



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Becario (Intern):
Asistencia de proyectos de
investigación**

INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Yanick De la Torre Mercado

ASESOR DE INFORME

Mtro. José Gonzalo Guerrero Zepeda



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado BECARIO (INTERN): ASISTENCIA DE PROYECTOS DE INVESTIGACION que presenté para obtener el título de INGENIERO MECÁNICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

YANICK DE LA TORRE MERCADO
Número de cuenta: 317264265

Índice temático

Introducción y objetivo.....	3
Antecedentes.....	3
Definición del problema o contexto de la participación profesional.....	11
Metodología utilizada.....	12
Resultados.....	24
Conclusiones.....	28
Aprendizajes.....	29
Referencias.....	31

Introducción y objetivo

El objetivo de este informe es presentar mi participación como becario en proyectos de investigación sobre soldadura acuática en el *Institut für Werkstoffkunde* en Hannover, Alemania, donde apliqué conocimientos de ingeniería mecánica mediante prácticas en laboratorio, diseño de herramientas y análisis de datos, con el fin de optimizar procedimientos técnicos y contribuir al desarrollo de soluciones aplicables en la industria.

Durante mi movilidad estudiantil, tuve la oportunidad de trabajar en este instituto como becario mientras terminaba mis créditos correspondientes dentro de este plazo. El trabajo consistió en apoyar a mis dos supervisores, el Ing. Leandro Vaccari y el M. C. Thomas Scheithauer en sus proyectos de investigación. El objetivo principal de dichos proyectos era hacer eficientes los procedimientos de soldadura acuática por medio de la aplicación práctica en el taller del instituto, tomando como referencia la investigación teórica existente.

Antecedentes

El Instituto para la Ciencia de los Materiales (*Institut für Werkstoffkunde IW*) fue creado en 1905 y ha sido activo en sus labores de investigación desde entonces. Sus instalaciones se encargan de impartir conocimiento en las áreas de ingeniería mecánica, de producción y logística, biomédica, metalúrgica, mecatrónica e industrial para los programas de licenciatura y maestría en el campus de ingeniería mecánica ubicado en *An der Universität 1 30823 Garbsen*, Hannover, Alemania.

A su vez, el IW está disponible para las empresas y compañías como proveedor de servicio y cooperación entre colegas para resolver problemas prácticos que van desde la profundización en teoría hasta su aplicación directa en campo.¹

El instituto cuenta con máquinas de corte simple, desde cizallas eléctricas hasta máquinas CNC, e incluso máquinas de corte con agua a presión. Esto permite el uso de perfiles bastante exactos para las pruebas correspondientes. También en las instalaciones hay una alberca/tanque profundo para pruebas con soldadores acuáticos, y una cámara hiperbárica que simula las condiciones de presión y temperatura a 30 m de profundidad máxima para evaluar la calidad de los procedimientos que se tienen que realizar en estas condiciones.

La clase de experimentos que se realizan se relaciona con la ciencia de los materiales, es decir, su composición, sus características mecánicas y químicas, y para mi especialidad del trabajo que se me encomendó, su grado de soldabilidad por debajo del agua.

Los trabajos en esta área tienen el objetivo de mejorar los procesos de soldadura acuática.

¹ Leibniz Universität Hannover - Institut für Werkstoffkunde. Rescatado el 04.03.2025. Disponible en: <https://www.irs.uni-hannover.de/de/luh-iw>

Soldadura acuática y el arco eléctrico

1.1. Arco eléctrico

El arco eléctrico es la fuente de calor más utilizada para la soldadura por fusión en materiales metálicos; presenta una combinación óptima de características que incluyen: una concentración adecuada de energía para la fusión precisa de metales, es de fácil control, el costo de equipo es relativamente bajo y hay un nivel aceptable de riesgos para la salud de los operadores. Actualmente, los procesos de soldadura con arco eléctrico tienen una gran importancia industrial y se utilizan en la manufactura de una gran variedad de componentes y estructuras metálicas, así como en la recuperación de un gran número de partes dañadas o usadas.²

La soldadura de fusión se lleva a cabo al aplicar energía concentrada en un punto específico de unión entre metales para su fusión correspondiente, formando así un “baño de soldadura” (metal fundido por el calor del arco).³

Este metal luego se enfría y solidifica, formando la unión soldada y afectando mínimamente el material circundante (zona afectada por el calor, HAZ por sus siglas en inglés). La Figura 1 ilustra el proceso: La fuente de calor transfiere energía al material base a través de un área de contacto, de modo que calienta y finalmente funde el metal por debajo. Sin embargo, debido a la alta conductividad térmica de los materiales metálicos y los altos gradientes de temperatura que se desarrollan durante el proceso de

² Modenesi, Paulo José. Introduction to the physics of the electric arc and its application to the welding of metals/ Paulo José Modenesi, Andrés Mauricio Moreno Uribe. -- 1 ed. -- Bogotá : Ecoe Ediciones, 2022. 232 p. – (Engineering and related. Mechanical engineer, physics, welding)

³ Rodríguez M. Soldadura por arco eléctrico: Procesos e innovaciones. Rescatado el 08.03.2025. Disponible en: <https://inspenet.com/articulo/fundamentos-soldadura-por-arco-electrico/>

soldado, la energía recibida de la fuente de calor se disipa rápidamente al resto del material de trabajo, haciendo más difícil la creación del baño de soldadura y simultáneamente alterando la composición metalúrgica del material y la forma de la zona afectada por calor (HAZ).

