

# FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de INGENIERÍA INDUSTRIAL

“MÉTODO PARA ASEGURAR LA CALIDAD EN EL PROCESO  
DE TERMOFUSIÓN DE SOLDADURA DE TUBERÍAS HDPE  
EN UNA EMPRESA METALMECÁNICA”

Trabajo de suficiencia profesional para optar el título  
profesional de:

Ingeniero Industrial

Autor:

Frank Edwin Castillo Mamani

Asesor:

Mg. Inés Tarazona Marañón

<https://orcid.org/0000-0002-1609-9215>

Lima - Perú

**2023**

## INFORME DE SIMILITUD

### ORIGINALITY REPORT

6%

SIMILARITY INDEX

3%

INTERNET SOURCES

1%

PUBLICATIONS

5%

STUDENT PAPERS

### PRIMARY SOURCES

1	Submitted to Universidad Privada del Norte Student Paper	2%
2	<a href="http://www.virtualpro.co">www.virtualpro.co</a> Internet Source	1%
3	<a href="http://mriuc.bc.uc.edu.ve">mriuc.bc.uc.edu.ve</a> Internet Source	1%
4	Submitted to CONACYT Student Paper	1%
5	Submitted to Universidad Autónoma de Nuevo León Student Paper	1%
6	Submitted to Universidad Anahuac México Sur Student Paper	1%

## **DEDICATORIA**

A mi madre Carmen Mamani y mi padre Eberth Rojas, por darme los valores y el apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

A mi esposa Lucy Quispe que me apoya día a día a seguir adelante siendo mi soporte y apoyo incondicional en todas las adversidades de mi vida

A mis hijos que son mi motivación por lo cual seguiré creciendo profesionalmente.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento muy especial a nuestra asesora de tesis, Ing. Inés Tarazona Maraión por su apoyo y guía en la elaboración del presente trabajo, absolviendo nuestras inquietudes sus conocimientos y experiencia hizo posible realizar esta investigación

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>INFORME DE SIMILITUD .....</b>	<b>2</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>3</b>
<b>AGRADECIMIENTO.....</b>	<b>4</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS.....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>7</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA .....</b>	<b>30</b>
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS .....</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>63</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>65</b>

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1 Información legal sobre PALCON .....	10
Tabla 2 Cantidad de colaboradores .....	13
Tabla 3 Fallas identificadas en la empresa Palcon .....	33
Tabla 4 Factores que originan las fallas .....	33
Tabla 5 Producción total de juntas y porcentaje de juntas falladas (Marzo, Abril y Mayo)37	
Tabla 6 Costos operativos (reales y proyectado).....	38
Tabla 7 Factores de soldadura .....	44
Tabla 8 Diseño de Taguchi .....	45
Tabla 9 Análisis de datos.....	45
Tabla 10 Niveles para cada factor de control .....	46
Tabla 11 Factores y su significancia estadística.....	47
Tabla 12 Señal a ruido .....	48
Tabla 13 Características de la tubería.....	52
Tabla 14 Variables que afectan la calidad de unión .....	53
Tabla 15 Parámetros óptimos .....	57
Tabla 16 Parámetros relacionados a la calidad de soldadura .....	58
Tabla 17 Variables antes y después de la aplicación del método.....	59
Tabla 18 Mejora en juntas soldadas .....	59

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 Clientes de la empresa PALCON.....	9
Figura 2 Organigrama del área de producción .....	14
Figura 3 Diagrama de Pareto .....	34
Figura 4 Diagrama de Ishikawa.....	35
Figura 5 DOP antes de la mejora.....	32
Figura 6 DAP.....	40
Figura 7 Efectos principales para medias .....	49
Figura 8 Efectos principales para relaciones SN.....	50
Figura 9 Variables .....	54
Figura 10 Antes de la implementación del método Taguchi para asegurar la calidad de la soldadura.....	60
Figura 11 Después de la implementación del método Taguchi para asegurar la calidad de la soldadura.....	61
Figura 12 DOP después del método Taguchi .....	62

## RESUMEN EJECUTIVO

El trabajo de investigación tuvo como objetivo principal; implementar un método para asegurar la calidad en el proceso de termofusión de soldadura de tuberías HDPE en una empresa metalmecánica. Se empleó el método Taguchi para dar solución a la problemática planteada; ya que se evidenció que la problemática se expresa en costos mayores, dado que el número de juntas falladas es considerable en relación a la producción total. Los resultados fueron; las características de la inspección a las tuberías a ser consideradas durante el proceso de soldaduras son; inspección visual y ensayos físico-mecánico. Las variables que afectan la calidad de las uniones son; espesor de tubería, presión de arrastre y tiempo de calentamiento. Con los nuevos parámetros solamente se evidenció un 6% de uniones falladas. Se concluyó que; con la creación de un nuevo método de trabajo, mediante Taguchi, fue posible a disminución de las variaciones que son controlables es indispensable para desviar a cero las distorsiones de la calidad. Finalmente, el método de Taguchi hace hincapié en reducir la variabilidad en el producto eligiendo los valores de los factores controlables de manera óptima frente a los factores que crean distorsión. De esta manera se redujeron los productos no conformes.

**Palabras clave:** Termofusión, Método Taguchi, uniones, soldadura.



## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Reseña histórica de la empresa**

Palcon Perú SAC., es una compañía peruana fundada en 2008, avocada a ofrecer soluciones al sector industrial peruano. Es una empresa contratista de Engineering Procurement and Construcción (EPC), que realiza proyectos de ingeniería, montajes mecánicos, instalaciones eléctricas, estructuras metálicas, infraestructura civil, automatización de procesos y mantenimiento industrial.

La empresa desde sus inicios ha contado con Staff técnico y logístico, tanto a nivel local como internacional, que tienen una sólida experiencia y capacidad, en relación a los controles de calidad y conformación de alianzas estratégicas. Como resultado de la amplia administración de sistemas en varios países, Palcon se ha convertido en la búsqueda integral de satisfacer necesidades de sus clientes. Además, tiene una base comercial sólida en Europa, China e India para obtener las piezas que se utilizan en el campo de la industria de la fuerza eléctrica y la industria de la mecanización.

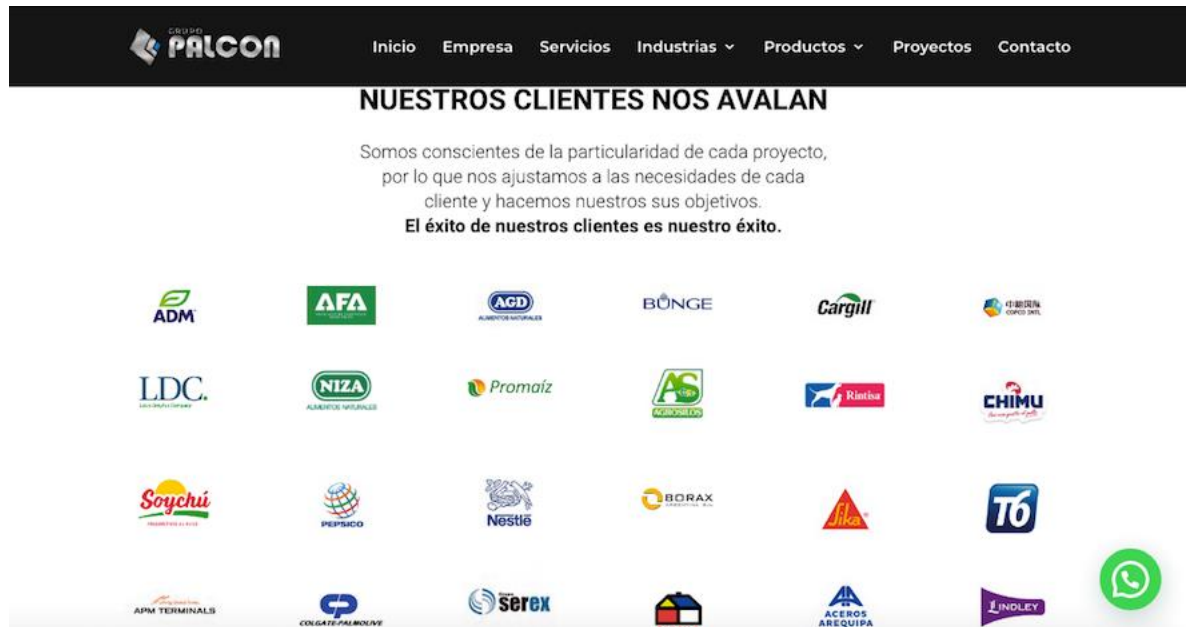
Con un historial de 15 años de innovación y asociación con clientes, la empresa ha sido pionera en la región latinoamericana, en soluciones para algunos de los desafíos de infraestructura más apremiantes de sus clientes.

### **1.2. Principales clientes de la empresa**

A continuación, en la figura 1, se presentan los clientes más representativos de Palcon Perú SAC.; para los cuales se han realizado trabajos de proyectos de ingeniería, montajes mecánicos, instalaciones eléctricas, estructuras metálicas, infraestructura civil, automatización de procesos y mantenimiento industrial.

**Figura 1**

*Cientes de la empresa PALCON*



Nota. La empresa Palcon Perú SAC., ofrece servicios a nivel nacional y también, en Argentina y Venezuela. Fuente: <https://palcon.pe/>

### 1.3 Datos de la empresa

En la tabla 1, se presenta información legal sobre la empresa Palcon Perú SAC.:

**Tabla 1**

*Información legal sobre PALCON*

<b>Razón Social</b>	PALCON PERU SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - PALCON PERU S.A.C.
<b>Rubro</b>	Sector Industrial
<b>N. RUC</b>	20545585465
<b>Actividad Comercial</b>	Construcción Edificios Completos.
<b>Dirección Legal</b>	Av. la Encalada Nro. 1420 Int. 901

Nota. Elaboración propia

#### **1.4 Perfil de la empresa**

A continuación, se detallan la misión, visión y valores que tiene la empresa Palco Perú SAC.:

##### **Misión**

De acuerdo con (Palcon, 2023), la empresa quiere sorprender a sus clientes con calidad, innovación y capacidad de respuesta y así convertirse en asesor de confianza; promover un ambiente de trabajo seguro y gratificante; y proporcionar un justo retorno de la inversión.

##### **Visión**

Palcon Perú SAC., tiene como visión crear un mundo más seguro y sostenible reuniendo a los mejores y más brillantes colaboradores para ofrecer tecnología y soluciones que ayuden a los clientes a cumplir sus misiones y objetivos más importantes (Palcon, 2023). También, la empresa tiene como visión despertar el ingenio industrial al conectarlo con información y conocimientos confiables, para impulsar el uso responsable de los recursos del mundo.

##### **Valores**

##### **Tradición de excelencia**

(Palcon, 2023), a través de relaciones basadas en el respeto mutuo, la confianza y la mejora continua de la calidad de nuestros servicios, la empresa cumple con los requisitos de los clientes de manera receptiva, segura, innovadora y técnicamente sólida. Al revisar y mejorar continuamente los procesos de trabajo, desemboca en que el trabajo se realice bien a la primera vez.

### **Los empleados son la clave**

Los servicios de calidad a los clientes requieren el tiempo, el talento y el compromiso de los empleados. Se les proporciona un ambiente de trabajo seguro, desafiante y gratificante y una atmósfera de confianza. Se ofrece a los empleados las herramientas y la formación necesarias para desempeñar sus funciones. (Palcon, 2023). se evalúa su desempeño regularmente y se les ayuda a alcanzar su máximo potencial.

### **Trabajo en equipo**

En Palcon Perú SAC., se exige un liderazgo colaborativo y se alienta un ambiente de trabajo colegiado en el que se valore la opinión de cada empleado, el compromiso compartido con la excelencia produce responsabilidad mutua, las necesidades del equipo se anteponen a las necesidades del individuo y el bien del conjunto.

### **Sostenibilidad**

La empresa está comprometida a mejorar los beneficios ambientales, económicos y sociales de las operaciones y proyectos que se llevan a cabo. Se trata de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer el futuro.

## **1.5 Colaboradores**

En la tabla 2, se detalla la cantidad de colaboradores que desarrollan labores en la empresa Palcon Perú SAC., de acuerdo al área administrativa u operativa:

**Tabla 2**

*Cantidad de colaboradores*

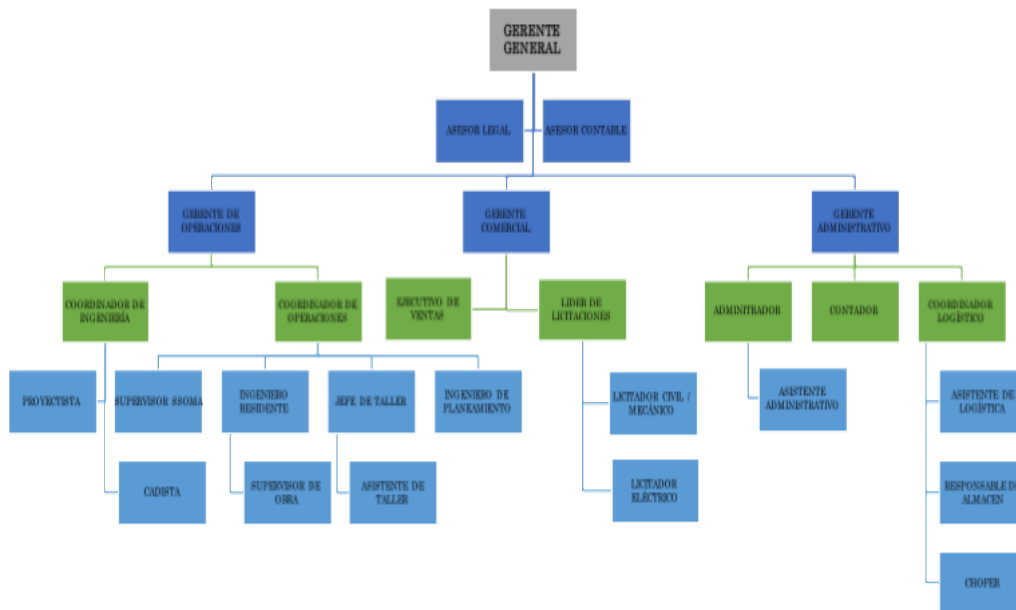
Colaboradores	Cantidad
<b>Personal Administrativo</b>	
Gerencia	2
Costos y Presupuestos	1
Ingeniería	2
Producción	2
Calidad	1
Contabilidad	1
Logística	1
Almacén	1
RR. HH	1
<b>Personal operativo</b>	
Operarios Armadores	6
Oficiales Armadores	6
Ayudantes	5
Soldadores	3
Mantenimiento/Mecánico	2
Conductor	1
Seguridad	1
<b>Total</b>	<b>36</b>

Nota. Elaboración propia.

