

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**

**CARRERA:**  
**INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:**  
**INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA:**  
**DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LA**  
**SOLDADURA TIG, PARA TUBERÍAS DE DIÁMETRO ESTÁNDAR**  
**DE 1" Y 4" CON ESPECIFICACIÓN TÉCNICA ASTM A270-TIPO 304 Y**  
**EVALUACIÓN POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.**

**AUTOR:**  
**DANIEL ALEJANDRO GAMARRA YEPEZ**

**TUTOR:**  
**MARCOS ANTONIO HECHAVARRÍA SÁNCHEZ**

**Quito, marzo 2020**

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo Daniel Alejandro Gamarra Yopez con documento de identificación N° 1721122941, respectivamente manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación: “DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LA SOLDADURA TIG, PARA TUBERÍAS DE DIÁMETRO ESTÁNDAR DE 1” Y 4” CON ESPECIFICACIÓN TÉCNICA ASTM A270-TIPO 304 Y EVALUACIÓN POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de Ingeniero Mecánico en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



---

Daniel Alejandro Gamarra Yopez

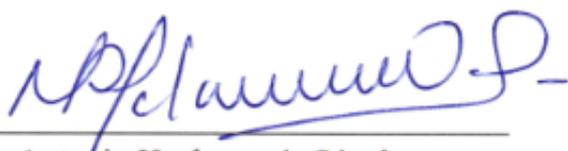
CI: 1721122941

Quito, marzo del 2020.

## **DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL TUTOR**

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el proyecto técnico, “DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS ÓPTIMOS DE LA SOLDADURA TIG, PARA TUBERÍAS DE DIÁMETRO ESTÁNDAR DE 1” Y 4” CON ESPECIFICACIÓN TÉCNICA ASTM A270-TIPO 304 Y EVALUACIÓN POR ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS.”, realizado por Daniel Alejandro Gamarra Yopez, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, marzo del 2020.



---

Marcos Antonio Hechavarría Sánchez

CI: 1756684369

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a todos mis seres queridos, en especial, a mi familia, a mi padre Gerardo Gamarra que me ha demostrado en todo momento su apoyo incondicional.

A mi madre, Yolanda Yepez que con su amor y bondad es un pilar fundamental en mi vida.

A mi tía, Antonieta Yepez que, con su apoyo e insistencia este logro es posible.

A mis hermanos, Josué y Rosario Gamarra que, con su ejemplo de determinación, decisión y disciplina, me enseñaron a perseverar para cumplir mis objetivos.

A mi amada esposa, Catalina Maldonado que, con su amor, determinación persistencia y apoyo incondicional me ayudo a cumplir mis objetivos.

A mis hermosas y amadas hijas Amelia y Antonia que son mi fuente de fuerza y decisión para seguir siempre adelante.

A mi jefe y excelente amigo Gerente General de EVA ENGINEERING el ingeniero Alejandro Narváez, a quien admiro mucho, pues con su valioso apoyo y ejemplo este logro es realmente posible.

***Daniel***

## **AGRADECIMIENTO**

Mi gratitud a la magna Universidad Politécnica Salesiana, cuya misión está sustentada en los valores del evangelio y la fe en las capacidades de los jóvenes y pobres, que abrió sus puertas y me recibió en sus aulas que se convirtieron en mi segundo hogar.

A la Empresa EVA ENGINEERING que me brindó la oportunidad para aplicar todo lo aprendido durante estos años.

Gracias a mis maestros que de manera abnegada, responsable y altruista entregaron sus conocimientos para que hoy pueda forjar una profesión que pondré al servicio de mi familia y la sociedad; prometo llevar en alto y con honor los colores, valores y conocimientos adquiridos en mi UPS.

Mi imperecedero reconocimiento al Ingeniero Marcos Antonio Hechavarría Sánchez, MSc. quien con su dirección, conocimientos y confianza creyó en mi proyecto y fue de gran aporte para hacerlo realidad.

Agradezco al Ingeniero Enrique Fernando Larco Calvache, M.Sc., lector de este proyecto por su guía técnica y experiencia en el área.

*Daniel*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR .....	i
DECLARACIÓN DE COAUTORÍA DEL TUTOR .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	v
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
RESUMEN .....	x
ABSTRACT .....	xi
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I.....	6
MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL.....	6
1.2. Aceros inoxidables .....	7
1.3. Aceros para tuberías inoxidables.....	8
1.4. Tipos de tuberías utilizadas en la industria alimenticia.....	10
1.5. Norma ASME y su importancia para la evaluación de calidad de tubería de acceso inoxidable en la industria alimenticia.....	11
1.6. Características sépticas de las instalaciones alimenticias, condiciones de riesgo que pueden estar presentes .....	12
1.7. Métodos de Inspección de soldadura enfocado a las tuberías-ensayos no destructivos: inspección visual, rayos x y tintas penetrantes .....	12
1.8. Soldadura en tuberías .....	16
CAPÍTULO II.....	18
MARCO METODOLÓGICO .....	18
2.1. Procedimiento de elaboración de las probetas.....	18
2.2. Metodología para la selección de la tubería .....	18
2.3. Metodología para la aplicación de la soldadura TIG.....	19
2.4. Metodología para la selección de los parámetros óptimos de la soldadura.....	23

2.5. Metodología para la elaboración de los procedimientos de soldadura por tipo de material y diámetro de la tubería .....	28
2.6. Metodología de aplicación de los ensayos no destructivos .....	30
2.7. Metodología de análisis de costo.....	33
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>36</b>
<b>PROCEDIMIENTOS Y PARAMETROS ÓPTIMOS DE LA SOLDADURA .....</b>	<b>36</b>
3.1. Preparación inicial de Probetas .....	36
3.2. Procedimiento de soldadura para la tubería de 1" a 4" pulgadas en orbital y obtención de parámetros según especificaciones del fabricante .....	37
3.3. Prueba de Ensayos no Destructivos.....	62
3.3.1. Resultados Ensayo Orbital inspección visual y líquidos penetrantes.....	62
3.3.2. Resultados ensayo Soldadura Manual para constatación de parámetros óptimos .....	63
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>65</b>
<b>COMPARATIVO DE COSTO DEL PROCESO DE SOLDADURA TIG</b>	
<b>MANUAL .....</b>	<b>65</b>
4.3. Costo del proceso de soldadura manual TIG actual en la empresa .....	68
4.4. Comparación de costos entre el proceso actual de soldadura con los parámetros óptimos probados .....	70
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aceros Inoxidables y propiedades .....	9
Tabla 2. Ventajas del uso de la soldadura TIG tuberías ASTM A 270-tipo 304 .....	20
Tabla 3. Procedimiento a seguir en la soldadura TIG Manual.....	21
Tabla 4. Amperaje para soldadura TIG según el diámetro de la tubería.....	25
Tabla 5. Amperaje y caudal de Argón soldadura TIG Orbital .....	28
Tabla 6. Procedimiento a seguir para realizar la soldadura TIG.....	28
Tabla 7. Pasos a seguir para iniciar la Inspección Visual .....	30
Tabla 8. Pasos a seguir para uso de líquidos penetrantes.....	31
Tabla 9. Tiempo vs. fases de inyección de tinta e intensidad lumínica .....	32
Tabla 10. Factor de operación .....	34
Tabla 11. Flujo gas por tipo de soldadura .....	34
Tabla 12. Parámetros Soldadura Orbital .....	38
Tabla 13. Parámetros soldadura TIG orbital 1" .....	41
Tabla 14. Parámetros soldadura TIG orbital 1,5" .....	42
Tabla 15. Parámetros soldadura TIG orbital 2" .....	43
Tabla 16. Parámetros soldadura TIG orbital 2,5" .....	44
Tabla 17. Parámetros soldadura TIG orbital 3" .....	45
Tabla 18. Parámetros soldadura TIG orbital 4" .....	46
Tabla 19. Parámetros Soldadura TIG Manual siguiendo los parámetros de la orbital .....	48
Tabla 20. Parámetros actuales soldadura TIG-manual .....	49
Tabla 21. Prueba N° 1 identificación de parámetros óptimos tubería de 1" .....	50
Tabla 22. Prueba N° 2 identificación de parámetros óptimos tubería de 1,5" .....	51
Tabla 23. Prueba N° 3 identificación de parámetros óptimos tubería de 2" .....	52
Tabla 24. Prueba N° 4 identificación de parámetros óptimos tubería de 2,5" .....	53
Tabla 25. Prueba N° 5 identificación de parámetros óptimos tubería para tubería 3" .....	54
Tabla 26. Prueba N° 6 identificación de parámetros óptimos tubería para tubería 4"55	
Tabla 27. Prueba N° 7 identificación de parámetros óptimos tubería 1" .....	56
Tabla 28. Prueba N° 8 identificación de parámetros óptimos tubería 1" .....	57
Tabla 29. Prueba N° 9 identificación de parámetros óptimos tubería 2" .....	58

Tabla 30. Prueba N° 10 identificación de parámetros óptimos tubería 2,5" .....	59
Tabla 31. Prueba N° 11 identificación de parámetros óptimos tubería 3" .....	60
Tabla 32. Prueba N° 12 identificación de parámetros óptimos tubería 4" .....	61
Tabla 33. Cálculo del costo total por cordón bajo los procedimientos actuales para la soldadura TIG manual por tipo de diámetro de tubería .....	66
Tabla 34. Costos de soldadura de los parámetros óptimos probados a través de la investigación por tipo de diámetro .....	67
Tabla 35. Costo de mano de obra actual de la empresa .....	68
Tabla 36 Costo de MO por Cordón de soldadura proceso actual en la empresa .....	68
Tabla 37. Cálculo del costo de gas empleado actualmente .....	69
Tabla 38. Costo gas por cordón de soldadura uso actual .....	69
Tabla 39. Cálculo costo de energía procedimiento actual.....	69
Tabla 40. Resumen parámetros soldadura actual y parámetros óptimos .....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Soldadura TIG componentes .....	7
Figura 2. Inspección visual prueba dentro de los ensayos no destructivos .....	13
Figura 3. Esquema aparato radiográfico Rayos X .....	14
Figura 4. Uniones de tuberías con y sin rotación .....	17
Figura 5. Imagen de probeta soldada a tope.....	18
Figura 6. Soldadura TIG manual-equipo .....	21
Figura 7. Soldadora Orbital.....	23
Figura 8. Distancia del electrodo a la pieza .....	24
Figura 9. Composición de los electrodos de Tungsteno.....	26
Figura 10. Equipo para soldadura TIG manual .....	30
Figura 11. Cartilla de colores .....	31
Figura 12. Pmd según la unión de soldadura .....	34
Figura 13. Cortes de tubos para preparación de la probeta .....	37
Figura 14. Probetas culminadas para soldadura TIG y posterior prueba de ensayos no destructivos .....	37
Figura 15. Afilado del electrodo de tungsteno .....	39
Figura 16. Galga y electrodo de tungsteno de punta morada.....	39
Figura 17. Parámetros para la soldadura TIG en 21. Orbital .....	40
Figura 18. Inyección de argón en el orbital para el proceso de soldadura.....	40
Figura 19. Soldador realizando las pruebas de parámetros óptimos TIG soldadura manual.....	47
Figura 20. Prueba de ensayos no destructivos, visual e inyección de tinta .....	62
Figura 21. Inspección visual y de inyección de tinta soldadura orbital .....	63
Figura 22. Inspección visual y de tinta soldadura manual .....	64

## RESUMEN

La soldadura por arco denominada *Tungsten Inert Gas* conocida por sus siglas TIG, incorpora gas protector y electrodo no consumible. En tuberías de acero inoxidable que cumplen con especificaciones técnicas ASTM A270-Tipo 304 amerita que la soldadura TIG cumpla con parámetros óptimos sobre todo en industria de alimentos. La investigación tuvo por finalidad determinar los parámetros óptimos y evaluación por ensayos no destructivos de la soldadura TIG para tuberías con especificación ASTM A270-TIPO 304 de diámetros estándares de 1" a 4". Fueron identificados los procesos de soldadura TIG manual en una empresa, se determinaron los parámetros óptimos de soldadura automática en orbital, generando probetas soldadas; fueron probados los parámetros de la orbital encontrando que no es funcional para la soldadura manual, siendo propuesto otros parámetros con los cuales se hicieron los ensayos de soldadura manual. Las probetas fueron evaluadas mediante inspección visual y tintas penetrantes obteniendo que, técnicamente, las probetas de orbital y manual cumplieron con las normas técnicas. Al hacer el análisis de costo se comprobó que los parámetros óptimos son idóneos para las tuberías de 4" a 2" bajando el caudal de argón y controlando el amperaje, reduciendo el costo de producción sin afectar la calidad de la soldadura. En el caso de 1,5" y 1" no hubo diferencias. A partir de la investigación se obtienen parámetros óptimos para soldadura TIG que pueden ser usados por las empresas del sector.

Palabras claves: soldadura, TIG, orbital, ensayos no destructivos, inspección visual, tintas penetrantes, acero inoxidable

## **ABSTRACT**

The Tungsten Inert Gas (TIG) welding is an arc process that incorporates protective gas and non-consumable electrode. Optimal parameters are needed for TIG welding in stainless steel pipes complying ASTM A270-Type 304 technical specifications, especially in the food industry. This paper aimed to determine the optimal parameters of TIG welding and evaluate its performance via non-destructive tests on ASTM A270-TYPE 304 pipes with 1" to 4" standard diameters. The manual TIG welding processes were identified in a company, and the optimal parameters of orbital automatic welding were determined, which generated welding specimens. Also, the orbital parameters were tested resulting in a non-functional manual welding. Different parameters for manual welding tests were proposed. The specimens were evaluated via visual inspection and penetrating inks technically obtaining that the orbital and manual specimens complied with the technical standards. By means of costs analyses it was proven that the optimal parameters are suitable for 4" to 2" pipes, which both lowers the argon flow and control the amperage. This reduces the production costs without affecting the welding quality. There were no differences in 1.5" to 1". TIG welding optimal parameters for the industry were obtained in this research.

Keywords: welding, TIG, orbital, non-destructive tests, visual inspection, penetrating inks, stainless steel

## INTRODUCCIÓN

La soldadura es el proceso de unión de metales llevada a cabo mediante fusión localizada de las piezas a unir empleando calor o presión controlada, a su vez en esta puede hacerse uso de aporte de material a los metales que se desean unir; las propiedades de los materiales cambian en el proceso de soldadura.

En cuanto al origen de la soldadura se remonta al Imperio Romano existiendo la soldadura por Forja en el que por calentamiento de las piezas y fusión por golpes se llevaba a cabo y el Brazing en el que se unían dos metales fundiéndolos con calor y un metal fundido que servía de relleno. Esta soldadura se practicaba en China, África y Europa [1].