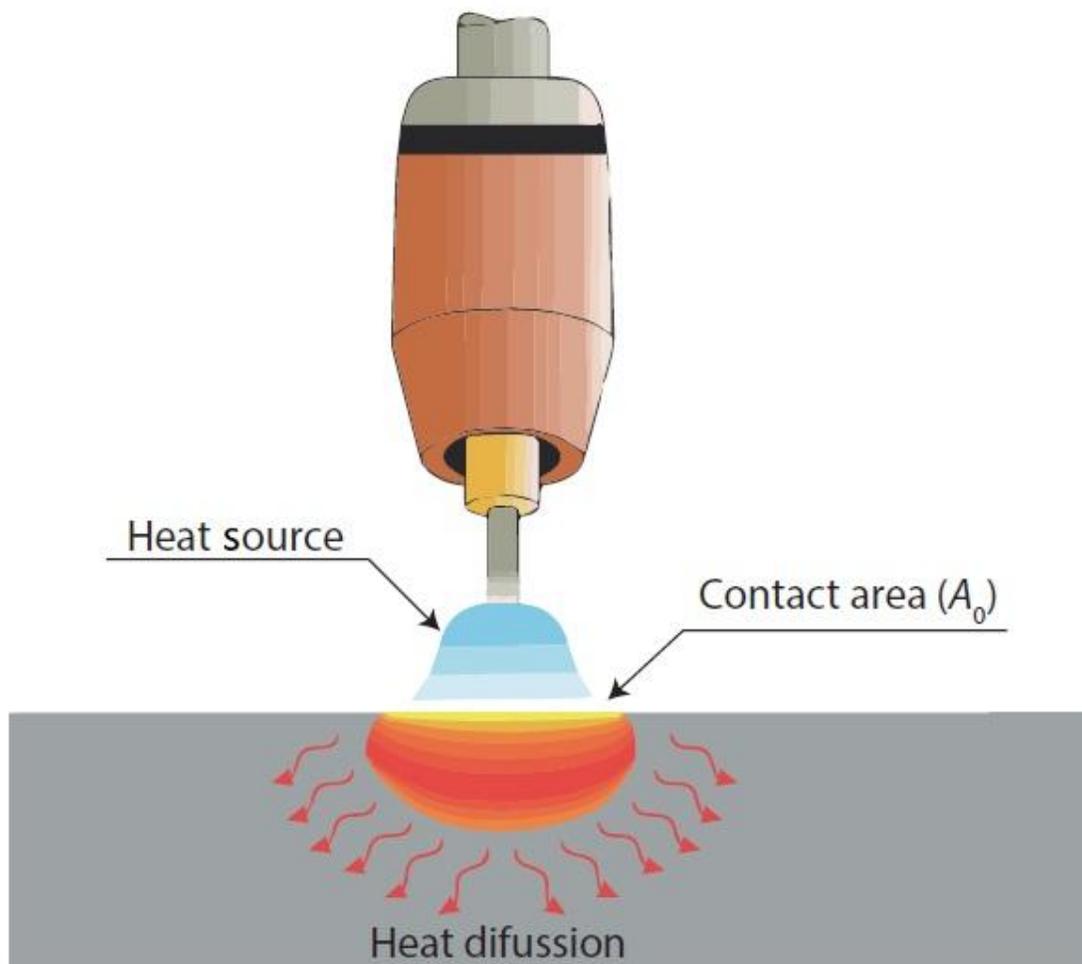


Figura 1. Proceso de soldadura por arco. (Modificada²)

1.2. Soldadura acuática

La soldadura acuática, soldadura de construcción marina o soldadura hiperbárica, consiste en realizar tareas de soldadura bajo la superficie del agua. Es esencial para mantener la integridad y seguridad de las estructuras marinas y tiene aplicación directa

en la construcción, reparación y mantenimiento continuo de buques, plataformas petrolíferas marinas, oleoductos, tuberías submarinas y otras estructuras e infraestructuras submarinas críticas expuestas a entornos marinos hostiles.⁴

La historia de la soldadura acuática inicia a principios del siglo XX, cuando en 1932, el ingeniero soviético Konstantin Khrenov fue pionero en el primer método exitoso de soldadura acuática. Su trabajo sentó las bases de las técnicas modernas que se utilizan actualmente en diversas aplicaciones subacuáticas, impulsando significativamente el campo de la soldadura marina y de alta mar.

La soldadura acuática que usa electrodos recubiertos es de los métodos más viejos, económicos y versátiles. Las principales dificultades dentro del proceso son las altas tasas de enfriamiento, así como, la presencia de Hidrógeno (H) en la zona del arco, generado por la chispa y la formación de estructura martensítica dura en la soldadura. Estos fenómenos están acompañados también por la generación de porosidad dentro de la soldadura, así como un gran número de cráteres en la zona. Estos últimos son más graves y comunes entre más profundidad se tenga.

Los métodos para soldadura acuática se clasifican en húmedos y secos. Dentro de esta clasificación se encuentra el método de cavidad aislada, el cual consiste en aislar el arco del ambiente acuático, este se considera como un método intermedio entre húmedo y seco.

⁴ Ocean Corp. Underwater Welding: A Comprehensive Guide. Rescatado el 15.03.2025. Disponible en: <https://oceancorp.com/underwater-welding-a-comprehensive-guide/>

La soldadura húmeda se caracteriza porque el área de contacto entre juntas está dentro de un ambiente acuático, lo cual afecta significativamente la soldabilidad del material, resultando en una calidad de unión con varias imperfecciones.

