

00574

1



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

“SISTEMA EXPERTO PARA DIAGNOSTICAR Y CORREGIR CAUSAS DE DEFECTOS EN SOLDADURA METÁLICA CON ARCO PROTEGIDO (SMAW)”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE :

MAESTRO EN METALURGIA

P R E S E N T A :

I. O. M. MANUEL MARIANO HERRERO TERAN



México, D. F.

2003

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

A



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACIÓN DISCONTINUA

Jurado Asignado

Presidente: Dr. Carlos González Rivera (FQ)
Primer Vocal: Dr. Enrique Augusto Martínez Martínez (IMICORR)
Secretario: Dr. Julio Ernesto Solís Daún (UAM I)
Primer Suplente: Dr. Heberto Balmori Ramírez (ESIQIE IPN)
Segundo Suplente: Dr. Bernardo Fabián Campillo Illanes (FQ)

Sitio donde se desarrolló el tema:

Ames Tinsa, S. A.
Av. La Presa No. 288
San Juan Ixhuatepec
Edo. Mex. 54180



Dr. José Bernardo Hernández Morales
Asesor



I. Q. M. Manuel Mariano Herrero Terán
Sustentante

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

B

Agradecimientos

Al Dr. José Bernardo Hernández Morales por presentarme la idea original de este trabajo e introducirme a la aplicación de los sistemas expertos en los procesos metalúrgicos; por todo el interés, el apoyo, la orientación y la paciencia que me ha brindado desde el principio...

Al M. en M. Octavio Peralta Alarcón, por todas sus ideas y aportaciones en lo referente a la “ingeniería del conocimiento” y a la programación en Visual Prolog; y cuyo apoyo fue fundamental para el planteamiento, el desarrollo y la conclusión de este trabajo...

Al I. Q. M. Gilberto Martínez Valencia por introducirme al mundo de la soldadura y quien por varios años ha compartido sus valiosas ideas y conocimientos conmigo...

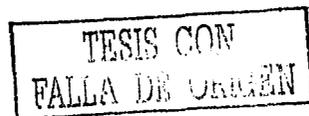
Al I. Q. M. Raúl Arellano Ángeles y a su equipo de trabajo en Ames Tinsa, S. A., por todas las atenciones y facilidades brindadas para realizar la parte experimental de este trabajo...

A todos los miembros del jurado por sus valiosos comentarios, sugerencias y aportaciones para enriquecer el presente trabajo...

Y a todos aquellos que de alguna manera me dieron su apoyo y estímulo para concluir este documento...

...Muchas gracias por todo.

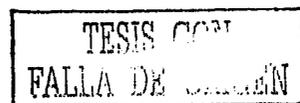
C



Contenido

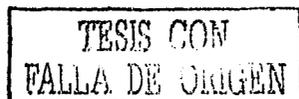
Lista de Figuras.....	i
Lista de Tablas.....	iii
Resumen.....	iv
Abstract.....	v
Capítulo 1 : Introducción.....	1
Capítulo 2 : Antecedentes.....	4
2.1 Soldadura Metálica con Arco Protegido (SMAW).....	4
2.1.1 Introducción.....	4
2.1.2 Descripción del proceso.....	4
2.1.3 Espesores.....	5
2.1.4 Posiciones para soldar.....	6
2.1.5 Tipos de uniones.....	7
2.1.6 Tipos de soldadura.....	8
2.1.7 Tipos de juntas.....	9
2.1.8 Soldaduras de paso simple y de paso múltiple.....	10
2.1.9 Aplicaciones.....	10
2.1.10 Electrodo.....	10
2.1.11 Almacenamiento de los electrodos.....	14
2.1.12 Fuentes de electricidad.....	15
2.1.13 Soldabilidad en aceros.....	16
2.1.14 Defectos de la soldadura.....	19
2.1.15 Principales factores que afectan el proceso de soldadura.....	23
2.1.16 Procedimientos de soldadura.....	30
2.1.17 La soldadura de calidad comercial.....	31
2.2 Sistemas Expertos.....	32
2.2.1 Introducción.....	32
2.2.2 Definición de Sistema Experto.....	32
2.2.3 Características de los Sistemas Expertos.....	34
2.2.4 Componentes de un Sistema Experto.....	34
2.2.5 Estructura de un Sistema Experto.....	36
2.2.6 Tipos de Sistemas Expertos.....	36
2.2.7 Desarrollo de un Sistema Experto.....	37
2.2.8 Lenguajes para construir Sistemas Expertos.....	42
2.2.9 Integración y migración de los Sistemas Expertos.....	43
2.2.10 Evolución histórica de los Sistemas Expertos.....	44
2.2.11 Tendencias futuras de los Sistemas Expertos.....	46
2.2.12 Aplicaciones de los Sistemas Expertos.....	48
2.2.13 Campo de aplicaciones de los SE.....	48
2.2.14 Sistemas Expertos empleados en metalurgia.....	50

0



Capítulo 3 : Objetivo y alcances.....	55
3.1 Posición del problema.....	55
3.2 Objetivo.....	55
3.3 Alcances.....	55
Capítulo 4 : Desarrollo del Sistema Experto.....	58
4.1 Metodología.....	58
4.1.1 Generalidades.....	58
4.1.2 Datos.....	60
4.1.3 Reglas del Sistema Experto.....	69
4.2 Reglas de operación.....	71
4.3 Estructura del Sistema Experto y diseño de ventanas.....	72
4.4 Ejemplo de funcionamiento.....	79
Capítulo 5 : Trabajo experimental.....	86
5.1 Introducción.....	86
5.2 Materiales y Equipos.....	86
5.3 Condiciones experimentales.....	89
Capítulo 6 : Resultados.....	91
Capítulo 7 : Análisis de resultados.....	105
Capítulo 8 : Conclusiones.....	115
Capítulo 9 : Bibliografía.....	117
Apéndice A. Clasificación de los electrodos para SMAW.....	120
Apéndice B. Condiciones típicas de almacenaje y reacondicionamiento de los electrodos recubiertos de acero al carbono.....	121
Apéndice C. Datos experimentales.....	122

E



Lista de Figuras

Figura 2.1: Posiciones para soldar.....	6
Figura 2.2: Tipos de uniones.....	7
Figura 2.3: Tipos de soldadura.....	8
Figura 2.4: Tipos de juntas.....	9
Figura 2.5: Electrodo y proceso SMAW.....	11
Figura 2.6: Grietas longitudinal (A), de cráter (B) y transversal (C).....	19
Figura 2.7: Porosidades formadas en ranura (A) y filete (B).....	20
Figura 2.8: Inclusiones sólidas en dos secciones (A) y (B).....	20
Figura 2.9: Fusión o penetración incompleta en dos secciones (A) y (B).....	21
Figura 2.10: Forma imperfecta o contorno inaceptable; socavado (A) y perfil incorrecto (B).....	21
Figura 2.11: Defectos diversos; apariencia pobre (A), chisporroteo (B), unión pobre (C) y fibras (D).....	22
Figura 2.12: Ángulos de aplicación en ranuras (a) y filetes (b).....	25
Figura 4.1: Diagrama de flujo básico para el diagnóstico de los defectos y su corrección.....	59

Figura 4.2: Ventana "Inicial".....	72
Figura 4.3: Ventana "Fotos".....	73
Figura 4.4: Ventana "Datos viejos".....	73
Figura 4.5: Ventana "Condiciones de Trabajo".....	74
Figura 4.6: Ventana "Soldabilidad del Metal Base".....	75
Figura 4.7: Ventana "Casos de estudio según el tipo de soldabilidad".....	75
Figura 4.8: Ventana "Características de la soldadura y su geometría".....	76
Figura 4.9: Ventana "Características operacionales del tipo de soldadura y junta".....	77
Figura 4.10: Ventana "Precalentamiento y postcalentamiento".....	78
Figura 4.11: Ventana "Diagnóstico".....	79
Figura 5.1: Ranura cuadrada a tope. Medidas: 4 probetas de 5" x 3" (127 x 76.2 mm). Espesor: Cal. 12 (0.1046") (2.65 mm).....	87
Figura 5.2: Filete a tope. Medidas: 2 probetas de 5" x 3" (127 x 76.2mm). 2 probetas de 8" x 3" (203.2 x 76.2mm). Espesor: Cal. 12 (0.1046") (2.65 mm).....	87
Figura 5.3: Filete en T. Medidas: 2 probetas de 5" x 3" (127 x 76.2 mm). 2 probetas de 8" x 3" (203.2 x 76.2 mm). Espesor: Cal. 12 (0.1046") (2.65 mm).....	87
Figura 5.4: Ranura de bisel doble a tope. Medidas: 2 probetas de 5" x 3" (127 x 76.2 mm). Ángulo de biseles: 45°. Espesor: ¼" (19.05 mm).....	87

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Ángulos típicos de aplicación.....	26
Tabla 4.1: Causa de defecto y regla correspondiente en el Sistema Experto.....	69-70
Tabla 5.1: Condiciones experimentales por tipo de soldadura y junta.....	90

Resumen

El progreso tecnológico y el desarrollo económico de un país están íntimamente relacionados con el nivel de capacitación, conocimientos y habilidades de las personas que conforman sus empresas. En particular, en áreas tan especializadas como la soldadura los profesionales que se dedican a ésta deben tener las características necesarias para garantizar la calidad de los productos finales.

En nuestro país hay muchas empresas dedicadas a fabricar partes soldadas, pero que adolecen de procedimientos para controlar el proceso y garantizar la calidad, así como de los técnicos certificados para llevarlo a cabo. Por lo anterior, en este trabajo se ha diseñado y desarrollado un Sistema Experto que proporcione, con base a reglas heurísticas, estos requerimientos.

Este Sistema Experto parte de la identificación visual de los defectos y se basa en el manejo de la información inherente al tipo de soldadura y a las variables de proceso por parte del operador, con lo cual él mismo diagnostica las fallas en que ha incurrido y lleva a cabo las correcciones pertinentes.

Empleando la programación lógica y el uso de ventanas, las cuales favorecen una relación más amigable y estructurada para el usuario, se utilizó **Visual Prolog** para desarrollar este sistema experto para diagnosticar defectos de la soldadura metálica de arco protegido. El sistema consiste de varios módulos para el diagnóstico de los defectos más usuales producidos por este proceso.

A partir de lámina de acero 1006 calibre 12 y de placa de acero A36 de $\frac{3}{4}$ " se prepararon y elaboraron muestras de algunos de los tipos de juntas y uniones más típicas: ranura cuadrada a tope, filete a tope, filete en T y ranura de bisel doble a tope, bajo diferentes variables de operación, las ideales, y las que provocaron algunos defectos. Una vez soldada cada muestra se procedió a su inspección visual correspondiente. Esta información experimental se utilizó para validar los resultados del Sistema Experto. La validación fue exitosa, por lo que hay confianza en el Sistema Experto.

La mayor ventaja del Sistema Experto es que ofrece la posibilidad de crecimiento y adaptabilidad a la medida de cualquier planta en particular, ya que en el lenguaje en que está programado se permite la inclusión de nuevos casos y la modificación continua del mismo.

Abstract

The technological progress and the economic development of a country are intimately related to the level of qualification, knowledge and abilities of the people who conform its industries. In areas so specialized as welding, they must have the necessary characteristics to guarantee the quality of their finished products.

In our country there are many companies dedicated to manufacture welded products, but they do not have procedures to control the process and guarantee the quality, as well as the certified technicians to carry it out. In this work, a heuristic rule-based Expert System has been designed and developed to provide these requirements.

This Expert System sets off from the visual identification of the defects and is based on the handling of the information inherent to the type of weld and the process variables, with which he diagnoses the faults produced by himself and carries out the appropriate corrections.

Using the logical programming and windows, which favor a friendlier and structured relation for the user, Visual Prolog was chosen to develop this Expert System for diagnosing defects of the Shielded Metal Arc Welding. The system consists of several modules for the diagnosis of the most usual defects produced in this process.

From 1006 steel sheet, gauge 12, and A36 steel plate, $\frac{3}{4}$ " thick, some samples of the most common types of joints and welds as the square grooves, corner fillets, tee fillets and double bevel grooves were prepared and elaborated under different operation variables, the ideals, and those that caused some defects. The samples were visually inspected. This experimental information was used to validate the results of the Expert System. The validation was successful and that is why there is confidence in the Expert System.

The main advantage of this Expert System is that it offers the possibility of growth and adaptability to any plant needs, since Visual Prolog allows the inclusion of new cases and its continuous modification.

TESIS COM
FALLA DE ORIGEN

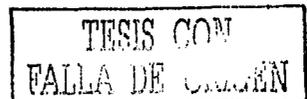
1. Introducción

El progreso tecnológico y el desarrollo económico de un país están íntimamente relacionados con el nivel de capacitación, conocimientos y habilidades de su población. En particular, en áreas tan especializadas como la soldadura, los profesionales que se dedican a ésta deben tener las características necesarias para garantizar la calidad de los productos finales.

La calidad es sólo una de las principales razones para reducir costos en la fabricación de cualquier producto soldado, ya que implica un proceso de mejoramiento continuo, en donde muchas áreas de la empresa participan activamente en su desarrollo, satisfaciendo las necesidades del cliente y logrando con ello mayor productividad. Algunos ejemplos de esto son: la operación segura y continua, la optimización del diseño y uso de recursos (los costos de los diferentes procesos de soldadura y cómo pueden ser modificados al conocer las variables que deben controlarse y desarrollar métodos para calcular los efectos de éstas sobre los costos), la integridad del producto y la extensión de vida del mismo. En el caso de la calidad comercial, ésta implica un nivel y apariencia que cumpla con los requerimientos nominales impuestos en muchas de las soldaduras hechas comercialmente, pero sin llegar a las exigencias de lo establecido por los códigos.

Dado que en nuestro país hay muchas empresas dedicadas a fabricar partes soldadas, pero que adolecen tanto de los procedimientos para controlar el proceso como de los técnicos certificados para llevarlo a cabo, en este trabajo se ha desarrollado un sistema experto que permita diagnosticar los defectos y brindar las acciones correctivas correspondientes para el proceso más versátil y usado en México: la Soldadura Metálica con Arco Protegido (SMAW, de sus siglas en inglés).

La supervisión del taller auxiliada por este sistema experto puede reducir costos con eficacia al concentrarse en las variables más importantes. La eficiencia del soldador es una buena fuente para encontrar ahorros. El entrenamiento, los dispositivos, los accesorios, y los ayudantes se pueden emplear para conseguir una mejor calidad. El uso



de esta tecnología permite que las compañías reduzcan su tasa de rechazos, evitando reparaciones costosas.

Empleando la programación lógica y el uso de ventanas, las cuales favorecen una relación más amigable y estructurada para el usuario, se utilizó el lenguaje de programación **Visual Prolog** para desarrollar un sistema experto para diagnosticar defectos de la soldadura metálica de arco protegido. El sistema consiste de varios módulos para el diagnóstico de los defectos más usuales producidos por este proceso, junto con las acciones correctivas correspondientes, con lo cual se logra consolidar una herramienta con propósitos de optimización, entrenamiento e incluso educativos.

Las variables operativas que solicita el paquete durante su ejecución están basadas en aquéllas que deben ser incluidas en cualquier especificación de procedimiento de soldadura y las cuales son en gran parte responsables de las causas de los defectos: clasificación, diámetro y posición de electrodo; corriente eléctrica; tipo de corriente; especificación del metal base; voltaje; velocidad de soldadura; temperaturas de precalentamiento, entre pasos, y de postcalentamiento; así como detalles de diseño de junta, entre otras.

La automatización del conocimiento del experto no sólo libera al supervisor de una carga tediosa de trabajo sino que también le permite explorar nuevas alternativas para desarrollar los programas de producción, estimar algunas variables que no aparecen en las especificaciones del procedimiento de soldadura y controlar el proceso. El mismo operador puede identificar que sus fallas han resultado en defectos y llevar a cabo las correcciones pertinentes. En proceso, puede evitar reparaciones y las gravísimas fallas que se podían tener con el producto en servicio, lo cual es mucho más caro dado que se podrían producir accidentes graves. En cuanto al número de personal, permite evitar el uso de un inspector de calidad, ya que de alguna manera éste se encuentra embebido en el sistema experto.

A partir de lámina de acero 1006 y placa de acero A36 se prepararon y elaboraron muestras de algunos de los tipos de juntas y uniones más típicas: ranura cuadrada a tope, filete a tope, filete en T y ranura bisel doble a tope, bajo diferentes variables de operación (las ideales, y las que provocarían algunos defectos). Los resultados de este trabajo se utilizaron para validar el sistema experto. Los diagnósticos realizados resultaron exitosos, ya que las causas concuerdan con las variables modificadas; sin embargo, se tuvieron algunos problemas en cuanto a la restricción de uso de electrodos según la clase a la que corresponden y otras variables que hacen cada caso muy específico, debido a las limitaciones de la actual base de datos.

La principal ventaja que ofrece el sistema es su posibilidad de crecimiento y adaptabilidad a la medida de cualquier planta en particular, ya que en el lenguaje en que está programado se permite la inclusión de nuevos casos y la modificación continua del mismo.

2. Antecedentes

2.1 Soldadura Metálica con Arco Protegido (SMAW)

2.1.1 Introducción ^(1, 2)

La soldadura de arco manual protegido (SMAW por sus siglas en inglés: Shielded Metal Arc Welding), que también es conocida como soldadura de electrodo cubierto, soldadura de varilla o soldadura de arco eléctrico, es el método más antiguo y versátil de todos los procesos de soldadura de arco.

En el año 1904, Oscar Kjellberg desarrolla el electrodo recubierto y aunque la era industrial de la unión soldada por arco eléctrico empieza en Europa a comienzos de la década de 1950, ya se realizaban uniones de este tipo a principios del siglo XX. Al pasar del tiempo, cientos de diferentes variedades de electrodos han sido producidos, a veces conteniendo aleaciones para mejorar la estructura metálica, la resistencia mecánica y la ductilidad de la soldadura, haciendo las labores más ligeras al usar corriente alterna (CA) por el bajo costo de los transformadores que la producen y usando fuentes de corriente directa (CD) más poderosas con grandes rectificadores para darle la polaridad exacta al proceso cuando se requiere de trabajo de alta producción industrial.