En 1895 Le Chatelier y von Linde crean la soldadura por llama oxiacetilénica, es Benardos en 1885 quien desarrolla la soldadura con arco eléctrico y Thompson conocido como el padre de la soldadura en este mismo año realiza un aparato soldador por resistencia eléctrica, para 1900 Fleitman y Edison patentaron otros métodos dando lugar a la Soldadura por Gas [1]. Para 1919 se inicia el uso de gases, principalmente, de helio y argón de protección en soldadura; es en 1924 donde se patenta la soldadura TIG siendo registrada por Devers y Hobard [2].

En relación a la soldadura TIG cuyas siglas provienen de Tungsten Inert Gas, es un procedimiento de soldadura por arco que incorpora gas protector y electrodo no consumible, usa como fuente de energía el arco eléctrico el cual se crea al estar en contacto el material de aporte no consumible con la pieza que será soldada, en tanto que el gas inerte da protección al baño de fusión usado en acero inoxidable [3].

La soldadura en tuberías que cumplen con especificaciones técnicas ASTM A270-Tipo 304 amerita que en el caso de la soldadura TIG cumpla con parámetros óptimos, siendo necesario realizar estudios que los determinen, sobre todo en empresas que llevan a cabo proyectos de ingeniería como la empresa ENGINEERING VALIDATION ANALYSIS EVA.

La empresa ENGINEERING VALIDATION ANALYSIS EVA, es una empresa ecuatoriana que se ha posicionado en el mercado, siendo su fuerte la instalación de

tuberías en acero inoxidable AISI 304. Fue fundada en el año de 2014 y desde entonces ha orientado su gestión al desarrollo de proyectos de ingeniería en el sector de la industria alimenticia, siendo reconocida en el mercado por la calidad que ofrece en los productos, todo soportado en normas y procedimientos establecidos para esta industria.

Esta empresa busca convertirse en un referente en el país en proyectos de ingeniería especializada con alto nivel de eficiencia y calidad brindando soluciones a sus clientes en un marco de seguridad y confianza en los proyectos que emprenda cumpliendo con las normas.

Para alcanzar los objetivos que se ha planteado es necesario realizar evaluaciones dentro de las unidades de operación de la empresa ya que es importante contar con procesos estandarizados que midan la efectividad de los procedimientos, el costo de materiales empleados, la calidad de los productos que se entregan, todo con miras a optimizar los procesos bajo niveles de rentabilidad y calidad.

Específicamente en el área de soldadura de las tuberías de acero inoxidable ASTM A270 – TIPO 304 los procesos son llevados a cabo por el personal que se especializa en esta tarea según los requerimientos de los proyectos que se contratan, a pesar de que el personal es supervisado y se cumplen las exigencias de la norma, no existe una estandarización del proceso.

Por las razones expuestas anteriormente, incide en que el procedimiento de soldadura dependa de la experticia del soldador en cuanto a la experiencia sobre el tipo de soldadura que se espera obtener, es por ello que la empresa amerita que se evalúe el procedimiento a través de ensayos no destructivos y a partir de los resultados establecer el nivel óptimo en cuanto uso de componentes y rentabilidad.

En vista de que la instalación de tuberías en acero inoxidable es el principal nicho de la empresa, es necesario evaluar el proceso actual de la soldadura TIG con miras a que se optimice el uso de consumibles, obteniendo un cordón de soldadura con el nivel de calidad requerido y ajustado a la norma, además de contar con un control eficiente de

los recursos lo que reportará en un mejor manejo de los costos generando una mayor rentabilidad e indicadores económicos.

Para el cliente y la empresa es importante garantizar la calidad de las soldaduras en las tuberías por donde fluye el producto ya que uno de los productos principalmente a tratar en este proceso industrial, es la leche proveniente del ganado vacuno, que es un producto muy delicado; si se empoza o existe grietas en las juntas se puede retener o acumular y llegar a descomponerse, contaminando los lotes de producción.

Las deficiencias en la calidad de las soldaduras pueden ser un error operacional de la mano de obra, utilizar demasiado o poco argón, equipos en mal estado, utilizar tuberías o accesorios con diámetros diferentes, fusionar materiales diferentes, etc.

Con este Proyecto de Titulación se pretende fijar los parámetros del proceso de soldadura TIG en tuberías de acero inoxidable ASTM A270 – TIPO 304 con diámetros de 1", 1 ½", 2", 2 ½", 3" y 4" y determinar los defectos por ensayos no destructivos que pueden aparecer; aquellos que se van a implementar son: inspección visual, tintas penetrantes y prueba de rayos X.

Una vez que se determine los mejores parámetros dentro del procedimiento de soldadura TIG se elaborará un instructivo el cual servirá para sociabilizarlo y establecerlo como manual de soldadura TIG para el sector de la industria de alimentos.

Por lo expuesto la empresa EVA ENGINEERING quien es un proveedor de servicios en el sector alimenticio en Ecuador se interesó en apoyar el desarrollo del presente trabajo de grado brindando el apoyo material y de espacio físico, de forma tal que se implementen las recomendaciones dadas a partir de los resultados obtenidos en la investigación.

Se espera que a través de esta investigación se establezca el mejor proceso que se adapte a los requerimientos de la empresa estandarizando la realización de la soldadura de forma tal, que independientemente de que cambie el soldador el resultado que se obtenga sea siempre positivo.

El trabajo que a continuación se presenta se organiza en cuatro capítulos: el Capítulo I, Marco Teórico y conceptual contiene el Marco Teórico el cual recoge los conceptos fundamentales relacionados con el tema de investigación.

El Capítulo II, Marco Metodológico, presenta el enfoque y tipo de investigación, y el diseño de la Investigación, en este último apartado se describe el procedimiento seguido en la determinación de los parámetros óptimos para la soldadura TIG en tuberías ASTM A 270-Tipo 304 a través de los ensayos no destructivos propuestos: observación visual, tinta penetrante y rayos X.

El Capítulo III recoge los resultados y respectivos análisis determinando el procedimiento óptimo recogido en un protocolo donde se describe el procedimiento el cual será usado por los soldadores de la empresa,

Por último, en el Capítulo IV, se presenta una comparación de costos entre el proceso actual para la realización de la soldadura y el proceso optimizado resultante del trabajo desarrollado.

Los objetivos planteados para el desarrollo de la presente investigación son los siguientes:

Con respecto al grupo objetivo el presente trabajo está dirigido a las empresas que proveen servicios mecánicos a las empresas en el sector alimenticio que no cuenten con un procedimiento interno de soldadura TIG acorde a la norma ASME BPE 2014, generalmente en estos casos el personal técnico realiza la soldadura acorde a la experiencia, generando desperdicios de material, consumibles y una demora significativa en reprocesos por mala soldadura.

Como objetivo general se ha establecido el siguiente:

Determinar los parámetros óptimos y evaluación por ensayos no destructivos de la soldadura TIG para tuberías con especificación ASTM A270-TIPO 304 de diámetros estándares de 1" a 4".

Siendo los objetivos específicos los que se detallan a continuación:

- Revisar la Norma ASME BPE 2014 para definir los requerimientos técnicos que se deben cumplir para la instalación de tuberías en la industria alimenticia. La revisión de la Norma ASME BPE 2014
- Elaborar probetas con soldadura utilizando el proceso TIG y someterlas a inspecciones visuales, tintas penetrantes y rayos X para determinar las fallas presentes.
- Determinar los parámetros óptimos para el procedimiento de soldadura TIG (Tungsten Inert Gas) para tuberías de acero inoxidable con especificación ASTM A270 – TIPO 304 de diámetros estándares de 1", 1 ½", 2", 2 ½", 3", 4".
- Elaborar un instructivo y procedimientos ajustados a la Norma ASME BPE 2014 para la instalación de tuberías de acero inoxidable TIPO 304 unidas por soldadura TIG.
- Analizar los costos del proceso de soldadura TIG realizados bajo estándares de la NORMA ASME BPE 2014 para tuberías de acero inoxidable de diámetros estándares de 1", 1 ½", 2", 2 ½", 3", 4".

# CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

El Capítulo I recoge las bases conceptuales relacionadas con el tema propuesto en la investigación sirviendo de soporte académico haciendo posible realizar los análisis respectivos una vez que se obtuvieron los resultados de la investigación, orientando además el instructivo final del proceso óptimo a seguir en soldadura TIG en la empresa EVA ENGINEERING.

### **1.1. Soldadura TIG**

Las siglas TIG significa Tungsten Inert Gas, es una soldadura que se produce en una atmósfera con gas inerte y electrodo de tungsteno, se usa en uniones que requieren alta calidad o en metales que son altamente sensibles a la oxidación como el titanio o el aluminio, frecuentemente es usada en aceros resistentes al calor, acero inoxidable y aluminio. En este tipo de soldadura no hay escoria, ni salpicadura, tiene la ventaja de que puede ser aplicada a espesores finos desde 0,3mm. Otra característica es que puede ser usada con o sin material de aporte, ofrece una ventaja en relación a la estabilidad y concentración del arco, se puede usar en todas las posiciones y tipos de juntas y se logra terminaciones suaves y lisas en los cordones, emplea además un electrodo de tungsteno, [4]. En la figura 1 se aprecian los elementos que caracterizan la soldadura TIG.

Tal y como se mencionó la soldadura TIG es adecuada para la mayoría de los metales, una de las ventajas es que presenta un arco estable y concentrado, si bien principalmente el proceso es manual, la automatización ha permitido hacer fabricaciones en serie como en el caso de tuberías de pequeño espesor que son soldadas longitudinal o helicoidalmente, también para fijar tubos a placas en intercambiadores de calor, otra de las ventajas es que las soldaduras son lisas, puede emplearse en todo tipo de uniones y posiciones, y se pueden conseguir soldaduras de alta calidad. Como desventaja de la soldadura se tiene que amerita gran habilidad por parte del soldador, no resulta económico para espesores mayores de 10 mm [3].

El equipo usado en este tipo de soldadura está compuesto por: una fuente de energía, máscara, unidad de alta frecuencia. Este tipo de soldadura se emplea en soldadura de

tuberías de aceros aleados primera pasada, aceros inoxidables y aleaciones de níquel, también en equipos de aluminio, titanio y aleaciones de níquel, en placas de los intercambiadores de calor, en soldadura interna de reactores de urea en acero inoxidable y titanio [5].

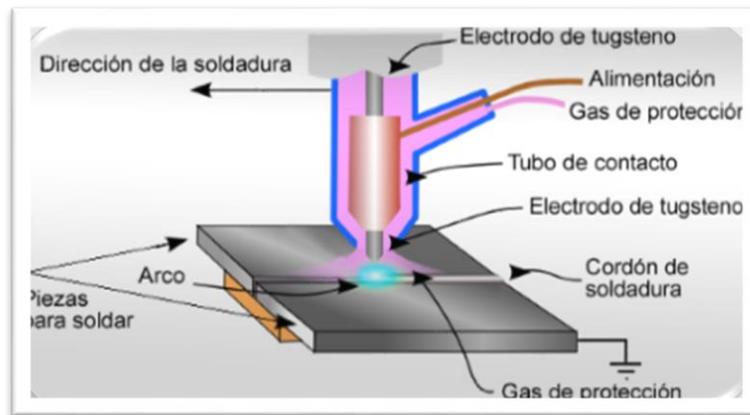


Figura 1. Soldadura TIG componentes, Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garcito, 2008

## 1.2. Aceros inoxidables

El acero inoxidable resulta de una aleación del hierro con el silicio, manganeso, níquel, cromo, molibdeno, cobre, vanadio; algunos de estos elementos se combinan con el carbono durante el enfriamiento y forman carburos y otros compuestos, sirviendo como agentes endurecedores del acero. Cuando se aumenta a un mínimo de 12% de cromo se logra el acero inoxidable con propiedad tanto mecánica como química especial. Es gracias a una capa superficial de óxido de Cromo muy fina que no presenta corrosión, dependiendo del tipo de acero este reaccionará a distintas condiciones de corrosión, ácidos. Para que el acero inoxidable tenga resistencia debe provenir de un adecuado tratamiento térmico, por ello conviene que se obtengan estructuras ferríticas, martensíticas, austeníticas, evitando la formación de carburos de Cromo el cual elimina la resistencia a la corrosión [6].

El acero inoxidable tiene variación en las propiedades físicas si provienen de carbono o son de origen austeníticos. por ello deben ser revisados para realizar soldadura, por ejemplo, los de composición austeníticos poseen coeficientes relacionados con la expansión térmica 50% por encima que los denominados aceros al carbono, requiriendo de que sea controlada la distorsión que puede generarse [5].

Es el hierro el elemento base de los aceros inoxidable, siendo necesario además que la composición de cromo disuelto en una solución por lo menos ha de tener 11,5%, se utiliza nueve veces más Fe-hierro- que Cr-cromo- siendo el elemento fundamental para la aleación en aceros clasificados como 300 y 400. Al agregar cromo en la proporción señalada o superior a esta, se forma una capa de óxido de cromo en la superficie que se expone al ambiente, esta capa es fina, de tonalidad color plata y tiene la propiedad de adherencia actuando como barrera evitando la corrosión [7].

### **1.3. Aceros para tuberías inoxidables**

El acero inoxidable AISI 304 es un tipo de acero austeníticos, teniendo mayor punto de fusión que los aceros al carbono, por ello se necesita menor calor para fundir, este tipo de acero conduce el calor en forma más lenta que los de carbono producto de la conductividad térmica que es menor, al presentar gradientes de temperatura se acelera la deformación del metal base y así permite que la porción de la pieza que es sometida a soldadura permanezca con alta temperatura en un espacio de tiempo mayor [5].

Dentro de los tipos de aceros inoxidables se encuentran:

- Martensíticos: cuya composición del elemento cromo puede ser de 11,5% y 18% siendo este el elemento más importante de aleación encontrando a AISI 410,416,420,431,501,502. En el caso del metal que ha de cumplir la función de aporte se recomienda emplear el tipo de aleaciones con composición química austeníticas, tales como E309, también E310, e incluir E312 de forma tal que se absorba las tensiones en las áreas cercanas al cordón evitando que se formen grietas, en caso de usar electrodos inoxidables martensíticos se recomienda precalentar a 300-350°C las piezas que serán soldadas. Este tipo de acero se usa en turbinas, rodets de turbinas hidráulicas, piezas de válvulas, entre otros [7]. Los aceros clasificados como martensíticos tienen en su composición principalmente una aleación de cromo y carbono. En cuanto a la composición del elemento cromo puede oscilar entre un valor de 10.5 hasta 18 por ciento, en el caso de la presencia del elemento carbono puede alcanzar 1.2% [7].

