámetro controlable, para procesos automáticos. Se establece un valor de corriente para garantizar el calentamiento del material de aporte y la pieza. Esto se genera tanto en el corto circuito generado, como durante el arco. En general, los procesos con control de corriente constante buscan crear las condiciones óptimas para que el contacto ocurra entre el material de aporte (convertido en gota metálica por la fundición del material por el calor generado) y el volumen líquido en la pieza. (Vergara et Soto, 2018)

En términos generales, el aumento de la corriente a su vez aumenta el calor generado en el proceso, garantizando un asentamiento adecuado de la gota de material fundido en el volumen líquido en el punto de la aplicación de la soldadura. Un uso adecuado de la corriente también permite la fluidez en la unión de ambos materiales cuando están en estado líquido. Por el contrario, cuando la corriente es demasiado baja, no realizará la unión de los materiales al generar una repulsión de la gota formada con el material base, y a una corriente demasiado alta, generará

salpicaduras del material perdiendo la estabilidad y fluidez del proceso. (Vergara et al., 2018)

2.3. EL EFECTO DEL VOLTAJE SOBRE LA LONGITUD Y ANCHO DEL ARCO

El voltaje de soldadura se entiende como el voltaje entre el extremo del alambre y la pieza a soldar. El voltaje tiene un efecto importante, ya que representa la longitud del arco e impacta directamente a la variación del proceso o transferencia de metal deseada. En el caso de la soldadura por arco por corto requiere voltajes relativamente bajos, mientras que la soldadura por rocío requiere voltajes altos. También debe mencionarse que, mientras la corriente de soldadura y la temperatura aumentan, el voltaje también debe aumentarse para mantener la estabilidad del proceso. (Vasdev, 2022)

El efecto visual de la aplicación el voltaje está relacionado con el grosor del cordón de soldadura. Una forma convexa de cordón de soldadura con frecuencia indica que el voltaje y la corriente no son compatibles con el espesor del metal base (Vasdev, 2022). Una aplicación de voltaje adecuado con una corriente y una velocidad de avance adecuado generará un cordón liso, extendido y sin socavones. Mientras que la porosidad también es un parámetro que se controla al establecer niveles adecuados de voltaje. Con un voltaje bajo para el proceso puede generar la inestabilidad del arco, haciendo que el cordón generado sea delgado y abultado, con una inclusión de escoria alta, dificultando su retiro. Por el contrario, un voltaje demasiado alto para el proceso generará una longitud de arco muy alta en donde el cordón de soldadura será cóncavo, sujeto a rotura y con socavación en los lados del cordón. (Molera Solá, 1992)

En este estudio se pretende comprobar también la relación que el voltaje tiene con respecto a la corriente y a la velocidad de avance, y si es un factor importante que muestre correlación en el modelo para el cálculo de la velocidad requerida para lograr la penetración deseada.

2.4. PENETRACIÓN DE LA SOLDADURA

La penetración, también conocida como la profundidad de fusión, es definida por la AWS como “la distancia en el que la fusión se extiende entre el metal base por la superficie del material derretido durante el proceso de soldadura”. Una sección transversal de una soldadura (particularmente cuando es cortada), mostrará el perfil de penetración de la soldadura, incluyendo la profundidad y el ancho de la penetración, como se puede observar en la Figura 3.

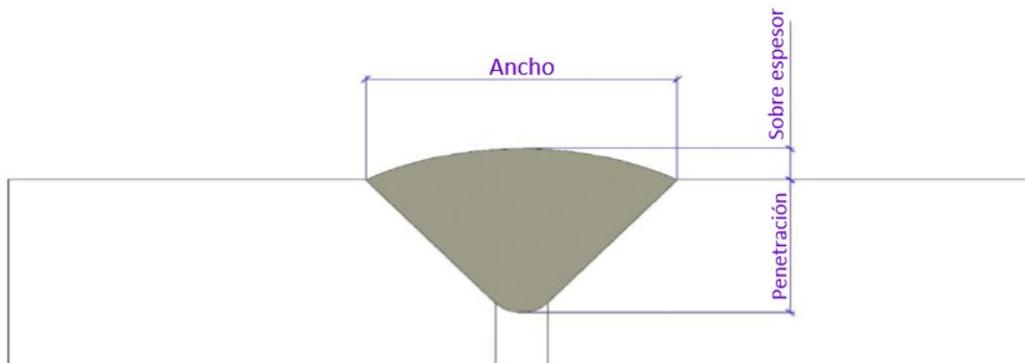


Figura 3. Geometría de un cordón de soldadura (vista transversal)

(Siddharth Kumaran et Oliver Nesa Raj, 2018)

Sin importar si se tiene una penetración profunda o superficial, teóricamente se puede tener una fusión completa considerando solo una profundidad de penetración en una distancia muy pequeña y todavía la pieza estaría unida mediante la soldadura. La fuerza de la soldadura está determinada alcanzando una fusión correcta y completa dependiendo de otros factores, como el tipo de soldadura, el espesor de la soldadura, el material, etcétera (The Lincoln Electric Company, 2022a). Es extremadamente complicado asegurar una fusión al 100% en la superficie, sin embargo, para asegurar la fuerza de la unión, generalmente se recomienda mínimo el 10% de penetración (verificado posteriormente para asegurar que la fusión tomó lugar con la superficie). Según el estándar de soldadura establecido por la AWS, se requiere mínimo un 10% de penetración del grosor total de la placa o lamina a unir, para considerar una buena unión de los materiales por medio de soldadura. (American Welding Society (AWS) D8 Committee on Automotive Welding, 2007)

La soldadura por arco metálico usa un electrodo de metal consumible, el cual se derrite en presencia del intenso calor del arco eléctrico. Gotas del metal consumible son expulsadas del electrodo e inciden en la base metálica para reforzar la soldadura, por lo tanto, la energía aumenta la transferencia del material al metal base por la energía propia en las gotas que chocan con el material fundido, formando un volumen líquido. Esta transferencia afecta muchos aspectos del proceso de soldadura, entre otras la penetración del volumen líquido de soldadura. Esta penetración es controlada según el impulso que tengan las gotas para llevar la energía al punto de aplicación y remover el material a su alrededor. Bajo ciertas circunstancias, el impulso provoca una penetración profunda y estrecha, que a menudo se observa en la soldadura GMAW, usando un gas de protección rico en Argón y con un contenido bajo en oxígeno. (Murray et Scotti, 1999)

Los modelos teóricos de transferencia de calor al volumen líquido de soldadura se han usado previamente para predecir el tamaño y la forma del área de la sección transversal del material fundido. (Murray et al., 1999)

Para alcanzar una correcta unión soldada, se requiere una fusión completa entre el material base y el material de aporte, pero no todas las uniones requieren una alta o profunda penetración. (The Lincoln Electric Company, 2022a)

Al unir las piezas por medio del proceso de soldadura, logrando una fusión completa entre el material de aporte y los metales base, se habrá logrado exitosamente unir los metales en una pieza homogénea. (The Lincoln Electric Company, 2022a)

Las piezas requeridas por la industria en general, dependiendo del cliente y sus requerimientos de resistencia del producto, tienen estándares específicos, donde pueden variar parámetros requeridos de penetración entre un 10% y un 80%. Sin embargo, algunos requerimientos pueden solicitar el 100% de penetración con algunas piezas (American Welding Society (AWS) D8 Committee on Automotive Welding, 2007). Como ejemplo, en lo concerniente a la industria automotriz, los fabricantes de equipo original solicitan de un 20% a un 80%, como el estándar

establecido por Toyota para uniones de soldadura. (Toyota Metallic Material Div., 2000.)

2.5. COMPONENTES PARA SOLDADURA ROBOTIZADA

La automatización en los procesos de soldadura es preferida por la industria por el incremento en la calidad final del producto, y la reducción del tiempo en el proceso. Los robots son utilizados ampliamente en donde la manufactura de productos a base de láminas y/o bloques metálicos, requieren de procesos de soldadura.

Inicialmente los robots se comenzaron a utilizar en el año 1960 en las industrias de Estados Unidos y, desde 1980 para procesos de soldadura por resistencia. En años recientes, la aplicación de soldadura de arco con robots se ha desarrollado muy rápido. (Siddharth Kumaran & Oliver Nesa Raj, 2018)

Para lograr el control de los parámetros de soldadura, y elevar la calidad del proceso con respecto a una soldadura aplicada manualmente, la industria ha optado por utilizar robots destinados a dicho proceso. Los robots pueden lograr tiempos de ciclo eficientes y controlados, con una calidad consistente contra los resultados ofrecidos en la soldadura manual. Integrar y programar los robots se ha hecho significativamente fácil, generando el retorno de la inversión por los equipos en relativamente poco tiempo.

Los robots más utilizados actualmente en la industria se componen de 6 grados de libertad o movimiento, con los cuales el acceso a los diferentes puntos de soldadura es flexible. Sin embargo, existen opciones de hasta 7 grados de libertad para piezas complejas y con necesidades específicas de posiciones de soldadura. La denominación de cada grado en el robot tiene una letra asignada, siendo S, L, U, R, B y T. Los 6 grados de libertad designados en un robot de la marca Yaskawa (en otras marcas de robots la designación puede ser diferente a la mostrada), se describen a continuación:

S: *Swivel Base* (Giro de la base)

L: *Lower Arm* (Parte inferior del brazo)

U: *Upper Arm* (Parte superior del brazo)

R: *Arm Roll* (giro del brazo)

B: *Wrist Bend* (Flexión de la muñeca)

T: *Tool Flange* (Brida para la herramienta)

(Yaskawa Europe GmbH, 2022)

El controlador del robot incluye los componentes para el movimiento monitoreado del mismo, con el cual se puede lograr un control de movimiento adecuado para la aplicación. Entre los componentes más importantes del controlador se encuentran los servodrivres (dispositivos necesarios para el control de cada uno de los motores), el CPU (el dispositivo de control con el cual se gestionan las señales para el movimiento y que procesa la programación del robot), el *teach pendant* (dispositivo de entrada de instrucciones y de monitoreo de programas, posición de ejes con valores numéricos, y control en general del robot), la tarjeta de comunicación y la etapa de potencia (que administra el voltaje y corriente necesarios en el sistema robótico completo). Algunas tarjetas adicionales para gestión de seguridad y control de dispositivos adicionales pueden ser incluidas según la aplicación (señales de entradas y salidas eléctricas específicas, discretas y analógicas, entre otras).

Como parte del sistema robótico de soldadura se incluyen también las fuentes de soldadura automáticas. Estas incluyen un sistema de control con una interfaz que puede ser analógica o digital, y que, en combinación con el controlador del robot, integra un sistema automático de soldadura con monitoreo de estatus del proceso y, de activación y desactivación del proceso de soldadura según se requiera. Adicionalmente pueden incluir sensores de monitoreo del proceso de soldadura (retroalimentación) en tiempo real, que ajusta los parámetros en la fuente, para casos donde la pieza requiere por su geometría un ajuste en automático. Estas funciones son limitadas a la posición de la soldadura y tolerancia geométrica de la

pieza. Otros ajustes son realizados en combinación con el robot, por ejemplo, para rellenar huecos donde, por la tolerancia de la pieza, se requieren de manera automática en parámetros de la fuente y en el movimiento del robot.

Para la aplicación de la soldadura, algunos equipos adicionales son utilizados, como los sistemas de guiado y control de velocidad del alambre, así como la antorcha de soldadura. Para este último caso, algunas antorchas controladas por servo gestionan la alimentación del alambre de aporte hacia el proceso de soldadura robotizada, ayudando al alimentador de alambre montada en el robot a tener una proporción adecuada de alimentación en el punto de aplicación, sin tener daños en el alambre. Otro tipo de antorchas más sencillas son utilizadas por economía en el equipo usado y requerimientos cubiertos con un equipo básico (que aún básicos incluyen control de aportación de gas y alimentación correcta del alambre).

2.6. DISEÑO FACTORIAL 2^k CON PUNTOS CENTRALES COMPUESTO

Para el estudio del efecto de la penetración con respecto a las variables de entrada (voltaje, corriente y velocidad de avance del robot), se decidió realizarlo mediante un diseño de experimento 2^k con puntos centrales. En este caso, al replicar puntos centrales, permite obtener grados de libertad adicionales para estimar la varianza del error.

Los diseños factoriales son muy utilizados cuando se requiere estudiar la respuesta de un fenómeno bajo el efecto de un conjunto de factores. Uno de ellos es el diseño de k factores, cada uno solo con dos niveles. Estos niveles pueden ser cualitativos (presencia de operadores o no, nivel alto o bajo de un factor) o cuantitativos (valores de temperatura, presión o tiempo) dependiendo del factor a estudiar. Una réplica completa de este tipo de estudios requiere $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ observaciones y se llama diseño factorial 2^k . (Montgomery, 2004)

El diseño 2^k proporciona el menor número de corridas con las que se puede estudiar los diferentes factores en un diseño factorial completo, es por ello que son usados

ampliamente en los experimentos de tamizado o selección de factores. (Montgomery, 2004)

Al tener dos niveles para cada factor, se podría suponer una respuesta aproximadamente lineal en el rango elegido para los dos niveles, sin embargo, el estudio propuesto mediante el diseño central compuesto permitirá determinar la posible presencia de curvatura.