2.1.2 Descripción del proceso ⁽²⁻¹¹⁾

El proceso de soldadura SMAW se caracteriza porque se produce un arco eléctrico entre la pieza a soldar y un electrodo metálico recubierto. Este arco eléctrico produce el calor necesario para fundir el material base y el de aporte, originándose la mezcla de ambos en estado líquido que al solidificar formará el cordón de soldadura.

Con el calor producido por el arco, se funde el extremo del electrodo y se quema el revestimiento, produciéndose la atmósfera adecuada para que se produzca la

transferencia de las gotas del metal fundido desde el alma del electrodo hasta el baño de fusión en el material base.

La temperatura que se genera en este proceso es superior a los 9932°F (5500°C). La corriente que se utiliza en el proceso puede ser directa o alterna, utilizándose en la mayoría de las veces la directa, debido a que la energía es más constante, con lo que se puede generar un arco estable. Para evitar la oxidación, al electrodo se le coloca un revestimiento químico el cual le dará propiedades específicas a la soldadura y formará una nube protectora contra el medio ambiente. En el arco, las gotas del metal fundido se proyectan recubiertas de escoria fundida procedente del recubrimiento que, por efecto de la tensión superficial y de la viscosidad, flota en la superficie, solidificando y formando una capa de escoria protectora del baño fundido que protegerá al metal sólido de enfriamientos bruscos, así como contaminaciones por absorción de gases.

2.1.3 Espesores ⁽³⁻⁷⁾

El rango de espesores que se puede soldar con SMAW va desde 1/16" (1.6 mm) hasta 1/4" (6.4 mm) sin ranura con una abertura de raíz suficiente y con una soldadura en un paso. Los materiales de mayor espesor requieren una preparación de junta especial y de soldadura en varios pasos. En posición horizontal se pueden hacer, en un paso, espesores de hasta 5/16" (8 mm). En posición vertical se pueden hacer filetes mayores, sin embargo la calidad se deteriora si éstos son mayores a 3/8" (10 mm) en soldadura de un paso. Cabe mencionar que con esta técnica se puede soldar un espesor ilimitado cuando se utilizan varios pasos.

2.1.4 Posiciones para soldar ^(3-7, 9)

La soldadura por arco puede hacerse en cualquiera de las cuatro siguientes posiciones (Figura 2.1):

- Plana
- Horizontal
- Vertical
- Sobrecabeza

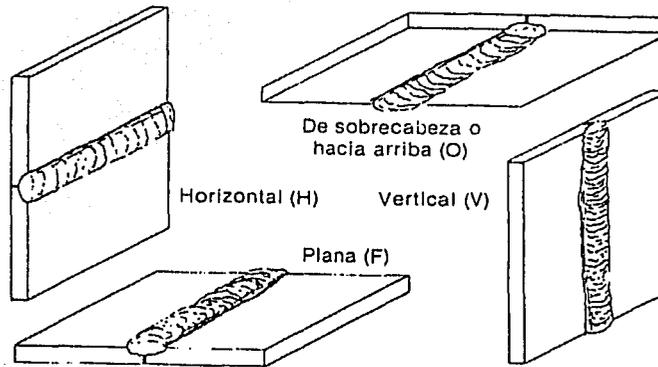


Figura 2.1: Posiciones para soldar.

2.1.5 Tipos de uniones ⁽³⁻⁷⁾

Hay cinco tipos básicos de uniones para integrar dos partes a una junta (Figura 2.2):

- Empalmada. En ésta las partes se encuentran en el mismo plano y se unen sus bordes.
- Esquina. Las partes de la unión forman un ángulo recto y se unen en la esquina del ángulo.
- Traslape. Consiste en dos partes que se sobreponen.
- T. Una parte es perpendicular a la otra en una forma parecida a la letra T.
- Borde. Las partes están paralelas con al menos uno de sus bordes en común y la unión se hace en él.

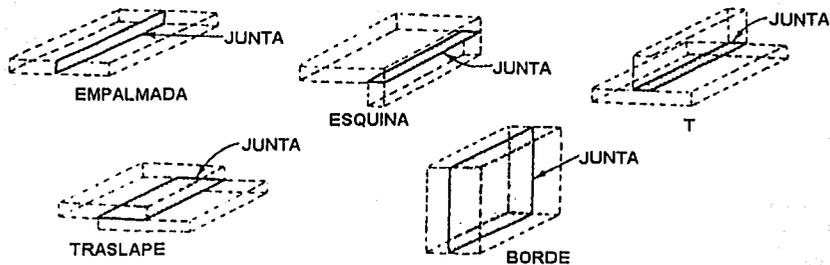


Figura 2.2: Tipos de uniones.

2.1.6 Tipos de soldadura (2.3. 5-7)

- Filete. Se unen para rellenar los bordes de las placas creadas mediante uniones de esquina, traslapadas y en T. Se usa un metal de relleno para proporcionar una sección transversal de aproximadamente la forma de un triángulo.
- Ranura. Generalmente requiere que se moldeen las orillas de las partes en un surco para facilitar la penetración de la soldadura. Las formas con surco incluyen un cuadrado, bisel, la “v”, la “u” y la “j” en lados sencillos o dobles. Se usa material de relleno para saturar la unión.
- Tapón. Se usa para unir placas planas utilizando uno o más huecos o ranuras en la parte superior, que después se rellenan con metal para fundir ambas partes.
- Cordón. Se hace en una pasada con el metal de aporte sin movimiento hacia uno u otro lado.
- Ondeada. Se logra haciendo un cordón con algo de movimiento hacia uno y otro lado. Su ancho depende del diseño o necesidad. (Figura 2.3)

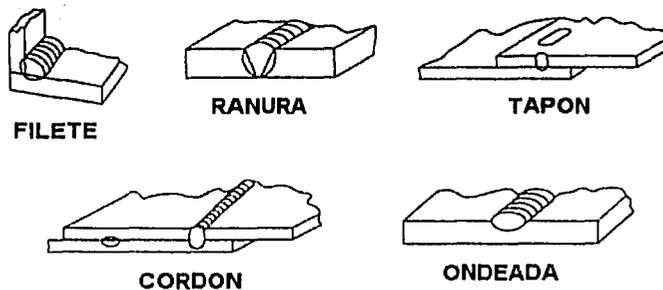


Figura 2.3: Tipos de soldadura.

2.1.7 Tipos de juntas ⁽³⁻⁷⁾

- La junta de tope cerrada tiene las aristas de las dos placas en contacto directo una con la otra. Esta junta es adecuada para soldar placas de acero que no exceden a 3.2 - 4.8 mm de grosor. Se puede soldar metal más pesado pero solamente si la máquina tiene la capacidad suficiente de amperaje y si se usan electrodos más pesados.
- La junta de tope abierta tiene las aristas ligeramente separadas para proporcionar mejor penetración. Muchas veces se coloca una barra de acero, cobre, o un ladrillo como respaldo debajo de la junta abierta para evitar que se quemen las aristas inferiores. Cuando el grosor del metal excede a 3.2 - 4.8 mm, las aristas tienen que estar biseladas para mejor penetración. El bisel puede estar limitado a una de las placas, o las aristas de ambas placas pueden estar biseladas, dependiendo del grosor del metal. El ángulo del bisel generalmente es de 60° entre las dos placas. (Figura 2.4)

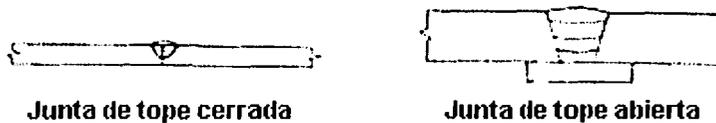


Figura 2.4: Tipos de juntas.

2.1.8 Soldaduras de paso simple y de paso múltiple ⁽²⁻⁴⁾

- Una soldadura de paso simple es el depósito de una sola capa de metal de soldar. Para soldar materiales de bajo espesor, un solo paso normalmente es suficiente.
- En planchas más pesadas o donde se requiera resistencia adicional, dos o más capas son requeridas con cada paso de soldadura solapando al otro. Siempre que se une un paso múltiple, las escorias en cada cordón de soldadura deberán removerse completamente con alguno de los métodos de limpieza antes de depositar la próxima capa.

2.1.9 Aplicaciones ⁽¹⁻³⁾

El proceso SMAW se utiliza por su versatilidad en una amplia gama de aplicaciones tanto en taller como en obra en la soldadura de materiales de espesor superior a 1.5 mm. Los sectores de mayor aplicación son la construcción naval, de máquinas, estructuras, tanques y esferas de almacenamiento, puentes, recipientes a presión y calderería, pailería en general, etc. La selección de los electrodos tiene una influencia decisiva en la calidad y el costo de la soldadura.

2.1.10 Electrodo ^(2-7, 11, 12)

El material de aporte que se usa en este proceso se conoce como electrodo y consiste en una varilla metálica, generalmente de acero, recubierta de un revestimiento concéntrico de flux extruído y seco. La fabricación de electrodos se realiza en dos líneas en paralelo: varilla o alma, y revestimiento.

Para el usuario, es muy importante disponer de una correcta relación de electrodos con finalidades específicas. En este sentido, los catálogos y folletos que editan los fabricantes suelen contener información de diámetros, parámetros de uso, revestimientos y precauciones sobre el almacenaje y funcionamiento de cada uno de sus productos.

Se pueden distinguir tres partes en el electrodo revestido: núcleo, revestimiento e identificación.

El núcleo del electrodo está constituido por un alambre metálico que conduce la corriente eléctrica y permite establecer el arco eléctrico. El intenso calor del arco hace que se funda progresivamente la punta del alambre y que en forma de pequeñas gotas se deposite en el cordón de soldadura, proporcionando así el material de aporte (Figura 2.5). El metal del núcleo depende del tipo de metal base que se requiere soldar. El calibre de diámetro del electrodo se mide en el núcleo y al mismo tiempo determina la intensidad de corriente promedio que debe utilizarse. En cuanto a la longitud de los electrodos, la medida más usual es la de 14" (356 mm) existiendo además electrodos de 9" (229 mm) y de 18" (457 mm). El electrodo SMAW tiene un diámetro de 3/32 a 3/8" (2.4 a 9.5 mm).

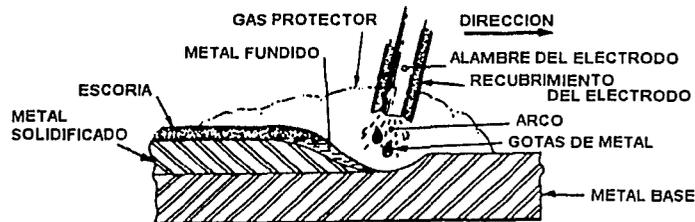


Figura 2.5: Electrodo y proceso SMAW.

Para el revestimiento se suelen utilizar hasta cuarenta minerales y sustancias distintas, tales como silicato de zirconio, rutilo, celulosa, caolín, mármol, polvo de hierro, FeSi, FeTi, FeMn, etc. En la fabricación de la pasta para el revestimiento suelen intervenir:

- óxidos naturales: óxidos de hierro, ilmenita (50% óxido férrico y 50% óxido de titanio), rutilo (óxido de titanio), sílice (óxido de silicio).
- silicatos naturales: caolín, talco, mica, feldespato.
- productos volátiles: celulosa, aserrín.
- fundentes.
- productos químicos: carbonatos, óxidos.
- ferroaleaciones de Mn, Si, Ti.
- aglomerantes: silicato sódico, silicato potásico.

El revestimiento del electrodo cumple diversas funciones al soldar con arco metálico protegido:

- Estabiliza el arco: facilita el encendido y el mantenimiento constante del arco.
- Genera una pantalla de gases de protección que evita la contaminación del cordón por el oxígeno y nitrógeno del aire.
- Proporciona compuestos que eliminan los óxidos de impurezas de material y forman escoria que retarda el enfriamiento brusco del cordón.
- Determina las condiciones de operación del electrodo.
- Determina las características del cordón.
- Dirige y controla el arco eléctrico según lo requieran las piezas por soldar.
- Proporciona el metal de aporte y aleantes.

En muchos lugares del mundo, la identificación de electrodos se efectúa utilizando en primer lugar un nombre comercial o sea la identificación particular que arbitrariamente le asigna cada fabricante y, en segundo lugar, un nombre genérico el cual

se forma siguiendo los lineamientos establecidos por la AWS (American Welding Society).

En esta clasificación, se han asignado símbolos específicos a cada tipo de electrodo, por ejemplo E-6010, E-7010, E-8010, etc. El prefijo E identifica al electrodo para soldadura por arco eléctrico. Los primeros dos números en el símbolo designan la resistencia mínima de tensión permisible del metal de soldar depositado, en miles de libras por pulgada cuadrada (psi). Por ejemplo, los electrodos de la serie 60 tienen una resistencia mínima de tensión de 60,000 psi (414 MPa); en la serie 70, una resistencia de 70,000 psi (483 MPa). El tercer número del símbolo indica las posibles posiciones de soldar. Se usan tres números para este propósito: 1, 2 y 3. El número 1 es para un electrodo que puede ser utilizado en cualquier posición. El número 2 representa un electrodo restringido para soldadura en posiciones horizontal y/o plana. El número 3 representa un electrodo para uso en la posición plana, solamente. El cuarto número del símbolo muestra alguna característica especial del electrodo, por ejemplo, la calidad de soldadura, tipo de corriente, y cantidad de penetración.

Los factores a considerar en la selección del electrodo son:

- La calidad de soldadura requerida.
- Propiedades del metal base (resistencia mecánica).
- Composición química del metal base.
- Posición a soldar.
- Concentración de hidrógeno.
- Espesor del metal base y diseño de la junta.
- Condición de servicio y especificaciones.
- La velocidad de avance o paso aplicada por el soldador.
- Eficiencia de producción y condiciones de trabajo.

Es importante indicar que la formulación de un electrodo es característica del tipo de transferencia que se busca realizar, así como del tipo de corriente y polaridad para los

cuales fueron fabricados. Por ejemplo, para los electrodos que manejan corriente alterna y cuya polaridad de corriente está cambiando 60 veces por segundo se requiere de un gas de protección que pueda conservar la ionización al cambio de polaridad, ya que de no ser así se perdería la facilidad de reiniciación del arco eléctrico.

Otra de las características fundamentales de los revestimientos es la ausencia o adición de óxido de hierro o polvo de hierro en el revestimiento el cual, además de dar un mayor rendimiento de depósito de aporte (por consecuencia mayor velocidad de avance), proporciona una mayor eficiencia en la energía proporcionada por el arco eléctrico. Algunas personas piensan que la característica fundamental del electrodo es la propiedad de depósito y el arrastre del electrodo el cual permite una longitud de arco constante; sin embargo, debemos de prever que en los electrodos que carecen de polvo se está minimizando con el arrastre algunas características de la corriente y la relación de la curva voltaje-amperaje.

La cantidad y calidad del revestimiento del electrodo influyen grandemente en la transmisión de calor, formación de escoria, y velocidad de depósito, lo cual puede traer consigo la necesidad de aplicar una mayor cantidad de amperaje (sólo recomendable para soldaduras de alto relleno y en posición plana).

2.1.11 Almacenamiento de los electrodos ^(3, 8)

Una soldadura libre de defectos es el resultado de un riguroso control de las variables involucradas antes, durante y después del proceso. El almacenamiento inadecuado de los electrodos puede dar lugar al deterioro del recubrimiento, lo cual produce pérdida de las características de soldabilidad y favorecerá la presencia de discontinuidades en el cordón depositado. Siempre debe procurarse que los electrodos estén secos.

2.1.12 Fuentes de electricidad ^(2, 3, 8, 9)

Para la soldadura efectiva por arco, se requiere una corriente constante. La máquina soldadora deberá tener una curva descendente de voltios-amperes, en la que se produce una cantidad relativamente constante de corriente con solamente un cambio limitado en la carga de voltaje. Cuando se establece el arco con el electrodo, el resultado es un cortocircuito que inmediatamente induce un oleaje repentino de corriente eléctrica, a menos que la máquina esté diseñada para evitar esto.

En la soldadura por arco, el voltaje de circuito abierto (el voltaje cuando la máquina está operando y no se está soldando) es mucho más alto que el voltaje de arco (el voltaje después de establecer el arco). El voltaje de circuito abierto puede variar de 50 a 100 V y el voltaje de arco, de 18 a 36 V. Durante el proceso de soldar, el voltaje de arco también cambiará con las diferencias en la longitud del arco. Debido a que es difícil mantener una longitud uniforme del arco en todo momento, aún para un soldador experimentado, una máquina con una curva voltios-amperes de pendiente empinada producirá un arco más estable, porque habrá muy poco cambio en la corriente de soldar aún con cambios en el voltaje de arco.

La corriente utilizada directamente afecta la velocidad de depositación. A medida que se aumenta ésta, también se aumenta la densidad de corriente en la punta del electrodo. La cantidad de corriente requerida para cualquier operación de soldar está dictada por el grosor del metal por soldar.

Hay tres máquinas básicas de soldar utilizadas en la soldadura por arco:

- Generadores. Generalmente de corriente directa.
- Transformadores. Para corriente alterna.
- Rectificadores. Para selección de corriente.

El tamaño de la máquina soldadora por utilizar depende de la clase y cantidad de soldadura por hacer. La siguiente es una guía general para seleccionar una máquina soldadora:

- 150-200 amperes. Para soldadura liviana a mediana.
- 250-300 amperes. Para requerimientos normales de soldadura.
- 400-600 amperes. Para soldadura grande y pesada.

2.1.13 Soldabilidad en aceros ^(2, 4, 11, 13-16)

La soldabilidad se define como la capacidad de un metal o combinación de metales para soldarse en una estructura diseñada de modo conveniente a fin de que las uniones soldadas posean las propiedades metalúrgicas requeridas y lleven a cabo satisfactoriamente el servicio pretendido. La buena soldabilidad se caracteriza por la facilidad con que se realiza el proceso de soldadura, la ausencia de defectos en el proceso y valores de resistencia, ductilidad y dureza aceptables en la unión soldada.