## 1.6 Organigrama

**Figura 2**

*Organigrama del área de producción*



Nota: Organigrama del área de producción de la planta de Villa el Salvador, Lima.  
Fuente: Propia

## 1.7 Tipos de servicios o productos que brinda

### Proyectos de ingeniería

Una ingeniería minuciosa, innovadora y profesional va más allá de los planes y materiales de construcción para considerar cada elemento de operación a lo largo de cada fase del ciclo de vida de su activo, desde el concepto hasta la construcción, operación y desmantelamiento. Palcon ofrece una gama completa de licencias y servicios de diseño de ingeniería.

Palcon ofrece una serie de soluciones innovadoras a los desafíos más complejos de sus clientes, desde estudios de factibilidad e ingeniería inicial hasta proyectos complejos de ingeniería, adquisiciones y construcción y renovaciones. El diseño de ingeniería básica constituye la base para la posterior finalización satisfactoria de los trabajos de ingeniería de detalle, adquisiciones, construcción y puesta en marcha, y además proporciona al cliente información valiosa para finalizar la discusión interna y la evaluación de la viabilidad del proyecto.

Los ingenieros de las empresas Palcon Perú SAC., tienen la experiencia y el compromiso para superar todos los desafíos técnicos y preparar proyectos de cualquier tamaño, en cualquier lugar. Los servicios y productos incluyen:

- Definición de alcance y propuesta de valor
- Rendimiento de la planta y la producción
- Balances de materiales, calor, servicios públicos y efluentes
- Diagramas de flujo de procesos
- Descripciones de procesos y tecnologías
- Listas de equipos y especificaciones
- Tuberías e instrumentación
- Controles clave del proceso
- Planos de parcela y diseño
- Seguridad de procesos

### **Mantenimiento industrial**

Elegir renovar, actualizar o convertir una instalación existente para aumentar la capacidad y la eficiencia, cumplir con las nuevas regulaciones y mejorar la seguridad puede ser una solución más rentable para muchas instalaciones. Como principal proveedor de soluciones de consultoría para la industria, Palcon ofrece la experiencia y los conocimientos para ayudar a sus clientes a cumplir nuevas metas y objetivos mientras maximizan el retorno de la inversión, brindando las soluciones adecuadas para renovar, convertir o actualizar una amplia gama de plantas e instalaciones.

### **Realidad problemática internacional y nacional**

A nivel mundial en los últimos 20 años, según Wang et al. 2022, se han desarrollado numerosas técnicas de soldadura para cumplir con los requisitos en constante cambio de los fabricantes, así como para mantenerse al día con los materiales en evolución. De acuerdo con Park ET AL. (2020), dado que la soldadura es un proceso de fabricación esencial en cualquiera de las industrias de la construcción o la fabricación. Debido a la evolución paulatina de los experimentos físicos, para Oladele et al. (2020), los avances tecnológicos y las teorías en el marco de la ingeniería industrial; la optimización de los procesos de soldadura ha ganado una atención significativa en los últimos años.

Rajak et al. (2019) indican que, en este proceso, dos o más componentes se unen en su superficie de contacto mediante la aplicación adecuada de calor y/o presión. Se emplea en casi todos los sectores de la industria, como la automotriz, aeronáutica, aeroespacial, muebles y tuberías, etc. debido a sus numerosas ventajas, como bajo costo, control fácil y preciso de la entrada de energía, facilidad en la producción de



arco, etc. No obstante, se ha realizado un esfuerzo continuo para asegurar la calidad, productividad y mejorar las propiedades metalúrgicas de la soldadura.

En el caso del Perú, el HDPE, según Milton (2019) se considera hoy en día el material de tubería más adecuado, al observar el excelente rendimiento de las tuberías fabricadas con este termoplástico versátil para las aplicaciones más rigurosas, no es de extrañar que las tuberías de HDPE alcanzaran la mayor popularidad en nuestro país.

### **Experiencia profesional**

Mi experiencia profesional se inicio cuando cursaba el primer año de ingeniera industrial, primero como practicante de control de calidad y después a nivel profesional como supervisor de control de calidad, este proceso se a medida a asumí mayores responsabilidades en el campo laboral contando con una serie de herramientas que configuraron mi perfil profesional como los conocimientos, habilidades, formación académica y la experiencia laboral adquirida.

En este tiempo que vengo ejerciendo la profesión eh podido volcar a mi trabajo diario todos los conocimientos aprendidos, eh desarrollado principalmente la faceta de supervisor de aseguramiento de control de calidad (QA), eh tenido la oportunidad de realizar trabajos de supervisor de soldadura por termofusión en la mina Minsur – Pucamarca, generando nuevo conocimiento respecto a las inspecciones soldadas por termofusión aplicando la norma ASTM F2620, para sus respectivas aprobaciones de las juntas soldadas.

En la empresa Palcon Perú ingrese con la finalidad de mejorar sus procedimientos e implementar un proceso soldadura de termofusión aplicado a la norma ASTM F2620, para dicho proceso de soldadura aplique el método Taguchi para los ensayos de las

probetas de soldadura por termofusión, utilizando los parámetros de las juntas defectuosas en la soldadura por termofusión, así mismo evitando los reproceso de soldadura.

### **Objetivo general**

Implementar un método para asegurar la calidad en el proceso de termofusión de soldadura de tuberías HDPE en una empresa metalmeccánica

### **Objetivos específicos**

- Determinar las características de las tuberías HDPE a ser consideradas durante el proceso de soldaduras de termofusión
- Determinar las variables que afectan la calidad de la unión de tuberías HDPE en el proceso de termofusión de soldadura?
- Determinar los parámetros óptimos que aseguran la calidad de la unión de tuberías HDPE en el proceso de termofusión?

## CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Soldadura de tuberías HDPE y Termofusión

Los productos poliméricos, de acuerdo con Nandi y Kuman (2022), son una parte cada vez más significativa de toda la fabricación industrial. Hay muchos tipos de materiales poliméricos y su uso en la industria mecánica y técnica en general está aumentando. El polietileno de alta densidad (HDPE) es el polímero más simple del grupo de las poliolefinas y hoy en día es uno de los polímeros comerciales más importantes. El polietileno se ha utilizado durante los últimos cincuenta años en tuberías de todo el mundo, y su aplicación experimentó una gran expansión en todo el mundo.

Yun et al. (2019) mencionan que las tuberías de HDPE (algunas de ellas están en funcionamiento durante 40 años) se caracterizan por una alta seguridad de conducción y costos de mantenimiento y reparación extremadamente. Numerosas ventajas sitúan a estas tuberías entre los mejores materiales para la construcción de gasoductos, tuberías de agua y sistemas de alcantarillado. Una de estas ventajas es que el proceso de soldadura y automatización de las tuberías de polietileno es más sencillo que la soldadura de tuberías de acero.

El éxito de una tubería, desde la perspectiva de Mehdikhani et al. (2022), depende en gran medida del método de empalme que se utilice; en ese sentido los métodos de unión utilizados se seleccionan en función de una serie de factores, incluido el tipo de material utilizado, la aplicación del sistema de tuberías y las habilidades especializadas disponibles. Cada método de unión tiene una serie de ventajas y desventajas asociadas.

Comprender los detalles de estos métodos es importante para tomar una decisión y poder sopesar los pros y los contras para las empresas.

Las tuberías de HDPE indican Hamade et al. (2019), que se utilizan ampliamente en sistemas de agua y petróleo debido a su facilidad de instalación, larga vida útil, buena resistencia a la corrosión, capacidad de protección ambiental y excelentes propiedades mecánicas. También se ha demostrado que las tuberías de HDPE son mejores que las tuberías de metal para su uso en sistemas de agua. Para garantizar la estanqueidad al agua y la integridad de un sistema de tuberías, generalmente se requiere que las tuberías de HDPE estén soldadas.

Saleem y Onour (2019) señalan que los principales métodos de soldadura para tuberías de HDPE son la soldadura por fusión a tope y la soldadura por electrofusión. En el caso de los sistemas de tuberías de HDPE de gran diámetro, la soldadura por fusión a tope es el método más eficaz y más utilizado. Según Chen et al. (2022), para la soldadura por fusión a tope, las dos superficies de los extremos del tubo soldado deben fresarse primero con una fresa. Las dos superficies se calientan con una placa calefactora y se funden bajo presión. Entonces, las dos superficies se conectan juntas rápidamente bajo presión. Finalmente, la junta de fusión a tope se enfría a temperatura ambiente bajo presión.

El rendimiento de las uniones por termofusión a tope para Kiani et al. (2022), se ve afectado principalmente por ciertos parámetros de soldadura, como la temperatura, la presión y el tiempo de calentamiento. Además, la desalineación axial de la unión puede reducir la vida útil de las uniones por fusión a tope. También, el rendimiento de las uniones por fusión a tope también se ve afectado por defectos de soldadura, como

porosidad, inclusiones y fusión incompleta. Por lo tanto, las juntas de fusión a tope son el eslabón más débil en un sistema de tuberías de HDPE.

La soldadura por termofusión a tope para Norman et al. (2019), es uno de los métodos más comunes utilizados para unir tuberías. Es un proceso que involucra el calentamiento simultáneo de los extremos de dos componentes que se van a unir hasta que se alcance un estado de fusión en cada superficie de contacto, produciendo así una conexión permanente, económica y de flujo eficiente.

El método de termofusión, Xingmin et al. (202), señalan que implica el calentamiento sincrónico de los extremos de dos elementos de medida cuadrada que se van a unir hasta alcanzar un estado de ablandamiento en todas las superficies de contacto. Las dos superficies miden el cuadrado y luego se llevan bajo presión controlada durante un tiempo de enfriamiento particular y se crea una fusión no diversificada al enfriarse.

## **2.2 Fallas en soldadura**

La falla de las conexiones soldadas, Shapheek y Shrivastava (2020) mencionan que puede deberse a varias causas; sin embargo, normalmente pueden estar relacionados con problemas agrupados en cinco categorías: diseño geométrico de soldadura, parámetros del proceso de soldadura, incompatibilidades entre materiales y procesos, ejecución del proceso de soldadura y requisitos de servicio imprevistos. Estos problemas a veces se encuentran combinados, y un problema en una de estas categorías puede resultar en un problema relacionado en otra.

Para Yu et al. (2020), las técnicas normales para determinar la causa de la falla de una unión soldada son el examen visual, el microscopio óptico y el examen no destructivo, a menudo seguidos de pruebas de materiales, muestreo adicional y estudios analíticos de tensión. De acuerdo con Yang et al. (2022), las pruebas no destructivas y el análisis

de tensión se utilizan para proporcionar una caracterización global de la unión o estructura, mientras que la microscopía y el análisis químico brindan una interpretación más profunda de las áreas que han fallado. La mayoría de los estudios de fallas de soldadura utilizan una variedad de herramientas de análisis. Todos utilizan inspección visual y microscopía óptica, análisis químico, determinación de propiedades mecánicas, pruebas no destructivas y estudios de estado de tensión como parte del análisis.

Para Zuo et al. (2021), la soldadura juega un papel destacado en la fabricación y montaje de estructuras y componentes en la industria. Las fallas de soldadura, cuando ocurren, ya sea durante la fabricación o el servicio, implican una considerable reelaboración, además de pérdidas de producción, tiempo y material. Por lo tanto, es esencial adoptar procedimientos de soldadura adecuados según el material, la configuración de la soldadura y los requisitos del servicio.

Además, la soldabilidad del material para Chen et al. (2022), debe establecerse con pruebas de laboratorio adecuadas para minimizar la tendencia a la susceptibilidad al agrietamiento en caliente y en frío. Los mecanismos de dicho agrietamiento y las pruebas a realizar para evaluar la susceptibilidad al agrietamiento se enumeran en este trabajo junto con un breve informe sobre las fallas de soldadura y los criterios a adoptar para su reparación.

De acuerdo con Nandi y Kumar (2022), los fallos de soldadura y sus reparaciones afectan a la productividad y seguridad de cualquier organización industrial. Si bien las fallas de soldadura que ocurren durante la fabricación pueden repararse con bastante facilidad, las que ocurren durante el servicio plantean serios problemas durante la reparación. Algunos de los problemas son la inaccesibilidad del área, la imposibilidad

de utilizar las prácticas de taller con tratamientos térmicos de precalentamiento y post-soldadura adecuados y la falta de datos adecuados sobre el historial previo de los componentes.