El objetivo del uso de este tipo de diseños es el obtener un modelo de regresión que proporcione una respuesta aproximada bajo los efectos de los tres diferentes factores que se estudiarán (voltaje, corriente y velocidad de avance del robot, que de ahora en adelante será denominada velocidad de avance).

El diseño elegido es el factorial 2^3 , teniendo los tres factores, A, B y C como parámetros de interés. La representación geométrica de las ocho combinaciones de tratamientos puede hacerse con un cubo como se muestra en la Figura 4.

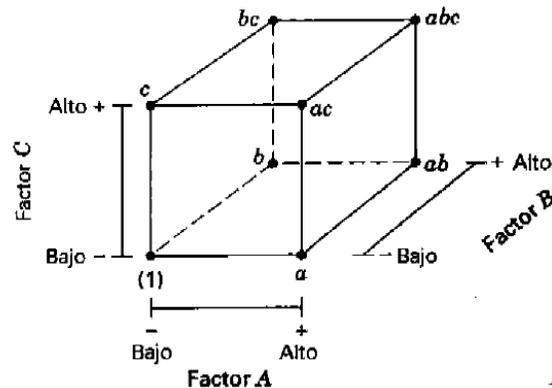


Figura 4. Representación geométrica del diseño factorial 2^3

(Montgomery, 2004)

Utilizando la notación "+" y "-" para representar los niveles altos y bajos de los factores, las 8 corridas se enlistan en la matriz de diseño. Las combinaciones de los tratamientos en el orden estándar se escriben como (1), a, b, ab, c, ac, bc, y abc. Estos símbolos también representan el total de las n observaciones hechas con esa combinación de tratamientos particular (ver Figura 5). (Montgomery, 2004)

Corrida	A	B	C	Etiqueta	A	B	C
1	-	-	-	(1)	0	0	0
2	+	-	-	a	1	0	0
3	-	+	-	b	0	1	0
4	+	+	-	ab	1	1	0
5	-	-	+	c	0	0	1
6	+	-	+	ac	1	0	1
7	-	+	+	bc	0	1	1
8	+	+	+	abc	1	1	1

Figura 5. Matriz de diseño para experimento 2³
(Montgomery, 2004)

En el estudio se tienen siete grados de libertad entre las ocho combinaciones de tratamientos para el diseño 2³. Tres grados de libertad se asocian con los efectos principales de A, B y C. Cuatro grados se asocian con las interacciones, uno con cada una de las interacciones AB, AC, y BC y uno con la interacción ABC. (Montgomery, 2004)

Una preocupación en el uso de diseños factoriales de dos niveles es que se supone una respuesta lineal de los efectos de los factores estudiados. Ya que no es necesario la linealidad perfecta, el sistema 2^k representa una solución que funciona bastante bien de manera aproximada. Para el modelo de los efectos principales, si se agregan los términos de interacción a la ecuación, se obtiene:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon$$

Ecuación 1. Modelo de superficie de respuesta de primer orden

Entonces se tiene un modelo con la capacidad de representar curvatura en función de la respuesta. Esta curvatura se da por los términos de interacción $\beta_{ij} x_i x_j$. En algunas situaciones en que la curvatura de la función no está modelada adecuadamente por la ecuación 1, en tales casos el modelo lógico a considerar es:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} x_j^2 + \varepsilon$$

Ecuación 2. Modelo de superficie de respuesta de segundo orden

Donde las β_{jj} representan efectos cuadráticos o de segundo orden puros. A esta ecuación se le llama modelo de superficie de respuesta de segundo orden. (Montgomery, 2004)

Existe un método para hacer una réplica de ciertos puntos de un diseño factorial 2^k que ofrece un ajuste a la curva de los efectos de segundo orden, al mismo tiempo que permite una estimación independiente del error que va a obtenerse. Este método consiste en agregar puntos centrales en el diseño 2^k . Esto consiste en n replicas que se corren en los puntos $x_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, k$). Una razón importante para agregar las réplicas de las corridas en el centro del diseño es que los puntos centrales no afectan las estimaciones usuales de los efectos en un diseño 2^k . Cuando se agregan puntos centrales, se supone que los k factores son **cuantitativos**. (Montgomery, 2004)

Debido a que se tienen más parámetros desconocidos (las β del modelo de regresión), la solución más simple y efectiva es añadir 6 corridas axiales. A este diseño se denomina **diseño central compuesto**, para ajustar el modelo de segundo orden. En la Figura 6 se muestra un diseño central compuesto para $k = 3$ factores. Este diseño tiene $14 + n_c$ corridas (generalmente $3 \leq n_c \leq 5$), y es un diseño eficiente para ajustar el modelo de segundo orden con 10 parámetros en $k = 3$ factores. (Montgomery, 2004)

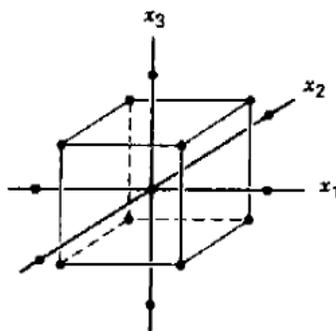


Figura 6. Representación de un diseño central compuesto de tres factores
(Montgomery, 2004)

Finalmente, este tipo de diseños compuestos centrales se usan ampliamente para construir modelos de superficies de respuesta de segundo orden.

3. PROCEDIMIENTO

3.1. OBTENCIÓN DE VALORES DE PUNTOS AXIALES

El diseño de experimento elegido para el estudio que se llevó a cabo es un diseño 2^k con puntos centrales compuesto. Esto para realizar el ajuste en caso de curvatura de la superficie de respuesta. La respuesta que se estará buscando es el porcentaje de penetración de la soldadura (basado en la distancia de la superficie de la pieza a la profundidad de la penetración), tomando en cuenta los tres factores que interactúan en el resultado: voltaje, corriente y velocidad de avance aplicados en el proceso.

De manera inicial se realizó una prueba con algunas de las piezas que se van a estudiar, para validación del sistema y del procedimiento para la prueba del diseño de experimentos. Bajo la definición de los niveles bajos y altos de los tres factores, se consideraron valores de experiencia según procesos de manufactura desarrollados en la empresa en proyectos anteriores. La tabla 1 muestra niveles bajos y altos para los factores estudiados.

Tabla 1. Niveles de referencia bajos y altos (-1, 1).

Parámetro	Niveles		Unidades
	Bajos	Altos	
Voltaje	18	25	Voltaje
Corriente	150	400	Corriente
Velocidad de avance	40	100	Velocidad de avance

Elaboración propia

Como punto inicial se establecieron los niveles bajos y altos, y se definieron los puntos axiales del diseño, a una distancia α del cero, para garantizar la rotabilidad del mismo. Para ello utilizamos un α de acuerdo con el valor de número de puntos factoriales. (Hernández Acero et al., 2022)

Siendo que

$$\alpha = \sqrt[4]{F}$$

Ecuación 3. Distancia α del centro del cubo al punto axial

Donde

$$F : \text{número de puntos factoriales} = 2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$$

$$\text{Entonces } \alpha = \sqrt[4]{F} = \sqrt[4]{8} = 1.681$$

Con ello se define la distancia del centro al punto axial determinado con un valor de $\alpha = 1.681$.

Para determinar los valores de voltaje, corriente y velocidad de avance, con base en la información disponible para la ecuación donde se observa una relación entre las variables naturales (factores) y la variable codificada (bajo y alto, -1, +1), se tiene que:

$$x = \frac{Vp - (Vb + Va)/2}{(Va - Vb)/2}$$

Ecuación 4. Ecuación de variable codificada

Donde

x = variable codificada

Vp = Valor del factor en la variable codificada

Vb = Valor Bajo (valor del factor en -1)

Va = Valor Alto (valor del factor en +1)

Siendo que la variable codificada toma el valor del punto axial en la distancia α , se realiza el despeje de Vp para obtener el valor del factor en $\alpha = 1.681$.

$$Vp = 1.681 * \left(\frac{Va - Vb}{2} \right) + \left(\frac{Va + Vb}{2} \right)$$

Ecuación 5. Valor del punto axial

Según la Ecuación 5, reemplazando el valor de voltaje, corriente y velocidad de avance, se obtienen los valores mostrados en la Tabla 2 para los parámetros estudiados.

Para asegurar la viabilidad del ajuste de parámetros a lo requerido por los valores de los ejes, se ejecutó una experimentación inicial para verificar que tanto voltaje, corriente y velocidad de avance pudieran ajustarse al dominio de $-\alpha$ a $+\alpha$. La validación consistió en realizar 5 pruebas ejecutando cordones de soldadura de 2.5 centímetros de largo, con los diferentes valores asociados de estos intervalos. La combinación se realizó con los niveles mostrados en la tabla 2. Se busca entonces comprobar que los niveles pueden ajustarse a lo requerido en los valores correspondientes en el equipo, tanto en la fuente de soldadura como en la velocidad de avance, para los puntos establecidos en los ejes.

Tabla 2. Valores de los parámetros en los niveles: $-\alpha$, -1, 0, 1, α

Parámetro	$-\alpha$ -1.681	Nivel bajo -1	Punto Central 0	Nivel alto 1	$+\alpha$ 1.681	Unidades
Voltaje	15.62	18	21.5	25	27.38	V
Corriente	64.88	150	275	400	485.13	A
Velocidad de avance	19.57	40	70	100	120.43	cm/min

Elaboración propia

3.2. DESCRIPCION DE LOS EQUIPOS USADOS Y USO DE VALORES PARAMETRICOS PREDEFINIDOS

En esta investigación se usó un robot de la marca Yaskawa modelo GP20HL, de seis grados de libertad, con un alcance de 3,124 mm de distancia horizontal, como se observa en la Figura 7. Su capacidad de carga es de 20 Kg y tiene altas velocidades en cada eje, para decrementar los tiempos de ciclo.

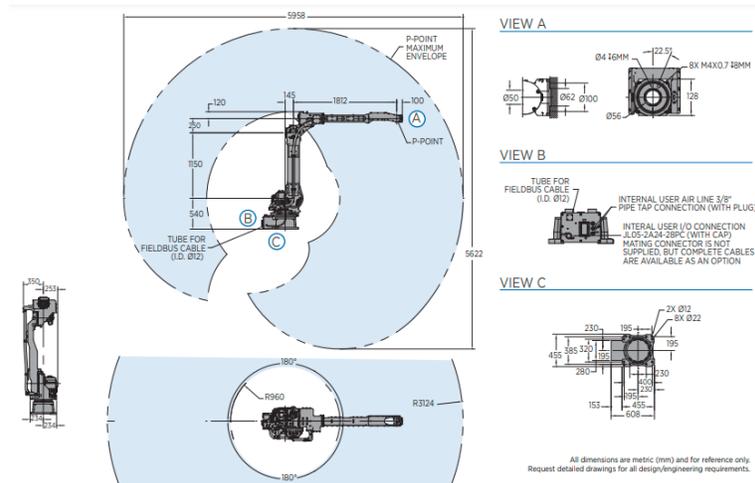


Figura 7. Dimensiones y medidas de alcance del robot GP20HL (Yaskawa America Inc., 2021)

Las velocidades se muestran en la Figura 8. La muñeca del robot es hueca, lo que permite utilizar la antorcha de soldadura colocando mangueras, cables y alambre por la parte central del eje T (brida de la herramienta, en este caso, la antorcha de soldadura).

Axes	Maximum motion range	Maximum speed	Allowable moment	Allowable moment of inertia	Item	Unit	GP20HL
	degrees	°/sec	N·m	kg·m ²	Controlled axes		6
S	±180	180	-	-	Maximum payload	kg	20
L	+135/-90	180	-	-	Repeatability	mm	0.07
U	+206/-80	180	-	-	Horizontal reach	mm	3,124
R	±200	400	39.2	1.05	Vertical reach	mm	5,622
B	±150	430	39.2	1.05	Weight	kg	560
T	±455	630	19.6	.75	Internal user I/O cable		24 conductors w/ ground
					Internal user air line		(2) 3/8" connection
					Power requirements		380-480 VAC
					Power rating	kVA	4.0

Mounting Options: Floor, Wall, Tilt or Ceiling
 * The MLX300 software option is not available for use with arc or spot welding applications. MLX300 fieldbus cards, I/O cards and vision equipment must be purchased separately from the supplier. All peripherals are programmed using a PLC.

Figura 8. Características, rangos de movimiento y velocidades de ejes de robot GP20HL (Yaskawa America Inc., 2021)

El controlador del robot es un modelo YRC1000, gabinete compacto con interfaz Ethernet IP para conectividad con dispositivos externos, en cuyo caso será conexión a la fuente de soldadura. La alimentación es 440 VCA trifásico a 60 Hz. (Yaskawa America Inc., 2021)

La antorcha de soldadura montada en el robot es de la marca Binzel, modelo ROBOWH W600 45°. Este dispositivo realiza el guiado correcto en la punta del robot, asegurando la aplicación correcta de la soldadura y la aplicación del gas en el punto deseado. El equipo cuenta además con un sensor de colisión iCAT de la marca Binzel en la brida de montaje de la herramienta, dispositivo que manda una señal en caso de que la antorcha sufra una deformación de posición original. El ensamble tiene un punto de amortiguamiento de algunos milímetros, suficientes para mandar una señal de paro de emergencia directo al controlador del robot, disparando la alarma del sensor de colisión propia del sistema. Este es un dispositivo de seguridad opcional presente en el robot de la prueba.