- Ferríticos: en este caso contienen entre 17- 27 por ciento del elemento cromo como AISI 405, 432, 442, 446. Tienen la particularidad de que no se endurecen por tratamiento térmico, lo hacen con frío moderado, logran la mayor suavidad, ductibilidad y en el recocido ofrecen resistencia ante la posibilidad de corrosión. Este tipo de acero es utilizado en estampado profundo de piezas para recipientes a la industria química y alimenticia, también en adornos arquitectónicos y automotrices [7]. Los aceros de naturaleza ferrítica contienen cromo resultante del proceso de aleación siendo su contenido desde 10.5 hasta llegar a 30 por ciento, teniendo a su vez una concentración inferior a 0.08 por ciento del elemento carbono. Puede adicionarse en diferentes grados de concentración elementos como molibdeno, silicio, aluminio, titanio y niobio, mediante los cuales se logra características diversas [7].
- Austeníticos: tienen la característica de no oxidarse en presencia de cromo, níquel y también frente a manganeso, otra característica es que cuando se encuentran en fase de recocido no tienen magnetismo, otra particularidad es que ante tratamiento térmico no se solidifican. En estos el contenido de níquel y cromo es de 23%, es posible trabajarlos tanto en caliente como en frío [7].
- Dúplex: presentan magnetismo, ante procesos térmicos no se endurecen. Resultan de una aleación entre cromo-níquel-molibdeno, tienen un contenido de cromo de entre 18 y 26% y de níquel de 4.5 a 6.5% [8]. En la tabla 1 se resume las propiedades generales de los aceros inoxidable.

Tabla 1. Aceros Inoxidables y propiedades

<b>Aceros Inoxidables principales propiedades</b>					
Clasificación	Nivel de resistencia ante corrosión	Dureza	Magnéticos	Endurecibles Trat. térmico	Soldabilidad
Martensíticos	Nivel bajo	Elevada	Positivo	Positivo	Nivel pobre
Ferríticos	Nivel bueno	Mediana	Positivo	Negativo	Nivel limitado
Austeníticos	Nivel superior	Elevada	Negativo	Negativo	Nivel superior

La Tabla 1 presenta las propiedades de los aceros inoxidable según el tipo, Fuente: Bonet, suministros y Maquinarias, 2019

#### **1.4. Tipos de tuberías utilizadas en la industria alimenticia**

En relación a las tuberías en la industria alimenticia, estas se corresponden con parte de los sistemas auxiliares que pueden estar en posible contacto con los alimentos y estas deben cumplir con las siguientes características:

- Las tuberías deben ser fácilmente desmontables para su inspección y limpieza.
- Las juntas de unión deben estar realizadas con material sanitario autorizado.
- Las tuberías deben estar construidas por estirado en frío y carecer de soldaduras y rugosidades internas.
- Las tuberías, conducciones y válvulas deben ser totalmente escurribles (pendiente mínima 1%) y no presentar recovecos ni zonas muertas.
- Se respetará una distancia mínima de 10 cm entre tuberías o bien entre la tubería y la pared.
- Los cierres y juntas deberán resistir los cambios de temperatura a los que son sometidos por los diversos tratamientos, sin formar huecos.
- La válvula de mariposa tendrá diseño higiénico cuando sea autovaciante, debido a que no se producirán acumulaciones de suciedad al interrumpirse el flujo [9].

En general en la industria de alimentos a nivel de planta se encuentran los siguientes tipos de tubería:

- Tubería de proceso: permiten la interconexión a equipos de proceso generalmente conectan equipos, también se encuentran tuberías con recorridos desde recipientes, otras intercambian calor desde bombas a algún otro equipo mecánico y de allí conducir a zonas de almacenamiento.

- Tuberías de servicios auxiliares: transportan fluidos suministrando servicios de ayuda a los procesos de las industrias como las tuberías de vapor, condensado, aire de planta y de instrumentos, agua para servicio y contra incendios que funcionan como cabezales generales para la distribución de servicios a toda la planta.
- Tubería de instrumentos: transmiten señales neumáticas o eléctricas para registro o control, se usan para conectar instrumentos en tuberías principales o equipo, no se incluye los que están cerrados y tienen fluidos [10].

En el caso del tubo especial de presión es el comprador el que solicita cual ha de ser el diámetro exterior, así como el grosor de pared promedio, y si requiere que el acabado se realice en caliente o en caso contrario en frío. Las especificaciones establecidas en las Normas ASTM A-249 y ASTM A-269 se utiliza en tuberías previamente calibradas de tipo austenítico con costura, principalmente en 304 y 316 en grados N y L en variados calibres y diferentes tipos de diámetro, son empleados en equipos como calderas, sobrecalentadores, intercambiadores de calor, al igual que en condensadores. En ambientes corrosivos y de altas temperaturas se usan los tipos 304 y 316 en grado N y L para ambientes corrosivos y altas temperaturas [11].

### **1.5. Norma ASME y su importancia para la evaluación de calidad de tubería de acceso inoxidable en la industria alimenticia**

Las Normas ASME se usa a nivel mundial y son consideradas de las más avanzadas en atención de demandas de la industria y la seguridad del público en general. En la norma se establecen requisitos para uso de materiales, componentes, diseño, fabricación, ensamblaje, instalación e inspección de pruebas para tuberías en las que se procesan todo tipo de fluido. La norma toma en consideración los parámetros más importantes para tuberías usadas en diferentes ámbitos [12].

En la norma se incluyen códigos de prueba de desempeño cuyas siglas en inglés son PTC, en las que se incluyen normas y procedimientos para la planificación, preparación, ejecución y presentación de informes de prueba de desempeño, indicando el estado de funcionamiento de equipos [12].

La norma establece como criterios importantes la coloración por la zona afectada por la soldadura admitiendo como aceptable hasta grado 3 de la cartilla de colores, ver figura 10, requerimiento de perfil de soldadura aceptable des alineamiento no mayor al 15% del espesor de la pared para diámetros menores a 4", concavidad externa e interna, máximo hasta un 10% del espesor de la pared, no es aceptable la falta de penetración y la convexidad externa máximo hasta 0,015" y la interna hasta 10% del espesor de la pared, las discontinuidades (fisuras, porosidades o grietas) no aceptables, el cordón de soldadura debe ser recto y uniforme solo es aceptable que la parte más estrecha sea mayor de un 50% de la parte más ancha del cordón [12].

#### **1.6. Características sépticas de las instalaciones alimenticias, condiciones de riesgo que pueden estar presentes**

Hoy en día la industria alimenticia requiere de la producción de alimentos inocuos y de buena calidad en condiciones de higiene sanitaria por ello se amerita del diseño de instalaciones, máquinas, tuberías que respondan a un diseño con características de higiene de forma tal que a lo interno la fábrica permanezca limpia en el proceso de producción, o que se logre alcanzar un grado de limpieza adecuado con el menor esfuerzo posible. Así es que los equipos y tuberías ameritan una concepción higiénica en los que se limite la contaminación microbiana, se mejore la limpieza y sea de práctico mantenimiento. Por ello la condición de asepsia o higiénica debe considerar exigencias mecánicas, tecnológicas de alimentos y de microbiología [9].

De esta forma las condiciones de asepsia se integra al proceso productivo, se establecen procedimientos para que los métodos sean eficaces; en la industria alimenticia se controla el conjunto de procesos que intervienen en la elaboración de los productos, esta evaluación es denominada análisis de riesgo y control de puntos críticos en el que el correcto desarrollo de las labores de limpieza y desinfección ocurran como parte de los procedimientos [13].

#### **1.7. Métodos de Inspección de soldadura enfocado a las tuberías-ensayos no destructivos: inspección visual, rayos x y tintas penetrantes**

Los ensayos no destructivos denominados por las siglas en inglés NTD consisten en la realización de pruebas aplicadas a un material sin que se altere sus propiedades mecánicas, físicas, o químicas. Estos tipos de ensayos contribuyen a identificar

discontinuidades superficiales e internas en dichos materiales, en piezas soldadas, y piezas sin soldar; también permiten evaluar el nivel de calidad de producción [14].

Los ensayos no destructivos se basan en el uso de la física específicamente lo que tiene que ver con ondas acústicas, electromagnéticas, y absorción. Se agrupan en los siguientes métodos: metrología para medición de espesores por un lado, o recubrimiento, nivel de llenado; defectología en el cual se detectan discontinuidades, presencia de corrosión, afectación por agentes ambientales y fugas; por último, caracterización para la determinación química, mecánica y estructural [14]

La inspección visual, tintas penetrantes y rayos X son tipos de ensayos no destructivos, sirven para inspeccionar y comprobar fisuras internas en componentes de máquinas, espesores de tubería, uniones de soldadura que puedan tener ciertas irregularidades, o deterioro en equipos que sirvan para el almacenamiento [15].

La inspección visual permite apreciar el estado superficial en que se encuentra determinada pieza, se puede apreciar en el caso de que se haya aplicado elevadas temperaturas o se encuentre corrosión, es un paso previo antes de usar un procedimiento de mayor detalle. En la inspección visual puede hacerse uso de lupas, anteojos, espejos, videocámaras [15].

Es decir, en la inspección visual se llevan a cabo en secuencia acciones a lo largo de todo el proceso productivo asegurando la calidad de las uniones soldadas, se identifica materiales que incumple su especificación, así se facilita la corrección de defectos durante el proceso de fabricación evitando que luego sean rechazados. Parte del procedimiento en la inspección visual se muestra en la figura 2.

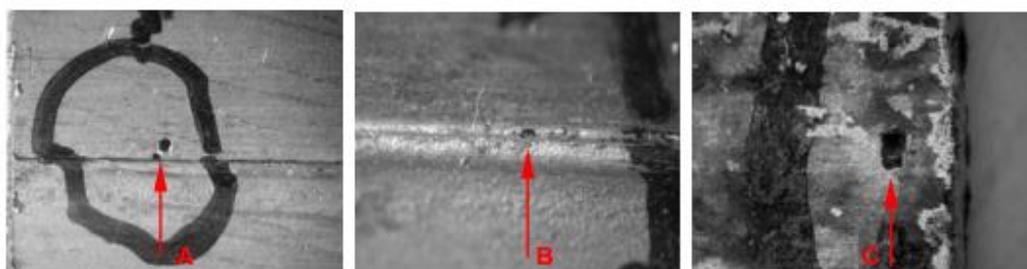


Figura 2. Inspección visual prueba dentro de los ensayos no destructivos, Obrutsky et al (2007)

La inspección visual con líquidos penetrantes permite detectar discontinuidades como grietas y estas se corresponden con fisuras ó poros. El tinte es llevado por acción capilar hacia una grieta delgada [16]. La visualización puede ser remota, esta se usa en caso de que se requiera hacer la observación visual y esta no pueda efectuarse, en la inspección visual remota se encuentra la endoscopia y la fibroscopia, esta última permite una excelente definición de las imágenes, iluminación y acceso a las zonas que tengan niveles de dificultad de acceso [17].

En los ensayos no destructivos es usada la radiografía a nivel industrial, por medio de esta se ofrece información detallada sobre discontinuidades internas, pudiendo determinar el nivel de calidad del producto en la evaluación, el resultado a obtener dependerá del tipo de radiación que sea usada [18]. En la Figura 3 se esquematiza un aparato de Rayos X.

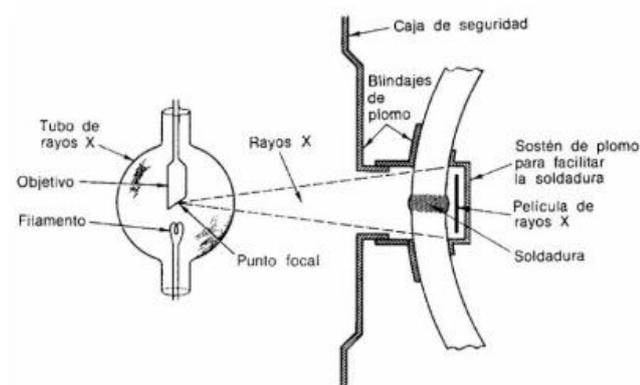


Figura 3. Esquema aparato radiográfico Rayos X, <http://queaprendemoshoj.com>

En la evaluación por radiografía se pasa un haz de radiación-rayos X- de características electromagnéticas, este haz atraviesa la pieza e incide en una película que es fotosensible, registrándose la imagen de la pieza: Luego al ser revelada se muestra la imagen, en caso de que se observe variaciones en la densidad fotográfica existen discontinuidades internas. El examen por rayos X permite detectar discontinuidades, se puede aplicar a diferentes materiales, muestra el tamaño y la forma que presentan las discontinuidades [19].

En el uso de Rayos X debe ser tomada en consideración la capacidad de penetración según el rango de espesor del acero para ser sometido a inspección, en el caso de las

secciones gruesas estas se inspeccionan mediante el uso de películas rápidas y grandes tiempos de exposición, siendo más práctico el uso de una rutina de trabajo donde sea usada una alta energía, según el grosor del acero estos pueden ser inspeccionados usando una exposición de varios minutos de duración y con una película de velocidad media [20].

La prueba de rayos X a su vez mide las diferencias de grosor o de densidad física de un componente que se compara con el material que lo bordea. También puede determinar fallas internas que se ubican por debajo de la superficie de la pieza. Al hablar de las ventajas de esta prueba se tiene que es posible identificar fallas internas, se evidencian variaciones significativas de la composición del material, y se hace una grabación permanente [20].

El uso de esta prueba está ceñida a que sea muy necesario asegurar que no existen fallas internas como en calderas, turbinas, que son sistemas de alta presión, en ensambles mecánicos, aunque en este caso existe limitación en función de la concisión, y de los componentes que se colocan, además del nivel del líquido de relleno en aquellos sistemas que se encuentren sellados [20]

La prueba de rayos X en tuberías se utiliza principalmente para la industria petrolera en función de que estas deben resistir altas presiones ameritando realizar esta prueba por la magnitud de las obras [21]. En el caso de tuberías de acero inoxidable AISI-304 en la industria de alimentación su función es transportación alimentos en estado líquido, teniendo presiones de trabajo bajas, por ello no es necesario realizar la prueba de rayos X, ya que es una prueba costosa [22].

#### **1.7.1. Acreditación de evaluadores para la realización de ensayos no destructivos**

El personal que realiza pruebas de ensayos no destructivos en diferentes industrias debe ser acreditado directamente por la American Society for Non Destructive Testing ASNT o la API 510 y 570. También existen empresas locales que ofrecen el curso acreditando evaluadores de nivel I, II, III, de los principales ensayos no destructivos siguiendo normas internacionales entre las cuales se encuentran las normas ISO 9712, SNT TC 1A y NAS 410 [17].

## 1.8. Soldadura en tuberías

La soldadura TIG en tubería se realiza en las siguientes posiciones:

- Posición Plana 1G: El primer pase de raíz se realiza rotando la tubería, en una posición plana, luego se lleva a cabo la segunda pasada o pase de relleno sobre el pase de raíz previo al esmerilado. Se hace la soldadura del pase de relleno, se utilizan los electrodos según el procedimiento, se funde bien los extremos de la soldadura, se usa una progresión en zig-zag. Se realiza el tercer pase de acabado el cual permite unir juntas de tuberías.
- Posición horizontal 2G: El primer de raíz es soldado rotando la tubería realizando la soldadura en posición horizontal, la segunda pasada de relleno pasa sobre el de raíz previa a un esmerilado o blanqueado, el tercer pase de acabado une las juntas de tuberías.
- Posición vertical 5G: El primer para de soldadura, o pase de raíz se realiza haciendo la soldadura en posición vertical. El segundo pase de relleno se realiza sobre el pase de raíz antes de un esmerilado o blanqueado, el tercer pase de acabado une las juntas de las tuberías.
- Posición sobrecabeza 6G: Se realiza la soldadura del primer pase de raíz en la tubería haciéndolo en posición vertical-sobrecabeza-, el pase de relleno se hace sobre el de raíz antes de un esmerilado o blanqueado, finalmente se realiza el pase final de acabado [23].