En la Tabla 1 se presentan los distintos métodos de soldadura y su desempeño dentro de un ambiente acuático.

Tabla 1. Posibilidades de aplicación en los procesos de soldadura en un ambiente acuático.

Proceso	Soldadura seca	Soldadura húmeda	Soldadura de cavidad aislada
Soldadura de arco metálico manual (MMA)	Sí	Sí	Posible
Soldadura de arco sumergido (SAW)	Sí	Sí	No
Soldadura de gas inerte metálico/ de gas metálico activo (MIG/MAG)	Sí	Posible	No
Soldadura por arco con núcleo fundente (FCAW)	Sí	Sí	Sí
Soldadura por arco con núcleo fundente autoprotegido (FCAW-S)	Posible	Sí	Posible
Soldadura de arco por plasma	Posible	No	Posible
Soldadura por láser	Posible	No	Posible
Soldadura por fricción	Sí	Sí	No
Soldadura explosiva	No	Sí	No
Soldadura de pernos	Posible	Sí	Posible

Fuente: ²

La soldadura de arco metálico manual (MMA) es el método más común de soldadura acuática (soldadura que utiliza electrodos recubiertos) debido a su bajo costo y versatilidad con fines de mantenimiento y reparaciones. Este método tiene la desventaja de crear imperfecciones dentro de la soldadura como por ejemplo, fracturas causadas por una gran cantidad de hidrógeno en la unión y enfriamiento prematuro, dichas fracturas pueden formarse durante el soldado acuático incluso en aceros con bajo porcentaje de carbono ($C_e=0.3$).⁵

Una variante a la anterior es la soldadura de arco protegido (SMAW) la cual utiliza una fuente de poder de corriente constante e incluye crear un arco eléctrico entre la punta de un electrodo consumible y la pieza de trabajo. El arco está protegido por un gas/fundente que se desprende del revestimiento del electrodo. Este tipo de soldadura fue el que utilicé en el Instituto para la Ciencia de los Materiales (*Institut für Werkstoffkunde IW*).

La selección de electrodos óptimos para la soldadura acuática es muy importante, y deben contener compuestos fácilmente ionizables, con una cantidad adecuada de gases que permitan mantener el arco de contacto estable. Los electrodos de rutilo (electrodos que contienen una alta cantidad de dióxido de titanio), son los que dan los mejores resultados en la soldadura, pues se logra fácilmente una chispa de arco estable y brillante. Otro factor importante es la calidad y durabilidad del recubrimiento, usualmente éstos tienen una base de acero austenítico para la soldadura acuática y brindan gran

⁵ Matsuda K., Masumoto I., Hasegawa M.: Study on the crack sensitivity of mild steel welded joint by underwater welding. Proceedings of the International Conference „Joining of Metals – 2”, Helsingor, Denmark 1984.

ductilidad a la soldadura, sin embargo, es menos resistente a la fractura a temperaturas elevadas durante el proceso de cristalización.^{5,6}

El rendimiento de estas uniones soldadas bajo el agua es un proceso complejo, lo que resulta en baja calidad de sus propiedades mecánicas. En un ambiente acuático, las tasas de enfriamiento son mucho más altas comparadas a un ambiente seco, lo que causa una gran pérdida de ductilidad del material soldado y en la zona afectada por calor (HAZ).

Bajo el agua, las soldaduras contienen muchos poros, que están compuestos por hidrógeno molecular, monóxido de carbono o vapor de agua, fenómeno que es afectado por la profundidad del agua, la cubierta de los electrodos y la estabilidad del arco. Además, las altas tasas de enfriamiento favorecen la formación de estructuras martensíticas duras en la zona afectada por calor (HAZ). También, es difícil evitar la presencia de hidrógeno en el área del arco debido al vapor de agua que lo rodea; el proceso de disociación del agua produce una gran cantidad de hidrógeno atómico que entra fácilmente al metal soldado, su contenido en las soldaduras de MMA acuático es aproximadamente tres veces mayor comparado con las soldaduras en el aire, y podría alcanzar 50-80 ml por cada 100 g de material depositado.^{7,8}

⁶ Fydrych D.: Cold cracking of steel welded in water environment. *Przegląd Spawalnictwa (Welding Technology Review)*, 10 (2012) (in Polish).

⁷ Fydrych D., Rogalski G.: Effect of shielded-electrode wet welding conditions on diffusion hydrogen content in deposited metal. *Welding International*, vol. 25, 3 (2011), 166-171.

⁸ Garasic I., Krajl S., Kozuh S.: Investigation into cold cracking in underwater wet welding of API 5L X70 steel. *Transactions of FAMENA*, vol. 33, 3 (2009), 25-34.

Otros factores por considerar en la soldabilidad son: el efecto de la presión hidrostática sobre el arco y los procesos metalúrgicos que afectan el balance químico y físico, así como las reacciones cinéticas en el baño de soldadura. También es importante mencionar las habilidades manuales del buzo-soldador, y la falta de visibilidad causada por la contaminación del agua, además del trabajo a gran profundidad (más de 250 metros).

Definición del problema o contexto de la participación profesional.