Los factores que afectan la soldabilidad son principalmente:

- El proceso de soldadura.
- Las propiedades del metal base (propiedades físicas, mecánicas, composición química y estructura).
- El metal de relleno o aporte.
- Las condiciones de la superficie (humedad, óxidos y películas sólidas en superficie).
- El espesor del metal base y el tipo de junta.
- El calor aportado y las temperaturas de precalentamiento y relevado de esfuerzos.

El criterio para establecer la soldabilidad en los aceros se basa en el valor del carbono equivalente (CE), que se puede calcular a través de la siguiente fórmula:

$$CE=C+((Mn+Si)/6)+((Cr+Mo)/5)+((Ni+Cu)/15)$$

donde C es el contenido de carbono; Mn, de manganeso; Si, de silicio; Cr, de cromo; Mo, de molibdeno; Ni de níquel y Cu de cobre, todos expresados en w/o (% en peso).

A partir del valor de carbono equivalente se pueden distinguir tres casos:

- Si el $CE \leq 0.40$, la soldabilidad es "buena".
- Si el $0.40 < CE \leq 0.60$, la soldabilidad es "regular". En general, se recomienda usar electrodos bajos en hidrógeno, debiendo precalentar entre 200°F (93°C) y 400°F (204°C) y usar postcalentamiento.
- Si el $CE > 0.60$, la soldabilidad es "mala". En general, se recomienda usar electrodos bajos en hidrógeno, debiendo precalentar entre 400°F (204°C) y 700°F (371°C) y usar postcalentamiento.

El caso de la soldabilidad "buena" se caracteriza por:

- Las piezas pueden unirse por cualquiera de los procedimientos de soldadura.
- Estos aceros muestran, si acaso, cierta tendencia a producir soldaduras porosas y picaduras superficiales, la cual se reduce conforme disminuye el contenido de carbono.
- Son fácilmente soldables sin necesidad de precaución alguna. En espesores hasta de 5/16" (7.9 mm) inclusive. Las secciones de mayor espesor de estos aceros, en las que más de uno de los elementos esté hacia el lado alto del límite permitido de contenido de carbono, muestran cierta tendencia hacia el agrietamiento.

El caso de la soldabilidad "regular" se caracteriza por:

- La soldadura de estos aceros puede requerir de procedimientos especiales, que pueden incluir el precalentamiento y el relevado de esfuerzos.
- Si no se tiene experiencia se aconseja verificar la tendencia del acero al agrietamiento (esto se puede realizar a través de pruebas de soldabilidad o mediante la estimación de índices de soldabilidad y parámetros de agrietamiento). Si el acero no muestra tendencia al agrietamiento pueden aplicarse los procedimientos normales de soldadura; si se observa una tendencia al agrietamiento, deben seguirse los procedimientos indicados para la soldadura de aceros de contenido bajo a medio de carbono.
- El relevado de esfuerzos ayuda también a reducir zonas duras producidas por la soldadura. La temperatura del tratamiento es de 1100°F (593°C) a 1200°F (649°C). Es práctica común mantener el acero durante una hora a esta temperatura por cada pulgada (o fracción de la misma) de espesor hasta un máximo de 8 horas.

El caso de la soldabilidad "mala" se caracteriza por:

- El éxito en la soldadura de estos aceros requiere del desarrollo de procedimientos específicos de soldadura para cada aplicación. Dicho procedimiento debe probarse y calificarse antes de ser adoptado.
- Los problemas que pueden surgir durante la soldadura de los aceros de alto carbono equivalente son:
 - Agrietamiento interno y externo del metal de la soldadura.
 - Porosidad en el metal de la soldadura.
 - Endurecimiento excesivo del metal base.
 - Agrietamiento del metal base.
 - Ablandamiento excesivo del metal base.

2.1.14 Defectos de la soldadura ⁽³⁻⁷⁾

El propósito de la soldadura es unir dos o más componentes en una sola estructura; por lo tanto la integridad física de ésta depende de la calidad de la soldadura. Aparte de las tensiones residuales y la distorsión en el ensamble final, pueden ocurrir otros defectos en la soldadura. Basada en una clasificación establecida por el IIS (International Institute of Welding) éstos se pueden clasificar en seis grupos:

- Serie 100: Grietas. Estas son discontinuidades en la soldadura misma o en el metal base adyacente a la soldadura. Este tipo de defecto produce una importante reducción en la resistencia de la soldadura (Figura 2.6).

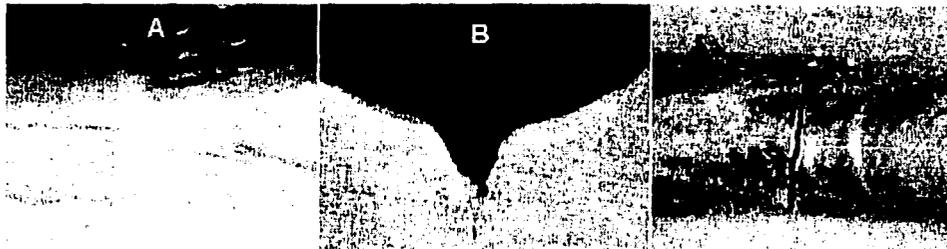


Figura 2.6: Grietas longitudinal (A), de cráter (B) y transversal (C).

- Serie 200: Porosidades. Estas incluyen diversos defectos de porosidad y contracción, consistiendo en defectos formados por gases atrapados durante la solidificación. Pueden tener forma esférica (huecos en forma de burbuja) o alargada (huecos en forma de gusano) (Figura 2.7).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Figura 2.7: Porosidades formadas en ranura (A) y filete (B).

- Serie 300: Inclusiones sólidas. Estas son materiales sólidos no metálicos atrapados en el metal de la soldadura. La forma más común son las glóbulos de escoria que en lugar de flotar en la parte superior del pozo de la soldadura, se quedan atrapados durante la solidificación del metal (Figura 2.8).

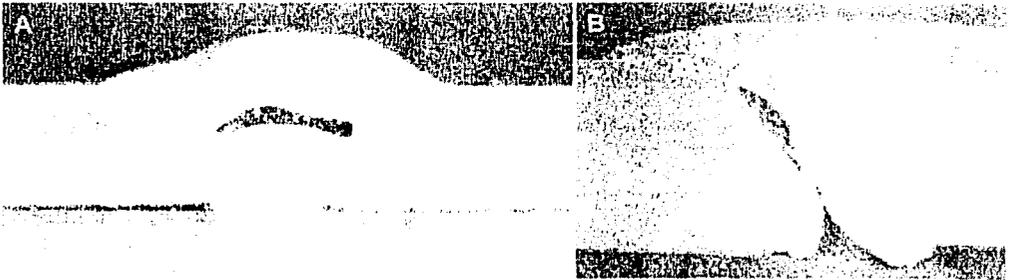


Figura 2.8: Inclusiones sólidas en dos secciones (A) y (B).

- Serie 400: Fusión o penetración incompleta. Esta carencia de fusión es simplemente una discontinuidad en la cual no hay fusión a través de toda la sección transversal de la unión. La penetración incompleta hace referencia a la profundidad que alcanza la soldadura dentro del metal base de unión. Una carencia de penetración significa que la fusión no penetró lo suficiente en la raíz de unión en relación con las normas especificadas (Figura 2.9).

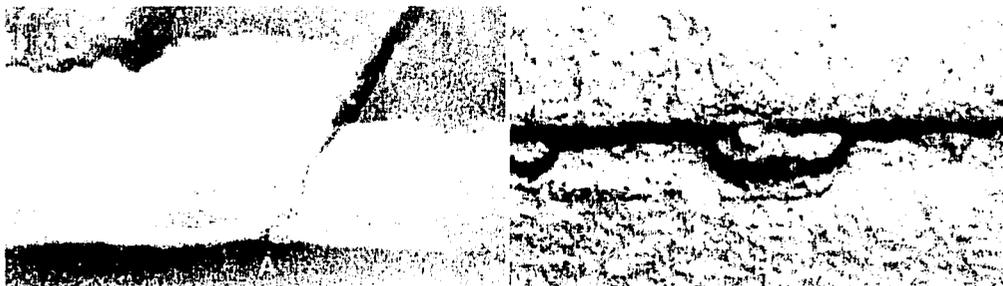


Figura 2.9: Fusión o penetración incompleta en dos secciones (A) y (B).

- Serie 500: Forma imperfecta o contorno inaceptable. La soldadura debe tener cierto perfil o forma para alcanzar una máxima resistencia de la unión soldada y evitar la fusión incompleta y la falta de penetración (Figura 2.10).



Figura 2.10: Forma imperfecta o contorno inaceptable; socavado (A) y perfil incorrecto (B).

- Serie 600: Defectos diversos. En esta categoría están los golpes de arco, en los cuales el soldador accidentalmente permite que el electrodo toque el metal base junto a la unión, dejando una cicatriz en la parte; la salpicadura excesiva, en la cual caen gotas del metal de soldadura fundido en la superficie de las partes base; y otros defectos no incluidos en las categorías anteriores (Figura 2.11).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

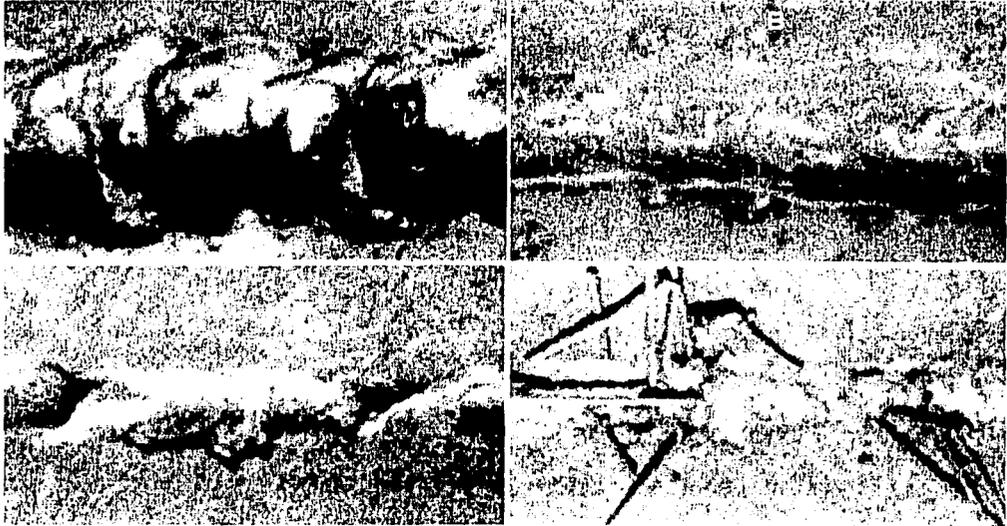


Figura 2.11: Defectos diversos; apariencia pobre (A), chisporroteo (B), unión pobre (C) y fibras (D).

Existen diversos métodos de inspección y prueba disponibles para verificar la calidad de la unión soldada. Los procedimientos estandarizados han sido desarrollados y especificados durante años por sociedades como la AWS (American Welding Society). Para fines de análisis, estos procedimientos de inspección y prueba se dividen en tres categorías:

- Visuales. Son primarios. Se caracterizan por la atenta observación y el detenido análisis del inspector durante todo el proceso.
- No destructivos. Se utilizan para detectar defectos o fallas en los metales y dejan a la muestra en condiciones de realizar la tarea para la que fue hecha aún después de la prueba.
- Destructivos. Generalmente se aplica fuerza destructiva en una forma que simula las condiciones de servicio y da una medida absoluta de la resistencia de la muestra probada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.1.15 Principales factores que afectan el proceso de soldadura

Los principales factores que afectan el proceso de soldadura son los siguientes:

- **Diámetro correcto de electrodo.** La selección del diámetro del electrodo depende del espesor del material a soldar, así como del tipo de junta, la preparación y la posición; para las posiciones verticales y sobrecabeza se prefiere disminuir el diámetro del electrodo, lo cual facilita la aplicación, ya que esto depende del tamaño del charco de fusión. Para la mayor parte de la soldadura plana, los electrodos deberán ser de 8 o 9.5 mm máximo, mientras que el tamaño máximo de los electrodos para soldadura vertical y de sobrecabeza es de 4.8 mm.
- **Tipo de corriente apropiada.** Cuando se emplea corriente directa se tiene un arco firme y controlable, obteniéndose un cordón muy parejo debido a que no existen cambios en la polaridad y a que el goteo es constante y uniforme. En el caso de la corriente alterna, el goteo no es constante debido al cambio de polaridad y la concentración de calor, razón por lo cual estos electrodos deben de soportar amperajes mayores.
- **Estabilidad y cantidad correcta de corriente (amperaje).** La cantidad de corriente depende de la aleación del electrodo, de su diámetro y del tipo de revestimiento. Cuando se selecciona el diámetro del electrodo con el amperaje apropiado se puede obtener un depósito constante de material lo cual, al mantener constante la anchura del cordón, dará la velocidad de avance adecuada. Como una regla general, se pueden usar corrientes más altas y electrodos de diámetros mayores para soldar en posiciones planas que en la soldadura vertical o sobrecabeza. Los fabricantes de electrodos generalmente especifican una gama de valores de corriente para electrodos de varios diámetros. Sin embargo, debido a que el ajuste de corriente recomendado es aproximado solamente, el ajuste final de corriente es hecho durante la soldadura.

- Voltaje. El voltaje ayuda a compensar la estabilidad del arco y la longitud de éste. Además, proporciona, en función de la cantidad, la apertura de transferencia. Muchas veces la caída de voltaje y el amperaje dependen de la relación del diámetro del conductor eléctrico contra la longitud de éste, por lo cual es muy importante soldar con los cables lo más cortos posibles y del diámetro adecuado. Es muy importante observar que la pieza porta-electrodo y la de tierra pueden afectar en la transferencia de corriente, al igual que el cable conductor.
- Estabilidad y longitud de arco. Cuando las máquinas de soldar proporcionan un voltaje continuo surge la falta de control de la corriente en el desarrollo de la soldadura, lo cual produce la discontinuidad en la forma del depósito, y por consiguiente, una disminución en el avance. La longitud de arco es importante dentro de la soldadura ya que de ésta depende en gran parte la corriente aplicada y el tipo de transferencia del metal. La longitud del arco depende del tipo de electrodo que se usa y el tipo de soldadura por hacer. Por lo tanto, para electrodos con diámetro pequeño, se requiere un arco más corto que para electrodos más grandes. Generalmente, la longitud del arco deberá ser aproximadamente igual al diámetro del electrodo. Un arco más corto normalmente es mejor para soldadura vertical y de sobrecabeza porque se puede lograr mejor control de la mezcla de metales fundidos. Cuando el electrodo, la corriente, y la polaridad sean correctos, un buen arco corto producirá un sonido agudo de crepitación. Un arco largo puede reconocerse por un silbido continuo muy parecido a un escape de vapor.
- Correcta velocidad de soldadura. Para regular la velocidad de soldadura, lo que se debe controlar es el ancho y alto del cordón. Una velocidad alta implica un enfriamiento rápido. Las impurezas y los gases no pueden ser liberados. El cordón es angosto y el ondeo punteado. Cuando la velocidad es baja, el enfriamiento se tarda más, provocando que el metal se amontone. El cordón es más alto y ancho con un ondeo recto.

- Posición a soldar. La velocidad de solidificación del material de aporte, con respecto a la transferencia de calor del revestimiento y a la consistencia en la densidad de éste durante la transferencia, sufre variaciones de acuerdo a la posición en que se realiza la soldadura. De ahí que los electrodos que se empleen deban ser los más apropiados.
- Ángulos correctos de aplicación. Un aspecto muy importante a controlar dentro del proceso es la orientación del electrodo, es decir, dependiendo de la preparación y tipo de cordón se recomienda no sobrepasar una inclinación dada durante la ejecución de la soldadura, ya que esto afecta la transferencia y la aportación de elementos aleantes. El ángulo de avance -o de ataque- es el ángulo entre la junta, y el electrodo, visto en un plano longitudinal. El ángulo de trabajo es el ángulo entre el electrodo y el metal por soldar, visto de un plano terminal (Figura 2.12 y Tabla 2.1).

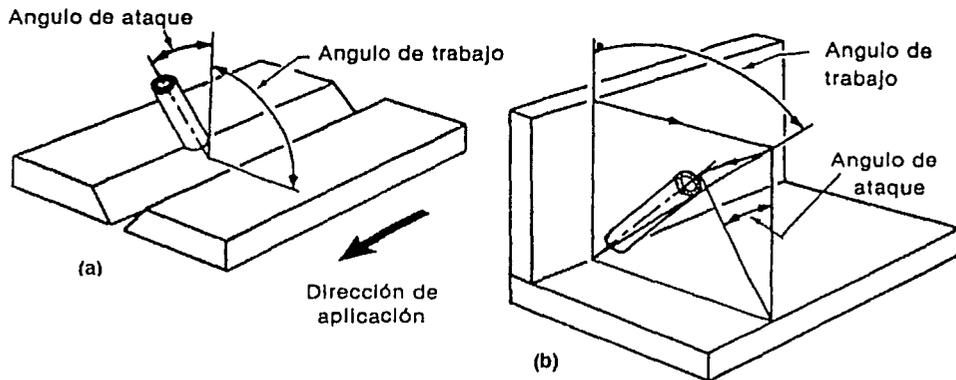


Figura 2.12: Ángulos de aplicación en ranuras (a) y filetes (b).

TESIS CON
FALLA DE CARGEN

Tabla 2.1. Ángulos típicos de aplicación.