En el caso de la tubería TIG 304 L las juntas son las de bisel tubería cedula, y las de a tope para los procedimientos de soldadura TIG sin aporte según la norma ASTM A270 -304L [23].

En la Figura 4 se aprecia la unión en tuberías según ANSI/AWS A3.0:2001

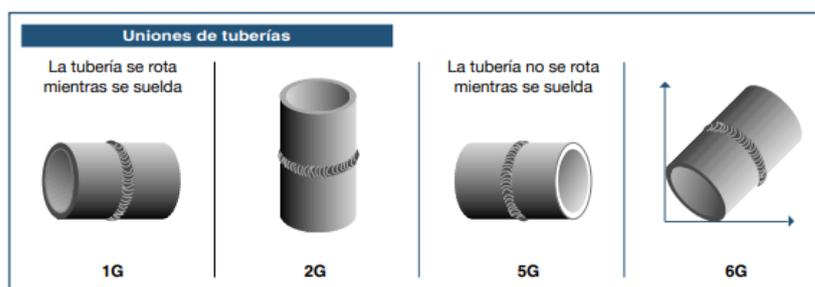


Figura 4. Uniones de tuberías con y sin rotación [8]

### 1.9. Especificación técnica ASTM A270-TIPO 304

Dentro de la industria el acero inoxidable el tipo 304 es uno de los más usados dentro de los aceros austénicos cuya principal aleación es cromo-níquel, en recocido es no magnético, y en frío se torna magnético. En el caso del tipo 304L es usado en soldadura evitando la formación de carburos de cromo en la fase de enfriamiento en la región que es sometida al calor de la soldadura, combina resistencia a la corrosión y es de fácil fabricación. Las especificaciones del Tipo 304 son: ASTM A240, ASTM A666, AMS 5513 Tipo 304L: ASTM A240, ASTM A666, AMS 5511 [24].

Los Tipos 304 y 304L no se endurecen mediante tratamiento térmico. Para el recocido se debe calentar a 1850 °F a 2050 °F (1010 a 1121 °C) y enfriar a índices suficientemente altos de 1500 °F a 800 °F (816 a 427 °C) para evitar la precipitación de carburos de cromo. Se debe aliviar la tensión de las piezas trabajadas en frío a 750 °F (399 °C) durante ½ a 2 horas. Tienen la particularidad de que pueden ser soldados con la mayoría de las técnicas de soldadura de fusión o resistencia, en caso de usar material de relleno el tipo 308 es el que mayormente es usado [24].

Dentro de los usos a los que se destina el Tipo 304 se tienen los siguientes:

- Se usan para equipos químicos y tuberías
- Intercambiadores térmicos
- Equipos y utensilios de manipulación de lácteos y alimentos
- Recipientes y componentes criogénicos
- Aplicaciones arquitectónicas y estructurales expuestas a atmósferas no marinas [24]

## CAPÍTULO II

### MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se describen los diferentes métodos con los correspondientes procedimientos a tomar en relación a la elaboración de las probetas para el ensayo no destructivo, la selección de tubería, la presentación de los parámetros óptimos de soldadura TIG manual y automático, el proceso de desarrollo de los ensayos no destructivos, los pasos óptimos para realizar la soldadura y finalmente el método propuesto para el análisis de costo a fin de seleccionar el procedimiento óptimo desde el punto de vista técnico y de rentabilidad financiera.

#### 2.1. Procedimiento de elaboración de las probetas

Para la elaboración de las probetas se sigue la norma ASTM designación E8-83 la cual está dirigida a pruebas que se realizan a tuberías, las probetas son soldadas a tope por fusión. Las medidas a considerar se pueden observar en la Figura 5:

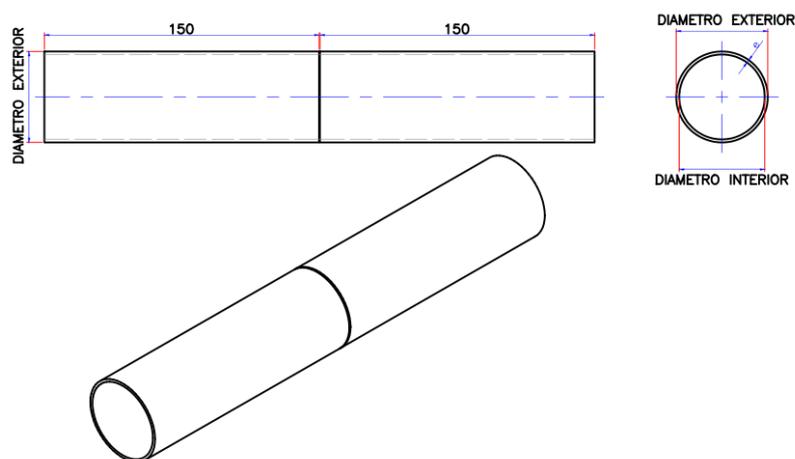


Figura 5. Imagen de probeta soldada a tope, Irieno, A (2009)

#### 2.2. Metodología para la selección de la tubería

La selección de los diámetros de tubería 304 de 1" a 4" para la realización del ensayo no destructivo responde a razones técnico-económicas relacionadas con la necesidad de estandarización del proceso y la búsqueda de un proceso óptimo con la mejor rentabilidad; dentro de las tuberías comerciales de acero inoxidable la tubería 304 es una de las más demandadas en la industria de alimentos ya que cumple con las especificaciones técnica ASTM A 270 tipo 4.

La presente investigación va dirigida al estudio de la tubería de acero inoxidable AISI 304 debido a que es más económica con respecto a otras del mismo material, ofreciendo las mismas condiciones de calidad. Siendo uno de los principales productos que son comercializados en la industria alimenticia, sin embargo, en la actualidad es necesario contar con un instructivo de ejecución de la soldadura TIG manual que previamente haya sido probado siguiendo los parámetros de la soldadura con orbital, ya que no está calibrado el proceso de producción de las piezas y las proporciones de los componentes implícitos en este, además de no contar con un análisis de costo.

El estudio incorpora una prueba de ensayo no destructivo a fin de identificar defectos en el material soldado separándolo de aquellos materiales con soldaduras en óptimas condiciones, identificar el proceso de producción y los costos, de forma tal de estandarizar un proceso de producción óptimo de soldadura TIG en tuberías de acero inoxidable.

Con base a lo expuesto se requiere realizar pruebas de ensayos no destructivos para encontrar el procedimiento óptimo a nivel de uso de componentes en el proceso de soldadura TIG, de forma tal, de seguir ofertando este producto y al mismo tiempo controlar el proceso de producción y uso de componentes implícitos.

### **2.3. Metodología para la aplicación de la soldadura TIG**

La selección del mejor método de soldadura parte del hecho de que está destinada para la industria de alimentos, por lo que amerita que la tubería de acero inoxidable se encuentre en óptimas condiciones, así que, dentro del grupo de soldaduras, es la soldadura TIG la que ofrece las mejores condiciones.

La soldadura TIG para el fin de la producción que se ofrece presenta las siguientes ventajas descritas en la tabla 2:

Tabla 2. Ventajas del uso de la soldadura TIG tuberías ASTM A 270-tipo 304

<b>Ventaja</b>	<b>Característica</b>
Producción de residuos	No se produce escoria
Producción de proyecciones	No se producen proyecciones al no existir transporte de metal en el arco
Soldadura según tipo de industria	Produce soldaduras lisas y regulares, ideal para la trasportación de fluidos en la industria de alimentos
Con respecto al Arco	Arco estable y concentrado
En relación al tipo de uniones	Se emplea en todo tipo de uniones y posiciones
Control de la penetración de pasada	Control excelente de la penetración en la pasada de raíz
Control de la fuente de energía	Permite el control independiente de la fuente de energía y del metal de aportación
Efecto sobre la composición química y del metal	Afecta relativamente poco a la composición química y propiedades del metal base durante el proceso de soldadura

---

La Tabla 2 contiene las ventajas del uso de la soldadura TIG para tuberías ASTM A 270-tipo 304,  
Fuente: Ingeniería Mecánica Tutorial N°48

Todas estas ventajas son factores determinantes para que esta sea la soldadura seleccionada por el tipo de tubería de acero inoxidable con la que se trabaja.

### **2.3.1. Soldadura Manual TIG**

En cuanto al equipo de soldadura básico Manual TIG la Figura 6 presenta el equipo usado para llevar a cabo la soldadura TIG manual:

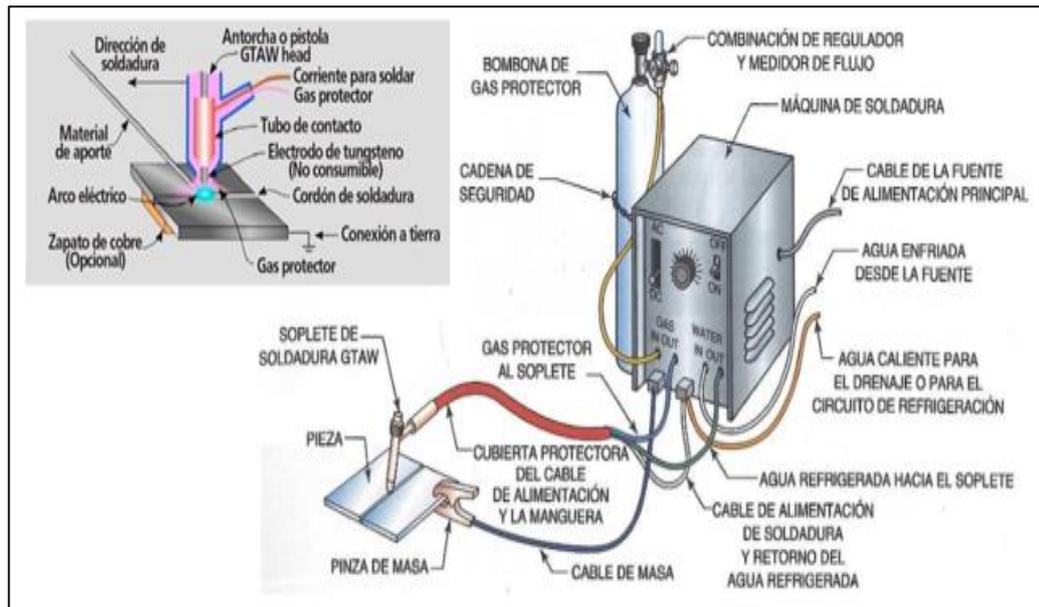


Figura 6. Soldadura TIG manual-equipos, Arboleda A. , 2016

Se aprecian los componentes que la integran, tales como las mangueras para recircular el agua de enfriamiento para recirculación y las que recircular agua de enfriamiento desde la antorcha hasta la máquina de soldadura; además la manguera para gas protector hacia la antorcha o pistola, la bombona de gas inerte unida a la cadena de seguridad, el soplete de soldadura donde se coloca el electrodo no consumible. Es importante controlar el ambiente externo ya que en caso de existir oxígeno la soldadura se carboniza, como alternativa puede ser usada una carpa para controlar este factor [4].

El procedimiento a seguir en la soldadura TIG Manual según ACERIND S.C. [25]. Es presentado en la Tabla 3.

Tabla 3. Procedimiento a seguir en la soldadura TIG Manual

Procedimiento	Descripción
Tipo de corriente	-Se debe usar corriente directa, con electrodo negativo, como alternativa puede ser usada corriente pulsante
Control de la intensidad	-Se recomienda controles en la intensidad por medio de un pedal con el cual el operario aumenta o disminuye la corriente durante la soldadura

---

Continuación Tabla 3.

---

Tipo de afilamiento del electrodo	-La punta de electrodo más usada es la que tenga un afilamiento que vaya de veinte grados y veinticinco grados con extremo despuntado en 0,25 mm de diámetro
Toberas y diámetros de las copas	-Las toberas deben ser adaptadas a la aplicación, copas de diámetros más grandes permiten una mayor protección a los gases, las de menor tamaño logran que el arco se sostenga estable favoreciendo la visibilidad, como alternativa usar lente gaseoso ya que se forma un flujo laminar por medio de pantallas especiales dentro de la tobera
Revisión de las conexiones	-Revisar las conexiones asegurando que no existan pérdidas en el sistema
Inicio del Arco	-Iniciar con alta frecuencia o arco piloto  -Si no cuenta con el dispositivo anterior dar inicio al arco frotando la superficie con el electrodo, evitando contaminar el electrodo
Control sobre la parte fundida de la soldadura	-Disminuir la dimensión de lo fundido, ya que al solidificar queda un hueco produciendo grietas.  -Si no cuenta con pie de corriente, incrementar la velocidad para soldar previo al levantamiento del electrodo
Ruptura del arco	-Al romper el arco sostener la antorcha por encima del cráter por espacio de segundos de forma tal que baje la temperatura con la atmósfera de argón que sirve de protección
Protección de la soldadura	-Se debe brindar una protección gaseosa a la soldadura y mantener dentro del escudo gaseosos el metal, el argón será el escudo gaseosos ya que brinda una buena penetración

---

La Tabla 3 contiene el procedimiento de soldadura TIG, Fuente: ACERIND S.C

### 2.3.2. Soldadura Orbital

En el procedimiento automático se encuentra la soldadura orbital que permite realizar la soldadura en forma circular de tubos, en donde el cabezal de soldadura debe permanecer inmóvil ya sea en un soporte o se lo fija a las líneas, mediante la soldadura TIG llevada a cabo por fusión se utiliza material de aporte de tungsteno que sea no consumible que se hace girar u “orbitar” alrededor del material o producto a ser soldado, se alcanza una automatización casi perfecta, debido a que el cabezal y las piezas a soldar permanecen fijos, encontrándose en movimiento solo el electrodo que orbita alrededor, se obtiene una soldadura continua y más limpia y se reducen los costos [26].

El sistema de soldadura orbital está compuesto por: una fuente de alimentación que ofrece los parámetros de control para la soldadura, del arco de corriente que permite la correcta fusión de los materiales, además se encuentra el cabezal de soldadura orbital que también es controlado por la fuente de alimentación [26]. En la figura 7 se observa la orbital.



Figura 7. Soldadora Orbital, Gamarra (2020)

### 2.4. Metodología para la selección de los parámetros óptimos de la soldadura

Los parámetros parten de las recomendaciones técnicas para lograr cordones de soldaduras de alta calidad buscando la optimización de los mismos, que serán evaluados y fijados a través de un proceso automático y manual.