Por lo tanto, Zhao et al. (2021) señalan que durante la soldadura se deben establecer datos adecuados sobre la soldabilidad del material, incluido el carbono equivalente, el agrietamiento inducido por hidrógeno, el agrietamiento por solidificación, el desgarro, etc. Hay varios métodos de prueba disponibles para evaluar la susceptibilidad al agrietamiento. Además, se deben adoptar los criterios de mecánica de fractura y aptitud para el propósito y se puede seleccionar juiciosamente una técnica de reparación de soldadura apropiada.

### **2.3 Asegurar calidad**

La calidad en términos de los productores, desde la perspectiva de Rehman et al. (2021), es el cumplimiento de los estándares de calidad que les han sido propios. De modo que la calidad puede interpretarse en cuanto a la capacidad de los productores para cumplir con los estándares que poseen para satisfacer los deseos y expectativas de los clientes. En referencia a la definición de calidad, la mejora de la calidad del producto para aumentar la satisfacción del cliente es un atributo importante en una organización empresarial. La satisfacción del cliente se puede formar si los clientes obtienen lo que se espera de un producto o servicio que utiliza.

En este hecho, según Han et al. (2019), se espera que el mundo industrial identifique los atributos que afectarán la satisfacción del cliente y luego los diseñe y cree en productos y servicios superiores de acuerdo con los deseos y expectativas de los clientes. La mejora de la calidad es una política de la empresa que debe realizarse para mantener la satisfacción y resistencia del cliente en cuestión. La mejora de la calidad

es una serie de actividades grupales e individuales que se enfocan en reducir la variedad de procesos y productos con métodos sistemáticos y medibles destinados a reducir cualquier desperdicio.

El proceso de mejorar la calidad, según Yang et al. (2018), consiste en identificar indicadores de calidad, monitorear estos indicadores y medir los resultados de estos indicadores de calidad que, por supuesto, conducen al resultado y siempre se enfocan en mejorar el proceso, para que la calidad de los resultados/productos mejore. Porque se cree que la mejora de la calidad influye mucho en la rentabilidad y competitividad de la empresa.

La calidad, Li et al, (2017) indican que es una condición dinámica relacionada con los productos, los servicios, las personas, los procesos y el medio ambiente que cumple o supera las expectativas, hablando de calidad ciertamente no existe una comprensión definida de la calidad y la calidad tiene un alcance amplio y tiene una comprensión diferente. La calidad puede verse como un punto de cumplimiento de la demanda y satisfacción del cliente, la calidad en términos de productores es el cumplimiento de los estándares de calidad que se han poseído.

De modo, Asif et al. (2020), mencionan que la calidad puede interpretarse en cuanto a la capacidad de los productores para cumplir con los estándares que poseen para satisfacer los deseos y expectativas de los clientes. Refiriéndose a la comprensión de la calidad que la mejora de la calidad del producto para aumentar la satisfacción del cliente se convierte en un atributo muy importante en las organizaciones empresariales (industria).

Se han desarrollado métodos y técnicas de evaluación de la calidad para la soldadura por tanto durante como después del proceso. Wang et al. (2021) indican que la Calidad



de la soldadura está relacionada con las características del cordón y de la zona afectada por el calor, incluyendo la presencia de defectos (acabado superficial, salpicadura, agrietamiento, porosidad, grado de penetración, refuerzo excesivo, etc.), propiedades mecánicas (resistencia, tenacidad, dureza, etc.) y composición química. La calidad es una propiedad relativa. Describir la calidad de forma cuantitativa es una tarea difícil. Una calidad buena o mala es una función de los requisitos para una aplicación particular.

De acuerdo con Raj et al. (2023), la integración de sensores en un sistema de soldadura mejora la calidad de las soldaduras producidas. Las variaciones en tres parámetros del proceso de soldadura (ancho del cordón de soldadura, profundidad de penetración y posición de la antorcha) se controlaron mediante un sensor de infrarrojos. Se encontró que las variaciones inducidas intencionalmente en cada uno de estos parámetros de soldadura afectan únicamente las distribuciones de temperatura de la superficie de la placa medidas por el sensor infrarrojo.

Para Rehman et al. (2021), los efectos del ancho del cordón de soldadura y las perturbaciones de la posición de la antorcha en la distribución de temperatura se separaron para identificar y controlar estos dos parámetros del proceso de soldadura simultáneamente. Los resultados preliminares sugieren que es posible controlar simultáneamente la profundidad de penetración, el ancho del cordón y la posición de la antorcha.

## **2.4 Método Taguchi**

La optimización de los parámetros del proceso, Ramesh et al. (2020), señalan que se realiza para tener un gran control sobre los aspectos de calidad, productividad y costo

del proceso. El control de calidad fuera de línea se considera un enfoque eficaz para mejorar la calidad del producto a un costo relativamente bajo.

El método de Taguchi, según Adin et al. (2022) es un método estadístico desarrollado por Genichi Taguchi para mejorar la calidad de los productos manufacturados y, más recientemente, también aplicados a la ingeniería. Los estadísticos profesionales han acogido con agrado los objetivos y las mejoras aportados por los métodos de Taguchi, en particular por el desarrollo de diseños de Taguchi para estudiar la variación. Taguchi revolucionó el proceso de fabricación en Japón mediante el ahorro de costos. Comprendió, como muchos otros ingenieros, que todos los procesos de fabricación se ven afectados por influencias externas, el ruido.

Sin embargo, Kumar y Singh (2019), indican que Taguchi descubrió métodos para identificar aquellas fuentes de ruido que tienen los mayores efectos sobre la variabilidad del producto. Sus ideas han sido adoptadas por fabricantes exitosos de todo el mundo debido a sus resultados en la creación de procesos de producción superiores a costos mucho más bajos. La optimización de procesos es la disciplina de ajustar un proceso para optimizar un conjunto específico de parámetros sin violar alguna restricción. Los objetivos más comunes son la minimización de costos, la maximización total y/o la eficiencia. Esta es una de las principales herramientas cuantitativas en la toma de decisiones industriales. Al optimizar un proceso, el objetivo es maximizar una o más de las especificaciones del proceso, manteniendo todas las demás dentro de sus limitaciones.

Chelladurai et al. (2021), mencionan que muchos relacionan la optimización de procesos directamente con el uso de técnicas estadísticas para identificar la solución óptima. Para este método se necesitan técnicas estadísticas. Sin embargo, se requiere

una comprensión profunda del proceso antes de dedicar tiempo a optimizarlo. A lo largo de los años, se han desarrollado muchas metodologías para la optimización de procesos, incluido el método Taguchi, lo cual comienza con un ejercicio para crear el mapa de procesos.

Las técnicas de Taguchi Wang et al. (2021) señalan que se han utilizado ampliamente en el diseño de ingeniería, ya que contiene procedimientos de diseño de sistemas, diseño de parámetros y diseño de tolerancias para lograr un proceso sólido y un resultado de la mejor calidad del producto. La principal confianza de las técnicas de Taguchi es el uso del diseño de parámetros, que es un método de ingeniería para el diseño de productos o procesos que se enfoca en determinar la configuración de los parámetros (factores) que producen los mejores niveles de una característica de calidad, con mínima variación.

Según, Adin et al. (2022) señala que los diseños de Taguchi brindan un método poderoso y eficiente para diseñar procesos que funcionan de manera consistente y óptima en una variedad de condiciones. Para determinar el mejor diseño, se requiere el uso de un experimento diseñado estratégicamente, que expone el proceso a varios niveles de parámetros de diseño. Los métodos de diseño experimental se desarrollaron en los primeros años del siglo XX y los estadísticos los han estudiado extensamente desde entonces, pero no eran fáciles de usar por los profesionales. El enfoque de Taguchi para el diseño de experimentos es fácil de adoptar y aplicar para usuarios con conocimientos limitados de estadística; por lo tanto, ha ganado una gran popularidad en la comunidad científica y de ingeniería. Taguchi especificó tres situaciones:

Taguchi comenzó a desarrollar nuevos métodos para optimizar el proceso de experimentación de ingeniería. De acuerdo con Ramesh et al. (2020), el modelo la

mejor manera de incrementar la calidad era diseñarla e integrarla en el producto. Desarrolló las técnicas que ahora se conocen como Métodos Taguchi. Su principal contribución no radica en la formulación matemática del diseño de experimentos, sino en la filosofía que lo acompaña. Sus conceptos produjeron una técnica única y poderosa de mejora de la calidad que difiere de las prácticas tradicionales.

Ramesh et al. (2020), argumenta que el enfoque de Taguchi para la ingeniería de calidad pone mucho énfasis en minimizar la variación como el medio principal para mejorar la calidad. La idea es diseñar productos y procesos cuyo rendimiento no se vea afectado por las condiciones externas e incorporar esto durante la etapa de desarrollo y diseño mediante el uso del diseño experimental. El método incluye un conjunto de tablas que permiten investigar las principales variables e interacciones en un número mínimo de ensayos.

Chelladurai et al. (2021) menciona que el Método Taguchi utiliza la idea de Funcionalidad fundamental, que facilitará a las personas identificar el objetivo común porque no cambiará de un caso a otro y puede proporcionar un estándar sólido para situaciones que cambian amplia y frecuentemente. También se señala que el Método Taguchi también es muy compatible con los enfoques de evaluación de la calidad centrados en el ser humano que están surgiendo.

El método ha sido ampliamente utilizado por las industrias para mejorar la calidad de los productos, de acuerdo con Ramesh et al. (2020), el objetivo de los experimentos es hacer comparaciones entre los efectos de diferentes factores y luego determinar la mejor configuración para cada factor. Los arreglos ortogonales de Taguchi son diseños altamente fraccionarios; estos diseños se pueden usar para estimar los efectos principales usando solo unas pocas corridas experimentales. Una matriz ortogonal es

una herramienta importante utilizada en el diseño de Taguchi que se utiliza para estudiar varios parámetros de diseño por medio de una sola característica de calidad.

Para Adin et al. (2022), el propósito de realizar un experimento ortogonal es determinar el nivel óptimo para cada parámetro controlable y establecer la importancia relativa de los parámetros individuales en términos de sus efectos principales sobre la respuesta. El método convencional involucra una variable a la vez mientras mantiene los otros parámetros en niveles fijos. Este método generalmente requiere mucho tiempo y requiere un número considerable de experimentos para ser realizado.

La optimización de los parámetros del proceso, Ramesh et al. (2020), señalan que se realiza para tener un gran control sobre los aspectos de calidad, productividad y costo del proceso. El control de calidad fuera de línea se considera un enfoque eficaz para mejorar la calidad del producto a un costo relativamente bajo.

## CAPÍTULO III. DESCRIPCIÓN DE LA EXPERIENCIA

En el presente capítulo se describe la implementación del método de Taguchi, desde su desarrollo, hasta el establecimiento de parámetros óptimos para dar respuesta a la problemática planteada.

El comienzo de las actividades de trabajo en dicha empresa fue el 4 de octubre de 2022, con la responsabilidad y puesto como supervisor de aseguramiento de calidad.

### **3.1 Problemática desde la ingeniería industrial**

Tashkandi y Becheikh (2022), señalan que el proceso de soldadura por termo fusión es un método ampliamente utilizado para unir tuberías de polietileno de alta densidad (HDPE). Con el número cada vez mayor de fabricantes de tuberías y resinas de HDPE y la diversidad de industrias que utilizan tuberías de dicho material. Han evolucionado una amplia gama de diferentes estándares para especificar los parámetros de soldadura por termofusión dentro de los métodos de inspección y prueba; con el fin de mantener la calidad y la integridad estructural de las soldaduras.

En ese sentido, para Azzeddine y Mazari (2018), se ha evidenciado que existe una falta de comprensión y cohesión en estos estándares para la selección de parámetros de soldadura; eficacia, precisión y selección de los métodos de prueba y; correlación de las propiedades mecánicas con la estructura de micro y macrojuntas.

### **3.2 Situación de la empresa**

En la empresa Palcon, la soldadura de materiales poliméricos de conexión es una forma común de conectar las uniones de tubería específica de HDPE. Dado que los materiales poliméricos se pueden soldar con éxito a un termoplástico que, al igual que los metales, se ablanda cuando se calienta y cuando se enfría se endurece. Con el aumento de la temperatura del proceso de soldadura de materiales termoplásticos, el flujo conduce al ablandamiento de sus (enlaces secundarios débiles). Con un mayor aumento de la temperatura, se produce la fusión de los materiales plásticos (los enlaces secundarios se reducen y se produce el movimiento suave de cadenas enteras de moléculas).

El aumento de la temperatura provoca la fusión y adquiere una condición termoplástica donde es posible reforzar la soldadura como resultado de la difusión superficial de las moléculas. El enfriamiento de las piezas soldadas consiste en establecer uniones secundarias y volver al estado sólido.

Las tuberías de HDPE son las tuberías preferidas de los sistemas de agua porque son duraderas, libres de corrosión, fáciles de instalar y no están sujetas a incrustaciones. Sin embargo, su rendimiento a largo plazo puede verse afectado por defectos de soldadura. También, en la empresa Palcon, se ha identificado que, para realizar un compuesto de alta calidad, es necesario realizar algunos trabajos preliminares relacionados con la preparación de la soldadura, incluida la verificación de la corrección del equipo de soldadura y la creación de las condiciones climáticas favorables necesarias. Es decir, emplear sistemas y procedimientos adecuados para mejorar la calidad de los procesos operativos de la soldadura.

**Realidad Problemática a nivel local (institucional)**

En la empresa Palcon, recién desde el año 2020 se implementó el área de control de calidad, de ese modo se trató de dar solución a diversas problemáticas mediante la utilización algunas pruebas según la norma ASTM, F2620 y pruebas hidrostáticas B31.1 y ASME IX.