Dentro de las actividades y áreas de investigación que realiza el IW, particularmente la labor del Ing. Leandro Vaccari y M. C. Thomas Scheithauer, se encuentra mejorar los procedimientos de soldadura acuática. Consecuentemente, mis actividades consistieron en la aplicación de la investigación teórica existente a la práctica dentro del taller del instituto. Concretamente, en realizar las siguientes actividades:

- Desarrollar nuevas tecnologías para hacer más eficiente el proceso de soldadura acuática.
- Buscar alternativas para optimizar el funcionamiento del equipo existente en el taller-laboratorio del Instituto para la Ciencia de los Materiales (*Institut für Werkstoffkunde IW*): Diseño de una abrazadera/soporte para instalarla dentro de la cámara hiperbárica.
- Dar mantenimiento y limpieza al equipo de trabajo: máquinas, alberca de pruebas para inmersiones, herramientas y áreas de trabajo.

- Apoyo a la investigación de M. C. Thomas Scheithauer: detección de compuestos de soldadura en un modelo gráfico, utilizando lenguaje de programación especializado (lenguaje R).

Metodología utilizada

Para desarrollar nuevas tecnologías y hacer más eficiente el proceso de soldadura acuática en el laboratorio-taller, mis supervisores tenían el propósito de obtener cordones de soldadura más consistentes y eficientes para reducir las imperfecciones causadas por este proceso.

Para llevar a cabo mi trabajo, tuve a mi alcance toda clase de equipo, material y herramientas en el taller (Fig. 2). Además, un horario flexible compatible con mis actividades académicas además de contar con todo el apoyo de mis supervisores. De igual forma, el Instituto por parte de la universidad me proporcionó un seguro laboral y equipo de protección que era indispensable por ley para poder trabajar en el taller. Este incluía: 2 pares de guantes (un par de carnaza y otro de nylon), protectores auditivos, lentes, pantalones y zapatos de seguridad.



Figura 2. Equipo de trabajo y taller en el Instituto para la Ciencia de los Materiales (*Institut für Werkstoffkunde IW*).

Así mismo, se me asignó un equipo de trabajo marca Lenovo que contaba con un CPU compacto, esto permitió aprovechar de mejor forma los espacios de trabajo. Junto con este equipo se creó una cuenta personalizada con mis credenciales de acceso que también serían las mismas con las que podría controlar, desde los archivos que imprimí en papel, hasta los diseños que realicé en impresión 3D a forma de prototipo antes de ser enviados a ser manufacturados y constituidos por partes metálicas.

A mí se me asignó la tarea de realizar pruebas en un banco de soldadura controlado por un robot con 3 ejes de libertad (Fig 3). Este banco estaba destinado para la soldadura de

arco protegido (SMAW), su pinza de sujeción presentaba dimensiones adecuadas para electrodos sumergibles comunes. Dentro de este banco se controlaban 3 parámetros, voltaje o diferencia de potencial [V], intensidad de corriente [A] y velocidad de soldado [m/s]. Se encontraba conectado al sistema de bombeo de agua de todo el instituto, de forma que era fácil la operación de llenado y vaciado de agua por medio de grandes válvulas de globo, permitiendo el nivel de agua óptimo para cada perfil de acero utilizado.



Figura 3. Banco de soldadura acuática.

Otra de mis actividades en este banco de pruebas consistió en modificar electrodos de carbono para que pudieran ser ensamblados a la máquina. Esta técnica era innovadora en este ámbito de trabajo ya que no se conocía el efecto que tendría para su aplicación directa en soldadura acuática. Como punto de partida, se pretendía estudiar su efecto sobre un cordón de soldadura previamente hecho bajo “condiciones estándares” de trabajo. Como hipótesis inicial se esperaba disminuir las tensiones existentes generadas por el proceso tradicional, al sobrecalentar nuevamente la zona afectada por el calor

(HAZ) para aminorar algunas imperfecciones presentes, como las fracturas causadas por hidrógeno.

Los electrodos de carbono disponibles en el laboratorio no cumplían con las mismas dimensiones que un electrodo recubierto para soldadura acuática estándar. Por ello, utilicé mis habilidades de creatividad para diseñar un modelo adecuado al banco de pruebas y adaptar esta nueva geometría a la pinza de sujeción (Fig. 4 y 5).



Figura 4. Electrodos de carbono utilizados (incluidas pruebas de durabilidad, ductilidad y resistencia).



Figura 5. Prueba de durabilidad de electrodos de carbono de distintas geometrías.

Registré las medidas del electrodo estándar y las adapté a un electrodo de carbono de mayor dimensión, por ensayo y error. En los ensayos introduje un tornillo M3x25 hasta M3x40 a la base del electrodo de carbono para que esta reducción de diámetro fuera acorde con el espesor del electrodo estándar (Fig. 6).



Figura 6. Herramientas utilizadas para la adaptación de los electrodos de carbono (tornillos y broca).

Realicé una serie de pruebas de soldadura en una placa de acero de 10mm de espesor. En estas pruebas se controlaron 3 parámetros: voltaje, intensidad y velocidad de soldado.

Las placas se sumergieron en el banco de prueba y se fijaron a la estructura de la base, después llené el tanque utilizando las válvulas de globo para alcanzar un nivel apropiado de agua y se bombeó aire dentro para controlar la inmersión del electrodo de acuerdo con su tamaño.

Posteriormente, realicé cordones de soldadura y registré los primeros resultados de los experimentos, variando cada uno de los parámetros de forma independiente; midiendo así qué tan útil resultaba esta adecuación.