Posición a soldar	Angulo de trabajo (°)	Angulo de avance (°)
Ranura plana	90	5-10*
Ranura horizontal	80-100	5-10
Ranura vertical ascendente	90	5-10
Ranura sobrecabeza	90	5-10
Filete horizontal	45	5-10*
Filete vertical ascendente	35-55	5-10

* El ángulo puede variar de 10 a 30° para electrodos con alto contenido de polvo de hierro

Un resumen de los defectos y las causas que los originan son los siguientes:

- Apariencia pobre
 - Corriente alta o baja
 - Técnica manual inapropiada
 - Electrodo incorrecto
 - Velocidad de paso irregular
 - Humedad electrodo

- Baja penetración
 - Corriente baja
 - Velocidad de paso alta
 - Posición electrodo incorrecta
 - Ángulo electrodo incorrecto
 - Electrodo grande
 - Abertura raíz pequeña

- Chisporroteo
 - Tipo corriente incorrecta
 - Corriente alta
 - Longitud de arco alta
 - Electrodo incorrecto
 - Ángulo electrodo incorrecto
 - Humedad electrodo

- Fibras
 - Abertura raíz grande

- Fusión incompleta
 - Velocidad de paso alta
 - Electrodo grande
 - Corriente baja
 - Abertura raíz pequeña
 - Posición electrodo incorrecta
 - Limpieza faltante
 - Longitud de arco irregular

- Grieta de cráter
 - Técnica manual inapropiada

- Grieta longitudinal superficial o interna
 - Precalentamiento inapropiado
 - Postcalentamiento inapropiado
 - Composición química del metal base
 - Electrodo incorrecto
 - Rigidez de la junta
 - Humedad electrodo
 - Metal base alto contenido de S
 - Corriente baja
 - Velocidad de paso alta
 - Electrodo pequeño
 - Secuencia inapropiada
 - Velocidad de enfriamiento alta
 - Preparación de junta inapropiado
 - Diseño de junta inapropiado

- Grieta transversal
 - Precalentamiento inapropiado
 - Postcalentamiento inapropiado
 - Composición química del metal base
 - Electrodo incorrecto
 - Electrodo pequeño
 - Corriente baja
 - Velocidad de enfriamiento alta
 - Soldadura pequeña

- Inclusiones sólidas
 - Limpieza faltante
 - Limpieza de junta faltante
 - Ángulo de ranura pequeño
 - Corriente alta o baja
 - Electrodo en mal estado
 - Técnica manual inapropiada

- Perfil incorrecto
 - Abertura raíz pequeña
 - Velocidad de paso baja
 - Velocidad de paso alta
 - Corriente alta
 - Longitud de arco baja
 - Corriente baja
 - Limpieza faltante
 - Técnica manual inapropiada
 - Electrodo grande
 - Electrodo incorrecto

- Porosidad superficial
 - Precalentamiento inapropiado
 - Limpieza faltante
 - Humedad electrodo
 - Metal base alto contenido de S
 - Corriente baja
 - Velocidad de enfriamiento alta
 - Longitud de arco alta

- Socavado
 - Técnica manual inapropiada
 - Corriente alta
 - Electrodo grande
 - Posición electrodo incorrecta
 - Ángulo electrodo incorrecto
 - Velocidad de paso alta

- Unión pobre
 - Ángulo electrodo incorrecto
 - Técnica manual inapropiada

2.1.16 Procedimientos de soldadura ^(2, 5-8, 11)

Una especificación del procedimiento de soldadura (WPS por sus siglas en inglés) es un documento que describe la metodología de cómo la soldadura debe ser realizada en producción. Se recomiendan para todas las operaciones de la soldadura y muchos códigos y estándares usados las hacen obligatorias. Esta ofrece suficientes detalles para permitir a cualquier soldador experimentado aplicar la información y producir una soldadura de calidad aceptable.

Bajo ciertas condiciones, la especificación del procedimiento puede ser considerada como precalificada, por lo cual no se requiere el registro de calificación ni la especificación del procedimiento. De hecho, la Sociedad Americana de la Soldadura (AWS) reconoce que los procedimientos de soldadura de acero al carbono son "muy probados y verdaderos". Estos proporcionan los parámetros más comunes, los que, si son seguidos, serán considerados "precalificados" y no requerirán de pruebas mecánicas para su verificación.

2.1.17 La soldadura de calidad comercial^{8, 10, 11}

En general, el procedimiento ideal de soldadura es uno que produce soldaduras de calidad aceptable al menor de los costos. Varios factores influyen para seleccionar las condiciones óptimas de soldadura, por lo que es imposible escribir un procedimiento para cada juego de condiciones. Al seleccionar un procedimiento, lo mejor es estudiar las condiciones de la aplicación y escoger el que más se ajuste al caso de interés.

Hay procedimientos de calidad de código, los cuales pretenden proporcionar el mayor nivel de calidad y apariencia, tales como: el AWS estructural; el AISC para edificios y puentes; el ASME para tanques a presión; el AASHO para puentes; por citar algunos. Las soldaduras producidas bajo este esquema deben estar libres de defectos de tal manera que acrediten todos los ensayos no destructivos impuestos por el código. Esto implica soldaduras libres de grietas, firmes, con porosidades o socavados pequeños o nulos.

En el caso de la calidad comercial, las soldaduras deberán tener buena apariencia, estar libres de grietas y cumplir con los requerimientos normales de resistencia de la junta. Las velocidades y corrientes regularmente son más altas que en el caso de los procedimientos de código y presentarán algunos defectos menores que serían objetables en los códigos más exigentes.

2.2 Sistemas Expertos

2.2.1 Introducción ⁽¹⁸⁻²¹⁾

La inteligencia artificial (IA) es una rama de la ciencia de la computación. La IA comprende el estudio y creación de sistemas computarizados que manifiestan cierta forma de “inteligencia”: sistemas que aprenden nuevos conceptos y tareas, que pueden “razonar” y derivar conclusiones útiles acerca del mundo que nos rodea, sistemas que pueden comprender un lenguaje natural o percibir y entender una escena visual, y sistemas que realizan otro tipo de actividades que requieren de inteligencia humana. Paralelo al desarrollo de la informática comienza el desarrollo de la inteligencia artificial.

La IA engloba diferentes subáreas. Las principales son:

1. El reconocimiento de voz o de patrones.
2. La demostración automática de teoremas.
3. El procesamiento del lenguaje natural.
4. La visión artificial, la robótica, las redes neuronales.
5. Los sistemas expertos.

2.2.2 Definición de Sistema Experto ⁽¹⁸⁻²¹⁾

Un sistema experto (SE) es un sistema basado en conocimientos que imita el pensamiento de un experto para resolver problemas de un terreno particular de aplicación. Una de las características principales de los sistemas expertos es que están basados en reglas, es decir, contienen conocimientos predefinidos que se utilizan para tomar todas las decisiones.

En teoría, estos sistemas son capaces de “razonar” siguiendo los mismos pasos que seguiría un especialista en determinada materia cuando resuelve un problema propio de su disciplina. Por ello, el creador de un sistema experto tiene que comenzar por identificar y recoger del experto humano los conocimientos que éste utiliza, así como los conocimientos empíricos que se adquieren con la práctica. Dado que los programas están basados en el conocimiento, un aspecto fundamental es la programación del conocimiento; esto hace uso de la representación explícita del conocimiento que utiliza el sistema y de su interpretación y manipulación lógica por medio de métodos de inferencia que permiten deducir nuevo conocimiento a partir del que ya se dispone.

Un SE no sólo realiza las funciones tradicionales de manejar grandes cantidades de datos, sino que también manipula esos datos de forma tal que el resultado sea inteligible y tenga significado para responder a preguntas incluso no completamente especificadas. Así, un sistema experto intenta imitar e incluso superar en algunas situaciones a un experto humano en un ámbito concreto de su actividad. No pretende, en absoluto, reproducir el pensamiento humano, sino simplemente la pericia de un profesional competente (téngase en cuenta que para construir un SE suele contarse con expertos en la materia que incorporan su conocimiento al sistema). Esta pretensión es más sencilla ya que en muchos campos los expertos trabajan siguiendo reglas, aunque, generalmente, no sean conscientes de ello.

En aquellos campos en los que no sea necesario aplicar la intuición ni el sentido común, los sistemas basados en el conocimiento han conseguido notables éxitos, logrando en ocasiones ser más regulares y rápidos que los propios expertos.

2.2.3 Características de los Sistemas Expertos ⁽¹⁸⁻²¹⁾

Para que un sistema actúe como un experto es deseable que reúna, en lo posible, las características de un experto humano, esto es:

- Habilidad para adquirir conocimiento.
- Fiabilidad, para poder confiar en sus resultados o apreciaciones.
- Solidez en el dominio de su conocimiento.
- Capacidad para resolver problemas.

Dada la complejidad de los problemas que usualmente tiene que resolver un SE, puede existir cierta duda en el usuario sobre la validez de la respuesta obtenida. Por este motivo, es una condición indispensable que un SE sea capaz de explicar su proceso de razonamiento o dar razón del por qué solicita alguna información o dato en particular.

2.2.4 Componentes de un Sistema Experto ⁽¹⁸⁻²¹⁾

Los principales componentes de un SE son los siguientes:

- Base de Conocimiento. Un SE posee el conocimiento del experto humano convenientemente formalizado y estructurado; esto es lo que se conoce como base de conocimiento. Está constituida por la descripción de los objetos y las relaciones entre ellos, así como de casos particulares y excepciones. El conocimiento se puede representar mediante cálculo de predicados, listas, objetos, redes semánticas y/o reglas de producción. De todas ellas, las dos formas más usuales son las reglas de producción y los objetos. En cualquier caso, la elección de las técnicas de representación a utilizar dependerá del tipo de problema a resolver.

- **Motor de Inferencia.** También llamado intérprete de reglas, es un módulo que se encarga de las operaciones de búsqueda y selección de las reglas a utilizar en el proceso de razonamiento.
- **Base de Hechos.** Se trata de una memoria temporal auxiliar que almacena los datos del usuario, datos iniciales del problema, y los resultados intermedios obtenidos a lo largo del proceso de resolución. A través de ella se puede saber no sólo el estado actual del sistema sino también cómo se llegó a él.
- **Interfaz de Usuario.** Todo sistema dispone de una interfaz de usuario, que gobierna el diálogo entre el sistema y el usuario. Para el desarrollo de estas interfaces algunas herramientas de desarrollo incorporan generadores de interfaz de usuario o bien utilizan herramientas de desarrollo de interfaces gráficas existentes en el mercado.

Otros módulos que forman parte de este tipo de herramientas son los siguientes:

- **Módulo de comunicaciones.** En la actualidad la mayoría de los sistemas basados en el conocimiento interactúan con el experto y otros sistemas para poder recoger información o consultar bases de datos.
- **Módulo de explicaciones.** Es una utilidad importante en la etapa de desarrollo ya que aporta una ayuda considerable al ingeniero del conocimiento[†] para refinar el funcionamiento del motor de inferencia, y al experto a la hora de construir y verificar la coherencia de la base de conocimiento. Sirve para explicar al usuario tanto las reglas usadas como el conocimiento aplicado en la resolución de un determinado problema.

[†]Ingeniero del conocimiento: Quien se encarga de crear y organizar un sistema de adquisición de conocimiento con su respectiva base de conocimiento a partir de la captación e interrogación de la experiencia previa del experto.

- Módulo de adquisición de conocimiento. Este módulo permite al ingeniero del conocimiento, y/o experto, la construcción de la base de conocimiento de una forma sencilla, y facilita la actualización de la base de conocimiento, cuando sea necesario.

Si bien estos módulos no existen en todos los sistemas expertos, o bien están desarrollados o implementados de maneras diferentes, la función que desempeñan es muy importante en el desarrollo de estos sistemas. Así, el motor de inferencia y las interfaces, que incluyen la interfaz de usuario, el módulo de explicaciones y el módulo de adquisición del conocimiento, forman el esqueleto o sistema esencial, y que, separadas de las bases de conocimiento y de hechos, constituyen una herramienta de software (“*shells*”) para el desarrollo de los sistemas basados en el conocimiento.

2.2.5 Estructura de un Sistema Experto ⁽¹⁸⁻²¹⁾

La estructura de un sistema experto está basada en una entrada de datos realizada por el usuario a fin de efectuar una consulta. Las entradas no solamente están compuestas de estas consultas. El aprendizaje del sistema y las condiciones específicas del problema a tratar también han de encontrarse en la entrada. Junto a ello, se encuentra la administración del sistema, compuesta por un interfaz encargada del manejo de la sintaxis del lenguaje y de la máquina de inferencias, que se encarga de efectuar la búsqueda en la base de conocimientos y en la base de datos. Por último, se despliegan los resultados.

2.2.6 Tipos de Sistemas Expertos ^(18. 20. 21)

Los problemas con los que pueden tratar los sistemas expertos pueden clasificarse fundamentalmente en dos tipos: 1) problemas esencialmente deterministas y 2) problemas esencialmente estocásticos. Consecuentemente, los sistemas expertos pueden clasificarse en dos tipos principales según la naturaleza de problemas para los que están diseñados: 1)

deterministas, los que son resultado de una causa que los ha determinado necesariamente; y 2) estocásticos, aquellos que dependen del azar.

En situaciones inciertas, es necesario introducir algunos medios para tratar la incertidumbre. Por ejemplo, algunos sistemas expertos usan la misma estructura de los sistemas basados en reglas, pero introducen una medida asociada a la incertidumbre de las reglas y a la de sus premisas. En este caso se pueden utilizar algunas fórmulas de propagación para calcular la incertidumbre asociada a las conclusiones. Durante las últimas décadas han sido propuestas algunas medidas de incertidumbre. Algunos ejemplos de estas medidas son los factores de certeza (usados en los "shells" para generar sistemas expertos tales como el sistema experto MYCIN, el cual es utilizado en tratamientos de infecciones bacterianas de la sangre), la lógica difusa, etc. Otra medida intuitiva de incertidumbre es la probabilidad, en la que la distribución conjunta de un conjunto de variables se usa para describir las relaciones de dependencia entre ellas, y se obtienen conclusiones usando fórmulas muy conocidas de la teoría de la probabilidad. Este es el caso del sistema experto PROSPECTOR, que utiliza el teorema de Bayes para la exploración de mineral.

Los sistemas expertos que utilizan la probabilidad como medida de incertidumbre se conocen como sistemas expertos probabilistas.

2.2.7 Desarrollo de un Sistema Experto ^{18, 20, 21, 23, 24}

El desarrollo de un SE suele pasar por cuatro fases:

- Identificación de la aplicación y concepción de la solución.
- Desarrollo del (de los) prototipo(s).
- Ejecución y construcción del sistema completo.

- Integración del nuevo sistema con los anteriores y la asimilación del uso de la nueva tecnología.

Como una primera aproximación es necesario indicar que las herramientas a emplear durante la elaboración de un SE pueden clasificarse en tres grupos en función de las diferentes etapas del proyecto en que intervienen:

- Estudio de viabilidad: Se intenta verificar si el problema justifica el desarrollo de un sistema basado en el conocimiento (este punto es muy importante, ya que algunas veces se ha intentado resolver con este tipo de tecnología problemas que no eran los adecuados, lo que llevó a resultados decepcionantes). Las herramientas deben ser flexibles y de uso muy sencillo. Muchas veces en esta etapa no es necesario el uso de una herramienta específica ya que puede utilizarse un lenguaje de programación de propósito general.
- Desarrollo del prototipo: En esta fase las herramientas deben poseer una serie de características a nivel de estructuras de control, permitir probar y comparar los diferentes enfoques de la resolución del problema (representación del conocimiento, estrategia de control, etc.) y ofrecer facilidades a los ingenieros del conocimiento (traza, gestión de coherencia, etc.) en el desarrollo del sistema.
- Desarrollo del sistema: El factor más importante es la eficiencia. Asimismo, debe disponer de módulos explicativos evolucionados para una efectiva compilación de la base de conocimiento y los métodos de inferencia. En resumen, deben adaptarse perfectamente al problema.

La tarea más importante durante el desarrollo de un sistema basado en el conocimiento consiste en el modelado del problema que se quiere resolver, esto es, representar el conocimiento que posee el experto en un lenguaje que permita razonar al sistema. Esto consiste en formalizar y estructurar los objetos y las relaciones entre ellos en la base de conocimiento. La elección dependerá, principalmente, de la naturaleza y

magnitud del problema. Así, existen formalismos que permiten representar fácilmente mecanismos de razonamiento puramente lógicos; otros, sin embargo, se adaptan mejor a una representación por analogía.

Existen tres tipos de representación:

1. La representación procesal expresa explícitamente las relaciones entre los fragmentos de conocimiento que son complejas de modificar.
2. La representación declarativa incluye el cálculo de predicados, las reglas de producción y las redes semánticas. El conocimiento queda estructurado en fragmentos independientes unos de otros y que, por tanto, son fácilmente modificables. Estos módulos de conocimiento se combinan mediante un mecanismo general de razonamiento y deducción.
3. La representación mixta, como los objetos y marcos, emplea los dos métodos de representación anteriores.

A continuación se explican algunos ejemplos de representación:

- Reglas de producción: Es una representación formal de una relación, una información semántica o una acción condicional. Una regla de producción tiene, generalmente, la siguiente forma:

SI Premisa ENTONCES Consecuencia

Las reglas de producción facilitan la creación y la modificación de la base de conocimiento. Permiten introducir coeficientes de verosimilitud para ponderar el conocimiento (estos coeficientes se van propagando durante el proceso de razonamiento mediante fórmulas de cálculo establecidas) y, en teoría, el método asegura que cuantas más reglas posea más potente es. Sin embargo, aunque es la

forma de representación más intuitiva y rápida, cuando el número de reglas es grande aumenta la dificultad de verificación de todas las posibilidades con el consiguiente riesgo de perder la coherencia lógica en la base de conocimiento.

- **Redes semánticas:** Es un método que consiste en representar el conocimiento en forma de redes; los nodos representan conceptos u objetos, y los arcos que los interconectan describen relaciones entre ellos.
- **Marcos:** Consiste en asociar propiedades a los nodos que representan los conceptos u objetos. Las propiedades son descritas en términos de atributos y los valores asociados.
- **Objetos:** La diferencia con los marcos reside en que, en un entorno de programación orientada a objetos, éstos pueden actuar como entidades independientes. De esta forma, el control del sistema se consigue mediante el envío de mensajes del sistema a los objetos y entre ellos mismos.
- **Representaciones múltiples:** Es posible, e incluso muy frecuente, combinar dos o más formas de representar el conocimiento en el mismo sistema para obtener el modelado más adecuado a cada problema, por lo que es bueno que una herramienta de desarrollo de sistemas basados en el conocimiento contemple más de una forma de representación.

En el desarrollo del sistema es necesario idear el mecanismo de inferencia que refleje lo más fielmente posible cómo piensa o actúa el experto. Este mecanismo, que se denomina motor de inferencia, es la parte más importante del sistema basado en el conocimiento junto con la base de conocimiento. Los mecanismos de razonamiento que utilizan reglas de producción son los de la lógica formal. Además existe otro método que difiere de los anteriores y que es la búsqueda en árboles.