En la tabla 3, se manifiestan fallas como: 1) uso de soportes artesanales para alinear las tuberías y poner el mismo nivel a la altura de la máquina, lo cual ha generado una presión de arrastre y por ende la soldadura en muchas ocasiones queda mal hecha, 2) se ejerce más presión de lo que se requiere, es decir, se aprietan las mordazas más de lo que se necesita, generando una mayor fuerza lo cual rompe perno por la tracción; provocando rotura de cadena y cambio de taladro. 3) no se espera el tiempo adecuado de enfriamiento, lo cual no permite la concretar la fusión de las tuberías, 4) los equipos de termo fusión no cuentan con el mantenimiento adecuado, lo cual incide en que se dañen de forma más rápida los equipos. 5) la ausencia de limpieza sobre la superficie de trabajo, hecho que conduce a una preparación deficiente o contaminar los procesos de soldadura. 6) el cordón no se enrolla sobre la superficie, lo que genera que no exista un calentamiento insuficiente.



**Tabla 3**

*Fallas identificadas en la empresa Palcon*

<b>Fallas</b>	<b>Conteo</b>	<b>Fr. Rel</b>	<b>Fr. Acum</b>	<b>80-20</b>
Presión de arrastre (soldadura mal hecha)	80	39%	80	80%
Rotura de cadena y cambio de taladro	60	68%	140	80%
No se concreta la fusión de las tuberías	30	83%	170	80%
Se dañan de formas más rápida los equipos	20	93%	190	80%
Calentamiento insuficiente	10	98%	200	80%
Contaminación de los procesos de soldadura	5	100%	205	80%
<b>Total</b>	<b>205</b>			

Nota. Elaboración propia. Año 2022

**Tabla 4**

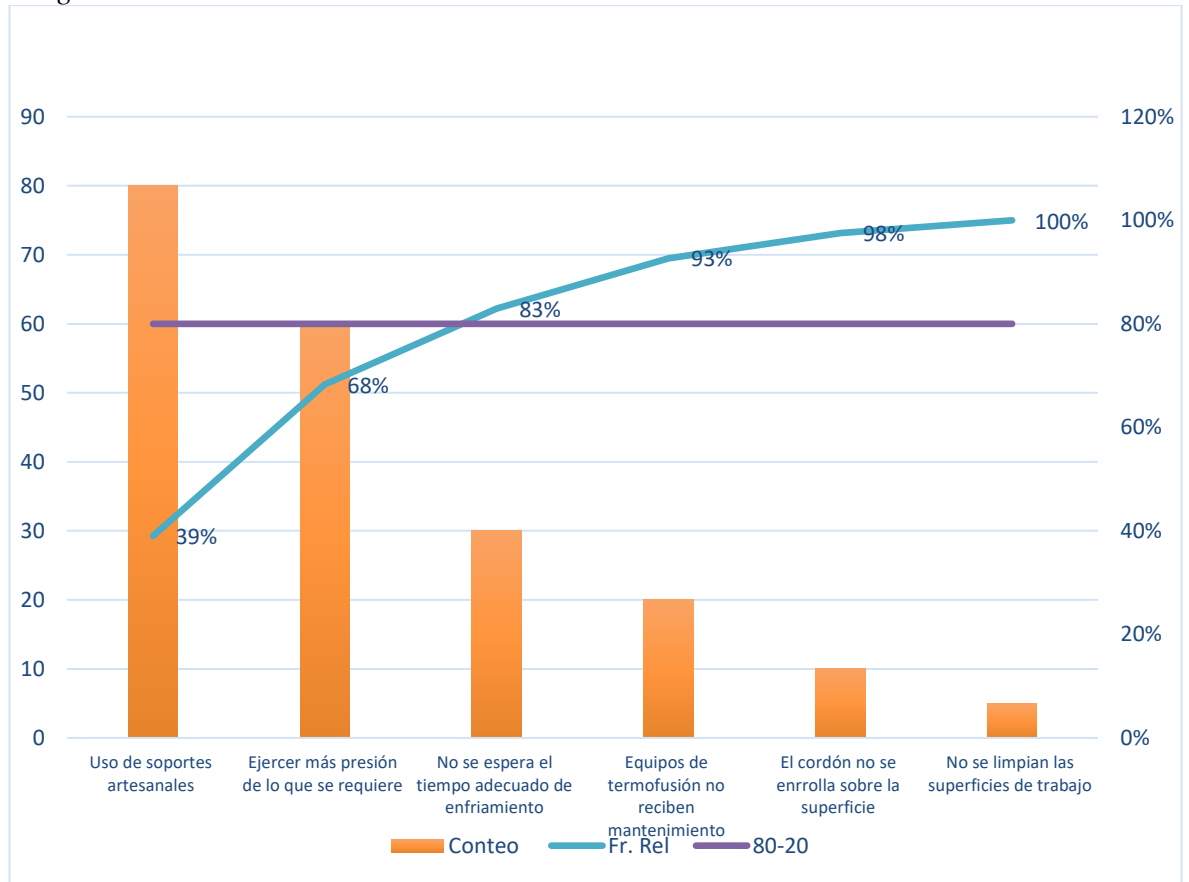
*Factores que originan las fallas*

<b>Factor que origina el problema</b>	<b>Conteo</b>	<b>Fr. Rel</b>	<b>Fr. Acum</b>	<b>80-20</b>
Uso de soportes artesanales	80	39%	80	80%
Ejercer más presión de lo que se requiere	60	68%	140	80%
No se espera el tiempo adecuado de enfriamiento	30	83%	170	80%
Equipos de termo fusión no reciben mantenimiento	20	93%	190	80%
El cordón no se enrolla sobre la superficie	10	98%	200	80%
No se limpian las superficies de trabajo	5	100%	205	80%
<b>Total</b>	<b>205</b>			

Nota. Elaboración propia.

**Figura 3**

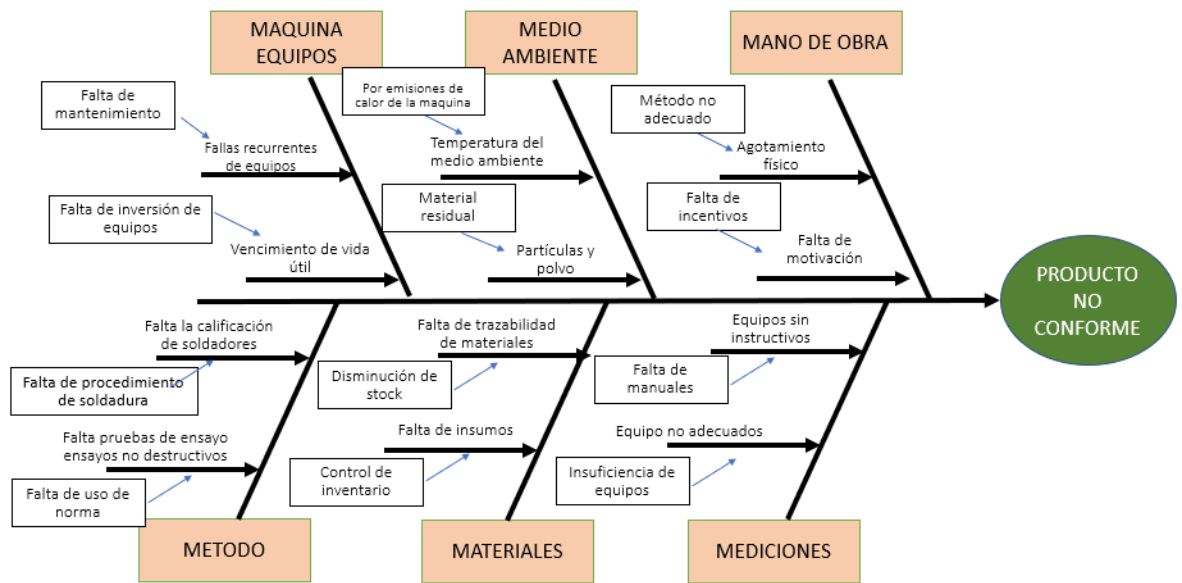
*Diagrama de Pareto*



Nota. Elaboración propia.

**Figura 4**

*Diagrama de Ishikawa*



Nota. Elaboración propia.

Análisis del diagrama:

Métodos: una de las causas probables de las fallas en los procesos operativos de soldadura, es que no se hizo la implementación de una guía de puntos para inspeccionar en el comienzo de cada proyecto. Por lo que no se sabe en qué momento y cuáles son los puntos que se deben de checar durante el proceso. También, el no tener un conjunto de especificaciones como WPS, WPQ y PQR provocan fallas en la soldadura. Falta de uso de la norma, además, existe una falta de procedimiento de soldadura, lo cual se puede derivar de la ausencia de calificación de soldadores.

Materiales: una de las causas identificadas está relacionada con los proveedores, dado que el material que se recibe en muchas ocasiones no cuenta con los certificados de

calidad correspondientes. De igual forma no se cuenta con una trazabilidad de materiales para dar seguimiento apropiado. No hay control de inventario (falta de equipos) y una disminución de stock.

Mano de obra: entre las causas sobresalientes se encuentra que no existe personal que inspeccione y supervise los procesos de soldadura. También, la ausencia de capacitación de los operadores involucrado en los procesos de soldadura, al desconocer la normativa internacional establecida. Método no adecuado (agotamiento físico), así como falta de incentivos.

Maquinaria: una de las causas identificadas es la ausencia de nueva tecnología en equipos, además de no contar con variedad de máquinas, dado que no hay inversión por parte de la empresa. Y se observó, una falta de mantenimiento, ya que hay fallas recurrentes de los equipos.

Mediciones: no existen equipos de medición, o sensores que complementen el trabajo del operador. No se cuenta con valores o parámetros que sean de confianza para llevar un control e inspección de los procesos. No se evidencia el uso de manuales, hay equipos sin instructivos y no se cuenta con los equipos adecuados.

Medio ambiente: no existe orden y limpieza. Los operadores se encuentran expuestos al viento, humedad en el transcurso de la ejecución, por lo que el polvo e impurezas del medio ambiente ingresan. Hay material residual, partículas de polvo. Y emisiones de calor por parte de las máquinas.

En ese sentido, las fallas en la soldadura, se debe a; no contar con una norma técnica y procedimientos, estándares, parámetros, equipo tecnológico adecuado que de pie a una adecuada ejecución de los procesos de soldadura. También, no se identifican las

variables y características que afectan la calidad de las uniones por termofusión de la tubería HDPE.

En la tabla 5, se puede evidenciar que la problemática se expresa en costos mayores, dado que el número de juntas falladas es considerable en relación a la producción total. También, al no contar con una mirada de estándares tanto para la soldadura como para la calificación de los operadores conduce a una duplicación significativa de recursos y compromete la imagen de la empresa.

**Tabla 5**

*Producción total de juntas y porcentaje de juntas falladas (marzo, abril y mayo)*

Ítem	Descripción	Unidad	Cantidad Original	PU (USD)	SUBTOTAL (USD)	total, de juntas	total, de juntas falladas	% de producción fallada	costo total de junta reparadas	TOTAL (USD)
1.6.1.3.2	Instalación de tubería D=4" HDPE - PE4710, SDR 11, diámetro IPS	m	1 220.00	16.78	5 369.60	304	132	65%	132897.6	138 267.20
1.6.1.3.3	Instalación de tubería D=4" HDPE - PE4710, SDR 13,5, diámetro IPS	m	3 860.00	12.17	21 175.80	144	31	48%	22636.2	43 812.00
1.6.1.3.4	Instalación de tubería D=4" HDPE - PE4710, SDR 17, diámetro IPS	m	4 200.00	9.89	11 868.00	78	42	57%	24922.8	36 790.80
<b>TOTAL</b>						<b>516</b>	<b>205</b>			

Fuente: Palcon Perú S.A.C.2022

**Tabla 6**

*Costos operativos (reales y proyectado)*

Año	Real				Reducción del 18% con respecto al año anterior
	2019	2020	2021	2022	2023 (proyectado)
<b>Mano de obra directa (MOD)</b>	216,000	233,000	250,000	267,000	218,940
<b>Mano de Obra indirecta (MOI)</b>	65,000	73,000	81,000	89,000	722,980
<b>Materia prima directa</b>	986,000	1,003,000	1,020,000	1,037,000	850,340
<b>Reparación</b>	150,000	167,000	184,000	201,000	165,000
<b>Mantenimiento</b>	45,000	50,000	55,000	60,000	49,200
<b>Costo energía planta</b>	39,000	40,000	41,000	42,000	34,440
<b>Costo agua planta</b>	4,500	5,500	6,500	7,000	5,470
<b>depreciación fabril</b>	65,000	68,000	71,000	73,000	59,860
<b>Costo de producción</b>	1,570,500	636,500	1,708,500	1,776,000	1,456,320