Las pruebas que se realizaron fueron las siguientes:

Prueba 1: Intensidad y velocidad constante: 150A y 0.2 m/s respectivamente. Diferencia de potencial variable: rangos de 25 a 33V (Fig.7).



Figura 7. Prueba 1

Prueba 2: Intensidad y velocidad constante: 60A y 0.2 m/s respectivamente. Diferencia de potencial variable: rangos de 23 a 29V (Fig. 8).



Figura 8. Prueba 2

Prueba 3: Intensidad y velocidad constante: 150A y 0.2 m/s respectivamente. Diferencia de potencial variable: rangos de 25 a 35V (Fig. 9)



Figura 9. Prueba 3

Prueba 4: Electrodo de carbono sobre cordón de soldadura; intensidad y diferencia de potencial constante: 150A y 33V respectivamente. Velocidad variable: rangos de 0.2 a 0.6 m/s (Fig. 10).



Figura 10. Prueba 4

En la búsqueda de alternativas para optimizar el funcionamiento del equipo existente en el taller-laboratorio del Instituto para la Ciencia de los Materiales (*Institut für Werkstoffkunde IW*) participé junto con mi jefe en una cámara hiperbárica de última tecnología en la cual se simulan las condiciones de soldadura a 30 m por debajo de la superficie. Dentro de esta, se presentó un problema con las muestras ya que la abrazadera que sujetaba las muestras de metal no funcionaba correctamente. Para resolver dicho inconveniente, diseñé una abrazadera/soporte para instalarla dentro de la cámara hiperbárica.

Para ello, aprendí a usar el software de CAD SolidWorks para diseñar todos los elementos requeridos (Fig. 11). Todo comenzó por un dibujo a mano alzada (sketch) de cómo pretendía que funcionara la abrazadera/soporte, después transcribí este sketch a SolidWorks. El diseño implicó múltiples iteraciones para ajustar tolerancias y garantizar el ensamblaje adecuado entre los elementos modelados y las piezas reales. Se realizaron varios diseños hasta lograr el objetivo considerando las tolerancias. Este modelo final se llevó a las máquinas de corte CNC para obtener las piezas de acero inoxidable en físico y los accesorios adecuados (tornillos, tuercas, rondanas, ejes encordados, etc) con el fin de ensamblar el soporte.

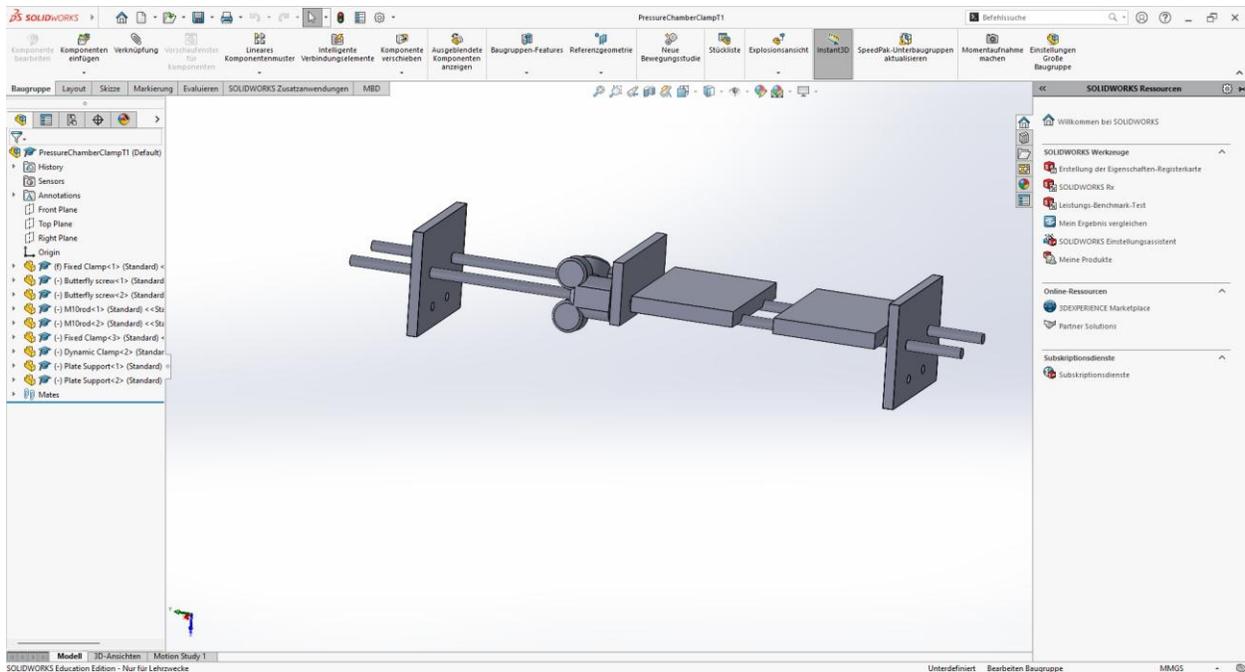


Figura 11. Dibujo CAD preliminar de la pinza de sujeción para la cámara hiperbólica.