Existen además cinco modos de razonamiento:

- Encadenamiento hacia adelante: El motor de inferencia parte de los hechos para llegar a los resultados, esto es, selecciona las reglas que verifiquen las condiciones de la parte izquierda (premisas).
- Encadenamiento hacia atrás: En este caso el motor de inferencia parte de los resultados y trata de volver a los hechos para comprobar si encajan con el problema planteado.
- Encadenamiento mixto: Este modo ofrece varias posibilidades que resultan de combinar el encadenamiento hacia adelante y hacia atrás para paliar sus limitaciones y mantener las ventajas.
- Algoritmos de búsqueda heurística: En los casos en los que la naturaleza de la base de conocimiento permita construir una estructura de árbol, el proceso de inferencia se convierte en un problema de búsqueda en un árbol.
- Herencia: Es el método de inferencia utilizado en entornos orientados a objetos. Un objeto hijo hereda propiedades y hechos de sus padres. Así, la asignación de nuevas propiedades a un objeto se realiza a través de las relaciones entre ese objeto y el resto.

Dentro de los modos de razonamiento los factores de incertidumbre son valores asignados a hechos o reglas que indican la certeza o grado de confianza que el experto tiene en una regla o el usuario en un hecho. No representan, ni mucho menos, una probabilidad en el sentido estricto de la palabra.

Un sistema que usa factores de incertidumbre asociados a las reglas o propiedades de los objetos puede realizar varias recomendaciones indicando el grado de confianza o nivel de certidumbre de cada una.

2.2.8 Lenguajes para construir Sistemas Expertos ⁽¹⁸⁻²⁴⁾

Para el desarrollo de sistemas basados en el conocimiento se han venido utilizando tanto lenguajes de programación específicos de la inteligencia artificial (LISP y PROLOG) como de propósito general (C, PASCAL, etc.).

LISP es uno de los lenguajes más utilizados desde los comienzos de la IA. Fue creado poco después de FORTRAN. Es un lenguaje cuya principal estructura de datos son las listas, aún cuando se han ido incorporando otras estructuras más sofisticadas como pueden ser los objetos. Tiene como ventaja el manejo de sus estructuras a muy alto nivel lo que facilita la implementación rápida de los modelos y su facilidad de modificación. Como desventaja está su relativa lentitud frente a lenguajes de propósito general como C. La mayoría de las primeras herramientas de desarrollo de sistemas basados en el conocimiento fueron escritas en LISP y, en la actualidad, conviven con otras que se han desarrollado en C++.

PROLOG es un lenguaje declarativo (en contraste con los lenguajes de programación más usuales que son de procedimiento). A diferencia de LISP, no describe secuencialmente el algoritmo de resolución del problema, sino que se limita a describir los hechos conocidos y las relaciones existentes entre ellos. Está orientado al "cómo" mientras que LISP está orientado al "qué". PROLOG, a partir de los datos introducidos, deduce nuevos hechos y resuelve el problema "automáticamente". PROLOG tiene incluido, por tanto, un motor de inferencia que se encarga de realizar búsquedas en su base de hechos. Programar con PROLOG, por tanto, consiste en "asertar" hechos sobre objetos y preguntar al sistema sobre sus relaciones. Este lenguaje, aún cuando se le reconocen sus bondades, no ha tenido una gran utilización (si se exceptúa Francia, Gran Bretaña y Japón con el proyecto de 5ª generación, en el que se adoptó como lenguaje de programación PROLOG) siendo su principal aplicación el manejo de bases de datos relacionales junto con lenguajes de bases de datos de 4ª generación asociados a éstas.

En la actualidad, es común la utilización de lenguajes orientados a objeto (tales como C++) para el desarrollo de generadores de sistemas expertos. La incorporación de la programación orientada a objetos al lenguaje C ha facilitado la labor del modelado que requiere todo sistema basado en el conocimiento y su rapidez de ejecución, así como el hecho de ser uno de los lenguajes de programación más conocidos, ha hecho que su uso vaya en aumento. Una herramienta para la construcción de sistemas basados en el conocimiento no es sólo un lenguaje de programación de alto nivel orientado al desarrollo de estos sistemas. Este equipo lógico de desarrollo tiene, entre otras, las siguientes características o utilidades:

- Posibilidades para el desarrollo de prototipos.
- Un motor de inferencia.
- Uno o varios métodos para la representación del conocimiento.
- Una o varias técnicas para el manejo de la incertidumbre.
- Un generador de interfaces gráficos (no siempre).

Estas herramientas están muy orientadas hacia el usuario final de la aplicación y, por lo tanto, es fundamental elegir la herramienta adecuada al entorno de aplicación. Son muchos los factores que influyen a la hora de tomar una decisión. En primer lugar es necesario conocer el alcance real del proyecto, esto es, si primero va a construirse una maqueta para estudiar la viabilidad del proyecto, o, si por el contrario, ya está decidido el desarrollo del sistema basado en el conocimiento.

2.2.9 Integración y migración de los Sistemas Expertos ^(18, 20, 22, 25)

Los sistemas expertos, salvo excepciones, no están aislados sino que forman parte de otros sistemas, expertos o convencionales. Existen dos tipos básicos de estructura de integración. En la primera, el sistema basado en el conocimiento forma parte de otro sistema principal. Así, si el sistema necesita comunicarse con el sistema basado en el conocimiento, entablará una comunicación directamente o a través de una red. En la segunda el sistema basado en el conocimiento es el sistema principal y está conectado a

otros sistemas basados en el conocimiento o convencionales, que le ayudan en su operación. Como ejemplo están los subsistemas de procedimiento que realizan complejos cálculos matemáticos necesarios durante el proceso de razonamiento.

En ambos casos debe garantizarse una comunicación fluida de todos los sistemas, aunque estén funcionando en plataformas diferentes, ya sea directamente o a través de una red local. Este aspecto es crítico en sistemas basados en el conocimiento en tiempo real, los cuales requieren un rápido acceso a la información relevante y a las bases de datos para poder ofrecer una solución inmediata y satisfactoria.

Por tanto, habrá que fijarse en las posibilidades de conexión a las bases de datos más conocidas y, en especial, a aquella que se esté utilizando como estándar en la organización así como la posibilidad de llamar a rutinas externas en diferentes lenguajes y viceversa, o la invocación del sistema basado en el conocimiento desde otros sistemas.

Un aspecto fundamental a tener en cuenta es la portabilidad de la herramienta. En este aspecto hay que valorar no sólo si la herramienta es susceptible de funcionar en diferentes plataformas sino también el costo del cambio de plataforma. Existen herramientas que permiten pasar de una plataforma a otra sin apenas esfuerzo, lo que facilitará la comercialización y el uso de los sistemas que se desarrollen.

2.2.10 Evolución Histórica de los Sistemas Expertos ^(18-22, 25)

En el año 1950 el campo de la automatización recibe un gran impulso cuando Wiener desarrolla el principio de la retroalimentación, que es base fundamental de los sistemas de control.

En 1955 Newell y Simon desarrollan "*The Logic Theorist*". Esto permitió desarrollar un programa de cómputo que exploraba la solución a un problema utilizando ramas y nudos, seleccionando únicamente las ramas que más parecían acercarse a la solución correcta del problema.

En 1958 McCarthy anuncia su nuevo desarrollo: el lenguaje LISP (LIST Processing), el lenguaje de elección para todos aquellos desarrolladores inmersos en el estudio de la IA.

En 1965 aparece DENDRAL, al que se puede considerar como el primer sistema experto. El objetivo de DENDRAL fue estudiar un compuesto químico. En 1972, en la Universidad de Stanford (EUA), se desarrolla MYCIN, sistema experto dentro del campo de la medicina para el diagnóstico de enfermedades infecciosas en la sangre.

En 1972 aparece también el lenguaje PROLOG, desarrollado en la Universidad de Marsella (Francia) por Alain Colmerauer y Phillippe Roussel como una herramienta para la PROgramación en LÓGica.

En 1979 aparece XCON, primer programa que sale del laboratorio. Su usuario fue la Digital Equipment Corporation (DEC). El cometido de XCON sería configurar todos los ordenadores que saliesen de la DEC.

Entre los años 1980 y 1985 se produce la revolución de los Sistemas Expertos. Se crearon multitud de empresas dedicadas a los sistemas expertos como Teknowledge Inc., Carnegie Group, Symbolics, Lisp Machines Inc., etc.

En 1987 XCON empieza a no ser rentable. El desarrollo de lenguajes como LISP y PROLOG condicionó esa evolución, así como investigaciones en diversos campos relacionados.

A partir de la década de 1990 y con el desarrollo de la informática, se produce un amplio desarrollo en el campo de la IA y los sistemas expertos, pudiéndose afirmar que éstos se han convertido en una herramienta habitual en algunas empresas en la actualidad.

La evolución histórica de los métodos utilizados en el desarrollo de los sistemas expertos también se ha producido a medida que se ha ido desarrollando la IA y los

diferentes métodos que se han empleado para su resolución. El desarrollo de lenguajes como LISP y PROLOG provocó esa evolución, así como investigaciones en diversos campos relacionados. Los primeros sistemas expertos que se desarrollaron en la década de 1960 eran capaces de resolver sólo problemas basados en situaciones determinadas, mediante sistemas de reglas. Es a partir de la década de 1970 cuando se empiezan a resolver problemas basados en situaciones inciertas, basados, al principio, en medidas difusas y en redes probabilísticas con posterioridad.

2.2.11 Tendencias futuras de los Sistemas Expertos ^(18, 20-22, 25)

El mercado de herramientas para el desarrollo de SE está sufriendo una profunda transformación debido a una reorganización en el mercado informático y al cambio de estrategia de las compañías dedicadas al desarrollo de estas herramientas. Son cada vez más las compañías que antaño se dedicaban exclusivamente a la inteligencia artificial y que han decidido introducirse en otros mercados más amplios. Esto irá en aumento a medida que las empresas que integraban el grupo del mercado de la inteligencia artificial pasen a comercializar otro tipo de productos.

El mercado se ha ido reconfigurando aprovechando las experiencias del pasado y el avance tecnológico. Así se ha pasado de utilizar máquinas específicas (por ejemplo máquinas LISP) a usar computadoras comunes (estaciones de trabajo, computadoras personales, etc.). Las aplicaciones eran muy específicas y ahora el ámbito es mucho más amplio. Los sistemas basados en el conocimiento estaban pensados para trabajar de forma aislada y ahora se conciben integrados con otros sistemas. Y, finalmente, el número de personas formadas en estas técnicas es mucho mayor que las existentes hace unos años. Un análisis del mercado actual lleva a distinguir varias categorías de herramientas en función de la plataforma de desarrollo y de operación que lo estructuran.

Algunos de los campos actuales de investigación y de aplicación son:

- **Aprendizaje:** Se pretende que sea la propia computadora la que adquiera el conocimiento. Existen muchas técnicas aplicables o no dependiendo del problema: aprendizaje inductivo, deductivo, redes neuronales, algoritmos genéticos.
- **Redes Neuronales:** Consisten en nodos conectados con otros mediante enlaces, simulando las conexiones que forman las neuronas en el cerebro. Se investiga su utilización en muchas áreas; visión artificial, razonamiento, aprendizaje, comprensión, lenguaje natural.
- **Redes Bayesianas:** Técnica para tratar el razonamiento con incertidumbre. Su base es el teorema de Bayes, el cual mide el cambio que se va produciendo en las probabilidades de los sucesos a medida que se van haciendo observaciones. El ejemplo típico son los sistemas de diagnóstico médico.
- **Algoritmos genéticos:** Son métodos de aprendizaje inspirados en la evolución natural, y que utilizan las nociones de individuos, apareamiento, recombinación de cromosomas, mutación genética, adaptación y selección natural. Son la base de las investigaciones en vida artificial.

Otras técnicas que se pueden mencionar son la utilización de ontologías para representar el conocimiento, por ejemplo, el “Data Mining” para obtención de conocimiento en bases de datos y los agentes inteligentes para la recuperación de información en Internet.

2.2.12 Aplicaciones de los Sistemas Expertos ^(18, 21-23)

Factores que justifican el desarrollo de un sistema experto:

- El costo para formar nuevos expertos es muy alto.
- Existe el riesgo de perder los conocimientos y la experiencia en posesión de los expertos.
- Los expertos reconocidos que resuelven ese tipo de problemas son escasos.
- Es conveniente disponer de expertos sin restricciones de tiempo y lugar.
- Los expertos tienen que trabajar en ambientes hostiles.

Tipo de problemas que hacen apropiado el desarrollo de un sistema experto:

- Las tareas requieren principalmente tratamiento y razonamiento simbólico.
- Las tareas admiten el uso de métodos heurísticos.
- Las tareas no son demasiado fáciles.
- Las tareas tienen un valor eminentemente práctico.
- Las tareas tienen un tamaño razonable, esto es, el número de conceptos que deben ser manejados es limitado y no requiere conocimientos de muchas áreas diferentes.

2.2.13 Campo de aplicaciones de los SE ^(18, 20-22)

Según el tipo de problema a resolver, los ámbitos de aplicación en los que más se han utilizado los sistemas basados en el conocimiento son los siguientes:

- Sistemas de ayuda a la toma de decisiones. Se trata de sistemas que a partir de una problemática determinada sugieren la solución que consideran más idónea a partir del conocimiento incluido en el sistema.

- Configuración. Se encargan de la selección y planificación de los componentes que se necesitan en un proceso determinado. Un caso típico son los sistemas que ayudan a configurar los equipos físicos a partir de los componentes existentes y de las restricciones establecidas.
- Diagnóstico. Se trata de sistemas que a partir de unos "síntomas" determinan las causas que lo producen. Ejemplo de ellos son los sistemas basados en el conocimiento de diagnóstico de enfermedades o de averías.
- Interpretación y Análisis. Sirven para tratar grandes volúmenes de información, interpretarla, dar un informe explicativo y sugerir las acciones a tomar. Ejemplo de ellos pueden ser los sistemas de evaluación de resistencia de estructuras frente a terremotos o sistemas de supervisión de procesos industriales.
- Monitoreo. En algunas situaciones se considera un caso particular de sistemas de interpretación y análisis, pero debido a su frecuente uso se suelen considerar aparte. Estos sistemas suelen encargarse de monitorear procesos suministrando una salida de control como respuesta. Existen muchos ejemplos de monitoreo de procesos en fábricas, plantas químicas, centrales nucleares, etc. Son sistemas que deben funcionar en tiempo real.
- Planificación. Son sistemas que establecen las etapas y recursos necesarios para alcanzar un determinado objetivo. Ejemplo de ellos podría ser un sistema basado en el conocimiento de planificación de trabajos en una fábrica.
- Interfaces inteligentes. Sirven de puente entre las personas y equipos complejos y de difícil utilización. Caso típico son las interfaces inteligentes de acceso a base de datos.

- **Diseño.** Son aquéllos que efectúan la planificación o trazado de un objeto o sistema con base en los requisitos especificados. Suelen ser capaces de dar diferentes soluciones de forma que el usuario pueda elegir aquélla que le convenga. Ejemplo de este tipo son los sistemas de ayuda al diseño de puentes, presas, microcircuitos electrónicos, etc.

2.2.14 Sistemas Expertos empleados en metalurgia

Algunos ejemplos de Sistemas Expertos aplicados en metalurgia son los siguientes:

- *Blast Furnace Operation*^{26, 27}, desarrollado y usado por la Nippon Steel Corp., es aplicado para controlar el alto horno, asegurar la estabilidad de su operación y la calidad de su carga. Proporciona a los operadores información de las condiciones del horno y acciones recomendables para su control óptimo. Se desarrolló considerando el conocimiento de los operadores más experimentados en el control de las operaciones diarias; en las medidas requeridas en situaciones de contingencia, en procedimientos de paro y en las fallas del equipo. Señala y corrige cualquier desviación de la operación óptima. Mejora la estabilidad de la operación, reduce las desviaciones de las variables resultantes, mejora la calidad del metal caliente y contribuye al ahorro de energía.
- *BAISYS*^{26, 28}, desarrollado y usado por la NKK Corporation, predice y controla las condiciones anormales del alto horno, su balance térmico y la distribución de la carga. Recolecta y proporciona información de tiempo real sobre la situación del horno. Hace inferencias sobre las condiciones actuales y futuras, e implementa las acciones de control requeridas para alcanzar las condiciones de operación más estables y óptimas. Sus pronósticos sobre la tendencia de las operaciones son acertados.

- *Continuous Caster Control*²⁵, desarrollado y usado por la Sumitomo Metal Industries, es aplicado para controlar el nivel del baño en torno al redondo de colada continua. Reduce las fluctuaciones que puedan afectar la calidad superficial de los lingotes. Optimiza los parámetros de control del baño, identifica las causas de las fallas de control y diagnostica las condiciones de operación. Mejora el control de la colada continua con respecto a la excesiva fluctuación del baño.
- *VASE*²⁵, desarrollado y usado por Voest-Alpine, asiste al planeador para maximizar la longitud de las secuencias de colada y minimizar los cambios de carga, reducir el tiempo de espera en los convertidores y las variaciones en los anchos de las piezas. A través de órdenes de preprocesamiento, de una base de conocimiento, y de una programación de calores, genera programas de producción optimizados y consistentes, mejorando el control de calidad en la planta, reduciendo los costos de producción y mejorando la eficiencia de energía.
- *Expert System for Steel Plate Production Design*²⁵, desarrollado y usado por Rautaruukki Oy Raah Steel Works, asiste a los ingenieros de planta en la selección de los parámetros de producción necesarios para alcanzar las propiedades idóneas de la placa de acero. Busca y modifica los datos históricos de producción de acuerdo a las propiedades requeridas por la placa. Proporciona los límites superiores e inferiores de los parámetros de producción que deben ser ajustados para alcanzar una operación óptima. Mejora la calidad y el diseño de las placas producidas, y optimiza las operaciones.
- *COGSYS*²⁵, desarrollado por Cogsys y empleado por Avesta Sheffield, permite conciliar grandes cantidades de datos a partir de varias fuentes y provee apoyo en la toma de decisiones a los operadores. Se aplicó inicialmente en la fusión y colada continua de acero inoxidable, al desarrollar planes de refinación en los equipos de descarburización Argón-Oxígeno, logrando reducir la energía y los costos de mantenimiento en el filtro de bolsa y mejorando la calidad de las piezas

fundidas. En general, mejora la calidad de la colada y reduce los costos de las plantas de refinación y de filtro de bolsa. Ahorra los consumos de energía.