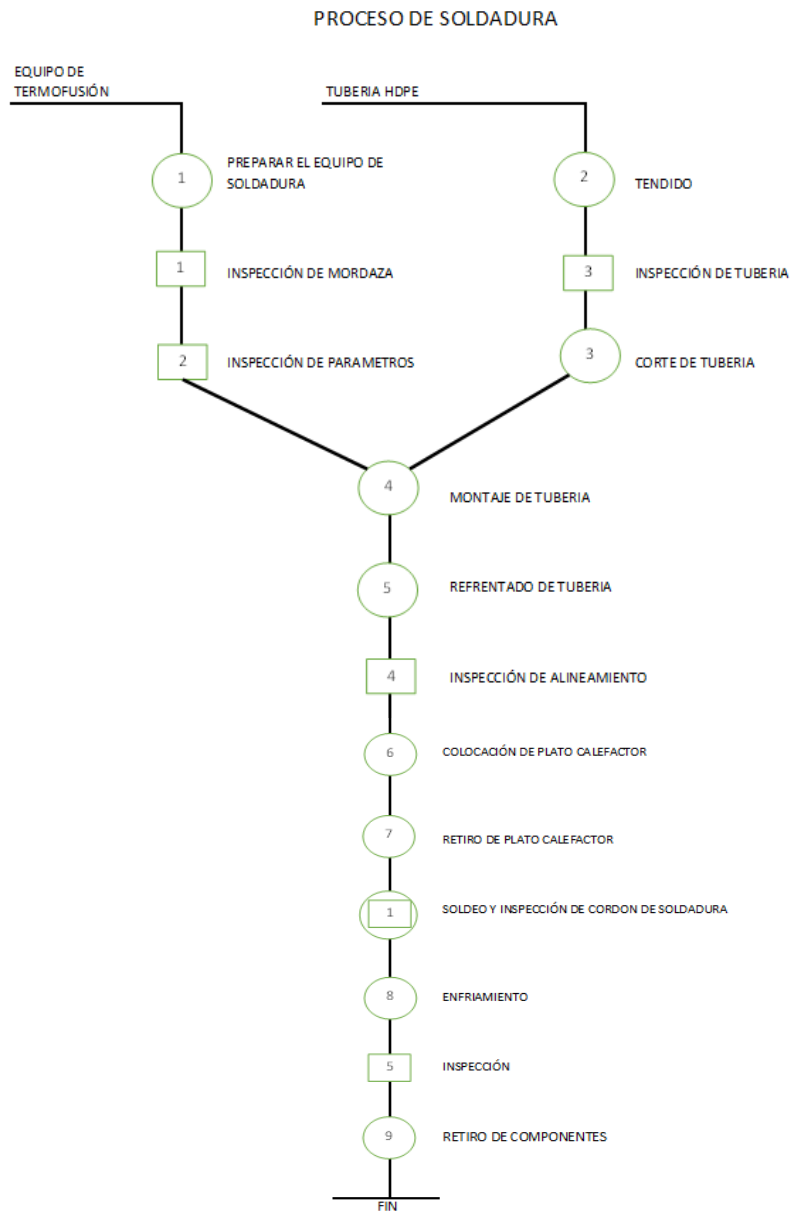
Fuente: Palcon Perú S.A.C.

Por lo que vuelve indispensable dar una respuesta a dicha problemática, mediante la implementación de un método que garantice la calidad del proceso de termofusión de soldadura de tubería HDPE en la empresa Palcon. Como propuesta se plantea implementar el método de Taguchi.

Indicando cual es la problemática que atañe a la empresa Palcon, es posible definir los objetivos del presente trabajo de suficiencia profesional.

**Figura 5**

*DOP antes de la mejora*








Resumen	
Actividad	Cantidad
Operación	9
Inspección	5
Combinada	1
<b>Total</b>	<b>15</b>



Nota. Elaboración propia

**Figura 6**

*DAP*

ITEMS	ACTIVIDAD	Cantidad	Distancia metros	Tiempo Segundos	SIMBOLOS PROCESOS				
									
1	PREPARACIÓN DE EQUIPO DE SOLDAR	1	---	720.0	●				
2	INSPECCIÓN DE MORAZA	4	---	600.0					●
3	INSPECCIÓN DE PARAMETROS (TEMPERATURA,PRESIÓN)	3	---	480.0					●
4	TENDIDO DE TUBERIA	2	6.0	1800.0	●				
5	INSPECCIÓN DE TUBERIA (DAÑOS EN LA TUBERIA)	2	2.0	900.0					●
6	CORTE DE TUBERIA DAÑADA	2	0.3	1500.0	●				
7	MONTAJE DE TUBERIA	2	---	1800.0	●				
8	REFRENTADO DE TUBERIA	2	0.4	360.0	●				
9	INSPECCIÓN DE ALINEAMIENTO	2	---	240.0					●
10	COLOCACIÓN DE PLATO CALEFACTOR	1	0.5	300.0	●				
11	FUSIÓN DE TUBERIA AL PLATO CALEFACTOR	1	0.1	150.0	●				
12	RETIRO DE PLATO CALEFACTOR	1	---	90.0	●				
13	FUSIÓN DE TUBERIA Y INSPECCIÓN DE SOLDADURA	1	0.2	210.0	●				●
14	ENFRIAMIENTO DE TUBERIA	1	---	240.0	●				
15	INSPECCIÓN DE VISUAL DE SOLDADURA	1	---	480.0					●
16	RETIRO DE EQUIPOS	3	---	1800.0	●				
Tiempo Minutos: 194.5		m	9.5	11,670.0					

RESUMEN			
SIMBOLO	ACTIVIDAD	Act.	Pro.
	Operación	1	11
	Transporte	1	0

Nota. Elaboración propia



### **3.3 Selección de la metodología de mejora**

Existen una serie de técnicas para la optimización de las características de salida y para obtener un valor óptimo, pero de todas las técnicas de optimización. Sin embargo, el método de Taguchi permite realizar un diseño experimental de forma sencilla y fácil de aplicar a muchos problemas de ingeniería. Se puede utilizar para identificar problemas en un proceso de fabricación a partir de los datos que ya existen. Además, el método Taguchi permite el análisis de muchos parámetros diferentes sin una cantidad alta de experimentos. También permite la identificación de parámetros clave que tienen el mayor efecto sobre el valor de la característica de rendimiento para que se pueda realizar una mayor experimentación con estos parámetros y se puedan ignorar los parámetros que tienen poco efecto.

En ese sentido, la selección del método y los pasos de optimización de Taguchi fue por conveniencia, Karma et al. (2018) señala, que la técnica hace hincapié en trasladar el problema de la calidad a la etapa de diseño y centrarse en la prevención de defectos mediante la mejora del proceso. Es decir, el método hace énfasis en la importancia de minimizar la variación como medio principal para mejorar la calidad.

### **3.4 Aplicación del método Taguchi**

El método Taguchi de análisis de función de deseabilidad (DFA) se puede aplicar para analizar los parámetros del proceso solo para características de rendimiento únicas. Para superar esta dificultad, en el presente trabajo se emplea un método de optimización multiobjetivo llamado análisis de DFA. El cual, se puede usar de manera efectiva para analizar las características de rendimiento múltiple. El método hace uso de una función objetivo,  $D(X)$ , denominada función de deseabilidad y transforma una

respuesta estimada en un valor libre de escala denominado deseabilidad o parámetros óptimos. Los rangos deseables van de cero a uno (de menos a más deseable, respectivamente). Los ajustes de factor con máxima deseabilidad total se consideran las condiciones de parámetro óptimas.

Asegurar la calidad del proceso de termofusión de soldadura en tuberías HDPE mediante la aplicación del método de Taguchi con un diseño robusto de matriz ortogonal fue el trabajo de desarrollo de la práctica profesional. El diseño de parámetros de Taguchi es un método poderoso y eficiente para optimizar el proceso, la calidad y el rendimiento de los procesos, por lo que es una herramienta poderosa para cumplir con este desafío. El control de calidad fuera de línea se considera un enfoque eficaz para mejorar la calidad del producto a un costo relativamente bajo. El método Taguchi es uno de los enfoques convencionales para este propósito. El análisis de varianza (ANOVA) se utilizó para estudiar el efecto de los parámetros del proceso en el proceso de soldadura. El enfoque se basa en el método de Taguchi, la relación señal-ruido (S/N) y el análisis de varianza se emplearon para estudiar las características de rendimiento.

### **3.5 Pasos en metodología del método Taguchi**

- La identificación de las características de calidad y el diseño de parámetros a ser evaluados.
- Determinación del número de niveles de los parámetros de diseño y posibles interacciones entre los parámetros de diseño
- La selección de la matriz ortogonal apropiada y asignación de los parámetros de diseño

- La realización de los experimentos sobre la base de la disposición de la matriz ortogonal
- Análisis de resultados
- Selección de niveles óptimos de los parámetros de diseño
- La verificación de los parámetros de diseño óptimos a través del experimento de confirmación

### **3.5.1 Factores que afectan la calidad en el proceso de termofusión de soldadura**

Se llevó a cabo un modelado matemático, es decir, experimentos de arreglos ortogonales (OA). Su uso, redujo significativamente el número de configuraciones experimentales a estudiar. Es decir, una vez que se determinaron los factores que afectan a un proceso que se puede controlar, también se establecieron los niveles en los que se deben variar estos parámetros de soldadura. Con el fin de determinar los niveles de un factor se requiere una comprensión profunda del proceso de soldadura, incluido el valor mínimo, máximo y actual del parámetro. En el marco del método, se indica que, si la diferencia entre el valor mínimo y máximo de un parámetro es grande, los valores que se prueban pueden estar más separados o se pueden probar más valores. Si el rango de un parámetro es pequeño, como fue el caso del presente trabajo, entonces se puede probar menos valor o se pueden probar menos valores.

En la tabla 9, se muestra que el método Taguchi es una poderosa herramienta para diseñar sistemas de alta calidad, para aumentar la eficiencia experimental, se ha utilizado la tabla ortogonal mixta L9 en el diseño de calidad de Taguchi. Para determinar los factores significativos, en los experimentos, se seleccionamos cuatro parámetros de soldadura influyentes, como temperatura de plato calefactor, presión de

arrastre, presión de fusión y tiempo de calentamiento; cada uno de los cuales tiene tres niveles diferentes (niveles alto, medio y bajo).

**Tabla 7**

*Factores de soldadura*

FACTORES QUE AFECTAN LA SOLDADURA POR TERMOFUSIÓN				
Factores	Parámetros de soldadura	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
A	Temperatura de plato calefactor °c	220	215	225
B	Presión de arrastre (PSI)	33	28	38
C	Presión de Fusión (PSI)	358	362	351.2
D	tiempo de calentamiento	4	3	5

Fuente: Palcon Perú S.A.C.

### 3.5.2 Diseño de Taguchi

El enfoque de Taguchi para la ingeniería de calidad pone énfasis en minimizar la variación como medio principal para mejorar la calidad. La idea es diseñar productos y procesos cuyo rendimiento no se vea afectado por las condiciones externas e incorporar esto durante la etapa de desarrollo y diseño mediante el uso de la experimentación. El método incluye un conjunto de tablas que permiten investigar las principales variables e interacciones en un número mínimo de ensayos. El Método Taguchi utiliza la idea de Funcionalidad fundamental, que facilitará a las personas identificar el objetivo común porque no cambiará de un caso a otro y puede proporcionar un estándar sólido para situaciones que cambian amplia y frecuentemente (como las situaciones externas al proceso de soldadura).

En la tabla 8, se puede visualizar el resumen del diseño de calidad de Taguchi, el cual estuvo compuesto por una tabla ortogonal mixta L9, compuesto por cuatro factores.

**Tabla 8**

*Diseño de Taguchi*

### ▸ Diseño de Taguchi

#### Resumen del diseño

Arreglo de Taguchi L9(3<sup>4</sup>)  
 Factores: 4  
 Corridas: 9

Columnas del arreglo de L9(3<sup>4</sup>): 1 2 3 4

Nota. Elaboración propia – Software Minitab

**Tabla 9**

*Análisis de datos*

Hoja de trabajo 1 ***												
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12
	Temperatura de plato calefactor	Presión de arrastre (PSI)	Presión de Fusión (PSI)	tiempo de calentamiento	PRESION FINAL	DEST1	MEDIA1	CV1	DEST2	MEDIA2	CV2	
1	220	33	358	4	114	30	114	2.5	57.5418	65.125	0.883560	
2	220	28	362	3	110	33	110	1.5	55.0717	63.625	0.865568	
3	220	38	352	6	114	30	114	2.5	57.5418	65.125	0.883560	
4	215	33	362	6	113	31	113	3.0	56.5921	65.000	0.870648	
5	215	28	352	4	113	31	113	2.5	56.7750	64.875	0.875144	
6	215	38	358	3	114	30	114	2.0	57.7235	65.000	0.888054	
7	225	33	352	3	110	33	110	2.0	54.8840	63.750	0.860925	
8	225	28	358	6	110	33	110	3.0	54.5099	64.000	0.851718	
9	225	38	362	4	114	30	114	2.5	57.5418	65.125	0.883560	
10												

Nota. Elaboración propia – Software Minitab

### 3.5.3 Se identificó el mejor nivel para cada factor de control

Es decir, se utilizó la relación de señal ruido con el fin de determinar la manera en la que se configuran los factores que se pueden controlar para minimizar la variación generada por los factores de ruido. Mediante Minitab se calculó la relación S/N promedio para cada nivel de cada factor. Se eligió entre cuatro relaciones S/N, conforme al resultado que se desea del proceso de soldadura.

En la tabla 10, es posible observar que Delta es la diferencia entre los valores de respuesta más altos y más bajos para cada factor. El programa Minitab asigna los rangos con base en los valores de Delta; el Rango 1 (.92) para el valor de Delta más alto, el Rango 2 para el segundo más alto (.67), y así sucesivamente, con el objetivo de señalar el efecto relativo de cada factor en la respuesta.

**Tabla 10**

*Niveles para cada factor de control*

**Tabla de respuesta para medias**

Nivel	Temperatura de plato calefactor	Presión de arrastre (PSI)	Presión de Fusión (PSI)	tiempo de calentamiento
1	64.96	64.17	64.58	64.13
2	64.63	64.63	64.71	65.04
3	64.29	65.08	64.58	64.71
Delta	0.67	0.92	0.13	0.92
Clasificar	3	2	4	1

Nota. Elaboración propia – Software Minitab

En la tabla 10, se muestran los resultados clave relacionados con Delta, tiempo de calentamiento (DELTA .92, Rango=1), luego sigue, presión de arrastre (DELTA .92, Rango=2), después temperatura de plato calefactor (DELTA .67, Rango=3).