La fuente de soldadura es el modelo Miller Auto-Continuum 500 EIP, con conectividad Ethernet/IP para intercambio de señales, y con alimentación a 440 VCA. La corriente máxima de salida de la fuente es de 500 amperes. (Miller Electric Mfg. LLC, 2018)

Las probetas utilizadas son de material de acero 1045 con un espesor de ½", con unión a tope (también conocido como soldadura de filete). Estas piezas se sujetaron dejando la preparación para la soldadura en el centro de la unión, como se muestra en la Figura 9. La soldadura se realiza del tipo 1G.



Figura 9. Preparación de la posición de las piezas (unión a tope) para las pruebas preliminares.

Elaboración propia

El alambre de aporte utilizado es de la marca Lincoln de 0.045" de diámetro con S-recubrimiento de cobre AWS: ER70S-6. Para asegurar el tamaño del alambre en la tobera del equipo (*stick-out*), se utiliza un equipo de corte de alambre automático (ver Figura 10), el cual es activado con el mismo programa del robot.

El robot es colocado en un punto de manera repetitiva y envía el comando de alimentación de alambre. Una vez que el alambre es extendido, se realiza el corte a la distancia determinada. Esto garantiza que la tobera siempre tenga la misma longitud de alambre al iniciar el arco. El corte se realiza mediante un cilindro neumático con una cuchilla montada y activada con electroválvula.



Figura 10. Equipo de corte de alambre a la posición determinada al terminar la soldadura del cordón. Se asegura la distancia del alambre en la tobera de la antorcha.

Elaboración propia

Se utiliza como gas de protección el modelo INFRA MIXX 200/25 | , el cual indica una concentración de 75% argón (número CAS 124-38-9) y un 25% de bióxido de carbono (número CAS 7440-37-1). (Grupo Infra, 2022)

Esta es una mezcla versátil para soldar aceros al carbón, aceros de baja aleación, y algunos aceros inoxidable. Este tipo de productos pueden emplearse para unir una amplia gama de espesores de materiales. En general la mezcla utilizada C-20 se utiliza cuando se requiere la soldadura de transferencia por cortocircuito o por pulverización de acero al carbón.

El procedimiento de la prueba para determinación del uso de parámetros requeridos en el diseño de experimento es el siguiente:

1. Habilitación y adquisición de piezas: Se adquieren las piezas suficientes para las pruebas (estas se adquirieron en un lote de 25 piezas cortadas a la mitad, las cuales serán también parte del experimento completo posteriormente).
2. Habilitación de robot de soldadura y equipo de soldadura. En este punto se verifica funcionamiento tanto de robot como de equipo de soldadura y el

conjunto de ambos. Se realiza la prueba de soldadura donde se genera el arco eléctrico y se produce una soldadura de prueba (ver Figura 11). La fuente de soldadura y el robot tienen retroalimentación para verificar si el equipo es funcional completamente, caso contrario aparecen alarmas en el *teach pendant* del robot.



Figura 11. Prueba de robot y equipo de soldadura.

Elaboración propia

3. Se adquiere y establecen las combinaciones de niveles de los parámetros a modificar en el controlador del robot por medio del *teach pendant*, en donde se colocan los valores deseados de voltaje, corriente y velocidad de avance en el proceso de soldadura. Esto se realiza mediante un archivo de condición de soldadura que será leído por el programa del robot en cierto punto del programa. La utilidad de tener estos archivos de condición o combinaciones es que se pueden tener varios parámetros en una sola pieza, dependiendo de los requerimientos de manufactura para dicho elemento. Estos archivos son parametrizados previamente y llamados para cada cordón en específico y pueden también hacer referencia a varias fuentes de soldadura según se requiera, para sistemas con más de una fuente de soldadura instalada en alguno de los robots de la celda (sistemas robóticos duales, triple o cuádruples). Para este caso de estudio y de prueba de los parámetros requeridos se crearon 5 diferentes archivos de condición que se guardaron y posteriormente se llamaron en el programa principal del robot.

La pantalla de configuración del archivo de soldadura se puede observar en la Figura 12.

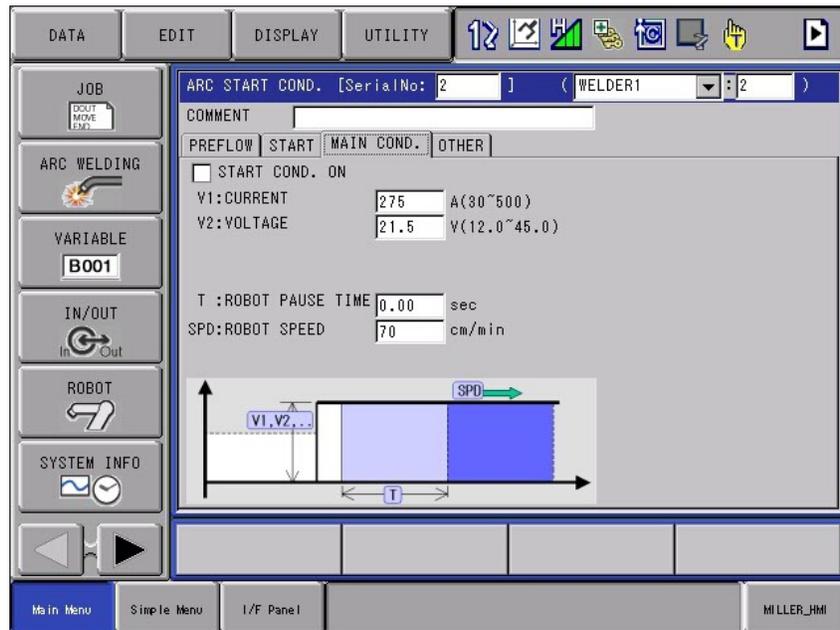


Figura 12. Ejemplo de pantalla de ajuste de parámetros en receta de soldadura (ARC START CONDITION). Se observan las variables a modificarse en el experimento (voltaje, corriente y velocidad de avance del robot).

(Yaskawa Electric Corp., 2021)

- Se realiza el programa de movimientos del robot, definiendo la aproximación y el punto en el que iniciará el cordón de soldadura y donde finalizará. Los parámetros de voltaje, corriente y velocidad de avance, en el programa, son tomados y referenciados por el número de la combinación previamente ingresada. Estos programas de movimiento de robots son ingresados en lenguaje INFORM, un modo de programación compuesto de líneas que contienen una instrucción, una etiqueta y un dato numérico. La instrucción es usada para la ejecución de una operación y el procesado, indicando el modo de interpolación en el caso de movimientos. También pueden indicar entradas o salidas discretas en módulos o registros del controlador. Las etiquetas y datos numéricos indican la velocidad, el tiempo, etc., referenciados al tipo de instrucción. En la Figura 13 se puede observar la pantalla de programación.



Figura 13. La selección de los parámetros se realiza en la asignación mediante la línea 0001 – MILLER-PROG-SEL Wlder#:1 Prgm#1. Se indica que tomará la combinación #1 ingresada en el ARC START CONDITION.

Elaboración propia

En el programa también se realiza la secuencia de corte del alambre para asegurar su longitud en la antorcha de soldadura al iniciar el arco. Esto se realiza en los pasos finales del programa para dejar listo el equipo para la siguiente corrida por medio de salidas digitales.

5. Se ensambla un dispositivo de registro, donde se colocarán las piezas topando las caras contra el dispositivo y se fija mediante mordazas mecánicas como se observa en la Figura 14. Esto se realiza para tener una posición registrada y que el programa se ajuste sólo en los puntos iniciales y finales del cordón de soldadura. En ese punto se fija la pieza para el proceso de soldadura.



Figura 14. Sistema de registro para la fijación de las piezas.

Elaboración propia

6. Se revisa que el alambre no esté doblado ni tenga anomalías después del corte para asegurar la dimensión en la antorcha.
7. Se verifica el programa en los puntos iniciales y finales, asegurando que el alambre este alineado al punto de unión deseado.
8. Se corre el programa especificado con los parámetros definidos. Es importante mencionar que, durante el trabajo del robot, tanto operadores como equipos, deben ser colocados a una distancia segura que permita la operación y movimiento del robot libre de obstáculos.
9. Una vez que el robot termina la ejecución del programa y se haya asegurado se encuentre en estado de reposo (STOP), se procede a retirar la pieza actual quitando las mordazas y se procede a marcarla con plumón permanente para metales. Es importante sujetar la pieza utilizando equipo de seguridad, ya que la misma está caliente.
10. Se reinicia el programa de corridas con la siguiente pieza.
11. Una vez que las cinco piezas fueron soldadas, se espera un tiempo de una hora con el fin de dejar enfriar las piezas y poderlas manipular con facilidad.

Se realiza a manera de prueba rápida la medición del valor de penetración de soldadura según las corridas establecidas. Este procedimiento es muy solicitado en pruebas emergentes y en pruebas donde se requiera a la empresa un valor

estimado de penetración en una prueba realizada. El método es destructivo ya que incluye un ataque químico en un corte transversal de la pieza para develar la forma de la penetración de la soldadura y hace contraste entre la soldadura y la pieza en sí. A continuación, se describe el proceso para la medición rápida:

1. Se cortan las piezas a la medida donde se efectuará la medición. Para este caso se cortan a la mitad del cordón generado (ver Figura 15).



Figura 15. Pieza seccionada en los puntos donde se revisará la penetración de la soldadura.

Elaboración propia

2. Se realiza un limado y lijado (de la cara cortada), para eliminar la superficie rugosa del proceso de corte (ver Figura 16). Se busca dejar la superficie lo más plana posible, sin defectos de porosidad.



Figura 16. Preparación de la superficie de la cara donde se realizará la medición de la penetración.

Elaboración propia

- Una vez lista la superficie para el estudio, se limpia, asegurándose de que quede libre de polvo y rebabas del proceso de corte, limado para quitar filos y lijado con grano numero 220 para alisar la superficie y 1200 para quitar la aspereza en el área.
- Se realiza una mezcla de 10 partes de alcohol isopropílico (2-propanol) con una parte de ácido nítrico (HNO_3). La Figura 17 muestra los elementos utilizados para la preparación de la mezcla.



Figura 17. Preparación de la mezcla para el ataque químico en la superficie de la pieza, para la prueba rápida de penetración.

Elaboración propia

- Se vierte la mezcla resultante en la pieza, específicamente en el punto donde se observa la penetración de la soldadura en la pieza, sobre la cara transversal preparada para el estudio, como se observa en la Figura 18.

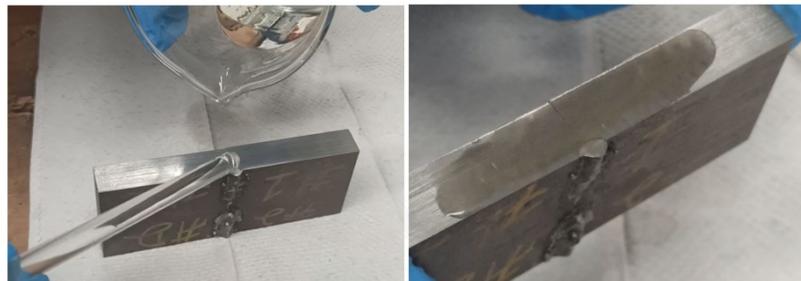


Figura 18. Ataque químico por medio de la mezcla en la superficie de la pieza, para la prueba rápida de penetración.

Elaboración propia

- Una vez que la marca de la penetración es revelada por el ataque químico, se enjuaga la pieza y se coloca laca transparente para protegerla de la corrosión del medio ambiente. La Figura 19 muestra el resultado con la marca revelada y la laca aplicada.



Figura 19. Pieza con aplicación de laca transparente en cara de pieza con penetración revelada.

Elaboración propia

- Finalmente se realizan las mediciones rápidas, con calibrador vernier, desde la base superior de la pieza a la raíz de la penetración, como se muestra en la Figura 20.



Figura 20. Medición de la distancia de penetración.

Elaboración propia

Con los resultados de cada una de las piezas, se llena la Tabla 4 para observar la variación de la penetración según los parámetros utilizados.

Tabla 3. Medición de la penetración.

Número de prueba para Validar	1	2	3	4	5	
Parámetro	- α	Nivel bajo	Punto Central	Nivel alto	+ α	Unidades
	-1.681	-1	0	1	1.681	
Voltaje	15.62	18	21.5	25	27.38	V
Corriente	64.88	150	275	400	485.13	A
Velocidad de avance	19.57	40	70	100	120.43	cm/min
Penetración en placa de 12.7mm	0.24	2.44	2.20	6.11	4.99	mm
Porcentaje de penetración en placa	2%	19%	17%	48%	39%	

Elaboración propia

En la Tabla 3 se puede observar además los cambios en el porcentaje de penetración de soldadura de las piezas, siendo el mayor el correspondiente a los valores de los niveles altos de los parámetros. También se observa que con los parámetros de nivel α el porcentaje de penetración bajó.

El objetivo de verificar si todos los niveles (en particular los niveles - α y α) podían lograrse y ubicar sus valores fue completado exitosamente.

Finalmente, para completar la primera fase de la investigación, se corrieron las pruebas basándose en los parámetros requeridos por el experimento 2^k , para lo cual se ejecutaron 20 combinaciones de niveles de manera aleatoria.