- *Proscop*²⁵, desarrollado y usado por Outokumpu, está dirigido a la maximización de la recuperación en las celdas de flotación, monitoreando y controlando los circuitos de molienda y flotación. Detecta e informa las alteraciones del proceso, proporciona reportes y costos de optimización de cada circuito, identifica los sistemas de control para la operación de molienda y flotación, monitorea y repite cambios de "set point", y clasifica los turnos de acuerdo a la optimización del sistema. Muestra los valores más recientes de las variables de proceso más importantes tales como análisis químicos, pronóstico de utilidad de operación, costo reactivo de cada circuito, etc. Además mantiene una historia de los promedios de todas las variables que permiten realizar una comparación entre turnos. Incrementa los rendimientos, disminuye el consumo de energía y reduce la generación de material superfino.
- *Expert System for Diagnosis of Mine Operations*²⁵, desarrollado y usado por la Anglo American Corporation (AAC), se basa en un proceso de simulación que emplea el Gensym G2 shell, el cual está conectado a una red de datos de adquisición y de toma de decisiones en tiempo real. El sistema de diagnóstico proporciona acciones recomendables para la operación y la ingeniería de proceso. Además ofrece un plan de mantenimiento inteligente para el equipo. La operación es más consistente en todos los procesos con mejores ciclos de mantenimiento y menores costos.
- *ATAS*²⁵, desarrollado y comercializado por NovaCast, está dirigido a la optimización, control de calidad y corrección de la fusión y el tratamiento de fundiciones de hierro. Es un sistema de control de proceso, el cual está basado en el análisis térmico avanzado y la inteligencia artificial. Interpreta la información obtenida de las curvas de enfriamiento y proporciona nuevo conocimiento a partir de los principales parámetros de operación. Permite reducir los defectos de

fundición, mejora la resistencia y reduce la variación en las propiedades del material.

- *BHP SHERPA*²⁹, integra un módulo para el desarrollo de bases de conocimientos, permite procesar señales, interacciones del operador, modelos numéricos en línea y almacenamiento de base de datos. Empleo adicional de TABLEAUX, una tabla de decisiones usada en combinación con SHERPA para desarrollar aplicaciones de sistemas expertos de tiempo real; existen tres prototipos aplicados a altos hornos.

En cuanto a soldadura se pueden citar los siguientes ejemplos:

- *Weldcrack Expert*³, es un sistema de diagnóstico para el agrietamiento en aceros ferríticos. El programa contiene reglas dictadas por algunos de los más famosos expertos en la materia. Cubre lo referente a los agrietamientos en frío y en caliente, al agrietamiento por solidificación y al agrietamiento laminar.
- *Weld Selector*³, es un paquete basado en la inteligencia artificial para escoger los electrodos más apropiados en una aplicación específica y proporciona opciones para usos más particulares. Incluye la información correspondiente a más de 1200 diferentes aceros según la clasificación ASTM, cubriendo los más populares y soldables.
- *Superweldbest*³, permite calcular los pesos de consumibles que se deben comprar, así como el tiempo de arco aplicado por longitud de soldadura. Puede estimar hasta 30 juntas por hora para cualquier configuración y usar cinco tipos diferentes de soldadura de arco eléctrico. Estima todos los metales. Ha estado en uso y en perfeccionamiento por más de 15 años. También es apropiado para aquellos usuarios con conocimientos limitados en soldadura y tiene la capacidad de seleccionar detalles de junta y recomendar las corrientes eléctricas más apropiadas

para cada caso. El programa también escribe e imprime procedimientos de especificación en soldadura (WPS) de la American Welding Society (AWS).

- *Weldex*³⁰, empleado como apoyo en el control de calidad y las pruebas no destructivas aplicadas a las soldaduras.

3. Objetivo y alcances

3.1 Posición del Problema

En nuestro país hay muchas empresas dedicadas a fabricar partes soldadas pero que adolecen de sistemas de administración de la calidad. En estas empresas se requieren procedimientos para controlar el proceso, regular sus operaciones, reducir responsabilidades y aumentar la economía de la planta. Por lo anterior, el objetivo de este trabajo es el siguiente:

3.2 Objetivo

Diseñar y desarrollar un Sistema Experto que proporcione, con base a reglas heurísticas, procedimientos para controlar el proceso de soldadura, regular sus operaciones, reducir responsabilidades y aumentar la economía de la planta, mejorando la eficacia de los técnicos calificados involucrados. El sistema experto partirá de la identificación visual de los defectos y se basará en el manejo de la información inherente al tipo de soldadura y a las variables de proceso por parte del operador, con lo cual él mismo diagnosticará las fallas en que ha incurrido y llevar a cabo las correcciones pertinentes.

3.3 Alcances

El Sistema Experto deberá:

- **Enfocarse a los procesos más particulares y representativos.** La Soldadura de Arco Manual Protegido o SMAW es el proceso de soldadura de arco más antiguo, usado y versátil, por lo que representa muy bien al proceso más empleado en las empresas mexicanas.

- **Considerar los materiales más empleados bajo el proceso de interés.** Con base en la naturaleza de los productos soldados manufacturados en nuestro país, el acero comercial -al carbón o estructural- se identifica como el metal base más empleado en las empresas y talleres del ramo. Con respecto a los espesores de placa empleados, los más comunes no superan las 2" de espesor.
- **Manejar el conocimiento del experto.** Esto no sólo liberaría al supervisor de una carga tediosa de trabajo sino que también le permitiría explorar nuevas alternativas para desarrollar los programas de producción, estimar algunas variables que no aparecen en las especificaciones de procedimiento de soldadura y controlar el proceso.
- **Controlar y optimizar el proceso.** Al diagnosticar las causas de los defectos establece indirectamente los errores cometidos por el operador quien, al seguir las acciones correctivas correspondientes, podrá garantizar la calidad y la funcionalidad de la soldadura. Consultando el Sistema Experto cuantas veces sea necesario se optimiza la técnica y con ello asegurar la repetibilidad del proceso.
- **Asegurar la repetibilidad del proceso.** Hay muchos factores implicados en la preparación de cualquier junta soldada. Los métodos y las prácticas detalladas para preparar una soldadura particular se compilan en una especificación del procedimiento. Ésta identifica todas las variables de la soldadura pertinentes para producir una soldadura de calidad aceptable.
- **Ser de fácil empleo y caracterizado por un entorno amigable.** Empleando la programación lógica y el uso de ventanas se favorece una relación más amigable y estructurada con el usuario correspondiente, con lo cual se logra consolidar una herramienta con propósitos de optimización, entrenamiento y aún educativos.
- **Impactar la economía de la planta favorablemente.** En proceso, podría evitar reparaciones y las gravísimas fallas que se pueden tener con el producto en

servicio, lo cual es mucho más caro dado que se podrían producir accidentes graves. En cuanto al número de personal, permitiría evitar el uso de un inspector de calidad, ya que de alguna manera éste se encontraría en el sistema experto. La supervisión del taller auxiliada por este sistema experto puede reducir costos con eficacia al concentrarse en las variables más importantes. La eficiencia del soldador es una buena fuente para encontrar ahorros. El entrenamiento, los dispositivos, los accesorios, y los ayudantes se pueden emplear para conseguir una mejor calidad. El uso de esta tecnología permite que las compañías reduzcan su tasa de rechazos, evitando reparaciones costosas.

4. Desarrollo del Sistema Experto

4.1 Metodología

4.1.1 Generalidades

El Sistema Experto se construye con base en estructuras proposicionales para representar la información del sistema, documentada en procedimientos operativos, y en reglas para manipular dicha información y hacer los diagnósticos y establecer las acciones correctivas a las causas que han originado los defectos.

Dándole un nombre a un predicado que relacione a todas las variables se establece una expresión proposicional. Como puede resultar complicado recordar qué es cada número, se pueden utilizar descripciones o funciones que relacionen a varios términos.

Varios datos se pueden omitir debido a que son deducidos o calculados utilizando reglas o fórmulas; el resto se deja en los procedimientos operativos. Por medio de las estructuras proposicionales se pueden construir las reglas que analicen esta información y que permitan generar nuevos conocimientos.

Dado que las reglas se utilizan en Visual Prolog para significar que un hecho depende de uno ó mas hechos y son la representación de las implicaciones lógicas del tipo $p \rightarrow q$ (p implica q), éstas son establecidas en función de valores fijos, rangos de valores y/o fórmulas, establecidos con base en procedimientos precalificados, información reportada en la literatura, recomendaciones de fabricantes y experiencias prácticas en el área, lo cual se constituye como la base de conocimientos.

Los algoritmos utilizados en Visual Prolog están íntimamente ligados a los términos y su estructura anidada/recursiva. De ahí que todos los términos pueden ser recursivos, y gracias a la unificación, se pueden recorrer sus argumentos a voluntad. La estructura de datos más significativa con respecto a la recursividad son las listas.

Hay una serie de operadores, predicados predefinidos en Visual Prolog para las operaciones matemáticas básicas. Su sintaxis depende de la posición que ocupen. Al igual que en otros lenguajes de programación es necesario tener en cuenta la precedencia y la asociatividad de los operadores antes de trabajar con ellos.

El diagrama de flujo básico para el diagnóstico de los defectos y la corrección de los mismos sería el siguiente:

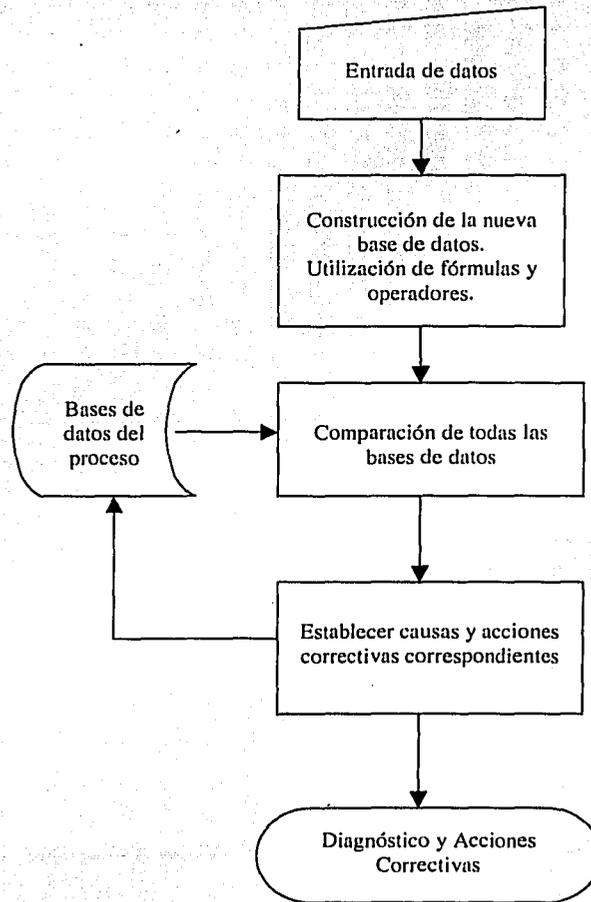


Figura 4.1: Diagrama de flujo básico para el diagnóstico de los defectos y su corrección.

El diagnóstico se realiza a través de las reglas, descartando todas aquellas con las que el proceso cumple satisfactoriamente. Aquellas con las cuales no se cumple son incluidas en el diagnóstico final, relacionándolas con su acción correctiva. Así el diagnóstico final emitirá siempre la siguiente información sin que haya un orden de relevancia en cuanto a las causas, pero haciendo notar la diferencia entre las causas por *default* y otras deducidas en cada paso:

- Defecto.
- Causa por *default* y acción correctiva correspondiente.
- Número de Paso.
- Causa particular deducida y acción correctiva correspondiente por paso.

De este listado es evidente que, en el caso de una unión realizada utilizando pasos múltiples, el Sistema Experto determina las causas que generaron los defectos para cada paso.

4.1.2 Datos

El Sistema Experto se caracteriza por desplegar una serie de ventanas, llamadas diálogos en la programación de Visual Prolog, las cuales ofrecerán y solicitarán datos al usuario, con los que el sistema podrá realizar el diagnóstico de los defectos. Para una mayor exactitud del mismo se solicita aportar la información lo más completa y precisa posible. En general, estos datos son los siguientes:

Grupo de defectos y apariencia (fotos) del mismo

- Defectos misceláneos
 - Apariencia pobre
 - Baja penetración
 - Chisporroteo
 - Fibras
 - Unión pobre

- Forma imperfecta
 - Perfil incorrecto A
 - Perfil incorrecto B
 - Socavado A
 - Socavado B

- Fusión incompleta
 - Fusión incompleta A
 - Fusión incompleta B
 - Fusión incompleta C
 - Fusión incompleta D

- Grietas
 - Grieta de cráter
 - Grieta longitudinal interna
 - Grieta longitudinal superficial
 - Grieta transversal

- Inclusiones sólidas
 - Inclusiones sólidas A
 - Inclusiones sólidas B
 - Inclusiones sólidas C

- Porosidades
 - Porosidad A
 - Porosidad B
 - Porosidad C
 - Porosidad D

Condiciones de trabajo

- Temperatura ambiente (°C)
- Humedad relativa (%)

Composición química del acero soldado

- %C (Carbono)
- %Mn (Manganeso)
- %Si (Silicio)
- %P (Fósforo)
- %S (Azufre)
- %Cu (Cobre)

Con esta información el sistema estimará la soldabilidad del mismo. Para conocer este dato se deberá oprimir el botón "Cálculo de soldabilidad". El criterio para establecer ésta se basa en el valor del carbón equivalente (CE), pudiendo distinguirse tres casos:

- Si el CE es menor o igual a 0.40, la soldabilidad es "buena".
- Si el CE es mayor a 0.40 y menor a 0.60, la soldabilidad es "regular".
- Si el CE es mayor a 0.60, la soldabilidad es "mala".

Cabe mencionar que este sistema experto sólo considera el análisis de los casos de soldabilidad "buena" y "regular".

Casos aplicables según la soldabilidad (elección de las geometrías de la soldadura y el tipo de junta)

- Para soldabilidad “buena”
 - Cordón en orilla
 - Filete a tope
 - Filete en esquina
 - Filete en T
 - Filete en traslape
 - Ranura cuadrada a tope
 - Ranura V a tope con respaldo

- Para soldabilidad “regular”
 - Ranura de bisel doble a tope

Características de las geometrías

- Cordón en orilla
 - Espesor (in)
 - Número de pasos

- Filete a tope / Filete en esquina / Filete en T / Filete en traslape
 - Espesor (in)
 - Número de pasos
 - Tamaño de soldadura (in)

- Ranura cuadrada a tope
 - Espesor (in)
 - Número de pasos
 - Abertura de la ranura (in)

- Ranura V a tope con respaldo
 - Espesor (in)
 - Número de pasos
 - Ángulo de ranura (grados)
 - Abertura de la raíz (in)

- Ranura de bisel doble a tope
 - Espesor (in)
 - Número de pasos
 - Ángulo de los biseles (grados)
 - Abertura de la raíz (in)

Características de la soldadura y del tipo de junta (variables y/o unidades del proceso)

- Propiedades mecánicas del metal base
 - Resistencia a la tracción del acero base (psi)

- Características eléctricas
 - Tipo y polaridad de corriente
 - Corriente (A)
 - Voltaje (V, opcional)

- Características del electrodo
 - Posición
 - Clase del electrodo
 - Diámetro del electrodo (in)

- Características de la técnica
 - Método de limpieza
 - Velocidad de soldadura (in/min)
 - Ángulo de trabajo (grados)
 - Angulo de avance (grados)

En el caso de la soldabilidad “regular”, se considerará también lo relativo al tratamiento térmico que se aplica al proceso

- Precalentamiento y postcalentamiento
 - Temperatura inicial (°F)
 - Temperatura mantenida (°F)
 - Tiempo de permanencia (min)
 - Rango de temperaturas (°F)

Por otro lado, las variables numéricas y alfanuméricas, así como las constantes incluidas en el programa que permiten establecer las causas de los defectos, son las siguientes:

- Corriente: valor numérico en un rango
- Técnica manual inapropiada: por *default*
- Clase electrodo: no aplica y es una limitante, se supone que las diferentes clases están ligadas correctamente en el Sistema Experto.
- Velocidad: valor numérico en un rango
- Humedad electrodo: valor numérico en un rango
- Posición electrodo: por asociación con electrodos de uso y tipos de junta

- Angulo electrodo: valor numérico en un rango
- Tamaño Electrodo: valor numérico en diámetro y relación con espesores
- Abertura raíz: valor numérico en un rango
- Tipo corriente: por asociación y descartamiento con lo sugerido
- Longitud de arco: en función de diámetro se supone correcta. De otra manera aparecerá como técnica manual inapropiada, por *default*
- Limpieza faltante: se establece con base en varios tipos, lo importante es determinar si la hay o no.
- Pre calentamiento inapropiado: valor numérico en un rango
- Post calentamiento inapropiado: valor numérico en un rango
- Composición química del metal base: valores numéricos en un rango, aplicación de fórmulas diversas
- Rigidez de la junta: por *default*
- Metal base alto contenido de S: valor numérico en un rango
- Secuencia inapropiada: sólo aplica a varios cordones, por *default*
- Velocidad de enfriamiento: fórmula con criterio de espesores críticos
- Preparación de junta inapropiada: por *default*

- Diseño de junta inapropiado: por *default*
- Soldadura pequeña: por *default*
- Angulo de ranura: valor numérico en un rango, no aplica por ser uno solo
- Electrodo mal estado: por *default*

Cabe mencionar que el voltaje es un valor opcional debido a que se obtiene en función de la corriente, dada la naturaleza de las máquinas soldadoras empleadas.