### 3.5.4 Determinación de factores tienen efectos estadísticamente significativos en la respuesta

En esta sección se evalúa la asociación entre la respuesta y cada factor (parámetro) en el modelo es estadísticamente significativo o no. Por lo general, un nivel de significancia, que se denota como como coeficiente alfa de 0.05 funciona adecuadamente. En ese sentido, en la tabla 10 y 11, para la relación de señal a ruido, presión de fusión (DELTA .03, Rango=4) cuenta con un valor p menor a ,05, por lo que dicho factor es estadísticamente significativo.

#### Tabla 11

##### *Factores y su significancia estadística*

Análisis de Taguchi: DEST1; PRESION FINAL; MEDIA1; CV1 ... ntamiento

Análisis de modelo lineal: Relaciones SN vs. Temperatura de plato calefactor; Presión de arrastre (PSI); Presión de Fusión (PSI); tiempo de calentamiento

Coefficientes de modelos estimados para Relaciones SN

Término	Coef
Constante	-35.0335
Temperat 215	-0.0883
Temperat 220	-0.0392
Presión 28	0.1564
Presión 33	0.0189
Presión 352	0.0096
Presión 358	-0.0186
tiempo d 3	0.0886
tiempo d 4	-0.1273

Nota. Elaboración propia. – Software Minitab

Las relaciones señal-ruido (S/N) en el método Taguchi, el término señal representa el valor deseable (media) para la característica de salida y el término ruido representa el valor no deseado (desviación estándar). La relación S/R mide la sensibilidad de la característica de calidad que se investiga de forma controlada a aquellos factores de influencia externos (factores de ruido) que no están bajo control. Entonces, Taguchi usa la relación S/N para medir la característica de calidad que se desvía del valor deseado. Existen principalmente dos relaciones S/N disponibles según el tipo de característica; más bajo mejor y más alto mejor.

**Tabla 12**

*Señal a ruido*

**Tabla de respuesta para relaciones de señal a ruido**

Nominal es lo mejor ( $-10 \times \text{Log}_{10}(s^2)$ )

Nivel	Temperatura de plato calefactor	Presión de arrastre (PSI)	Presión de Fusión (PSI)	tiempo de calentamiento
1	-35.12	-34.88	-35.02	-34.94
2	-35.07	-35.01	-35.05	-35.16
3	-34.91	-35.21	-35.02	-34.99
Delta	0.22	0.33	0.03	0.22
Clasificar	3	1	4	2

Nota. Elaboración propia. – Software Minitab

**3.5.5 Efectos de los factores**

Minitab ofrece gráficos de efectos principales para medias y para relaciones SN, las cuales expresan de qué manera cada factor tiene influencia en las características de



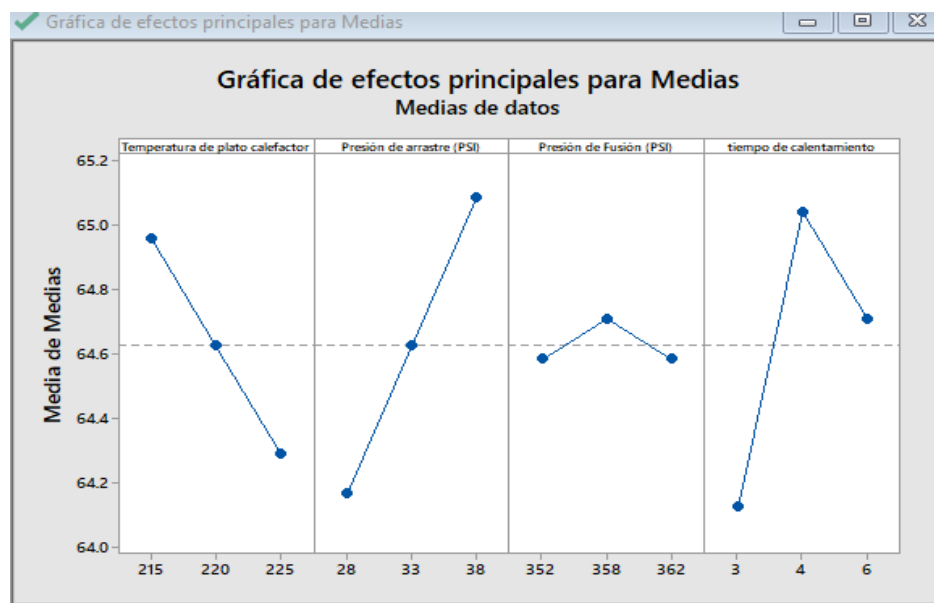
respuesta. Se puede decir que existen efectos principales cuando distintos niveles de un factor afectan la característica de formas distinta. Cuando hay un factor con 2 niveles, es posible observar que un nivel incrementa la media si es que se compara con otro factor. Esa diferenciación es un efecto principal.

Minitab genera el grafico de efectos principales con los promedios de la característica por niveles de cada factor, dichos promedios son los mismos que se muestran en la tabla de respuesta. La línea une los puntos de cada uno de los factores. Al observar la línea es posible establecer si un efecto principal se manifiesta en un u otro factor. Cuando la línea es horizontal, no hay efecto principal, y cuando la línea es vertical, se encuentra que existe un efecto principal.

En la figura 7, se puede evidenciar que la presión de arrastre ejerce mayor efecto para las medias.

**Figura 7**

*Efectos principales para medias*

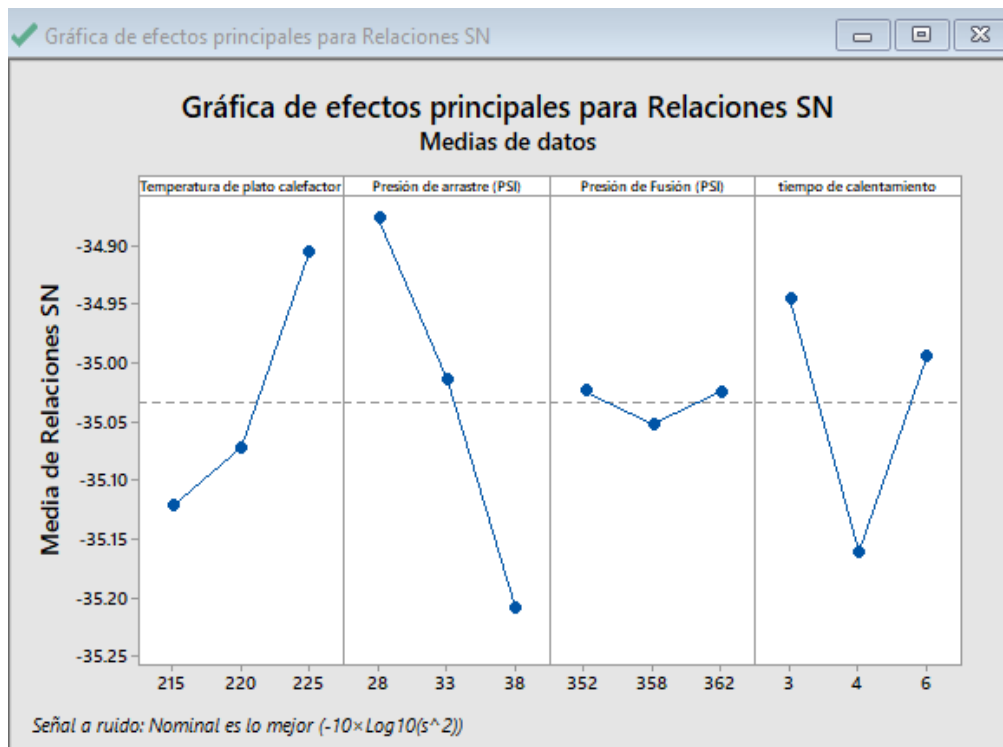


Nota. Elaboración propia – Software Minitab

La definición de interacción es, si el efecto de un factor sobre la variable de respuesta depende del valor del otro factor, se dice que existe una interacción entre dos factores como se ve en la Figura 8. Las interacciones pueden tener un impacto significativo en las características de rendimiento. En el grafico es explicito que la presión de arrastre ejerce mayor efecto en la relación de señal a ruido.

**Figura 8**

*Efectos principales para relaciones SN*



Nota. Elaboración propia – Software Minitab

## CAPÍTULO IV. RESULTADOS

### **Objetivo 1: Determinar las características de las tuberías a ser consideradas durante el proceso de soldaduras de termofusión**

En la determinación de las características de desempeño y sistema de medición, el producto puede tener una o más características de desempeño, por lo que la selección de las características de desempeño es importante. Las características de rendimiento son la base del estudio. La determinación del sistema de medición es fundamental. Cada una de las características de desempeño puede requerir diferentes sistemas de medición. En ese sentido, en la tabla 13, se observan las características de las tuberías a ser consideradas durante el proceso de soldaduras de termofusión son; 1) la inspección visual (apariencia, grietas, color), 2) dimensiones, (diámetro, ovalidad, espesor de pared, excentricidad y efecto lápiz) y 3) ensayos físico-mecánico (índice de fluidez, contenido de negro de humo, presión hidrostática, tiempo de inducción, dispersión del negro de humo, elongación a rotura).

**Tabla 13**

*Características de la tubería*

CARACTERISITCAS	REQUISITOS		RESULTADO PROMEDIO	EVALUACION
	MINIMO	MAXIMO		
<b>INSPECCIÓN VISUAL</b>				
Apariencia	LISA		LISA	CUMPLE
Grietas, poros	NO PRESENTA		NO PRESENTA	CUMPLE
Color,	UNIFORME		UNIFORME	CUMPLE
<b>DIMENSIONES</b>				
Diámetro	113.8	114.8	114.26	CUMPLE
Ovalidad	0	2.2	1.07	CUMPLE
Espesor de pared	10.39	0	11.05	CUMPLE
Excentricidad	0	12	5.5	CUMPLE
Efecto lápiz	0	1.5	0.31	CUMPLE
<b>ENSAYOS FISICO- MECANICO</b>				
Índice de fluidez	0:15	1:40	0.03	CUMPLE
Contenido de negro humo	2:00	3	2.3	CUMPLE
presión hidrostática	SIN FALLA	SIN FALLA	SIN FALLA	CUMPLE
Tiempo de inducción	20	0	MENOR A 30 MIN	CUMPLE
Dispersión del negro humo	0	3	0	CUMPLE
Elongación a rotura	400	0	415	CUMPLE

Fuente: Palcon Perú S.A.C. (Certificado de Calidad)

Taguchi observó que la razón más importante para que un producto sea rechazado es la variabilidad en las especificaciones del producto. Mejorar la calidad es mediante la

reducción de la variabilidad. Se deben hacer esfuerzos por la calidad para la desviación cero y la distorsión cero.

**Objetivo 2: Determinar las variables que afectan la calidad de la unión de tuberías HDPE en el proceso de termofusión de soldadura**

Determinación de las variables que afectan las características de desempeño del producto. La experiencia y los conocimientos previos son muy importantes en esta determinación. La lluvia de ideas, los diagramas de causa-efecto y los diagramas de flujo son herramientas importantes que se deben utilizar. Las variables fácilmente controlables se colocan en el grupo de variables de control (CV) y las demás en el grupo de variables no controlables (UCV)

En la tabla 14, se presentan las variables que afectan la calidad de las uniones; se encuentran; diferencia de materiales y espesor de tubería (SDR), Temperatura ambiente (°C), Presión de Arrastre (PSI o BAR), Alineamiento de tubería, Tiempo de Calentamiento y Tamaño de cordón de soldadura.

**Tabla 14**

*Variables que afectan la calidad de unión*

Diferencia de materiales y espesor de tubería (SDR)
Temperatura ambiente (°C)
Presión de Arrastre (PSI o BAR)
Alineamiento de tubería
Tiempo de Calentamiento
Tamaño de cordón de soldadura

Fuente: Norma DVS 2202

El objetivo principal de Taguchi es reducir la variabilidad en torno al valor objetivo de las propiedades del producto. Para lograr esto, se deben identificar las variables controlables que causan esta variabilidad y se debe diseñar el producto y el proceso de producción de acuerdo a estas. La estrategia de Taguchi es una aplicación sistemática del Diseño Experimental (DOE) y el análisis para mejorar o diseñar la calidad de los productos y procesos. Esta estrategia incluye la minimización experimental de una función de pérdida esperada para determinar el mejor diseño de producto (o diseño de proceso). De ese modo, en la figura 12, se presenta la definición de las variables para asegurar la calidad de las uniones; diámetro exterior, grosor de la pared, relación dimensiona, presión inter facial, área de pistón efectiva y fuerza requerida para mover el tubo.

### Figura 9

#### Variables



Fuente: MC ELROY

En ese sentido la norma técnica con la designación fija ASTM F2620, es un estándar que se desarrolló, en el marco de la experiencia profesional en la empresa PALCON, fue estandarización establecidos sobre estándares específicos.

A continuación, se describe la norma ASTM F2620:

Los procedimientos de la norma técnica están destinados principalmente (entre otros) a la unión en campo de tuberías y accesorios de polietileno, utilizando el equipo adecuado y los procedimientos de control ambiental apropiados. Cuando se implementa correctamente, se producen fuertes juntas estancas a la presión. Cuando estas uniones se someten a pruebas destructivas, la falla ocurre fuera del área unida por fusión.