Otra de las actividades realizadas fue dar mantenimiento y limpieza al equipo de trabajo: máquinas, alberca/tanque de pruebas para inmersiones, herramientas y áreas de trabajo. Para ello fue necesario realizar la limpieza del tanque que requería la coordinación de todo el personal del instituto y se realizaba una vez cada semestre, previo a las pruebas con los soldadores acuáticos. Dentro de este trabajo de equipo, realicé la limpieza del tanque (Fig. 12 a-b), utilizando herramientas como botas de agua, cubrebocas, guantes, lentes de seguridad y audífonos protectores (éstos eran de alta importancia, pues las “karchers” o máquinas de agua a presión presentan vibraciones muy fuertes a la hora de expulsar el chorro de agua, y del elevado ruido generado por la bomba de succión empleada para extraer el agua contaminada con desechos). El vaciado del tanque

implicaba que el agua se llevara a la planta de tratamiento de la ciudad, de manera que era reciclada y/o tratada.

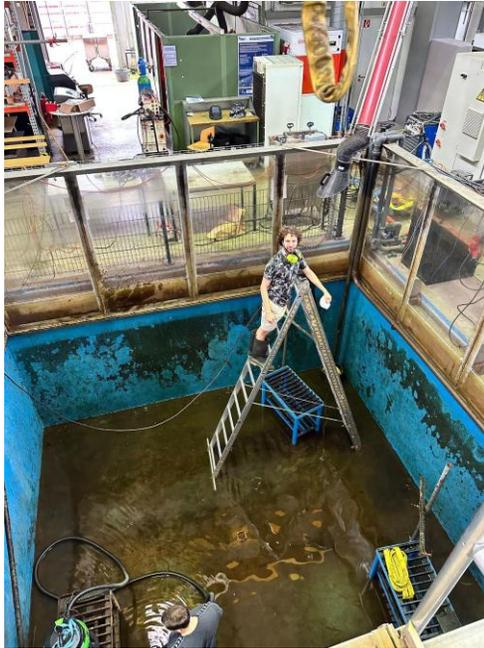


Figura 12a. Limpieza del tanque de inmersión utilizado para las pruebas de soldadura acuática.



Figura 12b. Limpieza del tanque de inmersión con máquinas de agua a presión.

Además, con el fin de apoyar a la investigación de M. C. Thomas Scheithauer: detección de compuestos de soldadura en un modelo gráfico utilizando lenguaje de programación especializado (lenguaje R). Aprendí este lenguaje de programación para manipular los datos que me proporcionaron. La finalidad era detectar y contrastar registros de datos existentes con un modelo gráfico, que resultaron de un proceso de soldadura acuática estándar.

Mi tarea consistió en detectar cada compuesto presente en el proceso de soldadura y discriminar ciertos picos característicos utilizando herramientas estadísticas como valores máximos y mínimos, medias aritméticas, y desviaciones estándar. Era importante primero comprender estas herramientas estadísticas para compararlas con los valores característicos ya existentes en una base de datos.

Por medio de Inteligencia Artificial logré autocapacitarme en el uso del Lenguaje R de programación. Cabe destacar que este lenguaje está enfocado al análisis estadístico de alta calidad por medio de líneas de código base y su entorno es visualizado gráficamente por medio de hojas de cálculo (Fig. 13).

Fe	WaveLength	Rel.	Akl	fak	S	log gf	Acc	Ei	Ei	Di	Di	gi	gi	Configuration i	Configuration k	Term i
Term k	Type	Note	Int.	(10 ⁸ s-1)				(eV)	(eV)							
	(nm)															
Fe I	170.43200	4	-	-	-	-	0.00000000	7.27478577	4.0	3.0	9	7.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	
Fe I	170.45450	1	-	-	-	-	0.08728574	7.35972660	2.0	1.0	5	3.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	
Fe I	170.99440	1	-	-	-	-	0.00000000	7.25873723	4.0	4.0	9	9.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	
Fe I	171.02160	1	-	-	-	-	0.11811433	7.35972660	1.0	1.0	3	3.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	
Fe I	171.22090	3	-	-	-	-	0.08728574	7.32812275	2.0	2.0	5	5.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	
Fe I	171.28520	0	-	-	-	-	0.12126572	7.35972660	0.0	1.0	1	3.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	
Fe I	171.64860	4	-	-	-	-	0.05156932	7.27478577	3.0	3.0	7	7.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	
Fe I	171.77830	1	-	-	-	-	0.11811433	7.32812275	1.0	2.0	3	5.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	
Fe I	171.81480	2	-	-	-	-	0.08728574	7.38342758	2.0	2.0	5	5.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	
Fe I	171.97770	6	-	-	-	-	0.00000000	7.28931005	4.0	5.0	9	11.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	
Fe I	172.14840	1	-	-	-	-	0.11811433	7.31227831	1.0	1.0	3	3.368.442		368.4s.(40).5p	a.50	

Figura 13. Representación del código base en documentos .txt

Resultados

Los electrodos de carbono fueron adaptados exitosamente a la pinza de sujeción del banco de prueba lo que permitió realizar correctamente los experimentos que se tenían previstos por mis supervisores (Fig. 14).



Figura 14. Electrodo de carbono modificado y adaptado al banco de pruebas.

Las pruebas realizadas permitieron obtener muestras específicas para enviarlas al laboratorio de metalografía, en donde se reveló la composición a través de las distintas capas del material expuesto al proceso de soldadura (Fig. 15).



Figura 15. Muestras enviadas al laboratorio de metalografía.

Así mismo, se diseñó y fabricó la pinza de sujeción/soporte para la cámara hiperbárica, empleando el software de CAD Solid Works y la máquina de CNC. El modelo ensamblado se instaló en la cámara hiperbárica, corroborando así su eficiencia y compatibilidad con los perfiles de acero destinados a pruebas futuras (Fig. 16 a-b).