Con los datos ofrecidos y solicitados en cada ventana, así como las variables y fórmulas establecidas dentro del programa, el sistema procesará toda la información y formará nuevas bases de datos correspondientes al caso particular que se está estudiando. Al comparar éstas con las preestablecidas, se realizan varias deducciones que generarán un diagnóstico final de las causas que han provocado los defectos y sus acciones correctivas. Estas bases de datos son las siguientes:

- Nuevas
 - *datos*
 - *caracteristicadesoldadura(slist)*
 - *composicion(slist)*
 - *soldaduraJuntaTipo(string)*
 - *númeroDePasos(string)*
 - *variablesDeProceso(slist)*
 - *ct(string,string)*
 - *calentamiento(string,string,string,string,string,string)*
 - *datosDeSoldaduraYJunta(slist)*

- Preestablecidas

- *fotos*

- *foto(string,string,string)*
 - *seleccion(string,string)*
 - *defectos(string,slist)*
 - *defectoGeneral(string,string,string)*

- *electrodos*

- *espesorElectrodo(real,real,real)*
 - *fraccion(string,real)*
 - *clasePosicionElectrodo(slist,slist,slist)*
 - *datosDeVentana(string,slist,slist,slist,slist)*
 - *texto(string)*
 - *pasos(string)*
 - *problema(string)*
 - *defecto(string)*
 - *etapa(string)*
 - *datosViejosDeSoldaduraYJunta(slist)*

- *wpsqv* (se refiere a la especificación del procedimiento de soldadura que incluye los datos de velocidad y calor de aporte más apropiados para cada caso particular)

- *wpsqv(string,string,slist,string,slist,string,string,string,string,string,string,string,string,string,string,string)*

- *wps* (se refiere a la especificación del procedimiento de soldadura que incluye las variables más típicas para cada caso particular)

- *wps(string,string,slist,string,slist,string,string,string,string,string,string,string,string,string,string,slist,slist,slist,slist,slist)*

- accionesCorrectivas
 - defectoaccionescorrectivas(string,slist,slist)
 - datosDeDiagnostico(string)
 - datosDeOperacion(string)

4.1.3 Reglas del Sistema Experto

Con base a lo tratado en la sección 2.1.15, la relación entre las causas y las reglas que las determinan son las siguientes (si la regla se cumple, la causa será el origen del defecto):

Tabla 4.1 Causa de defecto y regla correspondiente en el Sistema Experto

Causa	Regla
Abertura raíz grande	Ranura cuadrada: Abertura>0.0625 in; Ranura V sin respaldo: Abertura>0.125 in; Ranura V con respaldo: Abertura>0.31255
Abertura raíz pequeña	Ranura cuadrada: Abertura<0.03125 in; Ranura V sin respaldo: Abertura<0.0625 in; Ranura V con respaldo: Abertura<0.1875
Ángulo de ranura pequeño	Ranura V sin respaldo: 60; Ranura V con respaldo 30; Ranura de bisel 45
Ángulo electrodo incorrecto	AnguloAvance<AngAvanMin y AnguloAvance>AngAvanMax; AnguloTrabajo<AngTrabMin y AnguloTrabajo>AngTrabMax
Composición química del metal base	ParametroFracturasEnFrio=(C+Si/20.0+Mn/10.0+Cu/20.0), ParametroFracturasEnFrio>=0.25. SAC=C*(S+P+(Si/25.0))*1000.0/(3.0*Mn), SAC>=3.6. (SAC es la Susceptibilidad al Agrietamiento en Caliente)
Corriente alta	Depende de: Grado de soldabilidad, Tipo de Soldadura y Junta, Posición de soldar, Espesor de la pieza, Clase del Electrodo, Diámetro del electrodo, Tipo de corriente, Corriente>Corriente Max. Se revisa en wps.
Corriente baja	Depende de: Grado de soldabilidad, Tipo de Soldadura y Junta, Posición de soldar, Espesor de la pieza, Clase del Electrodo, Diametro del electrodo, Tipo de corriente, Corriente<Corriente Min. Se revisa en wps.
Diseño de junta inapropiado	Por default
Electrodo en mal estado	Por default
Electrodo grande	Depende de Grado de soldabilidad, Tipo de Soldadura y Junta, Espesor, Posición de soldar, Clase de Electrodo, Diámetro de Electrodo, DiametroUtilizado>DiametroSugerido. Se revisa en wps

Tabla 4.1 Causa de defecto y regla correspondiente en el Sistema Experto (continuación)

Causa	Regla
Electrodo incorrecto	Depende de: Grado de soldabilidad, Tipo de Soldadura y Junta, Espesor, Posición de soldar, Clase de Electrodo, Diámetro de Electrodo, Tipo de Corriente. Se revisa en wps.
Electrodo pequeño	Depende de Grado de soldabilidad, Tipo de Soldadura y Junta, Espesor, Posición de soldar, Clase de Electrodo, Diámetro de Electrodo, DiametroUtilizado<DiametroSugerido. Se revisa en wps
Humedad electrodo	HR>50.0
Limpieza de junta faltante	Método de limpieza=Ninguno
Limpieza faltante	Método de limpieza=Ninguno
Longitud de arco alta	Por default
Longitud de arco baja	Por default
Longitud de arco irregular	Por default
Metal base alto contenido de S	%S>0.05
Posición electrodo incorrecta	Depende de: Grado de soldabilidad, Tipo de Soldadura y Junta, Posición de Electrodo Clase de electrodo. Se revisa en wps.
Postcalentamiento inapropiado	TiempoPermanencia=60.0*Espesor; TiempoPermanencia<=TIEMPO, Tmin>1100.0, Tmax<1200.0
Pre calentamiento inapropiado	Espesor<=0.75: 70.0<=T0, TM, TP<=400.0; Espesor<=1.5: 150.0<=T0, TM, TP<=400.0
Preparación de junta inapropiado	Por default
Rigidez de la junta	Por default
Secuencia inapropiada	Por default
Soldadura pequeña	Por default
Técnica manual inapropiada	Por default
Tipo corriente incorrecta	Depende de: Clase de Electrodo y Tipo de corriente. Se revisa en AlternativasDeCorriente.
Velocidad de enfriamiento alta	Por default
Velocidad de paso alta	Depende de: Grado de soldabilidad, Tipo de Soldadura y Junta, Posición de soldar, Espesor de la pieza, Clase del Electrodo, Diámetro del electrodo, Tipo de corriente, Velocidad>Velocidad Max. Se revisa en wps.
Velocidad de paso baja	Depende de: Grado de soldabilidad, Tipo de Soldadura y Junta, Posición de soldar, Espesor de la pieza, Clase del Electrodo, Diámetro del electrodo, Tipo de corriente, Velocidad<Velocidad Min. Se revisa en wps.
Velocidad de paso irregular	Por default

4.2 Reglas de operación

Para utilizar el sistema se aplican las siguientes reglas de operación:

- Para posicionarse en una variable e introducir un valor, el usuario debe oprimir el botón izquierdo del ratón. Estas variables se caracterizan por tener un espacio en blanco junto a su nombre.
- En caso de que el valor deba ser escogido de una lista, habrá una flecha del lado derecho del espacio correspondiente donde el usuario deberá marcar la opción de interés oprimiendo una vez el botón izquierdo del ratón.
- Para pasar a la siguiente variable sólo basta posicionarse en ella utilizando el ratón y oprimiendo el botón izquierdo.
- Existen algunos casos de valores fijos, regularmente textos o números de referencia y/o secuencia, tales como los resultados del diagnóstico, el nombre del tipo de soldadura y junta escogido, y el número de paso o cordón donde se está realizando el análisis. Todos estos casos se caracterizan por estar en un fondo gris, lo cual implica que no pueden ser modificados.
- Los datos deberán alimentarse en las unidades indicadas para cada variable.
- Para pasar a la siguiente ventana o regresar a la ventana anterior basta oprimir "Continuar" o "Regresar", respectivamente, con el botón izquierdo del ratón.
- En caso de requerir de ayuda, bastará oprimir el botón "Ayuda" con lo cual se desplegará una ventana que auxiliará al usuario.
- Una vez que obtenga su diagnóstico, se podrá terminar la sesión y empezar una nueva.

- Al iniciar un diagnóstico existe la opción de poder usar los datos de la última corrida o empezar una completamente nueva.

4.3 Estructura del Sistema Experto y diseño de ventanas

Empleando la programación lógica y las ventanas ó diálogos, los cuales favorecen una relación más amigable y estructurada para el usuario, se determinaron los siguientes módulos secuenciales, donde cada uno de ellos constituye una ventana:

- El primer módulo, denominado “Inicial”, es una introducción al sistema, cuenta con una imagen alusiva al tema, y a través de los botones: “Acerca de...”, “Introducción”, “Iniciar el programa” y “Salir”, permite realizar las operaciones correspondientes (Figura 4.2).

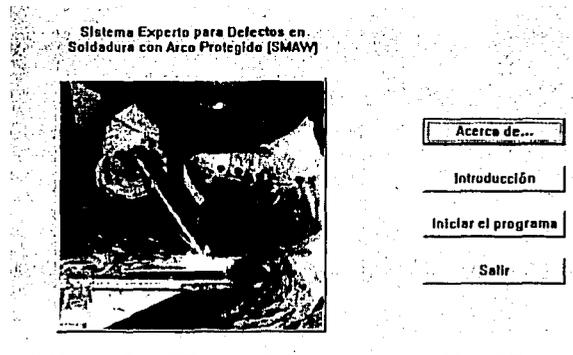


Figura 4.2: Ventana “Inicial”

- El segundo, llamado “Fotos”, despliega las clases de defectos disponibles y permite seleccionarlos a través de diferentes fotografías (Figura 4.3).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

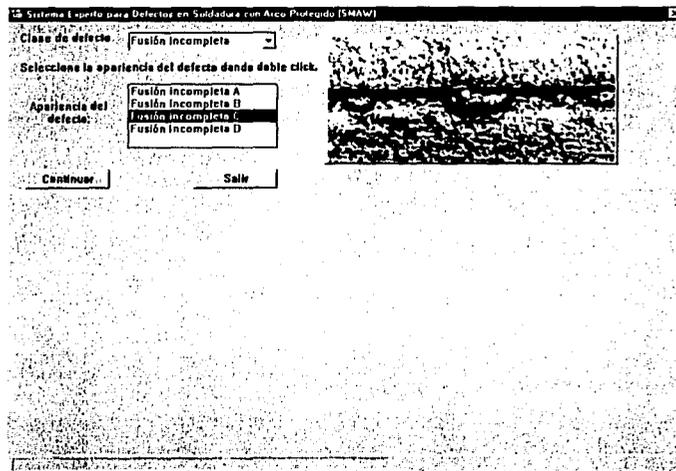


Figura 4.3: Ventana “Fotos”

- El tercero o “Datos viejos” brinda la opción de trabajar con datos empleados anteriormente o con aquellos correspondientes a un caso nuevo (Figura 4.4).

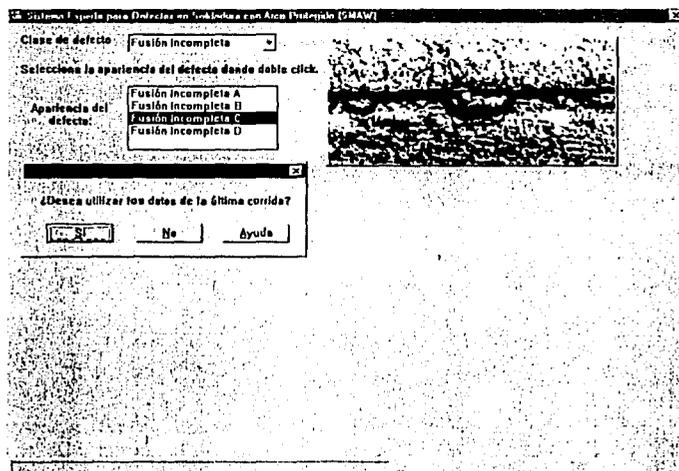


Figura 4.4: Ventana “Datos viejos”

- El cuarto, "Condiciones de Trabajo" solicita las condiciones de trabajo (Figura 4.5).

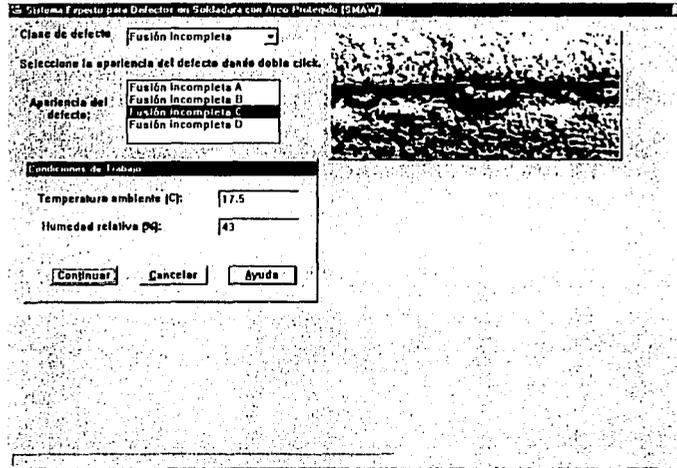


Figura 4.5: Ventana "Condiciones de Trabajo"

El quinto, también conocido como "Soldabilidad del Metal Base" determina el tipo de soldabilidad del metal base en función de su composición química (Figura 4.6).

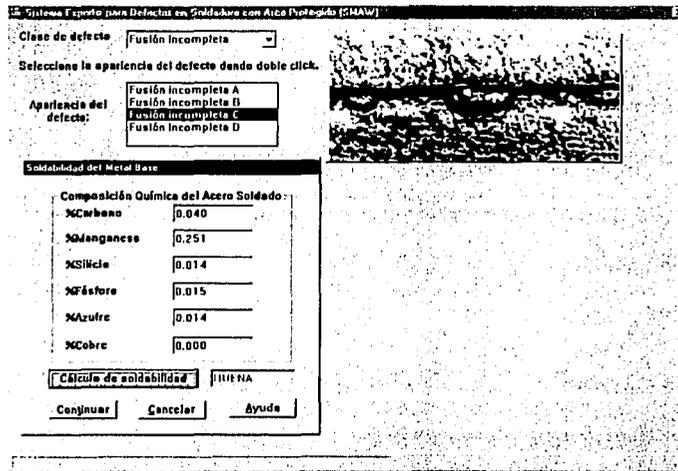


Figura 4.6: Ventana “Soldabilidad del Metal Base”

En el sexto, de acuerdo al resultado de la soldabilidad, se despliega “Casos de Estudio para Soldabilidad Buena” ó “Casos de Estudio para Soldabilidad Regular”, los cuales se refieren a las geometrías disponibles para soldabilidad buena o regular (Figura 4.7).

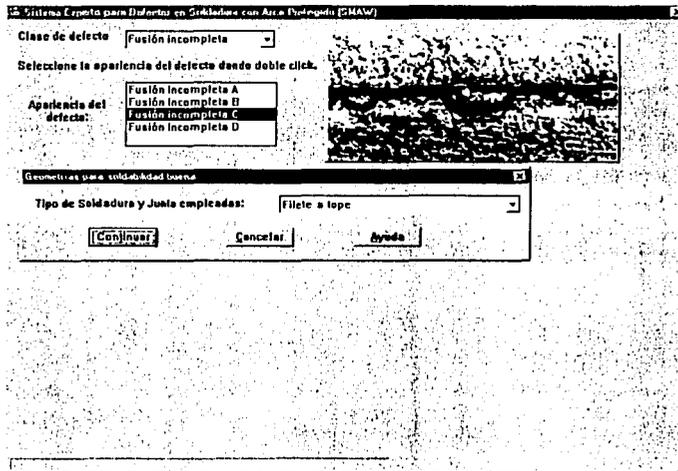


Figura 4.7: Ventana “Casos de estudio según el tipo de soldabilidad”

- En el séptimo, cuyo nombre varía según lo seleccionado anteriormente (“Características del cordón en orilla”, “Características de la soldadura de filete a tope”, “Características de la soldadura de filete en T”, “Características de la soldadura de filete en traslape”, “Características de la soldadura de filete en esquina”, “Características de la ranura cuadrada a tope”, “Características de la ranura en V a tope con respaldo” y “Características de la ranura de bisel doble a tope”), se solicitan las características de la geometría seleccionada, es decir, los datos y las dimensiones de la soldadura y la junta (espesor de placa, número de pasos, tamaño de soldadura, abertura de raíz, ángulo de ranura, etc., según sea el caso) (Figura 4.8).

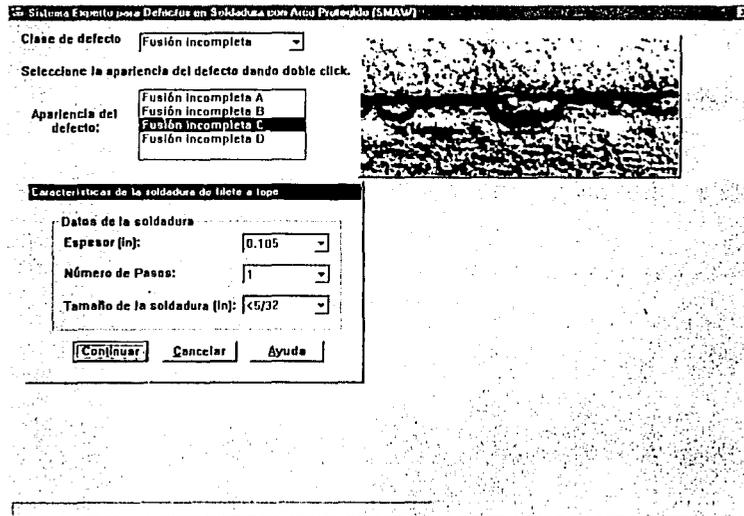


Figura 4.8: Ventana “Características de la soldadura y su geometría”

- En el octavo, denominado “Características del tipo de soldadura y de junta”, se marcan las características del tipo de soldadura y junta en cuanto a los parámetros operacionales empleados por cordón o paso (propiedades mecánicas del metal base, características eléctricas, características del electrodo y características de la técnica) (Figura 4.9)

Sistema Especial para Defectos en Soldadura con Arco Pulsado (SMAW)

Clase de defecto:

Seleccione la apariencia del defecto dando doble click.