Las características de fusión, el peso molecular promedio y la distribución del peso molecular son factores que influyen en el establecimiento de parámetros de fusión adecuados; por lo tanto, considere las instrucciones del fabricante en el uso o desarrollo de un procedimiento de fusión específico.

Los procedimientos de fusión por arrastre, fusión a tope y fusión de asiento en esta práctica son adecuados para unir tuberías y accesorios de gas de PE, tuberías y accesorios de agua de PE y tuberías y accesorios de uso general de PE fabricados según las especificaciones de productos de PE de organizaciones como ASTM, AWWA, API e ISO que se utilizan en aplicaciones de presión, baja presión y sin presión. Para las aplicaciones de gas, se requiere la calificación del procedimiento mediante el ensayo de las juntas realizadas con el procedimiento de acuerdo con los reglamentos de la autoridad competente.

Esta práctica describe los procedimientos para realizar uniones con tuberías y accesorios de polietileno por medio de unión por fusión por calor en, entre otros, un

entorno de campo. Otros procedimientos adecuados de unión por fusión por calor están disponibles de diversas fuentes, incluidos los fabricantes de tuberías y accesorios. Esta norma no pretende abordar todos los posibles procedimientos de unión por fusión por calor, o impedir el uso de procedimientos calificados desarrollados por otras partes que han demostrado producir uniones por fusión por calor confiables.

Los parámetros y procedimientos se aplican únicamente a la unión de tuberías y accesorios de polietileno de la química de polímeros relacionados. Están destinados a tuberías de PE para gas combustible según la especificación D2513 y tuberías de PE para agua potable, alcantarillado e industriales fabricadas según la especificación F714, la especificación D3035 y AWWA C901 y C906.

Las piezas que están dentro de las tolerancias dimensionales dadas en las especificaciones actuales de ASTM deben producir juntas sólidas entre la tubería de polietileno y los accesorios cuando se usan las técnicas de unión descritas en esta práctica. Los valores indicados en unidades de pulgada-libra deben considerarse como estándar.

### **Objetivo 3: Determinar los parámetros óptimos que aseguran la calidad de la unión de tuberías HDPE en el proceso de termofusión**

La etapa más importante del diseño de productos o procesos en términos de mejora de la calidad es la etapa de diseño de parámetros. En esta etapa, se utiliza el método diseño de experimentos (DOE), para determinar los factores que afectan el desempeño del producto y sus efectos en el desempeño. El objetivo es minimizar el efecto de los factores efectivos sobre el producto.



En la tabla 15, se presentan los parámetros óptimos que deben ejecutarse reducir las fallas en el proceso de soldadura por termofusión de tuberías HDPE.

**Tabla 15**

*Parámetros óptimos*

<b>PREDICCIÓN</b>			
Relación S/R Media	Media	Desv. Est.	Ln (Desv.est.)
-35.0049	64.6667	56.2771	4.03009
<b>CONFIGURACIÓN</b>			
Temperatura de plato calefactor	Presión de arrastre (PSI)	Presión de fusión	Tiempo de calentamiento
225	33	352	4

Nota. Elaboración propia.

Por lo tanto, el diseño que tiene una sensibilidad mínima a la variabilidad de los factores no controlables. Taguchi dice que es necesario minimizar la variabilidad en el producto o proceso eligiendo los valores de los factores controlables (parámetros) de manera óptima frente a los factores que crean la variabilidad. La palabra robusta, se refiere a factores incontrolables que son insensibles a las condiciones ambientales como la humedad, el polvo, el calor y las diferencias en los materiales. La clave del diseño robusto de Taguchi; en lugar de tratar de controlar los factores que no se pueden controlar o que son demasiado costosos de controlar, se trata de determinar los mejores valores de los factores controlables que minimizarán sus efectos sobre el producto o proceso.

En ese sentido a continuación se muestra de forma comparativa en la que se evidencia la mejora después de la aplicación del método Taguchi para asegurar la calidad en el proceso de termofusión de soldadura de tuberías HDPE en una empresa metalmecánica.

En la tabla 16, se presentan los parámetros que se relacionan a la calidad de la soldadura, se observan los parámetros que no permiten garantizar dicha calidad, así como los parámetros que son aceptables, para cada variable.

**Tabla 16**

*Parámetros relacionados a la calidad de soldadura*

ITEM	VARIABLES	Parámetros rechazados	Parámetros Aceptables
1	Temperatura de plato calefactor °c	230	225
2	Presión de arrastre (PSI)	40	33
3	Presión de Fusión (PSI)	352	352
4	tiempo de calentamiento	5	4

Nota: Elaboración propia

En la tabla 17, es posible visualizar la evolución de las variables antes y después de la aplicación del método Taguchi. Como se puede ver; el plato calefactor mejoró en s calibración, en cuanto a la presión de arrastre se añadieron las especificaciones de la ficha técnica. En lo referente a la presión de fusión se pudo contar con un soldador homologado, y finalmente, el tiempo de calentamiento, se pudo llevar a cabo a través de una toma de tiempos.

**Tabla 17**

*Variables antes y después de la aplicación del método*

<b>VARIABLES</b>	<b>ANTES</b>	<b>DESPUES</b>
Plato calefactor	Falta de calibración de plato calefactor	Plato calefactor calibrado
	sin control de temperatura	uso de pirómetro
presión de arrastre	Falta de especificaciones del equipo	Ficha técnica del equipo Termofusión
	Falta de uso de norma para soldadura de termofusión	aplicación de Norma ASTM F2620
Presión de fusión	Personal no capacitado	Soldador homologado
tiempo de calentamiento	falta de control de tiempo	Toma de tiempo de fusión

Nora: Elaboración propia

En la tabla 18, se muestra como tras la implementación del método Taguchi, se manifestó un beneficio. Ya que, en 2022, el total de juntas soldadas fue de 635, de las cuales 205 fueron falladas, en ese sentido, el 40% de la soldadura tenía fallas.

Mientras, que, en 2023, tras la aplicación del método Taguchi, se evidenció un total de 635 juntas soldadas, de las cuales solamente 40 tuvieron fallas, lo que se tradujo en que únicamente el 6% de las juntas contaban con algún defecto.

**Tabla 18**

*Mejora en juntas soldadas*

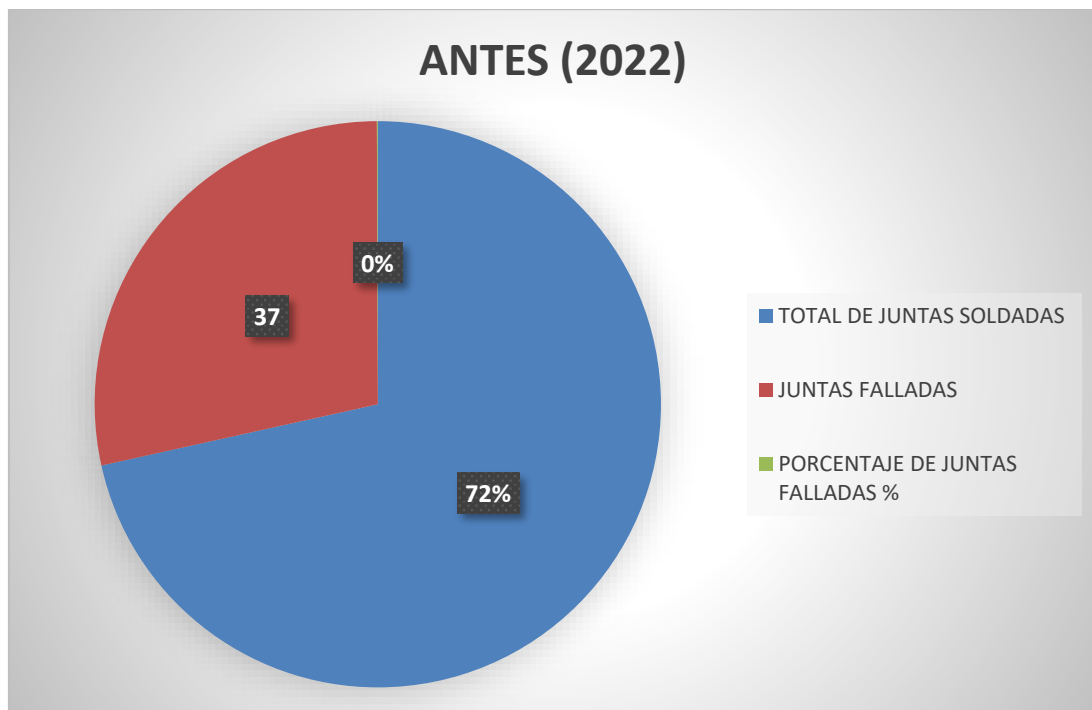
	<b>total, de juntas soldadas</b>	<b>juntas falladas</b>	<b>porcentaje de juntas falladas %</b>
<b>antes (2022)</b>	516	205	40%
<b>después (2023)</b>	635	40	6%

Nora: Elaboración propia

En la figura 10, se evidencia a nivel gráfico la situación de la calidad de la soldadura de tuberías HDPE. El total de juntas para el periodo 2022 (setiembre, octubre, noviembre), representaba el 72%, y el porcentaje de juntas falladas el 37%. De lo cual se puede deducir que la empresa PLACON, no contaba con algún instrumento, método o técnica que asegure la calidad de las uniones.

**Figura 10**

*Antes de la implementación del método Taguchi para asegurar la calidad de la soldadura*

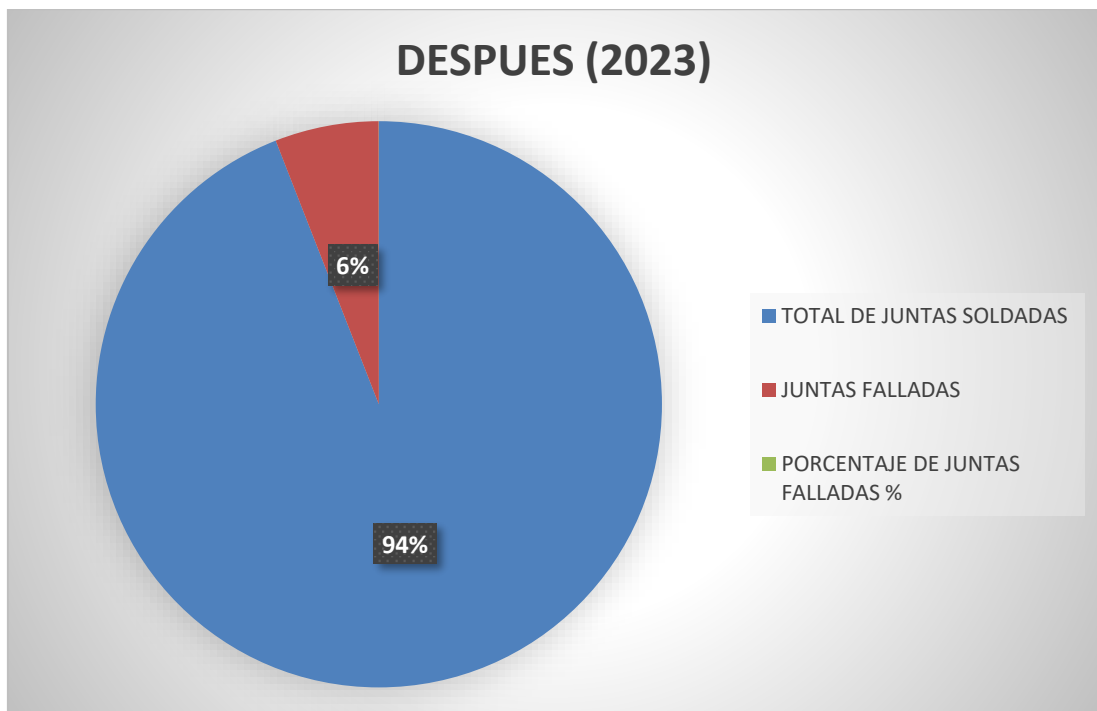


Nora: Elaboración propia

En la figura 11, es posible visualizar la situación de la calidad de la soldadura de tuberías HDPE posterior a la implementación del método Taguchi. El total de juntas para el periodo 2023 (marzo, abril, mayo), representaba el 94%, y el porcentaje de juntas falladas, únicamente el 6%. De lo cual se puede deducir que la empresa PLACON, ha contado con una gran mejora en la calidad de la soldadura por termofusión de tuberías HDPE.