3.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN PROGRAMA MINITAB

Minitab es un potente programa estadístico capaz de ayudar al análisis estadístico de datos ingresados por medio de herramientas básicas y avanzadas. El programa trabaja con hojas de datos arregladas en filas y columnas que posteriormente mediante las herramientas utilizadas, puede generar cálculos y análisis estadísticos, numéricos y gráficos (Evans, 2009). La Figura 21 muestra el entorno inicial predeterminado del programa Minitab.

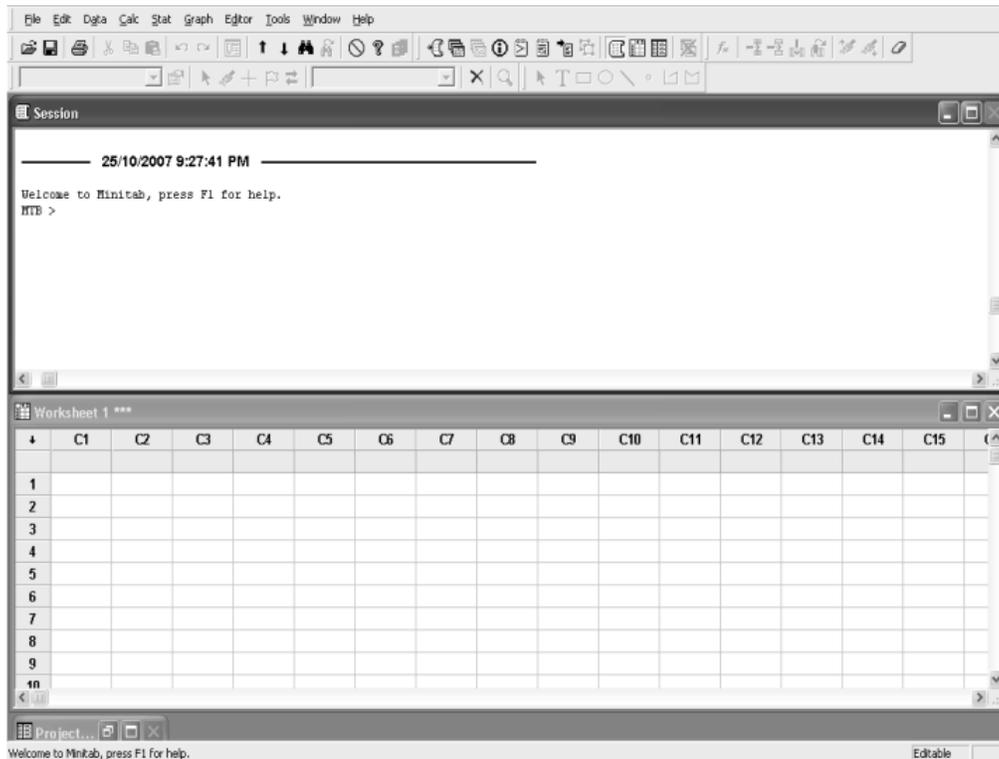


Figura 21. Pantalla predeterminada de programa Minitab.

(Minitab LLC, 2017)

El diseño de experimentos (DOE, por sus siglas en inglés) es un método para estudiar cualquier respuesta (o variable de salida) que varía en función de una o más variables independientes (factores o variables de entrada). Por medio de la observación de esa respuesta en una matriz planeada con las variables independientes, un modelo matemático puede ser determinado.

El modelo puede ser usado para una variedad de propósitos como la selección de valores óptimos, el colocar la atención en una variable determinada (según su grado de afectación en la respuesta) o proveer la predicción de la respuesta según el valor de las variables. (Arnold, 2006)

Mediante el programa Minitab se pueden realizar 5 tipos de diseño diferentes: diseños de cribado, diseños factoriales, diseños de superficie de respuesta, diseños de mezcla y diseños de Taguchi. Los valores del experimento a considerar se ingresan en la hoja de cálculo de manera automática una vez se crea el diseño deseado. Estos pueden organizarse de manera ordenada o de manera aleatoria.

Una vez realizado el experimento se ingresan los resultados en la hoja de cálculo. Minitab contiene herramientas para analizar y crear gráficas que ayudan a entender los resultados.

Para el caso de diseño central compuesto que se contempla para esta investigación utilizando el programa Minitab versión 17.1 (Minitab LLC, 2017), se ingresan los niveles bajos y altos, y los niveles $- \alpha$ y α mostrados en la tabla 4 para las 3 variables independientes.

La Tabla 5 muestra el orden aleatorio de las corridas generadas por el programa, así como el orden secuencial que les corresponden.

Tabla 4. Orden de corridas para el diseño.

Orden estándar	Orden de corrida	Voltaje (V)	Corriente (A)	Velocidad de avance (cm/min)
1	1	18	150	40
19	2	21.5	275	70
2	3	25	150	40
4	4	25	400	40
7	5	18	400	100
5	6	18	150	100
16	7	21.5	275	70
10	8	27.3863	275	70
18	9	21.5	275	70
13	10	21.5	275	19.546
11	11	21.5	64.776	70
15	12	21.5	275	70
17	13	21.5	275	70
9	14	15.6137	275	70
20	15	21.5	275	70
6	16	25	150	100
3	17	18	400	40
14	18	21.5	275	120.454
8	19	25	400	100

Elaboración propia

3.4. CORRIDAS DE DISEÑO EXPERIMENTAL CONFORME A LA TABLA 5

Una vez que el orden aleatorio es definido mediante el programa, se realizaron todas las corridas según la Tabla 5, todas una después de otra para conservar los mismos parámetros ambientales, 23°C de temperatura y 13% de humedad en el

sitio del experimento. Los pasos para las corridas de las pruebas fueron los mismos descritos en el procedimiento explicado en la sección 3.2, con la diferencia de que las piezas no se cortaron. Las Figuras 22, 23 y 24 muestran un ejemplo de las características de la pantalla de configuración de cada archivo de condición de soldadura, que será llamado en el programa principal de movimientos del robot, para la aplicación de la soldadura, con las condiciones de control establecidas.

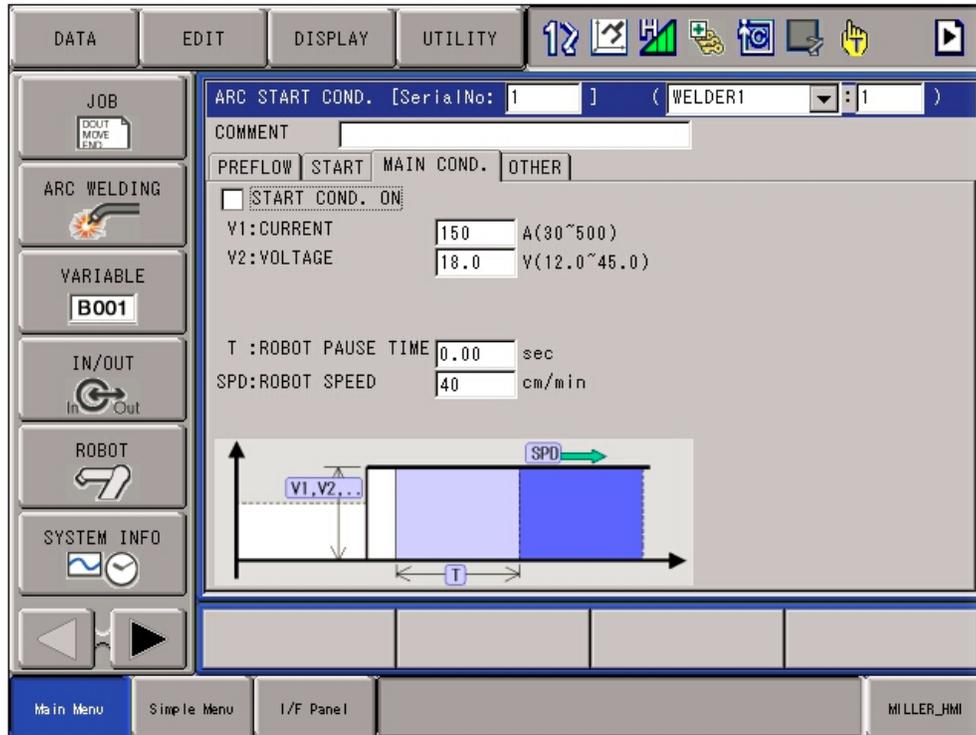


Figura 22. Parámetros de la corrida número 1. Parámetros ingresados de manera manual para cada una de las corridas.
(Yaskawa Electric Corp., 2021)

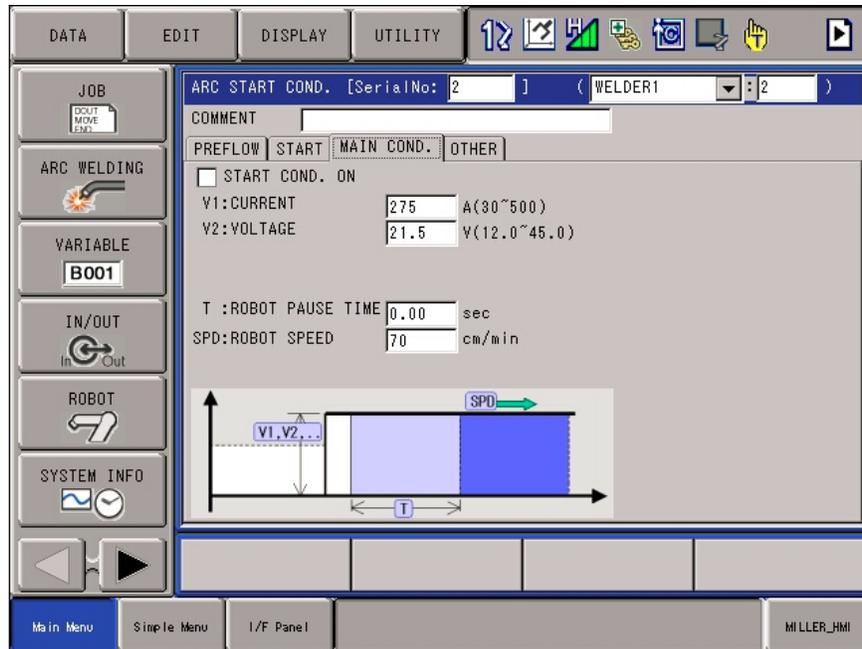


Figura 23. Parámetros de la corrida número 2.
(Yaskawa Electric Corp., 2021)

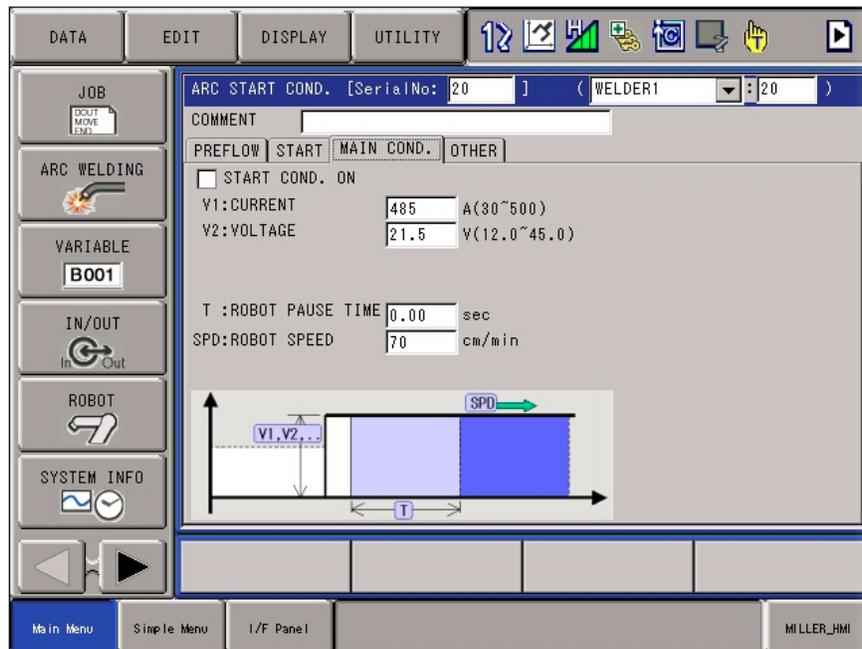


Figura 24. Parámetros de la corrida número 20.
(Yaskawa Electric Corp., 2021)

Estas piezas procesadas se marcaron una a una según el orden de corrida. En las Figuras 24 y 25, se pueden ver las marcas con plumón y con punto de golpe en cada pieza, las cuales se mandaron posteriormente al laboratorio para la medición del resultado.

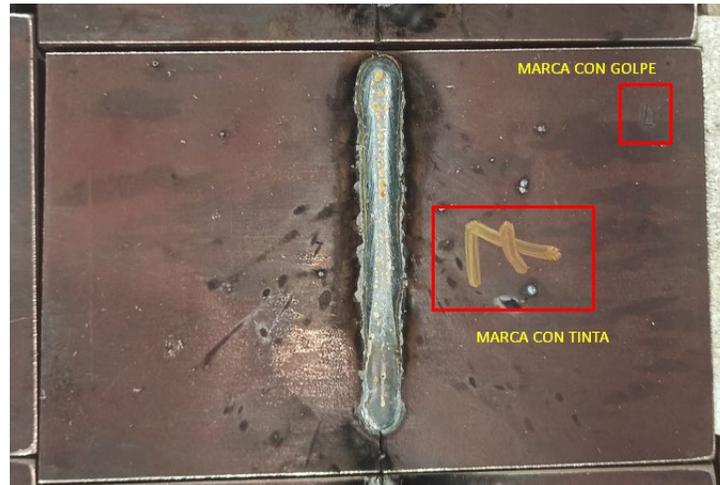


Figura 25. Marcas en la pieza con soldadura. Se marcan con tinta y con numero de golpe para facilidad de identificación en laboratorio.