- **Distancia:** la distancia que separa el electrodo de la pieza influye en el sostenimiento del arco eléctrico, igual la distancia del tramo que sobresale de

la tobera de la pinza, debiendo considerar 5 mm como máximo de salida del electrodo fuera de la tobera; 5 mm como máximo para la distancia de la punta del electrodo a la pieza [2]. La figura 8 esquematiza la distancia de la punta del electrodo a la pieza.

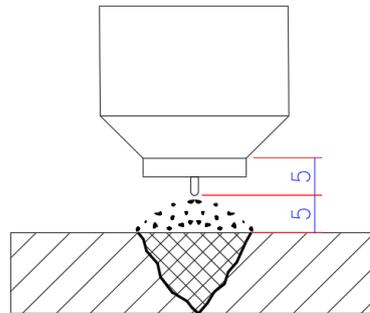


Figura 8. Distancia del electrodo a la pieza, INDURA

- **Ángulo:** la inclinación de la pinza porta electrodos debe estar entre  $75^{\circ}$ - $80^{\circ}$  para facilitar el trabajo y el control visual del cordón. Una mayor inclinación afecta la protección de la soldadura debido a que se produce una mala incidencia de la campana de gas protector sobre el baño [2].
- **Caudal de gas:** debe estar comprendido entre los 6 y 12 litros/minuto garantizando así que la soldadura sea óptima [2].
- **Intensidad de corriente:** dependerá del electrodo a ser usado, en la tabla 4 se observa la intensidad de corriente para soldadura TIG en función del diámetro de la tubería de acero inoxidable.

Tabla 4. Amperaje para soldadura TIG según el diámetro de la tubería

Procedimiento de soldadura	Diámetro	Espesor	Tiempo de soldadura orbital	Caudal de argón cámara interna	Caudal de argón cámara externa	Amperaje
	[pulgadas]	[mm]	[segundos]	[lts/min]	[lts/min]	[A] max/min
TIG	1	1,651	132,6	15	18	75/30
TIG	1,5	1,651	153,9	15	18	75/30
TIG	2	1,651	174,2	15	18	75/30
TIG	2,5	1,651	196,4	15	18	75/30
TIG	3	1,651	240,3	15	18	75/30
TIG	4	2,1082	360,5	15	18	90/35

La Tabla 4 contiene el amperaje por diámetro en soldadura TIG, Fuente: ITW, Orbital Tube Welding System, Training Guide

- **Electrodo de Tugsteno:** los electrodos tienen un código de colores y en función del trabajo a realizar deben ser elegidos debiendo considerar el diámetro y el tipo de material a soldar.

Según el color del electrodo este será usado:

- Electrodo punta verde: se usa para soldadura AC, especialmente en aluminio, magnesio, níquel y aleaciones
- Electrodo punta azul: se usa en acero inoxidable, acero al carbono, aleación de níquel, titanio y aluminio
- Electrodo punta roja: emite radiaciones alfa por lo que se prohíbe en algunos países, tiene buena ignición de arco, usado en DC para acero, acero inoxidable, aleaciones de níquel, titanio y cobre; en AC puede usarse para soldar aluminio.
- Electrodo punta negra: usado en corte de plasma y en soldadura WL20
- Electrodo punta dorada: usado en proceso de soldadura automatizado
- Electrodo punta blanca y punta marrón: usado poco, en soldadura con corriente AC, tiene alta resistencia a la contaminación

- Electrodo punta gris: en soldadura DC, con encendido de arco en corriente bajas, usado en equipos de orbitales de tubo y cañerías, en piezas pequeñas, no se usa en altos amperajes [27]. En la figura 9 se presenta la composición de los electrodos.

CLASIFICACIÓN	COMPOSICIÓN	COLOR	CORRIENTE	SOLDA
WP	PURO	VERDE	AC	ALUMINIO Y MAGNESIO
WT 10	1 % THORIO	AMARILLO	DC	ACERO, NIQUEL, TITANIO, COBRE
WT 20	2 % THORIO	ROJO	DC	ACERO, NIQUEL, TITANIO, COBRE
WT 30	3 % THORIO	MORADO	DC	ACERO, NIQUEL, TITANIO, COBRE
WT 40	4 % THORIO	NARANJA	DC	ACERO, NIQUEL, TITANIO, COBRE
WZ 8	0.8 % ZIRCONIO	BLANCO	AC	ALUMINIO Y MAGNESIO
WL 10	1 % LANTANO	NEGRO	AC / DC	ACERO, NIQUEL, TITANIO, COBRE, ALUMINIO
WL 20	2 % LANTANO	AZUL	AC / DC	ACERO, NIQUEL, TITANIO, COBRE, ALUMINIO
WC 20	2 % CERIO	GRIS	AC / DC	ACERO, NIQUEL, TITANIO, COBRE, ALUMINIO
WS 2	TIERRAS RARAS	TURQUEZA	AC / DC	ACERO, NIQUEL, TITANIO, COBRE, ALUMINIO

Figura 9. Composición de los electrodos de Tungsteno, INLAIHER Internacional, 2018

Electrodo de Tungsteno morado E3: cumple con las normas EN ISO 6848 y ANSI/AWS A5.12/A5.12M. Es usado en la soldadura de cualquier material y corrientes tanto AC como DC. Un buen afilado dará mayor durabilidad y hará que la corriente se concentre en la punta, a muy pocos mm<sup>2</sup> de la superficie se logra un arco estable. Se recomienda realizar el afilado en forma longitudinal a 60° de ángulo, en máquina y no en esmeriladora así no se contaminará el E3 [28].

La limpieza implica: controlar la presencia de grasas, aceites, óxidos, ya que pueden ser fuentes de contaminación del baño fundido, interfiriendo desfavorablemente en la calidad final del cordón de soldadura [2].

Los parámetros a seguir de la soldadura TIG en Orbital son los siguiente:

- Seleccionar en la fuente de alimentación los parámetros de control para la soldadura del arco de corriente descritos en el proceso manual de forma tal que exista la correcta fusión de los materiales.
- Controlar el cabezal de soldadura orbital mediante la fuente de alimentación,

- Controlar la emisión del gas en el momento de realizar el proceso de soldadura mediante la fuente de alimentación siguiendo lo establecido en los parámetros óptimos descritos para soldadura TIG [26].

El procedimiento establecido para la presente investigación en la identificación de los parámetros óptimos de soldadura TIG considera lo siguiente:

Las variables a considerar para probar los parámetros óptimos de soldadura en la investigación serán el suministro de argón y el amperaje, esta última variable se regula en función del diámetro. En tubería de 1 a 2” el espesor es de 1,65mm por lo tanto la circunferencia de la tubería es menor, por ende, el proceso de soldadura se culmina en un corto tiempo, siendo necesario regular tanto el caudal de argón como el amperaje evitando calentamiento excesivo durante el proceso de soldadura ya que si no es controlado puede ser perforado el tubo. A partir de 2 a 2,5” se mantiene el espesor de 1,65 variando el amperaje para mantener la misma velocidad de cordón.

El amperaje en tuberías de 1” hasta 3” de igual espesor (1,65mm) se usará: 75 amperios para las tuberías de 1” a 3”; en tubería de 4” se usará 90 amperios siguiendo esta pauta se espera tener un mismo nivel de penetración y resultado en todos los diámetros considerados. El flujo de argón interno para generar la cámara de soldadura se realizará con 15 lt/minuto para la cámara interna y 18 litros/minuto para la cámara externa para todas las probetas de diámetros considerados, evaluando que se obtenga una soldadura de color adecuado y limpio a lo interno. Detalle de los parámetros establecidos para la realización de la soldadura TIG y su evaluación se presentan en la tabla 5.

Tabla 5. Amperaje y caudal de Argón soldadura TIG Orbital

Procedimiento de soldadura	Diámetro	Espesor	Tiempo de soldadura orbital	Caudal argón cámara interna	Caudal de argón cámara externa	Amperaje
	[pulgadas]	[mm]	[Segundos]	[lts/min]	[lts/min]	[A] max/min
TIG	1	1,651	132,6	15	18	75/30
TIG	1,5	1,651	153,9	15	18	75/30
TIG	2	1,651	174,2	15	18	75/30
TIG	2,5	1,651	196,4	15	18	75/30
TIG	3	1,651	240,3	15	18	75/30
TIG	4	2,1082	360,5	15	18	90/35

En la tabla 5 se presenta el amperaje y caudal de Argón para cámara interna y externa evaluación de los parámetros, Fuente: ITW, Orbital Tube Welding System, Training Guide

## 2.5. Metodología para la elaboración de los procedimientos de soldadura por tipo de material y diámetro de la tubería

Para llevar a cabo el procedimiento de la soldadura se debe considerar cada uno de los aspectos mencionados los cuales se presentan en la tabla 6:

Tabla 6. Procedimiento a seguir para realizar la soldadura TIG

Procedimiento	Descripción
Uso de equipo de alta frecuencia	-Para iniciar la soldadura y establecer el arco, evitando tocar el con el electrodo la pieza evitando la contaminación de este y de la pieza
Regulación del nivel de intensidad	-Equipo de soldeo con un dispositivo de control que regule el nivel de intensidad de corriente que suministra el equipo, el operario aumenta o disminuye la intensidad de corriente en función de las condiciones de la soldadura, al final de la soldadura logra disminuir el tamaño del baño de fusión evitando la formación de grietas al final del cordón

---

Continuación Tabla 6

---

Control de la velocidad	-En caso de no tener dispositivo de control aumentar la velocidad de avance en los últimos tramos de soldadura para así conseguir disminuir el tamaño del baño de fusión
Uso de Argón	-Empleo de Argón como gas de protección, ofrece estabilidad del arco y facilidad de encendido, baja conductividad térmica, favoreciendo la concentración de calor en la parte central del arco, generando una penetración adecuada en el centro del cordón. Permite proteger al metal que ha sido fundido del ambiente
Uso de electrodos	-Uso de electrodos de tungsteno aleados con torio (Th) o con circonio (Zr) que mejoren el punto de fusión del tungsteno puro, y favorezcan el encendido y estabilidad del arco
Afilado del electrodo	-Mantener el extremo del electrodo con un correcto afilado, ya que define la calidad de la soldadura, un electrodo bien afilado en forma de cono con punta aguda dará un arco estable con buena penetración, en el caso de un electrodo mal afilado dará un baño ancho, mala penetración y un arco errático; y en el caso de que sea muy puntiagudo existe la posibilidad de que ocurran inclusiones o que se funda el extremo del electrodo  -Sostener la pistola TIG o pinza porta-electrodos sobre el punto final de la soldadura por varios segundos para la solidificación, esperar que baje la temperatura con el uso del chorro de salida del gas protector

---

La Tabla 6 contiene la descripción del proceso, Fuente: Ingeniería Mecánica Tutorial N° 52

La Figura 10 ilustra el equipo utilizado en la soldadura TIG para soldadura manual

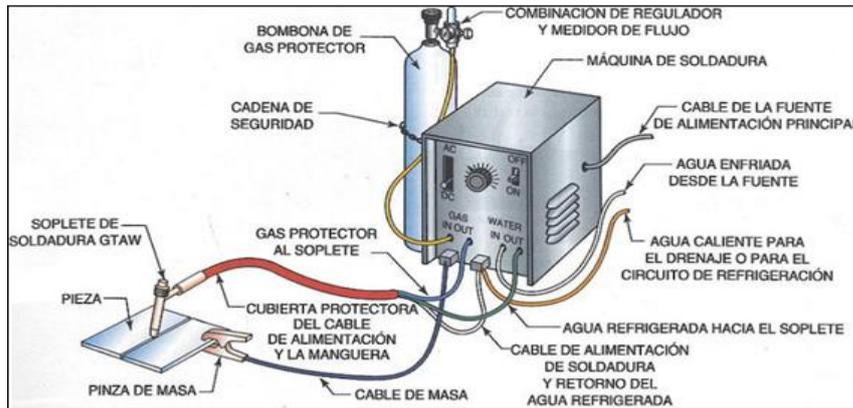


Figura 10. Equipo para soldadura TIG manual, Arboleda, 2016

## 2.6. Metodología de aplicación de los ensayos no destructivos

### 2.6.1. Inspección Visual

En la observación visual convencional o directa se establece el siguiente procedimiento detallado en la Tabla 7:

Tabla 7. Pasos a seguir para iniciar la Inspección Visual

Procedimiento	Pasos a seguir
Antes de soldar	<ul style="list-style-type: none"> <li>-  Chequear WPS, PQR, WPQ</li> <li>- Desarrollar sistemas para identificar rechazos</li> <li>- Chequear equipos de soldaduras Chequear calidad de MB y MA Chequear calidad y precisión de las juntas</li> <li>- Chequear montaje y alineamiento Chequear limpieza de la junta</li> <li>- Chequear precalentamiento cuando se requiera</li> </ul>
Durante la soldadura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Chequear variables</li> <li>- Inspección visual de cada pase</li> <li>- Chequear la limpieza entre pases Chequear la temperatura entre pases Chequear colocación y secuencia de pases, chequear las superficies de respaldo</li> </ul>
Después de la soldadura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar END adicional cuando se requiera</li> <li>- Preparar los reportes de inspección</li> </ul>

La Tabla 7 contiene las fases de la inspección visual, Fuente: Hechavarría Marcos, 2019

La inspección visual también se acompaña de una cartilla de colores basado en la Norma AWS D18.2:2009 para corroborar el tono interno de la tubería del cordón de soldadura, esta es una guía de niveles de decoloración para soldar sobre y en el interior de tubos de acero inoxidable, haciendo uso de una cartilla de uso general se puede verificar los niveles de decoloración de la soldadura por comparación, reconociendo la soldadura óptima.

Esta cartilla se construyó a partir de pruebas en las que se usó diferentes contenidos de oxígeno en el argón como gas de purga en el interior de un tubo en el momento de la soldadura, registrando fotográficamente los resultados plasmándolos en la cartilla de colores logrando plasmar el resultado de una soldadura óptima [29].

En la Figura 11 al interior de los tubos de acero inoxidable se aprecia la decoloración producida por la diferencia de oxígeno empleado en el argón como gas purga.