Figura 16a. Prototipo de la pinza de sujeción de la cámara hiperbárica.

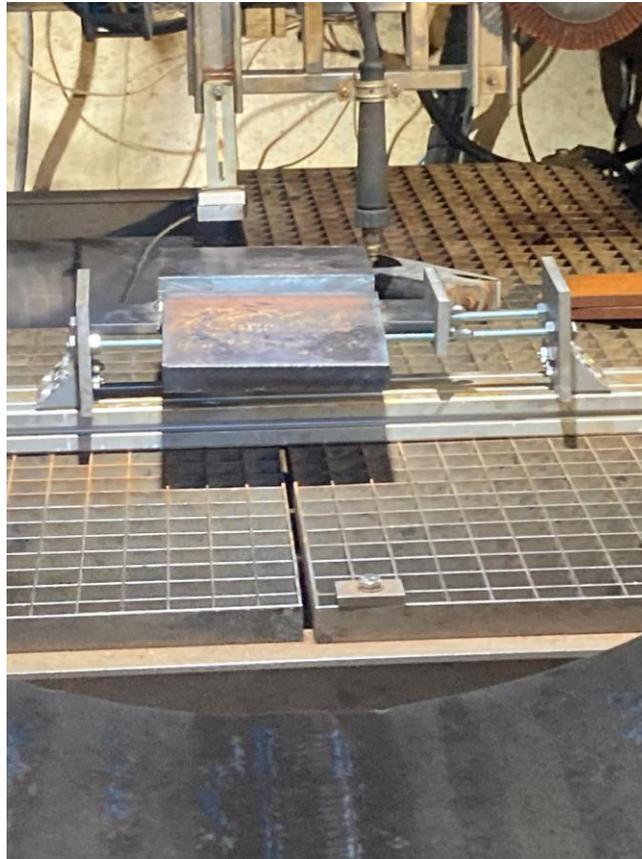
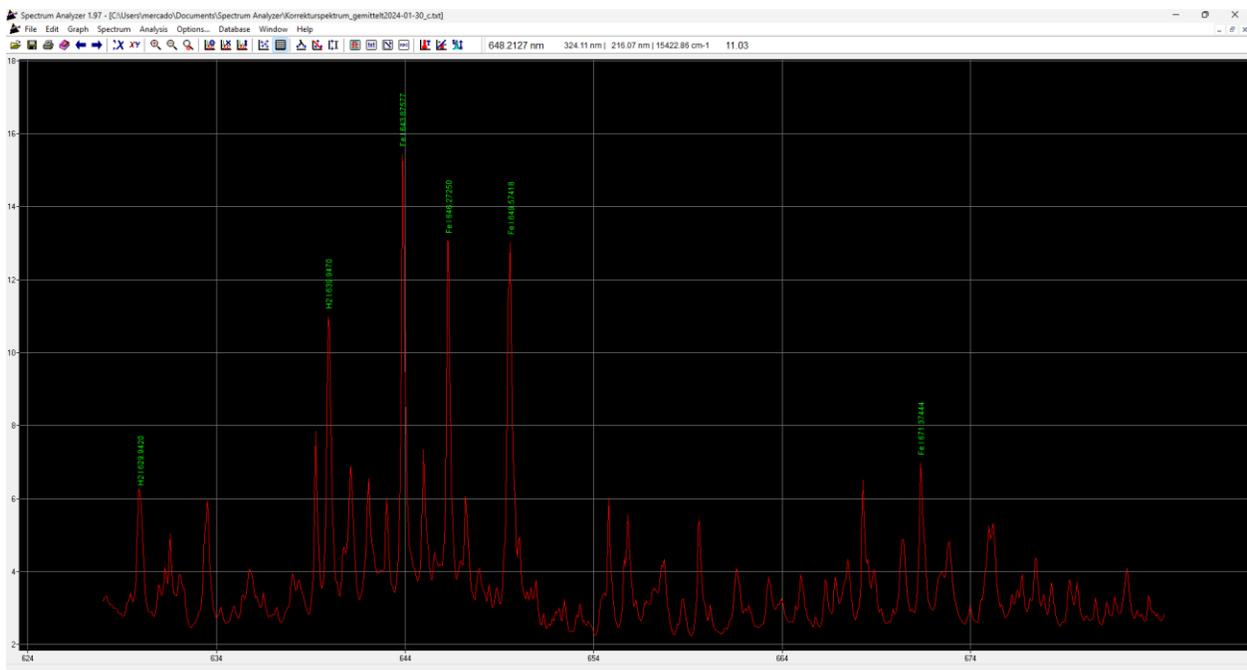


Figura 16b. Modelo final de la pinza de sujeción de la cámara hiperbárica.

En cuanto al mantenimiento del equipo de trabajo, se llevó a cabo de manera eficiente, resultando en la aplicación y uso correcto de los protocolos de seguridad y equipo de protección.

Relacionado con la investigación sobre detección de compuestos de soldadura, aprendí y utilicé de manera correcta la programación en Lenguaje R, para la cual se obtuvieron los datos necesarios y su despliegue a través de la gráfica 1:



Gráfica 1. Comportamiento que muestra la mezcla de gases presentes en un proceso de soldadura acuática: En rojo se muestra la distribución de un espectro FTIR, en el cuál sus picos máximos estadísticos representan un compuesto químico presente.