Elaboración propia



Figura 26. Piezas con soldadura aplicada según parámetros y marcadas con el orden establecido.

Elaboración propia

En la Figura 26 se puede observar las variaciones en la soldadura según los parámetros modificados. Como ejemplo, se nota que el parámetro de corriente de

la pieza número 11 es muy bajo (véase Tabla 4). En la misma Figura 26 se observa que el cordón de soldadura es muy delgado, comparado contra una pieza cuyo parámetro de corriente es más alto (por ejemplo, la pieza número 4).

3.5. MEDICIÓN DE LA PENETRACIÓN DE SOLDADURA EN LAS PIEZAS

Las piezas con unión soldada se marcaron en cada corrida, se clasificaron y enviaron al laboratorio de medición, para la obtención de la medición de la penetración por medio de microscopio.

Las probetas se constituyeron por dos placas de acero AISI 1045, de $\frac{1}{2}$ " de espesor, 3" de grosor y 4" de longitud, unidas por medio de un cordón de soldadura a lo largo de las probetas. El tipo de soldadura es a tope, sin garganta, con un material de aporte ER706S, como se ilustra en la Figura 27.

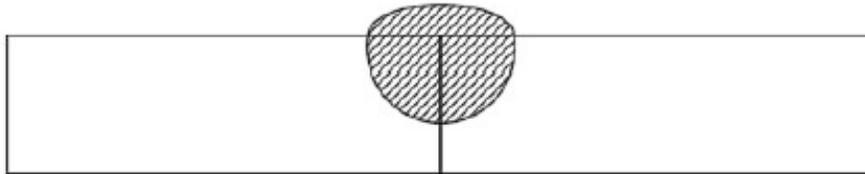


Figura 27. Metales Base (Acero AISI 1045), unión a tope, zona de fusión y refuerzo.

Elaboración propia

El procedimiento de las pruebas de medición se menciona a continuación:

1. Corte de probetas a la mitad de la unión soldada (Figura 28).
2. Preparación de la superficie (Figura 29).
3. Ataque químico con reactivo nital al 2%.
4. Toma de imagen con microscopio digital DIGIMICRO 200X ZOOMING PRO1002652 USB LUZEREN



Figura 28. Forma del corte de las probetas.

Elaboración propia



Figura 29. Resultado pieza pulida y ataque químico.

Elaboración propia

En la unión soldada mostrada en la Figura 29 se aprecia el metal base de las dos partes unidas, la unión a tope, la zona de fusión compuesta por el cordón de soldadura dentro de la superficie del metal base (penetración). También se muestra el refuerzo (la cresta del cordón de soldadura por encima del material base) y la zona de afectación térmica (ZAT), la cual presenta una transición de

microestructura, debido al nivel de temperatura alcanzada por la combinación de parámetros que causan el aporte térmico a la pieza durante el proceso de soldadura. (Hernández Acero et al., 2022)

Finalmente, cada una de las mediciones realizadas en las probetas preparadas y cortadas se enlista en la Tabla 5, junto con las mediciones características de la unión soldada, de acuerdo con la Figura 30, donde la letra "a" se refiere al ancho del cordón generado, la letra "b" al refuerzo (cresta que sobresale del cordón de soldadura desde la superficie de los materiales), y la letra "c" la penetración de la soldadura (zona de fusión dentro de la superficie del metal base).

Tabla 5. Medidas características de la unión soldada en milímetros (mm) que aparece en la Figura 30.

No.	a	b	c
1	7.0	3.0	2.0
2	8.0	3.0	3.5
3	8.5	3.0	2.0
4	16.0	6.0	6.0
5	6.0	4.0	5.0
6	3.0	1.5	1.0
7	7.0	3.5	4.0
8	9.0	3.0	4.0
9	7.5	3.8	3.0
10	18.0	5.0	3.0
11	4.0	1.0	0.9
12	7.0	3.0	3.0
13	7.5	3.0	3.0
14	6.0	3.0	2.0
15	8.0	3.0	3.5
16	6.0	2.0	1.0
17	12.0	5.4	4.8
18	6.0	1.5	2.5
19	10.0	2.0	5.0
20	16.0	3.5	6.5

Elaboración propia

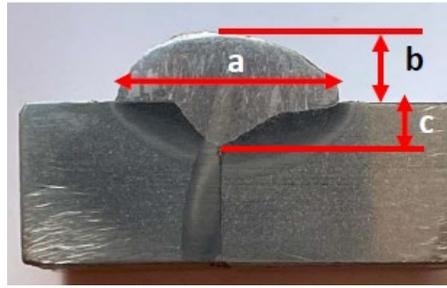


Figura 30. Medidas referenciales para valores de tabla 6.

Elaboración propia

Los valores referenciales muestran los valores del refuerzo, el grosor del cordón y finalmente la penetración del material de aporte en el material base (dimensión referenciada en la Tabla 5 con la letra "c"). Estos valores de penetración se recopilaron y ordenaron según el orden aleatorio de valores preestablecidos en el experimento generado, mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Tabla generada con medida de penetración en milímetros (mm).

Orden estándar	Orden de corrida	Voltaje	Corriente	Velocidad de avance	Penetración
1	1	18	150	40	2
19	2	21.5	275	70	3.5
2	3	25	150	40	2
4	4	25	400	40	6
7	5	18	400	100	5
5	6	18	150	100	1
16	7	21.5	275	70	4
10	8	27.3863	275	70	4
18	9	21.5	275	70	3
13	10	21.5	275	19.546	3
11	11	21.5	64.776	70	0.9
15	12	21.5	275	70	3
17	13	21.5	275	70	3
9	14	15.6137	275	70	2
20	15	21.5	275	70	3.5
6	16	25	150	100	1
3	17	18	400	40	4.8
14	18	21.5	275	120.454	2.5
8	19	25	400	100	5
12	20	21.5	485.224	70	6.5

Elaboración propia

3.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

Los datos recopilados del experimento permiten realizar el estudio completo del diseño central compuesto propuesto previamente. Ingresando la columna de resultados en la base de valores previstos para el experimento, se procede a correr el diseño central compuesto en el programa Minitab (Minitab LLC, 2017), considerando los parámetros mostrados en la Figura 31:

```
Central Composite Design  
  
Factors:      3      Replicates:    1  
Base runs:   20      Total runs:   20  
Base blocks: 1       Total blocks: 1  
  
Two-level factorial: Full factorial  
  
Cube points:      8  
Center points in cube: 6  
Axial points:     6  
Center points in axial: 0  
  
 $\alpha$ : 1.68179
```

Figura 31. Características del diseño central compuesto propuesto para el experimento, resumen de diseño experimental.

(Minitab LLC, 2017)

Ejecutando el computo en Minitab con los datos del diseño experimental generados con el experimento físico mostrados en la Tabla 7, los resultados se muestran en la Figura 32.

Response Surface Regression: Penetracion versus Voltaje, Corriente, Velocidad de avance

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	9	46.9669	5.2185	25.35	0.000
Linear	3	45.4421	15.1474	73.58	0.000
Voltaje	1	1.5250	1.5250	7.41	0.021
Corriente	1	42.9465	42.9465	208.62	0.000
Velocidad de avance	1	0.9707	0.9707	4.72	0.055
Square	3	0.9848	0.3283	1.59	0.252
Voltaje*Voltaje	1	0.0774	0.0774	0.38	0.553
Corriente*Corriente	1	0.4373	0.4373	2.12	0.176
Velocidad de avance*Velocidad de avance	1	0.3768	0.3768	1.83	0.206
2-Way Interaction	3	0.5400	0.1800	0.87	0.486
Voltaje*Corriente	1	0.1800	0.1800	0.87	0.372
Voltaje*Velocidad de avance	1	0.1800	0.1800	0.87	0.372
Corriente*Velocidad de avance	1	0.1800	0.1800	0.87	0.372
Error	10	2.0586	0.2059		
Lack-of-Fit	5	1.2253	0.2451	1.47	0.341
Pure Error	5	0.8333	0.1667		
Total	19	49.0255			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.453718	95.80%	92.02%	78.00%

Figura 32. Resultado del diseño central compuesto con los valores de resultado de penetración considerando parte lineal, parte cuadrática e interacciones en el modelo de regresión.

(Minitab LLC, 2017)

Como se observa en la Figura 32, el análisis de varianza muestra un valor de prueba (P-Value) de 0.000 para la parte lineal, lo cual indica un buen resultado del modelo de regresión para esta sección. No obstante, para la parte cuadrática, el valor de prueba muestra 0.252. Esto indica que los estimadores de los coeficientes encontrados no cumplen con el valor de prueba mínimo requerido para formar parte del modelo (considerando abajo del 5%), finalmente no rechazando la hipótesis nula para la sección cuadrática. Una vez analizado estos resultados, y teniendo en cuenta la regla de Ockham, buscando simplificar el modelo, se realiza nuevamente una corrida del modelo de regresión de superficie de respuesta tomando únicamente la parte lineal y los productos mixtos (interacciones de los parámetros). Se decide dejar la parte de productos mixtos para verificar que no exista alguna afectación de la parte cuadrática del modelo (ahora descartada) a la parte de la interacción. Se obtiene el resultado como se puede ver en la Figura 33. (Hernández Acero et al., 2022)

Response Surface Regression: Penetracion versus Voltaje, Corriente, Velocidad de avance

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	6	45.9821	7.6637	32.74	0.000
Linear	3	45.4421	15.1474	64.70	0.000
Voltaje	1	1.5250	1.5250	6.51	0.024
Corriente	1	42.9465	42.9465	183.45	0.000
Velocidad de avance	1	0.9707	0.9707	4.15	0.063
2-Way Interaction	3	0.5400	0.1800	0.77	0.532
Voltaje*Corriente	1	0.1800	0.1800	0.77	0.396
Voltaje*Velocidad de avance	1	0.1800	0.1800	0.77	0.396
Corriente*Velocidad de avance	1	0.1800	0.1800	0.77	0.396
Error	13	3.0434	0.2341		
Lack-of-Fit	8	2.2101	0.2763	1.66	0.300
Pure Error	5	0.8333	0.1667		
Total	19	49.0255			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.483848	93.79%	90.93%	82.64%

Figura 33. Resultado del diseño central compuesto con los valores de resultado de penetración considerando parte lineal e interacciones en el modelo de regresión.

(Minitab LLC, 2017)

Al revisar los niveles del valor de prueba mostrados en la Figura 33, para los parámetros de la parte lineal, se muestra que no se tiene afectación que reduzca en gran cantidad el valor de prueba, por la eliminación de la parte cuadrática. También se observa que el valor de prueba para los coeficientes de la parte de productos mixtos creció al retirar la parte cuadrática. Con ello se toma la decisión de retirar la parte de la interacción al no ser valores confiables para el modelo buscado, no rechazando la hipótesis nula para este componente del modelo de regresión obtenido con este análisis. Una vez establecido el punto a seguir, se continuó realizando la corrida del análisis estadístico solamente considerando la parte lineal del modelo, cuyo resultado se puede observar en la Figura 34. (Hernández Acero et al., 2022)

Response Surface Regression: Penetracion versus Voltaje, Corriente, Velocidad de avance

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	45.4421	15.1474	67.63	0.000
Linear	3	45.4421	15.1474	67.63	0.000
Voltaje	1	1.5250	1.5250	6.81	0.019
Corriente	1	42.9465	42.9465	191.76	0.000
Velocidad de avance	1	0.9707	0.9707	4.33	0.054
Error	16	3.5834	0.2240		
Lack-of-Fit	11	2.7501	0.2500	1.50	0.343
Pure Error	5	0.8333	0.1667		
Total	19	49.0255			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.473248	92.69%	91.32%	87.83%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant		3.285	0.106	31.04	0.000	
Voltaje	0.668	0.334	0.128	2.61	0.019	1.00
Corriente	3.547	1.773	0.128	13.85	0.000	1.00
Velocidad de avance	-0.533	-0.267	0.128	-2.08	0.054	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

Penetracion = -2.047 + 0.0955 Voltaje + 0.01419 Corriente - 0.00889 Velocidad de avance

Figura 34. Resultado del diseño central compuesto con los valores de resultado de penetración considerando solo la parte lineal en el modelo de regresión.

(Minitab LLC, 2017)

Los valores de prueba mostrados en la Figura 34, recopilan el análisis para los parámetros de la parte lineal, los cuales siguen sin afectación en sus valores al retirar la sección de productos mixtos. El valor de R-sq(adj) o R-cuadrada ajustada tiene un buen porcentaje resultante, por lo que la confianza del modelo es alta.

Por lo tanto, se tiene como resultado el modelo de regresión calculado dado por la formula:

$$Penetración = -2.047 + (0.0955 * Voltaje) + (0.01419 * Corriente) - (0.00889 * Velocidad de avance)$$

Ecuación 6. Modelo para obtención de penetración, donde Voltaje esta dado en volts, Corriente en amperes y Velocidad de avance en cm/min.