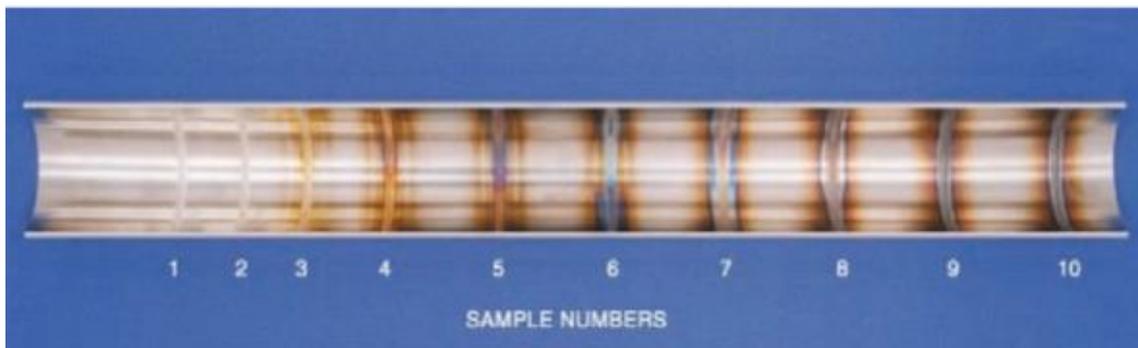


Figura 11. Cartilla de colores, Campbell, 2014

### 2.6.2. Líquidos penetrantes

Para la prueba de líquidos penetrantes se deben tomar en cuenta las consideraciones presentadas en las tablas 8 y 9 donde se resume las fases de la inyección de tinta, tiempo de duración, y la intensidad de luz.

Tabla 8. Pasos a seguir para uso de líquidos penetrantes

Pauta	Descripción
Tiempo de permanencia de la tinta:	-Es determinante en el éxito del ensayo para encontrar discontinuidades en el material inspeccionado. El tiempo está determinado por normas y el fabricante de la tinta.

Continuación Tabla 8

Medición del tiempo	-Inmediatamente a la aplicación de la tinta debe medirse el tiempo. -Para acero inoxidable la norma ASME establece que no sea mayor a 5 minutos en un rango de temperatura de 10°C a 52°C.
Tiempo de revelado	-Este inicia una vez que la capa del revelador aplicada está completamente seca. -El tiempo mínimo y máximo de espera para iniciar la inspección es de 10 minutos y 1 hora pudiendo variar con base a las especificaciones del fabricante. -No puede sobrepasarse el tiempo ya que deberá repetirse el ensayo.

La Tabla 8 contiene las pautas de la prueba de líquidos penetrantes, Fuente: Castro, 2015

Tabla 9. Tiempo vs. Fases de inyección de tinta e intensidad lumínica

Fase	Tiempo
Preparación de la superficie	-3 a 5 minutos
Proceso de aplicación de tinta	-Tiempo mínimo 10 minutos incluyendo tiempo de permanencia con T° 5°C-52°C/tiempo máximo 2 horas según ASTM-1417
Remoción de tinta	-Tiempo mínimo minuto/tiempo máximo hasta 2 minutos
Revelado	-Tiempo mínimo 10 minutos/máximo 1 hora
Iluminación	-En la norma ASTM E-165 se establece un umbral de iluminación más exigente igual a 100 fc (1000 Lx). -50 fc (foot-candel) equivalente a 500 lux, esto significa que se debe preferir la luz del sol y que debe estar bien iluminado el sitio de trabajo, acorde con ASME, sección V, Art. 6, T-676.3. -Bajo techo donde llega luz indirecta -Se restringe el horario de 09:00 a 15:00
Proceso para la aplicación del líquido penetrante	-Aplicar el líquido penetrante, tipo II tintas permanentes o visibles a la superficie de la pieza a ser examinada, para que penetre en las aperturas, remover el exceso de líquido
Aplicación de solvente	-Aplicar método solvente revelado no acuoso para tintas penetrables visibles
Evaluación de discontinuidades	-Evaluar e interpretar discontinuidades aplicando criterios de aceptación/rechazo

La Tabla 9 indica el tiempo por fase de inyección de tinta e intensidad lumínica, Fuente: Castro, 2015

## 2.7. Metodología de análisis de costo

Para la selección del método de análisis de costo de la soldadura TIG se sigue el propuesto por INDURA, donde se plantea que el costo de soldadura resulta de integrar: costo de consumibles, el costo de mano de obra, que son costos directos y gastos generales que incluye depreciación, capacitación del personal, supervisión técnica.

Son empleadas las siguientes fórmulas para el cálculo de los componentes de los costos:

Costo de mano de obra:

El valor del costo de mano de obra es la relación entre el pago del soldador por metro lineal soldado y se expresa en  $\frac{(\$)}{m}$  [8]

$$\text{Costo mano de Obra} \frac{(\$)}{m} = \frac{Pmd * \text{Valor de M.O}}{\text{Velocidad deposición} * F. \text{de operación}} \quad (1)$$

m: metros lineales

$Pmd \left( \frac{Kg}{m} \right)$ : cantidad de metal de aporte necesario para completar una unión de soldadura

Valor de M.O  $\left( \frac{\$}{h} \right)$ : es el costo de pagar el salario a los trabajadores que participan en la soldadura TIG

Velocidad de deposición  $\left( \frac{kg}{h} \right)$ : cantidad de material de aporte depositado en una unidad de tiempo

F. de operación %: relación entre el tiempo en que ha existido arco y el tiempo real o tiempo total pagado

- a. **Peso de metal depositado Pmd:** Es la cantidad de metal de aporte necesario para completar una unión de soldadura. Relación para determinar el peso del metal depositado. La figura 12 detalla el Pmd según la unión de soldadura [8].

$$Pmd = \text{Área Seccional} \times \text{longitud} \times \text{densidad aporte} \quad (2)$$

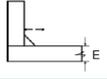
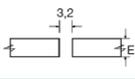
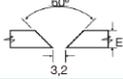
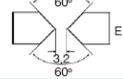
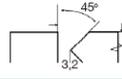
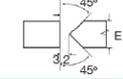
Unión de soldadura						
Espesor (E) mm	METAL DEPOSITADO (kg/ml) (acero)					
3,2	0,045	0,098				
6,4	0,177	0,190	0,380		0,358	
9,5	0,396		0,638		0,605	
12,5	0,708		1,168		1,066	
16	1,103		1,731		1,707	1,089
19	1,592		2,380	1,049	2,130	1,449
25	2,839		3,987	2,578	3,554	2,322
32				3,768		3,380
37,5				5,193		4,648
51				8,680		7,736
63,5				13,674		11,617
76				18,432		16,253

Figura 12. Pmd según la unión de soldadura, Manual INDURA (2010)

En este caso no se va a multiplicar por la densidad de aporte ya que este tipo de soldadura es a tope y por fusión.

**b. Factor de operación:** es la relación entre el tiempo en que ha existido arco y el tiempo real o tiempo total pagado

Tabla 10. Factor de operación

Proceso	Factor de Operación%
SMAW	5-30
GMAW	10-60
FCAW	10-60
GTAW	5-20
SAW	50-100

La Tabla 10 contiene el factor de operación para diferentes tipos de soldadura, Manual INDURA (2010)

**c. Flujo gas:** cantidad de gas necesario para protección por unidad de tiempo

Tabla 11. Flujo gas por tipo de soldadura

Proceso	Flujo gas (m <sup>3</sup> /hr)
MIG sólido	0,8-1.2
TIG	0,5-1.0

La Tabla 11 presenta el valor de flujo gas, Manual INDURA (2010)

**d. Costo Gas:** el costo del gas resulta de medir el costo de argón invertido por metro de la soldadura

$$\text{Costo Gas} \frac{(\$)}{m} = \frac{Pmd * \text{Flujo gas} * \text{Valor gas}}{\text{Velocidad deposición}} \quad (3)$$

$Pmd = \left(\frac{Kg}{m}\right)$ : relación para determinar el peso del metal depositado

$\text{Flujo gas} = \left(\frac{m^3}{h}\right)$ : cantidad de gas necesario para protección por unidad de tiempo

$\text{Valor gas} = \left(\frac{\$}{m^3}\right)$ :

$\text{Velocidad deposición} = \left(\frac{kg}{h}\right)$ :

**e. Costo de consumibles:** varía entre los diferentes procesos de soldadura porque cada uno tiene rendimientos diversos, la cantidad de consumibles también varían.

#### **f. Costo energía eléctrica**

Para el cálculo de la energía eléctrica se utiliza la siguiente formula:

$$Kw/hora = \text{Volts} \times \text{Amps} \times \text{Factor de potencia} \times \text{tiempo en horas} / 1000 \quad (4)$$

También existe una estimación para todos los procesos de soldadura por fusión el cual es un factor de 4 KW h/kg de soldadura de acero depositado. Este valor considera la perdida de energía en el equipo y el máximo de carga KVA, siendo un valor promedio [8].

## **CAPÍTULO III**

### **PROCEDIMIENTOS Y PARAMETROS ÓPTIMOS DE LA SOLDADURA**

En el presente Capítulo se exponen los resultados del procedimiento seguido para la determinación de los parámetros óptimos de la soldadura TIG, para tuberías de diámetro estándar de 1” y 4” con especificación técnica ASTM a270-tipo 304. Se inicia aplicando la soldadura orbital determinando los parámetros establecidos por el fabricante para la obtención de soldaduras TIG con el uso razonado de los consumibles.

Seguido, para el proceso de soldadura manual fueron tomados los parámetros de la Orbital bajo los cuales los soldadores que participaron en esta fase de la investigación fueron instruidos. También se presenta el registro que llevan los supervisores en torno al uso de consumibles en la soldadura manual TIG.

Los ensayos no destructivos están avalados por una empresa de servicio técnico especializado avalada por el Servicio de Acreditación Ecuatoriano. A partir de los resultados de dicha evaluación se constató la validez de los parámetros óptimos de la soldadura TIG establecidos en la investigación.

Finalmente, se establece una comparación entre la situación actual del proceso de la soldadura TIG en la empresa y los parámetros óptimos para realizar la soldadura resultante de la investigación efectuando un análisis de costo.

#### **3.1. Preparación inicial de Probetas**

El procedimiento seguido para la preparación de las probetas sigue la norma ASTM designación E8-83 para pruebas de probetas soldadas a tope por fusión, se detalla a continuación cada uno de los pasos seguidos:

- Se realiza el corte de los tubos de acero inoxidable utilizando una hoja de sierra o torno según la disponibilidad, en ambos casos es supervisado que los cortes sean perpendiculares, de forma tal que al hacer la junta no se produjeran aperturas, la Figura 13 detalla el procedimiento.



Figura 13. Cortes de tubos para preparación de la probeta, Gamarra (2020)

- Los cortes realizados para la obtención de las probetas como se muestra en la Figura 14, se hicieron con las siguientes medidas:
- En la tubería de 1" a 3" se cortaron pedazos de tubo de 150 mm de largo
- En la tubería de 4" se cortaron pedazos de tubos de 100mm de largo.



Figura 14. Probetas culminadas para soldadura TIG y posterior prueba de ensayos no destructivos, Gamarra (2020)

### **3.2. Procedimiento de soldadura para la tubería de 1" a 4" pulgadas en orbital y obtención de parámetros según especificaciones del fabricante**

En este apartado se presenta la soldadura automatizada en orbital realizada siguiendo los parámetros que son establecidos por el fabricante.

#### **3.2.1. Parámetros de soldadura automatizada en Orbital**

En la soldadura orbital fue usado material de aporte de tungsteno de tipo no consumible que giró alrededor de cada uno de los tubos empleados para la preparación de las probetas.

Los parámetros técnicos seguidos fueron:

- Control de grasas, aceites, óxidos evitando así la contaminación del baño fundido
- La separación entre la punta del electrodo y la pieza fue de 3mm logrando el sostenimiento requerido para el arco eléctrico. El electrodo fue morado E3 cumpliendo las normas en ISO 6848 y ANSI/AWS A5.12/A5.12M
- El ángulo de inclinación del electrodo fue afilado a 45° y colocado perpendicularmente

Con base a las especificaciones del manual del proveedor se presentan los parámetros establecidos por espesor de la tubería y el tiempo requerido para la soldadura haciendo un eficiente uso de argón, así como los niveles del programa y parámetros básico incluyendo el amperaje.

Los parámetros básicos del Orbital para el nivel 2 del programa se detallan en la Tabla 12:

Tabla 12. Parámetros Soldadura Orbital

<b>PARAMETROS DE SOLDADURA ORBITAL</b>			
Wall (espesor de pared)	Grado de rotación	Amperaje máximo y mínimo	Velocidad [mm/min]
0,065 in (1,65mm)	0°-360°	75/30	4.5
0,098 in (2.01mm)	0°-360°	90/35	4.5

La Tabla 12 contiene el grado de rotación, amperaje, tiempo y velocidad, Fuente: Manual Orbital, 2014

### 3.2.2. Obtención de probetas diámetro 1 a 4” en soldadura automática TIG orbital

- Una vez que se organizó el área de taller se procedió a realizar la limpieza de las probetas, se usó alcohol ya es efectivo para limpiar la grasa.
- El electrodo de tungsteno fue afilado a 45°, ya que permite tener un cordón de soldadura intermedio ni tan ancho ni tan delgado esto se lo puede observar y determinar en el manual de usuario de la orbital, y colocado perpendicularmente detalle en la Figura 15.

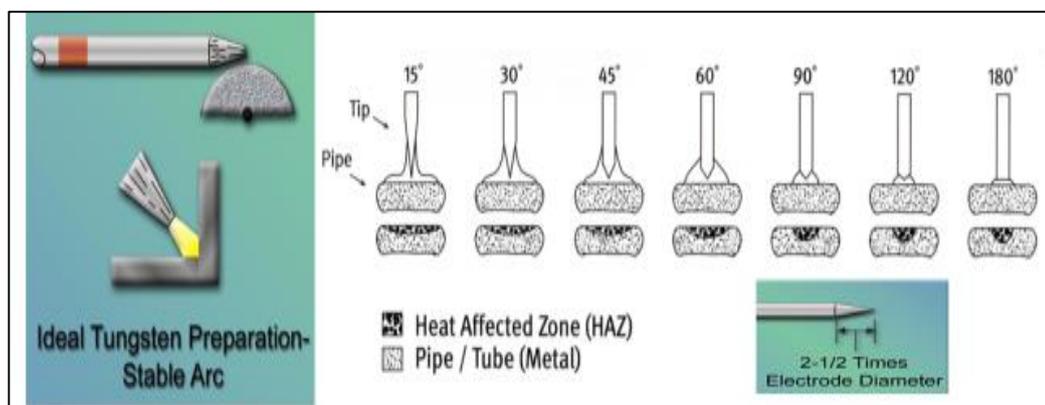


Figura 15. Afilado del electrodo de tungsteno, INLAHER Internacional, 2018

- Se procedió a establecer la distancia de colocación del electrodo mediante el empleo de la galga (figura 16) se hizo tres pruebas respectivas de soldadura con las siguientes distancias; 1,5 mm, 3mm, 5mm, obteniendo el mejor resultado de soldadura con 3mm ya que se evitó la perforación de la tubería y se obtuvo el cordón deseado.



Figura 16. Galga y electrodo de tungsteno de punta morada, Gamarra (2020)

Siguiendo los parámetros presentados por el orbital para soldadura TIG, se trabajó con 74 amperios y 15 lt/min, manteniéndolo para la tubería de 1" a 3", debido a que tienen el mismo espesor de pared que es de 1,65 mm. La figura 17 presenta la pantalla de la orbital donde se presenta la lectura de los parámetros que se fijan para la soldadura TIG.