### Figura 11

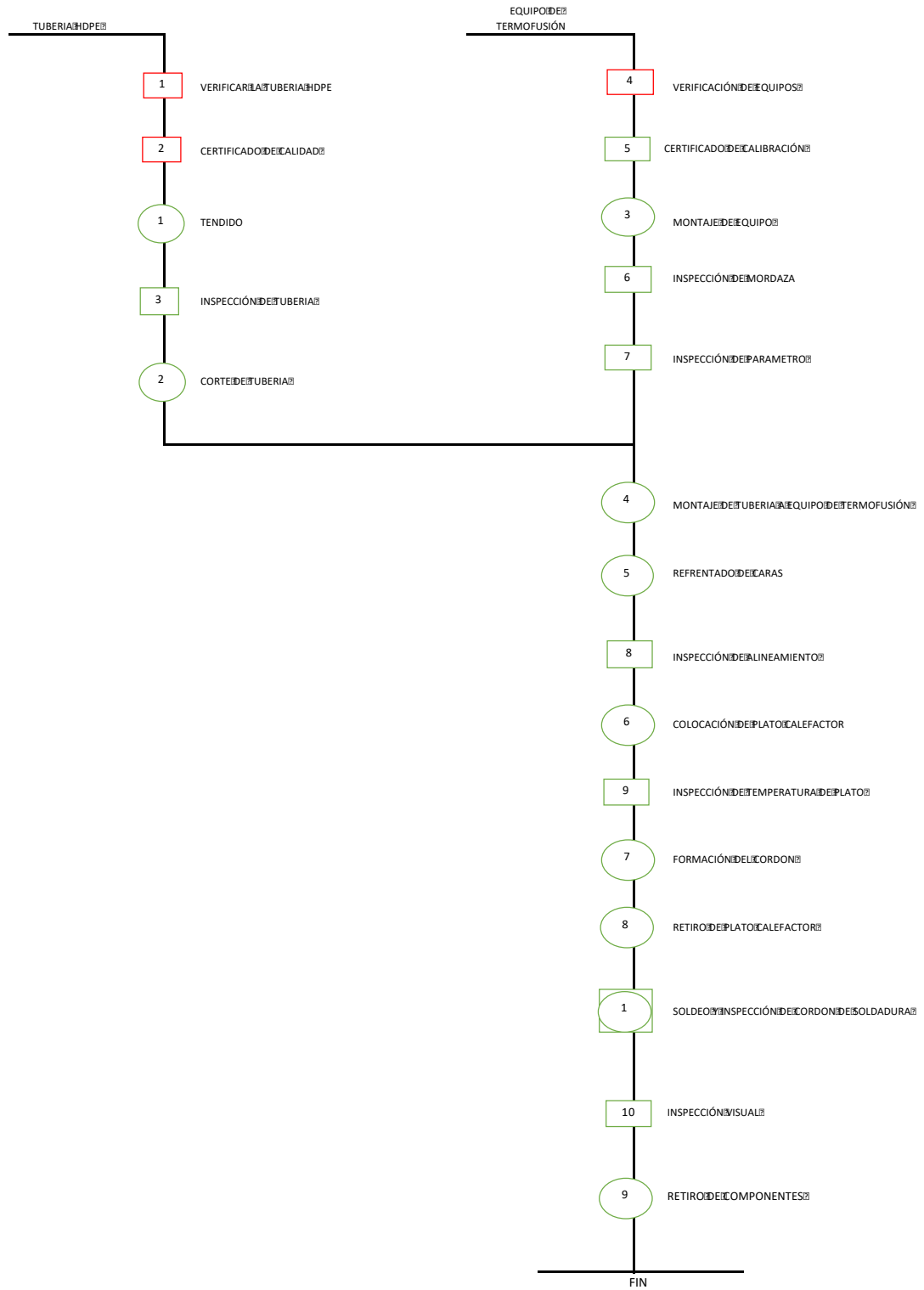
*Después de la implementación del método Taguchi para asegurar la calidad de la soldadura*



Nora: Elaboración propia

**Figura 12**

*DOP después del método Taguchi*



## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A manera de conclusión es posible decir que:

1.- Se determinó que las características de desempeño son fundamentales para contar con un sistema de medición y establecimiento de los aspectos con los que debe contar un producto para que se aceptado o descalificado. Es decir, la disminución de las variaciones que son controlables es indispensable para desviar a cero las distorsiones de la calidad. En ese sentido, se puede concluir que las características de las tuberías a ser consideradas durante el proceso de soldaduras de termofusión son; 1) la inspección visual, 2) dimensiones, y 3) ensayos físico-mecánico.

2.- En cuanto a las variables que afectan la calidad de la unión de tuberías HDPE en el proceso de termofusión de soldadura, se determinó que la reducción de la variabilidad de variables controlables es un aspecto relevante para mantener las propiedades de las uniones. Las variables que afectan la calidad de las uniones; se encuentran; diferencia de materiales y espesor de tubería (SDR), Temperatura ambiente (°C), Presión de Arrastre (PSI o BAR), Alineamiento de tubería, Tiempo de Calentamiento y Tamaño de cordón de soldadura.

3.- Finalmente, se determinaron los parámetros óptimos que aseguran la calidad de la unión de tuberías HDPE en el proceso de termofusión, por eso el método de Taguchi hace hincapié en reducir la variabilidad en el producto eligiendo los valores de los factores controlables (parámetros) de manera óptima frente a los factores que crean distorsión. Los valores pronosticados para asegurar la calidad de la soldadura por termofusión de tubería HDPE, fueron: Temperatura de plato calefactor (225), presión de arrastre (33), presión de fusión (352) y tiempo de calentamiento (4). Lo cual derivó en un total de 40 juntas falladas

en 2023 después de la aplicación del método Taguchi, lo que representa, solamente el 6% de juntas soldadas.

Por otro lado, se recomienda:

1.- Realizar de forma continua el análisis de las características mediante el método propuesto y la utilización de otras metodologías para controlarlas de forma adecuada al largo del tiempo. Por otro lado, se tienen que seleccionar a los proveedores de tubería, y solicitar los certificados de calidad y ficha técnica de los componentes externos. Y establecer de forma adecuada fichas técnicas del equipo de termofusión.

2.- También, es recomendable mejorar el proceso de alquiler de equipos que cuenten con certificado de calibración, e implementar de forma constante capacitaciones al personal operativo, para contar con soldadores homologados. Así, como hacer la calibración del plato calefactor de forma regular.

3.- Por otro lado, para contar con los parámetros óptimos que aseguren la calidad de la unión de tubería, se deben llevar a cabo simulaciones de parámetros mediante software, aportando valiosamente en la validación de los parámetros junto con la aplicación de la norma ASTM F2620.



## REFERENCIAS

- Adin, M., Iscan, B., & Baday, S. (2022). Optimization of Welding Parameters of AISI 431 and AISI 1020 Joints Joined by Friction Welding Using Taguchi Method . (<https://doi.org/10.35193/bseufbd.1075980>, Ed.) *Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science* , 9 (1), 453-470.
- Asif, K.; Zhang, L.; Derrible, S.; Indacochea, J.; Ozevin, D.; Ziebart, B. (2020) Machine learning model to predict welding quality using air-coupled acoustic emission and weld inputs. *J. Intell. Manuf.* **33**, 1–15
- Azzeddine B., Mazari M. (2018) Experimental Study of the Weld Bead Zones of a High-Density Polyethylene Pipe (HDPE). *Journal of Failure Analysis and Prevention.* 18(2): 1-12.
- Chelladurai, S., Murugan, K., Pratip, A., Upadhyaya, M., & Narasimharaj, V. (2021). Optimization of process parameters using response surface methodology: A review. (<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.466>, Ed.) *Materials Today: Proceedings* , 37 (2), 1301-1304.
- Chen, S., Lai, H., & Lin, R. (2022). Study on the creep properties of butt fusion-welded joints of HDPE pipes using the nanoindentation test. (<https://doi.org/10.1007/s40194-021-01186-0>, Ed.) *Welding in the World* , 66, 135-144.
- Hamade, R., Andari, T., Ammouri, A., & Jawahir, I. (2019). Rotary Friction Welding versus Fusion Butt Welding of Plastic Pipes – Feasibility and Energy Perspective. (<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.087>, Ed.) *Procedia Manufacturing* , 33, 693-700.
- Han, Y., Fan, J., & Yang, X. (2019). A structured light vision sensor for on-line weld bead measurement and weld quality inspection. (<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-019-04450-2>, Ed.) *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 106 (8), 2065-2078.
- Kiani, M., Parvaneh, V., Dadrasi, A., & Abbasi, M. (2022). Evaluating Tensile Strength in Butt Fusion and Electrofusion Joints in Nanocomposite HDPE Pipes. (<https://doi.org/10.1007/s40799-021-00477-x>, Ed.) *Experimental Techniques* , 46 (2), 191-202.
- Kumar, S., & Singh, R. (2019). Optimization of process parameters of metal inert gas welding with preheating on AISI 1018 mild steel using grey based Taguchi method. (<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106924>, Ed.) *Measurement* , 148, 634-639.
- Li, X.; Khyam, M.; Ge, S. (2017) Robust welding seam tracking and recognition. *IEEE Sensors Journal* 17(17):5609–561
- Mehdikhani, H., Mostafapour, A., Laiegh, H., Najjar, R., & Lionetto, F. (2022). Mechanical and Microstructural Properties of HDPE Pipes Manufactured via Orbital Friction Stir Welding. (<https://www.mdpi.com/1996-1944/15/11/3810>, Ed.) *Materials* , 15 (11), 1-16.

- Nandi, A., & Kumar, R. (2022). A Parametric Investigation of Butt Fusion Welding (Plastic welding novel approaches) Process Parameter on HDPE Pipe. (<http://www.ijred.com/volume5/issue3/IJSRED-V5I3P90.pdf>, Ed.) *International Journal of Scientific Research and Engineering Development* , 5 (3), 756-762.
- Natrayan, L., Anand, R., & Santhosh, S. (2021). Optimization of process parameters in TIG welding of AISI 4140 stainless steel using Taguchi technique. (<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.150>, Ed.) *Materials Today: Proceedings* , 37 (2), 1550-1553.
- Oladele I, Omotosho T., Adediran A. (2020) Polymer-based composites: an indispensable material for present and future applications. *International Journal of Polymer Science*, Vol. 2020. No. 8834518. 1-12. <https://doi.org/10.1155/2020/8834518>
- Park J., Kim H., Woo J. (2020) Development of Entering Order and Work-Volume Assignment Algorithms for the Management of Piping Components in Off shore Structure Construction. *Journal of Marine Science and Engineering*. Vol. 8, No. 894. 1-21. <https://doi.org/10.3390/jmse8110894>
- Rajak D., Pagar D, Menezes P., Linul E. (2019) Fiber-reinforced polymer composites: manufacturing, properties, and applications. *Polymers*. Vol. 11. No. 1667. 1-37. <https://doi.org/10.3390/polym11101667>
- Raj, A., Utkarsh, C., Chadha, A., & Rishikesh, M. R. (2023). Weld quality monitoring via machine learning-enabled approaches. (<https://doi.org/10.1007/s12008-022-01165-9>, Ed.) *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* , 12 (4).
- Ramesh, B., Hudgikar, S., & Poornachandra, S. (2020). Experimental investigation on friction stir welding of HDPE reinforced with SiC and Al and Taguchi-based optimization. ([https://doi.org/10.1007/978-981-15-1201-8\\_99](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1201-8_99), Ed.) *Advances in Applied Mechanical Engineering* , 1 (2), 978-981.
- Rehman, R., Sheikh, J., & Deveci, S. (2021). Effect of preheating on joint quality in the friction stir welding of bimodal high density polyethylene. (<https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-021-07740-w>, Ed.) *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* , 117 (23), 455-468.
- Saleem, S., & Onour, M. (2019). Mechanical properties of electro and butt fusion welded high-density polyethylene pipes. (<https://doi.org/10.3139/120.111325>, Ed.) *Materials Testing* , 61 (4), 337-343.
- Sun, Y., Haroon, M., Jia, Y., & Sheng, H. (2019). Welding residual stress in HDPE pipes: measurement and numerical simulation. (doi:10.1115/1.4043463, Ed.) *Journal of Pressure Vessel Technology* . , 4 (5), 1-43.
- Tashkandi, M., Becheikh, N. (2022) Optimization of joining HDPE rods by continuous drive friction welding, *Materials Science-Poland*, vol.40, no.2, pp.240-256. <https://doi.org/10.2478/msp-2022-0017>
- Wang, Q., Jiao, W., Wang, P., Zhang, Y. (2021) A tutorial on deep learning-based data analytics in manufacturing through a welding case study. *J. Manuf. Process*. 63, 2–13

- Wang, Z, Xu, L, You, Q, Peng, Y, & Zhang, Q. "Design of an Intelligent Butt-Fusing Welding Machine for HDPE Pipes." *Proceedings of the. Volume 1: Codes and Standards*. Las Vegas, Nevada, USA. July 17–22, 2022. V001T01A005. ASME. <https://doi.org/10.1115/PVP2022-84456>
- Xingmin, Z., Jianping, Z., & Jizhong, Y. (2021). Study on Constitutive Model for Butt Fusion Welded Joint of High- density Polyethylene Pipe. (Doi:10.19491/j.issn.1001-9278.2021.04.012, Ed.) *China Plastics* , 35 (4), 65-71.
- Yang, G., Su, P., Xu, P., Wang, Z., Wang, H., & Zuo, Z. (2022). Experimental Investigation on Failure Mechanisms of HDPE Welded Geocell Junctions under Different Clamping Distances. (<https://doi.org/10.3390/app12115343>, Ed.) *Applied Sciences* , 12 (11), 35-41.
- Yang L, Li E, Long T, Fan J, Mao Y, Fang Z, Liang Z (2018) A welding quality detection method for arc welding robot based on 3D reconstruction with SFS algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 94(1-4):1209–1220
- Yu, C., Troughton, M., Khamsehnezhad, A., & Zhang, X. (2020). Effect of insufficient homogenization during the extrusion of polyethylene pipes on butt fusion joint integrity. (<https://link.springer.com/article/10.1007/s40194-020-00948-6>, Ed.) *Welding in the World volume* , 64 (1), 1703-1713.
- Zuo, Z.; Yang, G.; Liu, Y.; Du, T.; Wang, Z.; Yu, F. (2021) Experimental investigations on failure mechanism of different junction connections of geocells. *Chin. J. Geotech. Eng.*, 43, 1682–1690
- Zhao, Y.; Lu, Z.; Yao, H.; Zhang, J.; Yuan, X.; Cui, Y.; Nie, Y. (2021) Development and mechanical properties of HDPE/PA6 blends: Polymer-blend geocells. *Geotext. Geomembr.* **2021**, 49, 1600–1612.