El análisis de la predicción de los datos versus los datos medidos se puede observar en la Figura 35. En el gráfico se observa la relación que se ajusta al modelo lineal.

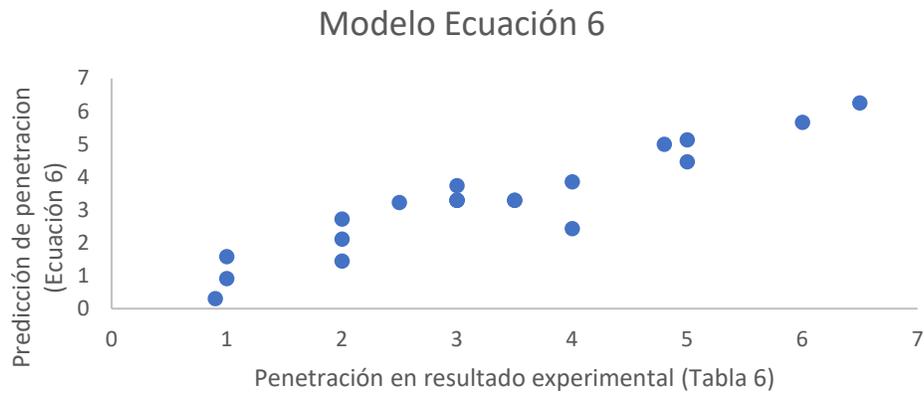


Figura 35. Gráfica comparativa de penetración en el resultado experimental versus la predicción del modelo generado.

(Microsoft Corporation, 2018)

Dados los resultados del experimento, y descartando los productos mixtos (interacción) y la sección cuadrática del modelo, las gráficas de los efectos principales se muestran en la Figura 36.

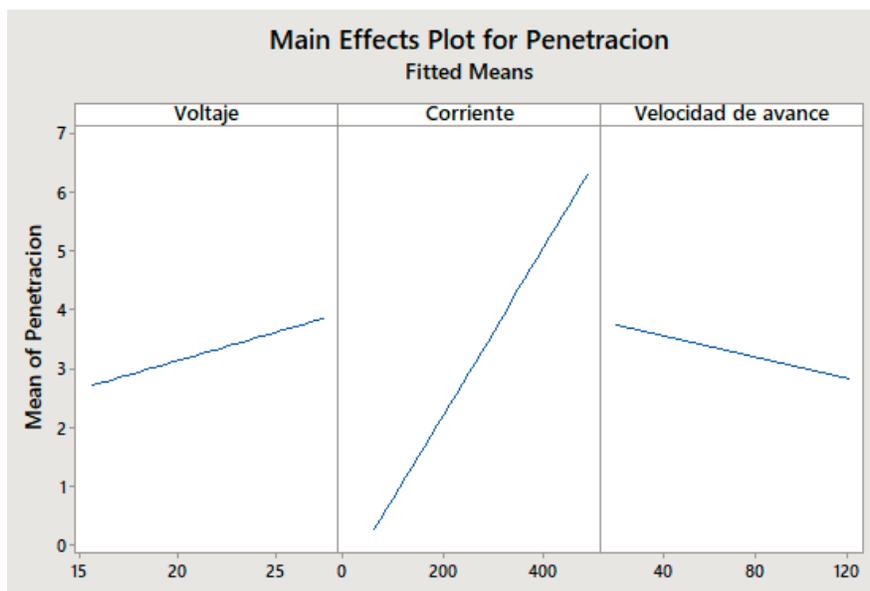


Figura 36. Gráficas de efectos principales para resultado de penetración. El voltaje está dado en volts, corriente en amperes y velocidad de avance en cm/min. La penetración resultante está dada en mm.

(Minitab LLC, 2017)

Se puede verificar mediante las gráficas mostradas en la Figura 36 contra las imágenes de los cordones mostrados en la soldadura y comparados en la tabla generada para el experimento, que la corriente tiene un efecto mayor con respecto al voltaje y a la velocidad de avance. Esto indica que es un efecto que tiene alto impacto en el resultado de penetración. Por otro lado, la velocidad de avance tiene una pendiente negativa, ya que para que la penetración sea mayor, se requiere más calor, debiendo permanecer el proceso más tiempo en el punto de soldadura, lo cual conduce a que la velocidad requiera ser baja para penetrar más en el material. Por otro lado, si se requiere menos penetración (y por lo tanto menos calor en la pieza) la velocidad de avance deberá ser alta.

Los gráficos de superficie de respuesta que involucran la combinación de dos parámetros contra el resultado de penetración se muestran a continuación en las Figuras 37 y 38.

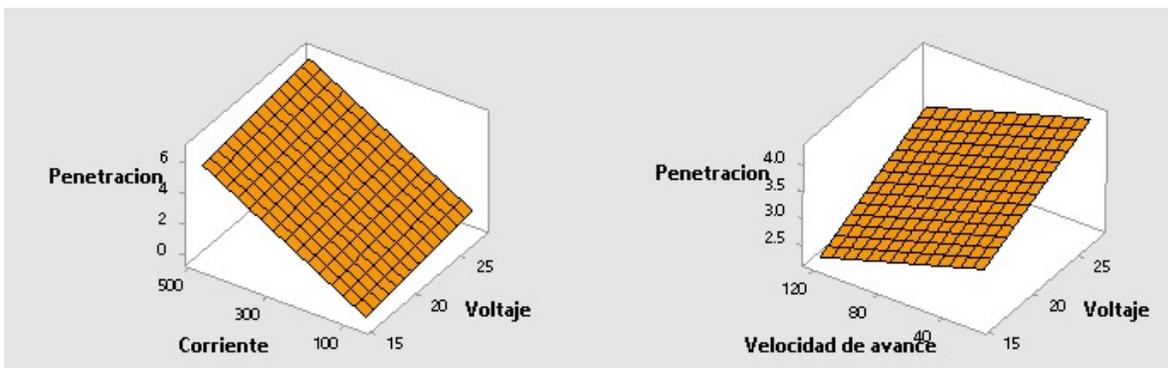


Figura 377. Gráficas de superficie de respuesta (penetración) con respecto Corriente vs Voltaje (izquierda) y Velocidad de avance vs. Voltaje (derecha).

(Minitab LLC, 2017)

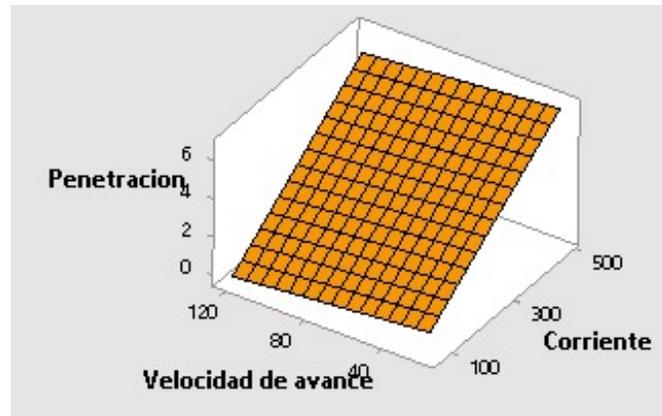


Figura 388. Grafica de superficie de respuesta (penetración) con respecto a velocidad de avance vs corriente.

(Minitab LLC, 2017)

En los gráficos se observan las variaciones de los parámetros y como influyen en la penetración de la soldadura en el acero 1045.

De acuerdo con los resultados de las gráficas de los residuales mostrados en la figura 39, se infiere lo siguiente:

- En la gráfica de probabilidad normal indica un comportamiento normal de los residuales.
- La gráfica de los valores ajustados contra los residuales no presenta correlación.
- El histograma refrenda lo indicado por la gráfica de probabilidad normal.
- El gráfico de orden en que se llevó a cabo el experimento no tiene una tendencia a crecer o decrecer.

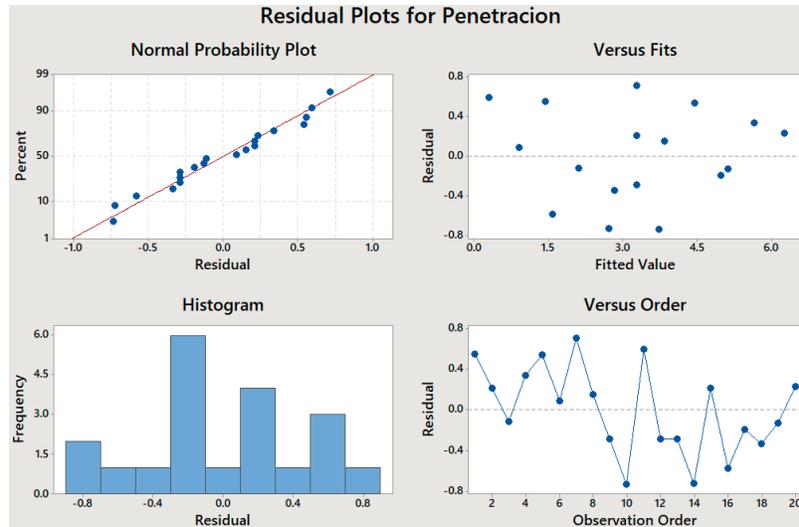


Figura 39. Gráficas de residuos.

(Minitab LLC, 2017)

Con ello se concluye que se tiene una buena confianza en el modelo de regresión resultante.

El modelo generado da como resultado un valor de penetración. Sin embargo, lo que se busca es la velocidad de avance. Este modelo se usa de manera indirecta, es decir, en lugar de penetración (valor ya previsto por requerimiento del proceso de soldadura), los valores de voltaje, corriente y la penetración deseada por el cliente para estimar la velocidad de avance en la aplicación de soldadura. Para ello, y conociendo que la relación de los factores es lineal, se procede a obtener el despeje para el parámetro de velocidad, según los datos observados previamente en el experimento realizado.

En el primer intento, dada la ecuación despejada, se busca un comportamiento correcto para la variable de velocidad. Sin embargo, los residuales realizando el cálculo en la tabla del experimento se magnifican al realizar la sustitución de los valores, dando una respuesta estimada muy diferente a la observación, incluso con resultados de velocidades negativas. Se establece que no es factible entonces usar el despeje sobre la ecuación obtenida para la penetración de soldadura. Esto comprueba que se requiere el análisis en particular para la búsqueda del modelo

para la velocidad realizándose nuevamente y considerando como variable buscada la velocidad.

Para la búsqueda del modelo lineal que permita estimar la velocidad, se consideran únicamente los valores observados para los rangos dentro de los estimados para los parámetros, es decir, se retiran los extremos que se incluyeron para verificar la presencia de curvatura (niveles $-\alpha$ y $+\alpha$ de cada parámetro), y las repeticiones en los puntos centrales, como se observa en la Tabla 7.

Tabla 7. Tabla de observaciones descartando niveles $-\alpha$ y $+\alpha$ de cada parámetro.

Observación	Velocidad	Voltaje	Corriente	Penetración
1	40	18	150	2
2	70	21.5	275	3.5
3	40	25	150	2
4	40	25	400	6
5	100	18	400	5
6	100	18	150	1
7	70	21.5	275	3.5
8	100	25	150	1
9	100	25	400	5

Elaboración propia

Se corre el análisis de regresión nuevamente con la tabla de valores medidos y seleccionados por medio del programa Minitab, en la cual genera el resultado del análisis de regresión que se muestra en la figura 40.

Regression Analysis: Velocidad de avance versus Penetracion, Corriente, Voltaje

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	6200.00	2066.67	*	*
Penetracion	1	5815.38	5815.38	*	*
Corriente	1	6017.91	6017.91	*	*
Voltaje	1	0.00	0.00	*	*
Error	5	0.00	0.00		
Lack-of-Fit	4	0.00	0.00	*	*
Pure Error	1	0.00	0.00		
Total	8	6200.00			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0	100.00%	100.00%	100.00%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	16.00	0.00	*	*	
Penetracion	-60.00	0.00	*	*	16.75
Corriente	0.9600	0.0000	*	*	16.48
Voltaje	-0.000000	0.000000	*	*	1.07

Figura 40. Gráficas de residuos.

(Minitab LLC, 2017)

Se observa que el modelo generado tiene una R cuadrada ajustada muy alta de acuerdo con los datos cargados. Se procede a generar una tabla calculando la predicción con el modelo generado y haciendo la comparativa para observar el residuo (ver Tabla 8).

Tabla 8. Tabla generada con la predicción de los parámetros.

Observación	Velocidad	Voltaje	Corriente	Penetración	Predicción	Residual
1	40	18	150	2	40.0000000000001000	-0.0000000000000568
2	70	21.5	275	3.5	70.0000000000001000	0.0000000000000000
3	40	25	150	2	40.0000000000000000	0.0000000000000000
4	40	25	400	6	40.0000000000001000	-0.0000000000000568
5	100	18	400	5	100.0000000000000000	0.0000000000000000
6	100	18	150	1	100.0000000000000000	0.0000000000000000
7	70	21.5	275	3.5	70.0000000000001000	0.0000000000000000
8	100	25	150	1	100.0000000000000000	0.0000000000000000
9	100	25	400	5	100.0000000000000000	0.0000000000000000

(Microsoft Corporation, 2018)

Es visible que el modelo generado involucra un efecto del voltaje en los resultados despreciable, dado por un valor muy bajo en el multiplicador del factor, como se puede observar en los coeficientes de la figura 40. Con ello se procede a eliminar la porción del voltaje en el análisis y así ver su resultado en el residual. La figura 41 muestra el resultado de dicha corrida.