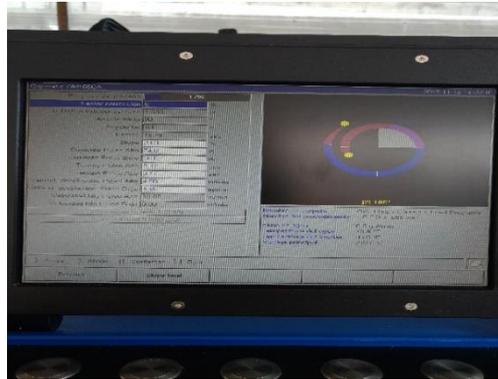


Figura 17. Parámetros para la soldadura TIG en 21. Orbital, Gamarra (2020)

En la Figura 18 se puede observar que del lado izquierdo ingresa el gas en donde se encuentra la cámara de gas inerte, importante para obtener un cordón de soldadura limpio en la parte interna, la salida del lado contrario del cabezal es necesario para que no explote cuando se esté soldando, la purga empieza cuando el proceso de soldadura también lo hace.



Figura 18. Inyección de argón en el orbital para el proceso de soldadura, Gamarra (2020)

A continuación, se presentan los resultados de la soldadura TIG con orbital bajo los parámetros establecidos por el manual del proveedor para las probetas de 1" a 4" en las Tablas 15-18.

Tabla 13. Parámetros soldadura TIG orbital 1 "

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico
1" -001	15	75/30	132.6	
1" -002	15	75/30	132.6	
1" -003	15	75/30	132.6	

La Tabla 13 contiene los parámetros según diámetro en orbital para soldadura TIG, Fuente: ITW, Orbital Tube Welding System, Training Guide

Tabla 14. Parámetros soldadura TIG orbital 1,5"

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico
1,5" -001	15	75/30	153.9	
1,5" -002	15	75/30	153.9	
1,5" -003	15	75/30	153.9	

La Tabla 14 contiene los parámetros según diámetro en orbital para soldadura TIG, Fuente: ITW, Orbital Tube Welding System, Training Guide

Tabla 15. Parámetros soldadura TIG orbital 2"

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico	
2" -001	151	75/30	174.2		
2" -002	15	75/30	174.2		
2" -003	15	75/30	174.2		

La Tabla 15 contiene los parámetros según diámetro en orbital para soldadura TIG, Fuente: ITW, Orbital Tube Welding System, Training Guide

Tabla 16. Parámetros soldadura TIG orbital 2,5 "

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico
2,5" -001	15	75/30	174.2	 
2.5" -002	15	75/30	174.2	 
2,5" -003	15	75/30	174.2	 

La Tabla 16 contiene los parámetros según diámetro en orbital para soldadura TIG, Fuente: ITW, Orbital Tube Welding System, Training Guide

Tabla 17. Parámetros soldadura TIG orbital 3''

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico	
3'' -001	15	75/30	196.4		
3'' -002	15	75/30	196.4		
3'' -003	15	75/30	196.4		

La Tabla 17 contiene los parámetros según diámetro en orbital para soldadura TIG, Fuente: ITW, Orbital Tube Welding System, Training Guide

Tabla 18. Parámetros soldadura TIG orbital 4 "

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico
4" -001	15	90/35	360.5	 
4" -002	15	90/35	360.5	 
4" -003	15	90/35	360.5	 

La Tabla 18 contiene los parámetros según diámetro en orbital para soldadura TIG, Fuente: ITW, Orbital Tube Welding System, Training Guide

### 3.2.2. Preparación de probetas en la soldadura manual TIG

La preparación de las probetas seguida para la soldadura TIG manual se describe a continuación:

- Se realizó la limpieza de las probetas garantizando que estuvieran libre de grasa
- Se controló la corriente e intensidad por el operario
- El afilado del electrodo a 25°C con despuntado de 0,25mm
- Inicio del arranque y formación del arco
- Control del área fundida de la soldadura evitando grieta
- Ruptura del arco manteniendo la antorcha sobre el cráter por un tiempo corto para bajar la temperatura con la protección que brinda el argón. La figura 19 es una muestra de los trabajos realizados por los soldadores.



Figura 19. Soldador realizando las pruebas de parámetros óptimos TIG soldadura manual, Gamarra (2020)

### 3.2.3. Resultados de la soldadura TIG manual siguiendo los parámetros establecidos en la orbital

Se llevó a cabo la soldadura manual siguiendo los parámetros definidos en la orbital, obteniendo como resultados fallas en la soldadura de las probetas, hubo perforaciones y quemado de la soldadura. Esto se debió a que el soldador controla la ejecución de la soldadura a través del movimiento de la muñeca, mientras que la orbital tiene una variación del amperaje controlada por pulsaciones mecánicas. En función de este resultado se ajustó caudal y amperaje en las siguientes pruebas. Ver tabla 19.

Tabla 19. Parámetros Soldadura TIG Manual siguiendo los parámetros de la orbital

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico
1" -001	15	75/30	67	
1,5" -001	15	75/30	145	
2" -001	15	75/30	153	
2.5" -001	15	75/30	204	
3" -001	15	75/30	209	
4" -001	15	75/3	297	

La Tabla 19 contiene los parámetros establecidos por la orbital para soldadura TIG, Fuente: ITW, Orbital Tube Welding System, Training Guide

En virtud de los resultados obtenidos se consultó a los soldadores con base a su experiencia bajo que amperaje lograban un cordón de soldadura similar a la que resulta del orbital, se estableció un promedio de amperaje entre el valor máximo y mínimo de la orbital y el resultado se comparó con los valores dados por los soldadores, definiendo el amperaje a usar según el tipo de tubería. Para las pruebas se usó primero como caudal 15 lts/min evaluando el cordón de soldadura obtenido haciendo el respectivo registro fotográfico. Luego se hizo otra prueba, pero esta vez empleando un caudal de 10lts/min.

También fue necesario identificar los parámetros que son empleados en la empresa para la realización de la soldadura TIG manual tabla 20. En las tablas 21 a 32 se muestra las pruebas realizadas:

Tabla 20. Parámetros actuales soldadura TIG-manual

Diámetro de la tubería	Amperaje	Caudal de Argón
[plg]	[Amp]	[lt/min]
1"	30-45	5-7
1,5"	40-45	10
2"	50-55	10-15
2.5"	50-55	20
3"	55-60	20
4"	55-60	25

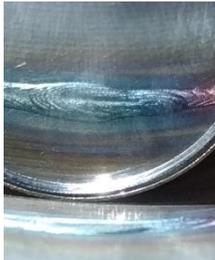
La Tabla 20 contiene el amperaje y argón por diámetro usado, Fuente: Gamarra (2020)

Tabla 21. Prueba N° 1 identificación de parámetros óptimos tubería de 1"

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico	
1"-001	15	45	67		
1"-002	15	45	67		
1"-003	15	45	67		

La Tabla 21 presenta la modificación de amperaje y uso de un caudal de 15 lt/min para tubería de 1", Gamarra (2020)

Tabla 22. Prueba N° 2 identificación de parámetros óptimos tubería de 1,5 "

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico	
1,5"-001	15	45	145		
1,5"-002	15	45	145		
1,5"-003	15	45	145		

La Tabla 22 presenta la modificación de amperaje y uso de un caudal de 15 lt/min para tubería de 1,5", Fuente: Gamarra (2020)

Tabla 23. Prueba N° 3 identificación de parámetros óptimos tubería de 2''

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico
2''-001	15	50	153	
2''-002	15	50	153	
2''-003	15	50	153	

La Tabla 23 presenta modificación de amperaje y uso de un caudal de 15 lt/min para tubería de 2'', Fuente: Gamarra (2020)

Tabla 24. Prueba N° 4 identificación de parámetros óptimos tubería de 2,5 "

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico
2,5"-001	15	55	204	
2.5"-002	15	55	204	
2,5"-003	15	55	204	

La Tabla 24 contiene la modificación de amperaje y uso de un caudal de 15 lt/min para tubería de 2,5 ", Fuente: Gamarra (2020)

Tabla 25. Prueba N° 5 identificación de parámetros óptimos tubería para tubería 3''

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico	
3''-001	15	55	209		
3''-002	15	55	209		
3''-003	15	55	209		

La Tabla 25 presenta la modificación de amperaje y uso de un caudal de 15 lt/min para tubería de 3'', Gamarra (2020)

Tabla 26. Prueba N° 6 identificación de parámetros óptimos tubería para tubería 4''

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico	
4''-001	15	75	297		
4''-002	15	75	297		
4''-003	15	75	297		

La Tabla 26 contiene la modificación de amperaje y uso de un caudal de 15 lt/min para tubería 4'', Fuente: Gamarra (2020)

Tabla 27. Prueba N° 7 identificación de parámetros óptimos tubería 1 "

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico	
1"-001	10	45	67		
1"-002	10	45	67		
1"-003	10	45	67		

La Tabla 27 contiene la modificación de amperaje y uso de un caudal de 10 lt/min para tubería 1", Fuente: Gamarra (2020)

Tabla 28. Prueba N° 8 identificación de parámetros óptimos tubería 1 "

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico	
1,5"-001	10	45	145		
1,5"-002	10	45	145		
1,5"-003	10	45	145		

La Tabla 28 presenta la modificación de amperaje y uso de un caudal de 10 lt/min para tubería de 1,5". Fuente: Gamarra (2020)

Tabla 29. Prueba N° 9 identificación de parámetros óptimos tubería 2''

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico
2''-001	10	50	153	
2''-002	10	50	153	
2''-003	10	50	153	

La Tabla 29 presenta la modificación de amperaje y uso de un caudal de 10 lt/min para tubería de 2'', Fuente: Gamarra (2020)

Tabla 30. Prueba N° 10 identificación de parámetros óptimos tubería 2,5 "

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico
2,5"-001	10	55	204	
2,5"-002	10	55	204	
2,5"-003	10	55	204	

La Tabla 30 presenta la modificación de amperaje y uso de un caudal de 10 lt/min para tubería de 2,5 ". Fuente: Gamarra (2020)

Tabla 31. Prueba N° 11 identificación de parámetros óptimos tubería 3''

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico	
3''-001	10	55	209		
3''-002	10	55	209		
3''-003	10	55	209		

La Tabla 31 presenta la modificación de amperaje y uso de un caudal de 15 lt/min para tubería 3'', Fuente: Gamarra (2020)

Tabla 32. Prueba N° 12 identificación de parámetros óptimos tubería 4''

Código de Probeta	Caudal de argón [lts/min]	Amperaje [Amp]	Tiempo [seg]	Registro fotográfico	
4''-001	10	75	297		
4''-002	10	75	297		
4''-003	10	75	297		

La Tabla 32 presenta modificación de amperaje y uso de un caudal de 10 lt/min para tubería 4'', Fuente: Gamarra (2020)

### 3.3. Prueba de Ensayos no Destructivos

Mediante la prueba de Inspección Visual y Líquidos penetrantes fue realizada la inspección de las probetas soldadas en orbital y bajo procedimiento manual. En la prueba de líquido penetrante se usó un tipo II –SKL-WP2 con revelador SKD-S2. La Figura 20 presenta al técnico especialista en el área de taller para la realización de las pruebas.



Figura 20. Prueba de ensayos no destructivos, visual e inyección de tinta, Gamarra (2020)

#### 3.3.1. Resultados Ensayo Orbital inspección visual y líquidos penetrantes

En este informe se puede apreciar tanto en la inspección visual como de tintas que los cordones son limpios, no tienen discontinuidades, no poseen fisuras ni grietas, sin embargo, en uno de ellos se presentó porosidades, los cuales según la norma B31.3 no representa un problema o riesgo para la junta soldada; puede apreciarse en la figura 21. En el Anexo 1 se presenta el informe de la inspección del ensayo de soldadura TIG en orbital.

En la Inspección Visual las probetas están acorde a la Norma ASME-BPE 2014, no se detectaron fallas de coloración, el perfil de soldadura es aceptable, no presentan discontinuidades, el cordón es recto y uniforme.



Figura 21. Inspección visual y de inyección de tinta soldadura orbital, informe técnico

### 3.3.2. Resultados ensayo Soldadura Manual para constatación de parámetros óptimos

Los ensayos de soldadura manual - inspección visual y tintas penetrantes- para la verificación de parámetros óptimos arrojaron que no existe presencia de discontinuidades, ni de fisuras, grietas o poros, por lo que los cordones de soldadura cumplen los estándares técnicos que exige la norma B31.3, tal y como se muestra en la Figura 22. El Anexo 2 recoge dos informes para dos pruebas realizadas de la soldadura manual en los diferentes diámetros 4" -1".



Figura 22. Inspección visual y de tinta soldadura manual, informe técnico

## **CAPÍTULO IV**

### **COMPARATIVO DE COSTO DEL PROCESO DE SOLDADURA TIG MANUAL**

El análisis de costo de soldadura TIG siguió el método propuesto por INDURA en el que el costo de soldadura integra los siguientes rubros: consumibles, mano de obra, costos directos y gastos generales que incluye depreciación, capacitación del personal y supervisión técnica.

Los cálculos que se presentan corresponden al proceso de soldadura TIG manual actual de la empresa donde se llevó a cabo la investigación y los resultados de los parámetros óptimos de soldadura obtenidos.

El cálculo de los costos se realizó en el programa Microsoft Excel siguiendo las fórmulas establecidas tal y como se mencionó anteriormente por INDURA. En el caso específico de los gastos generales no se incluyeron ya que el análisis se centra en los costos directamente relacionados con el cordón de soldadura de forma tal que cualquier empresa relacionada con el medio pueda hacer uso.

En lo referente al peso del metal depositado-Pmd- para el tipo de soldadura empleada TIG no existe aporte.

En cuanto al factor de deposición, se usó un dato general y constante al no existir aportación en este tipo de soldadura. Siendo el parámetro de velocidad empleado una constante: 1,4 Kg/h tal y como se recomienda en el manual de INDURA [8].