Conclusiones

El desarrollo de estas actividades permitió cumplir con el objetivo principal de los proyectos de mis dos supervisores, el Ing. Leandro Vaccari y el M. C. Thomas Scheithauer, mejorando la eficiencia de los procedimientos de soldadura acuática. Este trabajo contribuyó a la publicación de los resultados en revistas de alto impacto ingenieril.

La producción académica del instituto es alta, con múltiples proyectos traducidos en publicaciones periódicas, lo que evidencia su enfoque en la transferencia de conocimiento técnico-científico. El proceso implicaba un proyecto en el cual se realizaba la investigación necesaria, posteriormente, los experimentos y, finalmente, se reportaban los resultados preliminares ante un comité a modo de presentación. Luego, una vez que éstos se validaban por completo o se discutía que deberían continuar su desarrollo, se procedía a la redacción formal que documentaba el proceso completo y finalmente, se concluía con el artículo publicado en revistas de alto impacto.

Es importante destacar que el trabajo en el que participé fue publicado recientemente en 2025.⁹

⁹ Vaccari, L., Klett, J., Scheithauer, T. et al. Development of a carbon equivalent formula for underwater wet welding. *Weld World* 69, 751–760 (2025). <https://doi.org/10.1007/s40194-024-01899-y>

Aprendizajes

Realizar esta movilidad me permitió enriquecer mi trayecto en la carrera de ingeniería mecánica con conocimientos de calidad. Tuve la oportunidad de realizar visitas guiadas a fábricas y talleres especializados.

Importante mencionar que el trabajo continuo en esta área pretende mejorar la calidad de la soldadura para su aplicación en entornos acuáticos, mediante datos experimentales y modelos matemáticos. Mi participación en este trabajo de equipo se publicó internacionalmente, eso habla de la relevancia de mi labor como colaborador en el proyecto.

Aprendí que el idioma es fundamental para llevar a cabo esta clase de retos profesionales entendiéndolo ahora que es una herramienta básica para cualquier otro emprendimiento.

Aprendí que la teoría y la práctica son totalmente distintas, pues en esta clase de macroproyectos se evalúa ampliamente la viabilidad y el costo del proyecto. La experiencia en mantenimiento del taller me permitió identificar la importancia de una gestión eficiente del inventario para el prototipado. A través del diseño de la pinza de sujeción/soporte aprendí que si el diseño es realizado correctamente es muy importante tomar en cuenta las tolerancias de los elementos como barrenos, adaptación a piezas existentes, etcétera, para obtener un resultado favorable.

También fue de mucha importancia la confianza que mis supervisores depositaron en mí como profesionalista, para realizar una labor de manera satisfactoria.

Una de las oportunidades más grandes que se me presentó fue trabajar y ganar mi primer sueldo como ingeniero en Alemania. Esta experiencia fue muy relevante en mi desempeño académico. Durante la estancia se operó equipo de alta tecnología industrial, como bancos de pruebas de soldadura, manejo de una cámara hiperbárica y sistemas de corte CNC, lo que permitió fortalecer habilidades en manufactura avanzada. Lo anterior fue un punto clave que dejó puertas abiertas para una continuidad académica a nivel posgrado, acercándome a esta área de trabajo.

Finalmente, estuve en comunicación con importantes personajes de la industria en un área inexistente en la UNAM y poco explorada en México, mis jefes y los jefes de mis jefes confiaban altamente en mi capacidad profesional y mi forma de resolver los problemas presentados, tanto que tenía todo el taller para diseñar la mejor solución posible que permitiera mejorar la investigación y que se aplicara a la industria.

Referencias

[1]. Leibniz Universität Hannover - Institut für Werkstoffkunde. Rescatado el 04.03.2025.

Disponible en: <https://www.irs.uni-hannover.de/de/luh-iw>

[2]. Modenesi, Paulo José. Introduction to the physics of the electric arc and its application to the welding of metals/ Paulo José Modenesi, Andrés Mauricio Moreno Uribe. -- 1 ed. -- Bogotá : Ecoe Ediciones, 2022. 232 p. – (Engineering and related. Mechanical engineer, physics, welding)

[3]. Rodríguez M. Soldadura por arco eléctrico: Procesos e innovaciones. Rescatado el 08.03.2025. Disponible en: <https://inspenet.com/articulo/fundamentos-soldadura-por-arco-electrico/>

[4] Ocean Corp. Underwater Welding: A Comprehensive Guide. Rescatado el 15.03.2025. Disponible en: <https://oceancorp.com/underwater-welding-a-comprehensive-guide/>

[5] Matsuda K., Masumoto I., Hasegawa M.: Study on the crack sensitivity of mild steel welded joint by underwater welding. Proceedings of the International Conference „Joining of Metals – 2”, Helsingor, Denmark 1984.

[6] Fydrych D.: Cold cracking of steel welded in water environment. Przegląd Spawalnictwa (Welding Technology Review), 10 (2012) (in Polish).

[7] Fydrych D., Rogalski G.: Effect of shielded-electrode wet welding conditions on diffusion hydrogen content in deposited metal. Welding International, vol. 25, 3 (2011), 166-171.

[8]. Garasic I., Krajl S., Kozuh S.: Investigation into cold cracking in underwater wet welding of API 5L X70 steel. Transactions of FAMENA, vol. 33, 3 (2009), 25-34.

[9] Vaccari, L., Klett, J., Scheithauer, T. et al. Development of a carbon equivalent formula for underwater wet welding. Weld World 69, 751–760 (2025).

<https://doi.org/10.1007/s40194-024-01899-y>