Regression Analysis: Velocidad de avance versus Penetracion, Corriente

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	2	6200.00	3100.00	*	*
Penetracion	1	6038.71	6038.71	*	*
Corriente	1	6150.31	6150.31	*	*
Error	6	0.00	0.00		
Lack-of-Fit	2	0.00	0.00	*	*
Pure Error	4	0.00	0.00		
Total	8	6200.00			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0	100.00%	100.00%	100.00%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	16.00	0.00	*	*	
Penetracion	-60.00	0.00	*	*	16.13
Corriente	0.9600	0.0000	*	*	16.13

Regression Equation

$$\text{Velocidad de avance} = 16.00 - 60.00 \text{ Penetracion} + 0.9600 \text{ Corriente}$$

Figura 41. Estadísticas del modelo de regresión generado retirando el factor voltaje
(Minitab LLC, 2017)

Con este resultado el modelo regresión mostrado en la Ecuación 7 representa la función buscada en nuestra investigación. Un valor de R cuadrada ajustada como el resultante nos indica una muy buena estimación y un modelo completamente lineal.

$$\text{Velocidad de avance} = 16 - (60 * \text{Penetración}) + (0.96 * \text{Corriente})$$

Ecuación 7. Modelo para obtener la velocidad de avance

4. RESULTADOS

Para realizar la comprobación de los resultados obtenidos, el modelo de regresión resultante es analizado, reemplazando los valores de corriente y penetración, y así obtener el valor calculado de la velocidad y los residuos para cada una de las corridas como se observa en la tabla 9.

Tabla 9. Tabla generada de la predicción de los valores descartando el voltaje.

Observación	Velocidad	Voltaje	Corriente	Penetración	Predicción sin Voltaje	Residual sin considerar
1	40	18	150	2	40.000	0.000000000
2	70	21.5	275	3.5	70.000	0.000000000
3	40	25	150	2	40.000	0.000000000
4	40	25	400	6	40.000	0.000000000
5	100	18	400	5	100.000	0.000000000
6	100	18	150	1	100.000	0.000000000
7	70	21.5	275	3.5	70.000	0.000000000
8	100	25	150	1	100.000	0.000000000
9	100	25	400	5	100.000	0.000000000

(Microsoft Corporation, 2018)

Se muestra que el residuo es 0, lo cual indica un buen resultado del cálculo, estimando una velocidad igual a la observada. La comparativa para los diferentes valores observados y calculados se puede ver en la Figura 42.

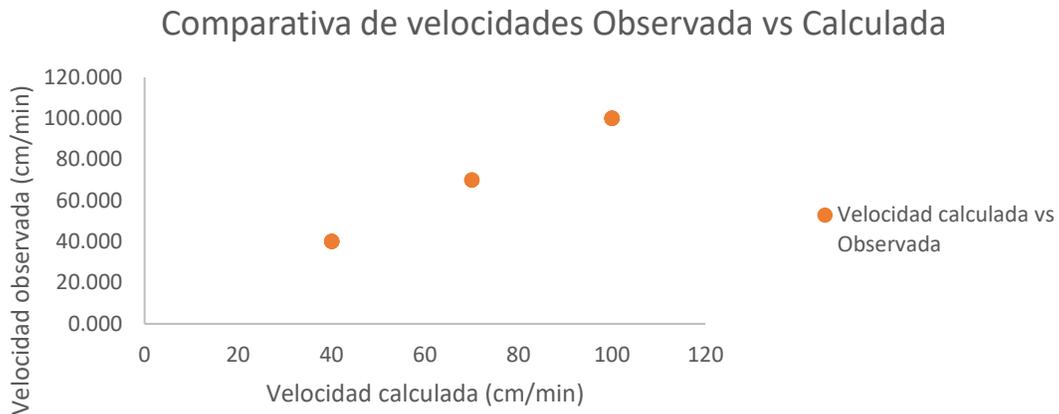


Figura 42. Gráfica comparativa de velocidad en el resultado experimental versus la predicción del modelo generado (ecuación 7).

(Microsoft Corporation, 2018)

Al revisar la gráfica de normalidad de los residuos, se observa que los puntos generados se acercan mucho a la recta generada, por lo cual el supuesto de normalidad es cumplido (ver la Figura 43).

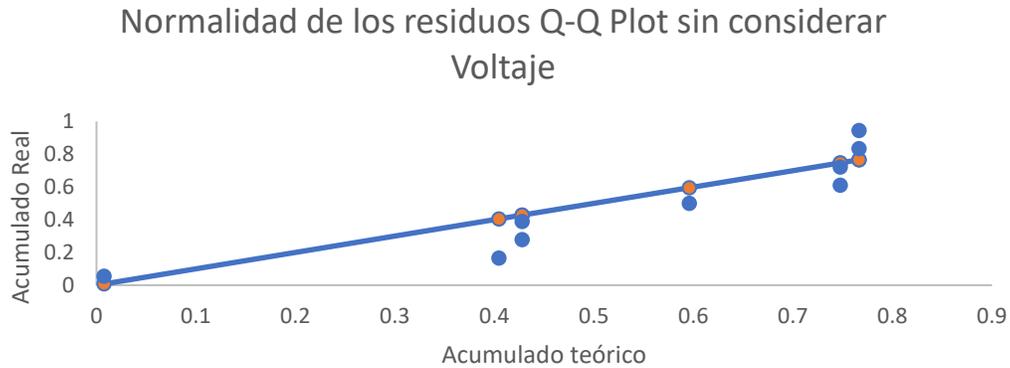


Figura 43. Gráfica de normalidad de los residuos (Ecuación 7).
(Microsoft Corporation, 2018)

Una vez obtenidos los valores estimados de velocidad de avance según el modelo matemático, el proceso de manufactura de la celda queda modificado en los métodos de conceptualización y de programación de proceso, como se observa en la Figura 44, obteniendo información fiable y reduciendo tiempos de ejecución de proceso.

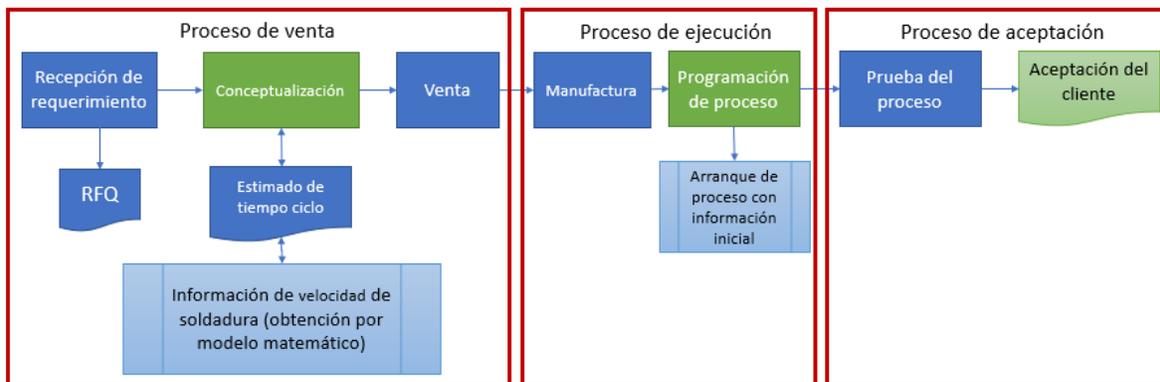


Figura 44. Proceso de manufactura de celda robotizada indicando donde el estimado de tiempo ciclo interviene.
(Alonso Marcos, 2021)

Finalmente, el proceso de conceptualización incluyendo un estudio fiable del tiempo ciclo, asegura que la aceptación del cliente sea conforme a lo requerido según volumen de producción y ofrecido en la oferta comercial (aumentando la fiabilidad de que la celda produzca lo requerido). Por su parte el subproceso de programación asegura arrancar con información disponible que pueda ser usada como base de programa y realizar los ajustes en menor tiempo que arrancando sin información y con solo la experiencia de procesos similares. Esto puede lograr una reducción en el tiempo de puesta en marcha de hasta 3 días laborales en acercar el parámetro de soldadura a lo requerido por el cliente, lo que hace que el enfoque sea ahora sólo en parámetros adicionales no considerados en este estudio, como pudiera ser la apariencia de la soldadura (no exclusiva de la variación de los 3 parámetros estudiados en esta investigación).

El ahorro que representa la confianza en el cálculo del tiempo ciclo en la conceptualización puede oscilar entre los \$1,000 USD (cuando se agregan dispositivos adicionales para ayudar a reducir el tiempo ciclo), hasta los \$50,000 USD (cuando se tienen que agregar robots adicionales para procesar la pieza) y recursos adicionales de programación y diseño, en caso de que un error en la estimación cause una producción deficiente. Mientras que el ahorro en horas de programación pudiera rondar los \$2,000 USD (considerando solo horas de ejecución y modificación de programa). También se debe considerar el ahorro en las piezas necesarias para las pruebas iniciales y la puesta a punto del proceso (al arrancar con parámetros de voltaje, corriente y velocidad de avance cercanos a los estimados para cumplir con el proceso) y tiempo del personal de laboratorio que realiza las mediciones en un número menor de piezas. Dependiendo del precio de producción por pieza es el ahorro que se puede llegar a tener. Considerando que normalmente una pieza puede llegar a rondar las 30 piezas para pruebas y puesta a punto de parámetros, este puede bajar hasta un 30% en la cantidad de piezas necesarias.

CONCLUSIONES

Mediante las pruebas realizadas en las piezas de acero 1045 se pudo observar la influencia de los parámetros relacionados con la penetración de la soldadura en el material para procesos con aporte de alambre. Estos datos, más allá de reflejar la interpretación de los valores en algún parámetro en específico, representa la combinación de parámetros y sus efectos para provocar cierta reacción en el resultado deseado. Esto ayuda a predecir lo que sucederá con la variación de los parámetros. Con la información generada podemos concluir los siguientes puntos:

- El modelo de regresión obtenido indica una relación lineal de los parámetros con la respuesta, ya que no presenta curvatura.
- La corriente tiene un mayor impacto en la penetración que la velocidad de avance y el voltaje aplicados en la pieza.
- El voltaje, mientras el proceso sea controlado en la longitud del arco, no representa una variable que afecte en la penetración de la soldadura en la pieza.
- Se obtuvo una buena confianza en las estimaciones de la variable de respuesta, por lo que el modelo puede utilizarse (si se conoce de antemano la profundidad requerida por el cliente y la corriente requeridos por el material utilizado) para obtener la velocidad de avance, la cual puede aplicarse para determinar el tiempo ciclo ya que es fundamental para la conceptualización de la celda robótica y un punto inicial en la programación de un robot para soldadura MIG según el grosor de materiales en acero 1045 AISI.

RECOMENDACIONES

Tomando como punto de partida la experiencia obtenida en la realización de este trabajo, se recomienda realizar el mismo tipo de experimentación con el mismo tipo de corridas para dos actividades futuras:

1. Validación y pruebas adicionales del modelo obtenido en procesos robóticos con soldadura MIG en piezas de acero 1045. La experimentación con las pruebas adicionales permitirá obtener algunas condiciones bajo las cuales el modelo podría o no funcionar de manera adecuada (parámetros ajustados de manera inconsistente).
2. Investigación futura con otros materiales mediante el mismo tipo de experimento y así definir los modelos según el material a unir mediante soldadura. Esto permitirá tener un amplio catálogo de materiales para procesos de piezas distintas según requerimientos específicos.

APORTACIÓN DE LA TESIS

Los resultados de este trabajo ayudan a las empresas que diseñan y comercializan celdas de soldadura robotizada, simplificando la conceptualización y propuesta de soluciones para sus clientes, según el volumen y procesos con soldadura MIG para piezas de acero 1045. En los cálculos del tiempo ciclo, la velocidad del robot juega un papel importante, y el contar con un parámetro cercano a la realidad, ayuda a disminuir el riesgo del no cumplimiento con el volumen de producción, evitando reclamos del cliente. La obtención de una velocidad aproximada a la que tendrá el proceso también ayuda a los diseñadores y programadores de robots, a tener un punto de partida en el cálculo de la velocidad de avance para lograr la calidad que la pieza requiere. Uno de los beneficios es lograr reducir la cantidad de horas invertidas en realizar la soldadura con métodos tradicionales, como prueba y error, y la destrucción de gran cantidad de probetas en el laboratorio de calidad. Las empresas que realizan la soldadura por proceso MIG pueden economizar al utilizar menos recursos materiales y humanos en la puesta a punto de sus procesos. La inversión del tiempo de programación puede reducir de 40 horas efectivas de programación y pruebas, a solamente 16, optimizando el tiempo de ajuste en el robot, dado que se predice la penetración resultante en la pieza.

APORTACIÓN SOCIAL DE LA TESIS

Este trabajo pretende ayudar a realizar conceptos robóticos con la fiabilidad necesaria para realizar negocios de forma correcta entre las empresas dedicadas a la construcción de celdas robotizadas y las empresas manufactureras de piezas en acero 1045 AISI. Debido a los altos costos de adquisición e implementación de las celdas robotizadas, las empresas de integración de estos sistemas requieren tener niveles de fiabilidad que ayuden a disminuir riesgo en este tipo de negocios de alto valor monetario. Un uso adecuado de la herramienta generada también puede ayudar en parte a tener el parámetro que ofrezca una ayuda en disminución de costos de implementación y de puesta a punto del equipo. La intención es que cada vez más empresas que no pueden correr riesgos en una mala implementación, debido a factores de incertidumbre en el producto final, puedan tener acceso al negocio de la automatización robotizadas y así contribuir al desarrollo económico y tecnológico con miras a una producción de alta calidad y competitividad en la región.