Detalle del procedimiento de cálculo se presenta a continuación en relación a los costos actuales de soldadura de la empresa y los costos relacionados con los parámetros óptimos de soldadura TIG obtenidos a partir de la presente investigación:

#### 4.1. Costos actuales de soldadura TIG en la empresa

Los costos toman en consideración el pago que se realiza al soldador por metro lineal de soldadura y el costo de mano de obra por cordón de soldadura, para finalmente presentar el costo total por cordón de soldadura

Tabla 33. Calculo del costo total por cordón bajo los procedimientos actuales para la soldadura TIG manual por tipo de diámetro de tubería

Diámetro [plg.]	Diámetro [m]	Espesor [m]	Longitud de Circunferencia [m]	Tiempo [s]	FLUJO DE GAS [lts/min]	FLUJO DE GAS [m3/hr]	AMPERAJE [Amp]	Velocidad deposición [kg/h]	Pmd [kg/m]	COSTO M.O. [\$m]	COSTO GAS [\$m]	COSTO M.O. por CORDON [\$]	COSTO GAS por CORDON [\$]	COSTO ENERGIA por CORDÓN [\$]	COSTO TOTAL POR CORDON [\$]
4	0,101	0,0021	0,319	297	25	1,5	60	1,4	10,766	372,50	275,35	118,90	87,89	1,09	<b>207,88</b>
3	0,076	0,0017	0,239	209	20	1,2	60	1,4	8,436	291,72	172,51	69,83	41,30	0,77	<b>111,90</b>
2 1/2	0,063	0,0017	0,199	204	20	1,2	55	1,4	6,323	218,79	129,38	43,65	25,81	0,69	<b>70,14</b>
2	0,050	0,0017	0,159	153	15	0,9	55	1,4	5,269	182,32	80,86	29,10	12,91	0,51	<b>42,52</b>
1 1/2	0,038	0,0017	0,119	145	10	0,6	45	1,4	4,215	145,86	43,13	17,46	5,16	0,40	<b>23,02</b>
1	0,025	0,0017	0,079	67	10	0,6	35	1,4	3,161	109,39	32,35	8,73	2,58	0,14	<b>11,45</b>

La Tabla 33 incluye el uso de consumibles, el tiempo empleado por cordón de soldadura, flujo de gas, amperaje y el costo por metro lineal y cordón de soldadura TIG, fuente: Gamarra, 2020

#### 4.2. Cálculos de los costos de soldadura de los parámetros óptimos probados a través de la investigación

A continuación, se presenta el cálculo de los costos de soldadura por metro lineal y por cordón de soldadura empleando los parámetros óptimos probados en la presente investigación por tipo de diámetro de tubería:

Tabla 34. Costos de soldadura de los parámetros óptimos probados a través de la investigación por tipo de diámetro

Diámetro [plg.]	Diámetro [m]	Espesor [m]	Longitud de Circunferencia [m]	Tiempo [s]	FLUJO DE GAS [lts/min]	FLUJO DE GAS [m3/hr]	AMPERAJE [Amp]	Velocidad deposición [kg/h]	Pmd [kg/m]	COSTO M.O. [\$ /m]	COSTO GAS [\$ /m]	COSTO M.O. por CORDON [\$]	COSTO GAS por CORDON [\$]	COSTO ENERGIA por CORDÓN [\$]	COSTO TOTAL POR CORDON [\$]
4	0,101	0,0021	0,319	297	15	0,9	75	1,4	10,766	372,50	165,21	118,90	52,73	1,36	<b>172,99</b>
3	0,076	0,0017	0,239	209	15	0,9	55	1,4	8,431	291,72	129,38	69,83	30,97	0,70	<b>101,51</b>
2 1/2	0,063	0,0017	0,199	204	10	0,6	55	1,4	6,323	218,79	64,69	43,65	12,91	0,69	<b>57,24</b>
2	0,050	0,0017	0,159	153	10	0,6	50	1,4	5,269	182,32	53,91	29,10	8,60	0,47	<b>38,17</b>
1 1/2	0,038	0,0017	0,119	145	10	0,6	45	1,4	4,215	145,86	43,13	17,46	5,16	0,40	<b>23,02</b>
1	0,025	0,0017	0,079	67	10	0,6	45	1,4	3,161	109,39	32,35	8,73	2,58	0,18	<b>11,49</b>

La Tabla 34 incluye el uso de consumibles, el tiempo empleado por cordón de soldadura, flujo de gas, amperaje y el costo por metro lineal y cordón de soldadura TIG, fuente: Gamarra, 2020

### 4.3. Costo del proceso de soldadura manual TIG actual en la empresa

Las Tablas 35, 36 y 37 presentan un resumen de los costos según el diámetro de tubería por metro lineal y por cordón de soldadura.

#### a. Costo de Mano de Obra

Tabla 35. Costo de mano de obra actual de la empresa

Diámetro de tubería	\$/m
4"	372,50
3"	291,72
2,5"	218,79
2"	182,32
1,5"	145,86
1"	109,39

La Tabla 35 presenta el costo de soldadura manual TIG actual de la empresa, Fuente: Gamarra (2020)

#### b. Costo de Mano de Obra por cordón de soldadura

Tabla 36 Costo de MO por Cordón de soldadura proceso actual en la empresa

Diámetro tubería	\$/cordón
4"	118,90
3"	69,83
2,5"	43,65
2"	29,10
1,5"	17,46
1"	8,73

La Tabla 36 presenta la fórmula del cálculo de Mano de obra y el valor del cordón de soldadura según ecuación (1), Fuente: Gamarra (2020)

### c. Calculo del costo de gas

Tabla 37. Calculo del costo de gas empleado actualmente

Diámetro de tubería	Valor \$ /m
4"	275,35
3"	172,51
2,5"	129,38
2"	80,86
1,5"	43,13
1"	32,35

La Tabla 37 presenta el costo de ml de gas según ecuación (3)

### d. Calculo del costo de gas por cordón de soldadura

Tabla 38. Costo gas por cordón de soldadura uso actual

Diámetro de tubería	\$/cordón
4"	87,89
3"	41,30
2,5"	25,81
2"	12,91
1,5"	5,16
1"	2,58

La Tabla 38 presenta el costo de ml de gas según ecuación (3), Fuente: Gamarra (2020)

### e. Cálculo del consumo de energía según procedimiento actual de la empresa

Tabla 39. Cálculo costo de energía procedimiento actual

Diámetro tubería	\$/cordón
4"	1,09
3"	0,77
2,5"	0,69
2"	0,51
1,5"	0,40
1"	0,14

La Tabla 39 recoge el valor de la energía empleada para la soldadura según los diámetros según la ecuación (4), Fuente: Gamarra (2020)

#### 4.4. Comparación de costos entre el proceso actual de soldadura con los parámetros óptimos probados

Tabla 40. Resumen parámetros soldadura actual y parámetros óptimos

ACTUAL	OPTIMO	COMPARACIÓN
COSTO TOTAL POR CORDON	COSTO TOTAL POR CORDON	
[\$]	[\$]	
207,88	172,99	OPTIMIZADO
111,90	101,51	OPTIMIZADO
70,14	57,24	OPTIMIZADO
42,52	38,17	OPTIMIZADO
23,02	23,02	IGUAL
11,45	11,49	NO OPTIMIZADO

La Tabla 40 contiene los parámetros óptimos evaluados y la comparación entre el costo de soldadura actual y el costo de soldadura con los parámetros sugeridos, Fuente: Gamarra (2020)

Una vez realizado el cálculo del procedimiento actual de soldadura manual y la soldadura con procesos óptimos probada mediante los ensayos no destructivos se aprecia que las modificaciones efectuadas en los consumibles fueron adecuadas técnicamente, sin embargo, con relación al costo los parámetros óptimos fueron los empleados en los diámetros 4”, 3,5”, 2,5”, 2”. Para el diámetro de 1,5” no hubo variación en costo entre el proceso actual y el propuesto en los ensayos, por lo tanto, se puede seguir manejando el mismo procedimiento. Para el caso de la soldadura de 1” los parámetros sugeridos a nivel de costo supera el del procedimiento actual por lo tanto se puede seguir usando el proceso de soldadura seguido hasta el presente en el caso de este diámetro.

El Anexo 3 presenta el instructivo y procedimientos Código IM00-EVA0501-PRO01 de soldadura TIG manual elaborado a partir de los resultados obtenidos, estos serán usados en la empresa tanto por supervisores como soldadores.

## CONCLUSIONES

- La Norma ASME BPE 2014 establece la coloración por la zona afectada por la soldadura, desalineamiento no mayor al 15% del espesor de la pared para diámetros menores a 4", concavidad externa e interna, máximo hasta un 10% del espesor de la pared, la convexidad externa máximo hasta 0,015" y la interna hasta 10% del espesor de la pared, las discontinuidades no son aceptables, el cordón de soldadura recto y uniforme.
- Se realizaron 56 probetas siguiendo las especificaciones de la norma ASTM, en el caso de 4" con longitud de 200mm y en el de 3" 300mm, fueron sometidas a las pruebas de ensayos no destructivos inspección visual y tintas penetrantes, no se encontraron porosidades, grietas, fisuras ni discontinuidades, no fue necesario aplicar Rayos X.
- Los parámetros óptimos para el procedimiento de soldadura TIG con especificación ASTM A270 – TIPO 304, para tuberías de 4" fue de 15lt/min de argón y 75 amperios; en 3" es 15 lt/min y 55 amperios; en 2,5 es 10 lt/min y 55 amperios, en 2" es 10 lt/seg de argón y 50 amperios. En el caso de 1,5" se probó con 10 lt/min argón y 45 y en 1" 10lt/s y 45 amperios, logrando cordones de soldadura según la norma, no encontrando diferencia en reducción de costo con respecto al procedimiento seguido por la empresa.
- Fue elaborado un instructivo y procedimiento código IM00-EVA0501-PRO01 de soldadura TIG manual basado en la Norma ASME BPE 2014 los cuales serán usados tanto por los supervisores como soldadores garantizando así soldaduras técnicamente sin fallas y con el control de consumibles para el manejo de costos.
- Fueron comparados los costos actuales de la empresa en relación a la elaboración de soldadura en tubos de acero inoxidable de 4"-1" con respecto a las soldaduras obtenidas para estos diámetros con los parámetros óptimos establecidos obteniendo que para 4" se logra un rendimiento en costo de 16%, para 3" de 10%, para 2,5" de 18%, y 2" un 10%. En el caso de 1,5" el costo fue igual y en el caso de 1" la modificación de parámetros supero el costo del proceso seguido por la empresa, por lo tanto, para estos dos últimos diámetros se mantuvo el procedimiento de soldadura.

## **RECOMENDACIONES**

- Los resultados obtenidos pueden ser empleados por las empresas en cuanto a la modificación de consumibles ya que fueron probados a través de pruebas de ensayos no destructivos.
- Realizar estudios en tuberías de acero inoxidable- 316 con miras a probar parámetros que permitan controlar el uso de consumibles sin afectar la calidad de soldadura y que se refleje en una racionalización de costos.
- Es importante realizar investigaciones con respecto a la pasivación de aceros inoxidables dado que en el proceso de soldadura se afecta directamente la composición química, por ende, la pasivación contribuye a superar las propiedades inoxidables de los materiales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BF. México, «La Soldadura y su Desarrollo,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.bfmx.com/la-soldadura-y-su-desarrollo/>. [Último acceso: octubre 2019].
- [2] «Ingemecanica, Ingeniería, Consultoría y Formación,» octubre 2019. [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn52.html>. [Último acceso: octubre 2019].
- [3] Centro Autonomico de Formación e Innovación, «Proceso de soldadura TIG,» 2012. [En línea].
- [4] Escuela Colombiana de Ingenieria "Julio Garvito", «Soldadura Protocolo. Curso de Proceso de Manufactura,» 2008.
- [5] N. Gómez y E. Ramírez, «Estudio de Soldabilidad de Tubería Sanitaria en Acero Inoxidable con soldadura TIG para la empresa INGENIAR Inoxidables de Pereira,» 2016.
- [6] R. Cortes, J. Villanueva, E. Ponce, M. Rojas y E. Rojas, «Estudio de la soldabilidad y corrosión del acero inoxidable AISI 904L con los agentes utilizados en la lixiviación del cobre,» *Revista Facultad de Ingeniería, UTA*, 2004.
- [7] M. Ibarra y E. J. Nuñez, «Manual de aceros inoxidable para soldadores,» INDURA S.A., Industria y Comercio, Santiago de Chile, 2010.
- [8] Indura, «Manual de Acero Inoxidables,» 2010.
- [9] E. Castañeda, «Diseño higiénico del equipo procesado de alimentos,» 2017.
- [10] N. Aguilar, «Desarrollo de Programa de Cómputo para la Especificación de Tuberías de Proceso (Índice de Líneas),» México, D.F., 2014.
- [11] V. Lux, «Estudio Técnico para la Construcción y Montaje de Tanques de Cocimiento de Mosto en la Industria de fabricación de cerveza,» 2005.
- [12] Asme. Normas y Certificación, «Ejemplos de uso de códigos y normas para los,» 2019.
- [13] J. Milledge, «The cleanability of stainless steel used as a food contact surface: An updated short review,» vol. 24, n° 4, pp. 27-28, 2010.

- [14] Federación de Enseñanza de CC.OO. de Andalucía, «Ensayos no destructivos en la Soldadura,» *Revista Digital para Profesionales de la Enseñanza*, 2011.
- [15] P. Mosquera y M. Sánchez, «Detección de Fallas Superficiales e Internas en Tuberías de alta Presión para Motores Estacionarios por el Método de Ultrasonido,» Cuenca, 2015.
- [16] D. Castro, «Diseño de Procedimientos Radiográfico y Tintas Penetrantes para Control de Calidad de las soldaduras en las construcciones de estaciones de bombeo de petróleo,» Quito, 2015.
- [17] CALIMET, «Servicios de ensayos destructivos y no destructivos,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.calimet.com.mx/la-inspeccion-visual-remota>.
- [18] M. Melgarejo, A. Martínez y P. Yaneth, «Revista Colombiana de materiales,» n° 5, pp. 204-210, 2013.
- [19] Instituto Politécnico Nacional, «Ensayos no Destructivos,» 2015.
- [20] G. Alfonso, «Aplicación de los Rayos X en la industria como prueba no destructiva,» 1995.
- [21] B. Plnsky, «Rayos X para la industria: los ensayos no destructivos contribuyen a aumentar la competitividad de Malasia,» 2015.
- [22] S. Izurieta, «Evaluación de defectos y discontinuidades de la soldadura por medio de la aplicación de ensayos no destructivos en la fabricación de tuberías de 3000mm de diametro,» Guayaquil, 2017.
- [23] SENATI, «Soldadura de Tubería en Procesos TIG,» 2014.
- [24] NKS México, «Acero Inoxidable 304 y 304L,» 2019. [En línea]. Available: <https://nks.com/es/distribuidor-de-acero-inoxidable/acero-inoxidable-304/>. [Último acceso: octubre 2019].
- [25] ACERIND S.C., «Soldadura de los Áceros Inoxidables,» s/f.
- [26] Grupo BAW, «Soldadura Orbital,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/soldadura-orbital-que-es>. [Último acceso: octubre 2019].
- [27] SMP, «Electrodos de Tungsteno,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.smp.es/electrodosdetungsteno>.

- [28] Binzel+-Abicor, «Tungsteno E3,» 2019. [En línea]. Available: [https://www.manxaindustrial.com/index.php?controller=attachment&id\\_attachment=1060011201](https://www.manxaindustrial.com/index.php?controller=attachment&id_attachment=1060011201).
- [29] R. S. L. y. R. W. Campbell, «Codes and Standards that deal with Stainless Steels,» *Welding Journal*, vol. 93, n° 5, p. 47, 2014.
- [30] Federación de Enseñanza de CC.OO de Andalucía, «Tipos de Uniones Soldadas. N°6,» 2010b.