REFERENCIAS

- Alonso Marcos, C. (2021). *Interpretación de planos en soldadura*. Editorial Paraninfo.
- American Welding Society (AWS) D8 Committee on Automotive Welding. (2007). *AWS D8.8M:2007 Specification for Automotive Weld Quality—Arc Welding of Steel*.
- Arnold, S. F. (2006). *Design of Experiments with MINITAB. The American Statistician* (vol. 60). 10.1198/tas.2006.s46
- Compañía general de aceros. (2020). *Acero Grado Ingeniería Aceros al Carbono 1045. Aceros especiales para aplicaciones especiales*.
https://www.cga.com.co/wp-content/uploads/2020/07/Ficha_Técnica_Aceros_Grado_Ingeniería_1045.pdf
- Contreras, L. E., Ríos, R. A. et Vargas, L. F. (2018). *Procesos de fabricación en metales* (1a Edición). Ediciones de la U.
<https://es.scribd.com/read/436222231/Procesos-de-fabricacion-en-metales>
- Evans, M. (2009). *MINITAB Manual* (1st éd.). W.H. Freeman and Company.
- Grupo Infra. (2022). *Infra Mixx 200-25*. <https://grupoinfra.com/files/hds-infra-mixx-200-2-8-10-15-20-25.pdf>
- Hernández Acero, C., Luque Morales, R. et Anaya Eredias, C. (2022). Análisis de Velocidad de Soldadura Robótica en Proceso MIG para Acero 1045 AISI. *Investigación para el Mejoramiento de la Sociedad — AJ CDMX 2022*, 14(7), 170-175.
<https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/63265db1caf2f20e0c84b942/1663458742005/Tomo+02+-+Articulos+del+Congreso+AJ+CDMX+2022.pdf>
- Hooda, A., Dhingra, A. et Sharma, S. (2012). Optimization of MIG welding process parameters to predict maximum yield strength in AISI 1040. *Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res.* <http://www.ijmerr.com/currentissue.php>
- Mahesh, S. (2017). Optimization of MIG Welding Parameters for Improving Strength of Welded Joints. *(IJITR) INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE TECHNOLOGY AND RESEARCH*, 5(3), 6453-6458. <http://www.ijitr.com>
- Martinez, E. J., Miguel, V., Parra, C., Godinez, C. et Abellan, E. (2011). Análisis de la penetración en la soldadura de una estructura metálica. *Revista DYNA*, 87(No.1).
- Microsoft Corporation. (2018). Microsoft Excel for Microsoft 365 MSO.
- Miller Electric Mfg. LLC. (2018). Auto-Continuum™ Systems. Miller Electric Mfg. LLC.
<https://www.soldadorasmillermexico.net/app/download/10707911519/Ficha+Técnica+Auto-Continuum+500.pdf?t=1624644872>
- Minitab LLC. (2017). Minitab. Minitab, LLC. <https://www.minitab.com/es-mx/>

- Molera Solá, P. (1992). *Soldadura industrial: Clases y aplicaciones*. MARCOMBO.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos (2a Edición)*. LIMUSA WILEY.
- Murray, P. E. et Scotti, A. (1999). Depth of penetration in gas metal arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 4(2), 112-117.
10.1179/136217199101537644
- Rios Vargas, L. (2017). *Estudio del efecto de los parámetros de soldadura robotizada en un componente estructural de aceros disímiles por medio de GMAW*. CIATEQ A.C.
- Siddharth Kumaran, K. et Oliver Nesa Raj, S. (2018). Optimization of parameters involved in robotic MIG welding process based on quality responses. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 402(1). 10.1088/1757-899X/402/1/012016
- The Lincoln Electric Company. (2022a). *Fusión de soldadura frente a penetración de soldadura*. <https://www.lincolnelectric.com/es-MX/Welding-and-Cutting-Resource-Center/Process-and-Theory/Weld-Fusion-vs-Weld-Penetration>
- The Lincoln Electric Company. (2022b). *Salida de corriente constante frente a voltaje constante*. <https://www.lincolnelectric.com/es-mx/welding-and-cutting-resource-center/process-and-theory/constant-current-vs-constant-voltage-output>
- Toyota Metallic Material Div. (s. d.). Toyota Engineering Standard TSH5603G.
- Vasdev, R. (2022). Cómo aumentar la eficiencia de la soldadura GMAW en el taller de fabricación. *The Fabricator en español*, 12-17.
<https://www.thefabricator.com/thefabricatorenespanol/article/arcwelding/cómo-aumentar-la-eficiencia-de-la-soldadura-gmaw-en-el-taller-de-fabricacion>
- Vergara, V. et Soto, M. (2018). *A Study of the Influence of Variables in the MIG/MAG CCC Welding Process in the Mining Sector Estudio e implementación del proceso de soldadura TIG Hot Wire (Study and Implementation of the TIG Hot-Wire welding process) View project*.
<https://www.researchgate.net/publication/327647036>
- Wenhua, J., Qiyue, W., Yongchao, C. et YuMing, Z. (2020). End-to-end prediction of weld penetration: A deep learning and transfer learning based method. *Jorunal of manufacturing processes*, 63. 10.1016/j.jmapro.2020.01.044
- Yaskawa America Inc. (2021). GP20HL Robot Arm.
<https://www.motoman.com/getmedia/ce50023f-4f4e-43e1-85c8-cfef643a7692/gp20hl.pdf.aspx>
- Yaskawa Electric Corp. (2021). Programming pendant software.
- Yaskawa Europe GmbH. (2022). *Robotics Glosary*.
<https://www.yaskawa.eu.com/products/robots/glossary>

ANEXOS

ANEXO A

El Robot de alcance extra-largo GP20HL de Yaskawa ofrece un desempeño preciso de alta velocidad para incrementar la productividad de las aplicaciones para las que está diseñado. Es ideal para el procesamiento de partes grandes, como marcos automotrices y equipos de agricultura. Con la nueva tecnología usada en este robot, se han incrementado la capacidad de carga (antorchas de soldadura más grandes) y la velocidad de los ejes, optimizando la calidad y el rendimiento. (Yaskawa America Inc., 2021)

Algunas de sus características más sobresalientes son las siguientes:

- Tiene un diseño esbelto y delineado, por lo que ofrece menos interferencia con los herramientas para el proceso de soldadura.
- El largo alcance ayuda a posicionar el robot en la ubicación en la que la aplicación es requerida, ofreciendo flexibilidad a la aplicación.
- Un orificio de 50mm en el último eje del robot en el cual se puede instalar la antorcha y pasar las mangueras de gas y cables, reduciendo las posibilidades de interferencia con la pieza.



Figura 45. Robot GP20HL
(Yaskawa America Inc., 2021)

ANEXO B

La fuente Auto-Continuum 500 es un equipo de proceso de soldadura MIG para aplicaciones robotizadas. Su alimentación multi-voltaje puede ser desde 230 VCA hasta 575 Volts VCA Trifásica, y no necesita de modificaciones o puentes de manuales para su ajuste en el voltaje de entrada. Entre algunos otros, la fuente puede realizar los siguientes procesos en su configuración:

- Accu-Pulse® MIG (GMAW-P)
- Versa-Pulse™
- RMD®
- MIG (GMAW)
- MIG de alta deposición (GMAW)
- Con núcleo fundente (FCAW)

(Miller Electric Mfg. LLC, 2018)

Esta fuente tiene comunicación directa con equipos robóticos mediante su interfaz Ethernet/IP, lo cual hace sencilla su configuración, monitoreo y ajuste de parámetros. La fuente Auto-Continuum 500 también puede ser utilizada en procesos manuales.



Figura 46. Fuente Auto-Continuum 500 en uso automatizado o manual
(Miller Electric Mfg. LLC, 2018)

Sus datos de rendimiento que se muestran en la Figura B2, tienen un excelente comportamiento en porcentajes de trabajo altos (donde prácticamente se asegura un 100% a 500 Amperes de corriente).

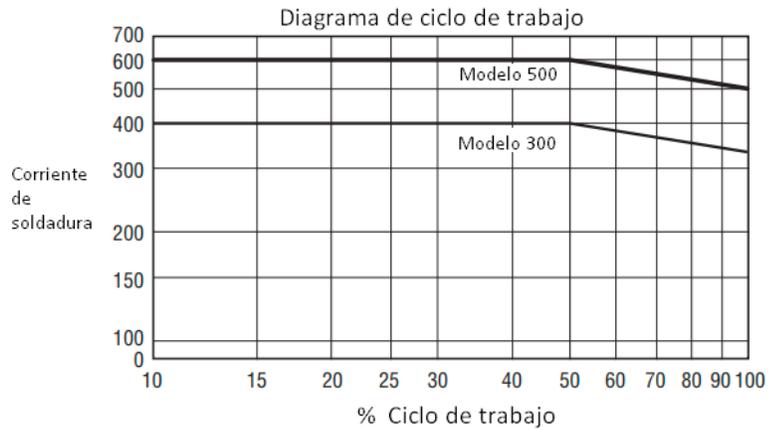


Figura 47. Gráfico de ciclo de trabajo vs Corriente de soldadura (Miller Electric Mfg. LLC, 2018)

La instalación típica con equipos robóticos es muy flexible como se observa en la Figura B2, necesitando solo establecer una longitud de cables y mangueras de manera correcta (la instalación de gas no se muestra para facilidad de interpretación).

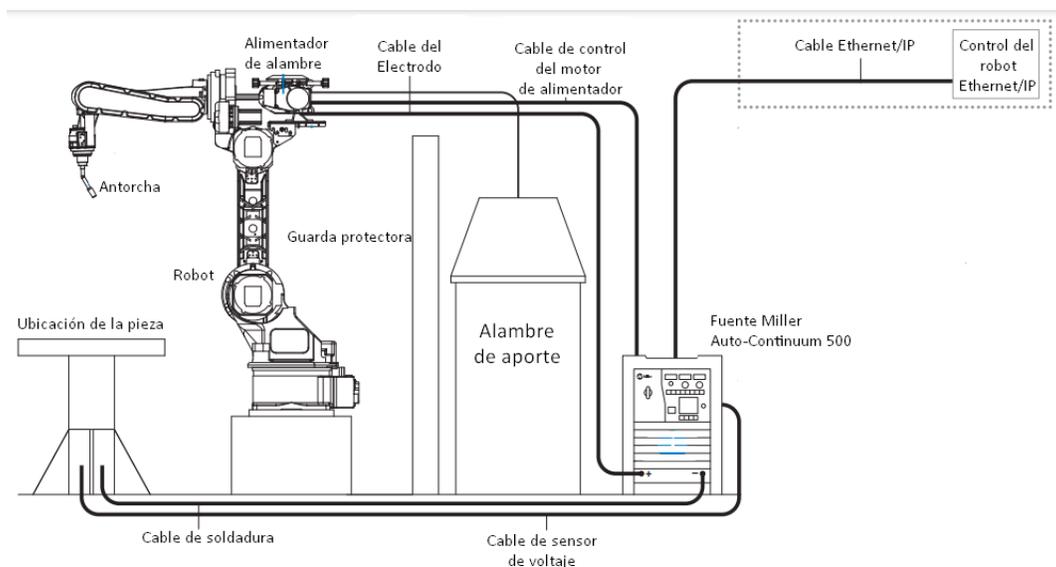


Figura 48. Instalación típica de una aplicación de soldadura robotizada (Miller Electric Mfg. LLC, 2018)

ANEXO C

El acero 1045 es un metal de medio carbono, con buena maquinabilidad y con buena respuesta al tratamiento térmico y al endurecimiento por llama o inducción. (Compañía general de aceros, 2020)

 AISI / SAE: 1045			
Composición química (%)			
C	0.43 - 0.50	P	0.04 Max.
Mn	0.60 - 0.90	S	0.05 Max.
Si	0.20 - 0.40		

Dureza de suministro 180 - 220 HB.

EQUIVALENCIAS EN OTRAS NORMAS

NORMAS	NOMBRE
AISI SAE	1045
DIN	CK45
AFNOR	XC45
UNI	C45
BS	060 A45

Figura 49. Composición química y equivalencia del acero 1045 en otras normas (Compañía general de aceros, 2020)

Entre las aplicaciones más comunes del acero 1045 AISI/SAE se encuentran las relacionados con el ramo automotriz y de maquinaria en general de resistencia media como ejes, cigüeñales, engranajes, piñones, cuñas, partes de maquinaria y herramientas agrícolas.

En general se suministra comercialmente laminado en caliente o calibrado. Su variación se encuentra en el límite elástico del material, incrementándose este último mediante el calibrado.

Estado de Suministro	Resistencia tracción kg/mm ²	Límite elástico kg/mm ²	Alargamiento %	Reducción de área %	Dureza brinell HB
Laminado en Caliente	60	32	> = 16	> = 40	180/220
Calibrado	60	42	> = 16	> = 40	180/220

Figura 50. Características generales de acuerdo con el suministro (Compañía general de aceros, 2020)