Apariencia del defecto:

Características del tipo de soldadura y de junta

Tipo de Soldadura y Junta empleadas:

Número de Cordón:

Características del Electrodo
 Posición:

Clase:

Diámetro (in):

Propiedades mecánicas del metal base
 Resistencia a la tracción (psi):

Características de la Técnica
 Método de limpieza:

Velocidad de soldadura (in/min):

Ángulo de trabajo:

Ángulo de avance:

Características Eléctricas
 Tipo y polaridad de corriente:

Corriente: Voltaje (opcional):

[Continuar] [Cancelar] [Ayuda]

Figura 4.9: Ventana “Características operacionales del tipo de soldadura y junta”

- En el noveno, “Precalentamiento y Poscalentamiento”, el cual sólo aplica para soldabilidad regular, se solicitan las temperaturas de precalentamiento, entre pasos y postcalentamiento, así como el tiempo de operación (Figura 4.10).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

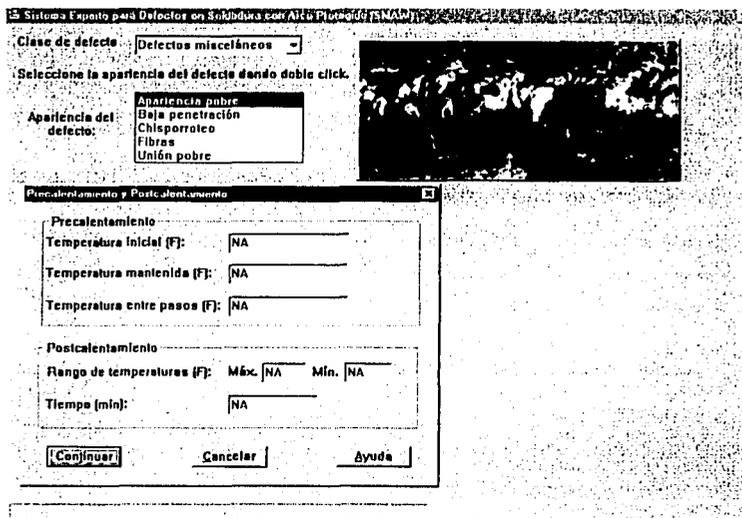


Figura 4.10: Ventana “Precalentamiento y postcalentamiento”

- En el décimo, llamado “Diagnóstico”, se realiza el diagnóstico y se indican las acciones correctivas, dando opción también a reparar las condiciones de operación y a la impresión del reporte (Figura 4.11).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

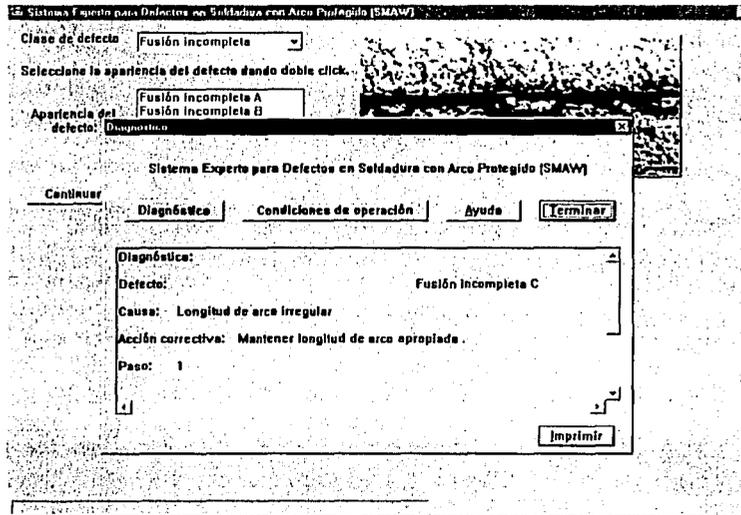


Figura 4.11: Ventana “Diagnóstico”

Cabe mencionar que, a partir de una serie de valores operacionales, se podría establecer un mecanismo inverso en el que el resultado sean todos los posibles defectos y sus acciones correctivas; sin embargo, en este caso se prefirió partir del defecto y llegar a un diagnóstico de causas y acciones correctivas, de tal manera que el mismo operador identifique lo que ha obtenido como defecto, y pueda hacer las correcciones pertinentes.

4.4 Ejemplo de funcionamiento

Se determina que un filete a tope presenta un defecto de fusión incompleta. La temperatura ambiente era 17.5°C y la humedad relativa, 43%. El espesor es 0.105”, en un paso y con un tamaño de soldadura inferior a 5/32”. Se utilizó un electrodo E6013 con diámetro de 5/32” en posición plana. Se usó corriente alterna de 175 A a una velocidad de 32 in/min. No se le hizo limpieza alguna, y los ángulos de trabajo y de avance fueron de 90° y 10° respectivamente.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Al utilizar el Sistema Experto para hacer el diagnóstico y establecer las acciones correctivas, ocurre de una manera muy resumida lo siguiente:

Selección del defecto. En la ventana "Fotos" se elige la opción de fusión incompleta y la foto que más se asemeje a la apariencia del defecto encontrado (dígase la fusión incompleta C). Este dato se archiva en el hecho: *defectos("Fusión incompleta",["Fusión incompleta A","Fusión incompleta B","Fusión incompleta C","Fusión incompleta D"])* (Ver Figura 4.3).

Formación de la base de datos reales. A partir de la ventana de "Datos viejos" se puede generar una base de datos nueva, o usar toda o parte de la base previa. (Ver Figura 4.4). Esta base se conforma por todos los datos alimentados en las ventanas siguientes:

- "Condiciones de Trabajo" (Ver Figura 4.5). Los datos se archivan en *ct(string,string)*
- "Soldabilidad del Metal Base". Una vez alimentada la composición química, el Sistema Experto realiza un cálculo rápido a través de la fórmula:

$$CE=Real_C+((Real_Mn+Real_Si)/6)+(Real_Cu/15)$$

Los datos se archivan en *composicion(slist)*

- En base al valor obtenido se establece que la condición que se cumple es la de: *soldabilidad("BUENA",X):-X<0.4,!. (Ver Figura 4.6)*
- En "Casos de estudio para soldabilidad buena"; se escoge la opción de interés: "Filete a tope" (Ver Figura 4.7). Los datos se archivan en *soldaduraJuntaTipo(string)*
- "Características de la soldadura de filete a tope: Datos de la soldadura" (Ver Figura 4.8). Los datos se archivan en *caracteristicasdesoldadura(slist)*
- "Características operacionales del tipo de soldadura y junta" (Ver Figura 4.9). Los datos se archivan en *datosDeSoldaduraYJunta(slist)*

Análisis y determinación de las causas. Al contar con todos los datos ya mencionados se hace una consulta donde el tipo de defecto se relaciona con una serie de causas ya tipificadas. En este ejemplo, las causas de la fusión incompleta son las siguientes:

- Velocidad de paso alta
- Electrodo grande
- Corriente baja
- Abertura raíz pequeña
- Posición electrodo incorrecta
- Limpieza faltante
- Longitud de arco irregular

Sabiendo cual es el defecto y conociendo sus diversas causas, se hace una revisión de todas las reglas que incluyen las diferentes variables y sus valores correspondientes:

```

analizarCausaPaso("Velocidad de paso alta",[StrNúmeroDeCordón,_,_ VelocidadStr,_,_
Diametro,Electrodo,Posicion,_,_CACD,_,_]):-
    caracteristicasdesoldadura([_,_,_StrEspesor|_]),
    composicion(Composicion),
    ce(CE,Composicion),
    soldabilidad(Grado,CE),
    soldaduraJuntaTipo(SoldaduraJuntaTipo),
    caracteristicasdesoldadura([_,_,_StrEspesor|_]),!,
    wpsqv(Grado,SoldaduraJuntaTipo,PosicionList,StrEspesor,StrListaDeCordones,
Electrodo,Diametro,CACD,_,_,_StrVelMax,_,_),
    member(StrNúmeroDeCordón,StrListaDeCordones),
    member(Posicion,PosicionList),
    str_real(VelocidadStr,Velocidad),
    str_real(StrVelMax,VelMax),
    Velocidad>VelMax.

```

Al consultar wpsqv:

```
wpsqv("BUENA","Filete a tope",[ "Plana","Horizontal"],"0.105",[ "1"],"E6013","5/32"  
,"Alterna","na","160","26.4","14","18","11947.89","9292.80").
```

y analizar si $Velocidad > VelMax$,

se determina que la velocidad de paso utilizada es superior a la máxima establecida, por lo que la “velocidad de paso alta” es identificada como causa del defecto.

```
analizarCausaPaso("Electrodo grande",[StrDiámetro,Electrodo,Str  
TipoDeCorriente,])-
```

```
caracteristicasdesoldadura(StrEspesor),!
```

```
wps(StrEspesor,Electrodo,StrDiámetroSugerido,TipoDeCorriente,  
),
```

```
fraccion(StrDiámetro,Diámetro),
```

```
fraccion(StrDiámetroSugerido,DiámetroSugerido),
```

```
DiámetroSugerido < Diámetro.
```

Al consultar wps:

```
wps("BUENA","Filete a tope",[ "Plana","Horizontal"],"0.105",[ "1"],"E6013","5/32"  
,"Alterna","120","170","22","26","na",[ "90","45"],[ "90","45"],[ "5","5"],[ "10","10"],[ "  
Ninguno","Cepillado","Esmerilado","Decapado","Otro"])
```

y analizar si $DiámetroSugerido < Diámetro$

se determina que el electrodo cumple con el diámetro establecido, por lo que la causa no es el “electrodo grande”

analizarCausaPaso("Corriente baja",[____Diametro,Electrodo,Posicion,____CorrienteStr,CACD,____]):-

*str_real(CorrienteStr,CorrienteNum),composicion(Composicion),
ce(CE,Composicion),soldabilidad(Grado,CE),
soldaduraJuntaTipo(SoldaduraJuntaTipo),
caracteristicadesoldadura([____StrEspesor____]),!,
wps(Grado,SoldaduraJuntaTipo,PosicionList,StrEspesor,____Electrodo,Diametro,CACD,CorminStr,____),
member(Posicion,PosicionList),str_real(CorminStr,Cormin),CorrienteNum<Cormin.*

Al consultar wps:

*wps("BUENA","Filete a tope",["Plana", "Horizontal"],"0.105",["1"],"E6013","5/32",
,"Alterna","120","170","22","26","na",["90","45"],["90","45"],["5","5"],["10","10"],["Ninguno","Cepillado","Esmerilado","Decapado","Otro"])*

y analizar si $CorrienteNum < Cormin$

se determina que la corriente no es inferior al mínimo establecido, por lo tanto, la causa no es la "corriente baja".

analizarCausa("Abertura raíz pequeña"):-

*caracteristicadesoldadura([____StrAbertura____]),!,
str_real(StrAbertura,Abertura),
Abertura<0.03125.*

Como se trata de un filete a tope, no aplica la abertura de raíz en *caracteristicadesoldadura([____StrAbertura____]),!* y se descarta como una causa de defecto.

analizarCausaPaso("Posición electrodo incorrecta",[_____]StrClase,Str Posicion,_____)):-

*soldaduraJuntaTipo(StrSoldaduraJuntaTipo),!,
clasePosicionElectrodo(ListSoldaduraJuntaTipo,ListPosicion,ListClase),
member(StrSoldaduraJuntaTipo,ListSoldaduraJuntaTipo),
member(StrPosicion,ListPosicion),
member(StrClase,ListClase),!,fail.*

Al revisar clasePosicionElectrodo:

clasePosicionElectrodo(["Cordón en orilla","Filete a tope","Filete en T","Filete en traslape","Filete en esquina","Ranura cuadrada a tope","Ranura V a tope con respaldo","Ranura de bisel doble a tope"],["Plana","Horizontal","Vertical hacia abajo"],["E6010","E6011","E6012","E6013","E7014","E7015","E7016","E7018","E7048"]).

y analizar a sus miembros, se puede ver que la posición está incluida, razón por lo cual la "posición de electrodo incorrecta" no ha sido la causante del defecto.

analizarCausaPaso("Limpieza faltante",[_____] "Ninguno",_____)):-!.

Como la opción "ninguno" fue utilizada para describir el método de limpieza de la soldadura, ésta se identifica como una limpieza faltante, y por lo tanto, como una causa del defecto.

analizarCausa(X):-member(X,["Diseño de junta inapropiado","Electrodo en mal estado","Preparación de junta inapropiado","Rigidez de la junta","Secuencia inapropiada","Soldadura pequeña","Técnica manual inapropiada","Longitud de arco alta","Longitud de arco baja","Longitud de arco irregular","Velocidad de paso irregular","Velocidad de enfriamiento alta"]),!.

De todas las causas por *default*, la longitud de arco irregular es aquella relacionada con la fusión incompleta.

Determinación de las acciones correctivas. Con las causas detectadas, se hace un enlace a las acciones correctivas respectivas mediante la estructura *defectoaccionescorrectivas(string,slist,slist)*:

```
defectoaccionescorrectivas("Fusión incompleta",["Velocidad de paso alta", "Electrodo grande","Corriente baja","Abertura raíz pequeña","Posición electrodo incorrecta","Limpieza faltante","Longitud de arco irregular"],["Reducir velocidad de soldadura","Utilizar tamaño correcto de electrodo","Incrementar corriente para mayor penetración","Utilizar detalle de junta correcto","Corregir posición o electrodo","Limpiar superficie soldada antes de siguiente paso","Mantener longitud de arco apropiada"])
```

Despliegue de diagnóstico y acciones correctivas. Finalmente se muestra la ventana "Diagnóstico" donde aparecen los siguientes elementos:

Defecto: Fusión incompleta

Causa: Longitud de arco irregular

Acción correctiva: Mantener longitud de arco apropiada

Paso: 1

Causa: Velocidad de paso alta

Acción correctiva: Reducir velocidad de soldadura

Causa: Limpieza faltante

Acción correctiva: Limpiar superficie soldada antes de siguiente paso

5. Trabajo experimental

5.1 Introducción

Con objeto de validar el sistema experto se prepararon y elaboraron muestras de algunos de los tipos de juntas y uniones más típicas, las cuales fueron soldadas bajo diferentes variables de operación: las ideales, y las que provocarían algunos defectos.

Para realizar las pruebas, se recurrió a un solo soldador, el más calificado de la planta a criterio del supervisor, y el cual no contaba con certificado alguno. La empresa, ATSA, proporcionó también un equipo de personas y aditamentos para llevar a cabo todas las operaciones y mediciones pertinentes.

Una vez soldada cada muestra se procedió a su correspondiente enfriamiento y se le realizó una limpieza para su presentación final. Con base en estas muestras se realizarán los diagnósticos correspondientes, mismos que serán mostrados en la sección de resultados.

5.2 Materiales y Equipos

A partir de lámina de acero 1006, de calibre 12 de espesor, y placa de acero A36, de $\frac{3}{4}$ " de espesor, se realizaron diversos cortes en medidas de 5" x 3" (127 x 76.2 mm) y 8" x 3" (203.2 x 76.2 mm), algunos fueron limpiados y otros no, de tal manera que se pudieran simular condiciones diferentes e inducir ciertos defectos. Las probetas fabricadas para las pruebas de soldadura se muestran en las Figuras 5.1 a 5.4.

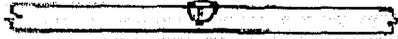


Figura 5.1: Ranura cuadrada a tope. Medidas: 4 probetas de 5" x 3" (127 x 76.2 mm).
Espesor: Cal. 12 (0.1046") (2.65 mm).

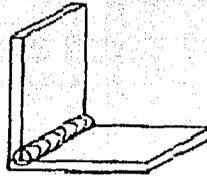


Figura 5.2: Filete a tope. Medidas: 2 probetas de 5" x 3" (127 x 76.2mm).
2 probetas de 8" x 3" (203.2 x 76.2mm). Espesor: Cal. 12 (0.1046") (2.65 mm).

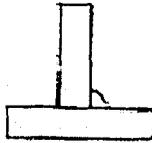


Figura 5.3: Filete en T. Medidas: 2 probetas de 5" x 3" (127 x 76.2 mm).
2 probetas de 8" x 3" (203.2 x 76.2 mm). Espesor: Cal. 12 (0.1046") (2.65 mm).

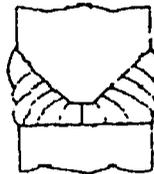


Figura 5.4: Ranura de bisel doble a tope. Medidas: 2 probetas de 5" x 3" (127 x 76.2 mm).
Ángulo de biseles: 45°. Espesor: 3/4" (19.05 mm).

Las máquinas de soldar empleadas fueron las siguientes (con sus respectivas características):

1) Marca: Miller

Modelo: MI-250 CA

Rango: Alta; 60 a 300 A

Baja; 20 a 150 A

Voltaje: 110 a 220 V

Primario:

Tensión nominal: 127-220 V

Corriente nominal: 109-63 A

Potencia real: 9.1 kW

Potencia aparente: 13.8 kva

Frecuencia monofásica: 60 Hz

Secundario:

Tensión máxima a circuito abierto: 80 V

Tensión normal: 30 V

Corriente nominal: 250 A

Ciclo de trabajo: 25 %

Corriente máxima: 300 A

Aislamiento, clase: 155

2) Marca: Lincoln Welder

Type SAE: 300

Volts NEMA: 40

Serial No. 104077

RPM: 1,800

Voltaje: 220-440 V

Corriente: 74-38 A

Fases: 3

Ciclos: 60

Con 4 tipos de aplicaciones:

Electrodos largos: 90 a 450

Rango de soldadura normal: 75 a 400

Sobre-cabeza y vertical: 55 a 350

Aplicaciones especiales: 75 a 400

Para electrodo en fase positiva y negativa

5.3 Condiciones experimentales

Las condiciones experimentales para cada uno de los 14 experimentos se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Condiciones experimentales por tipo de soldadura y junta. Los datos experimentales completos se reportan en el Apéndice C.

Tipo de soldadura y junta: Ranura cuadrada a tope

No. Muestra	Variables Modificadas				
	Corriente (A)	Clase de Electrodo	Diámetro (in)	Velocidad de soldadura (in/min)	Angulo de trabajo (°)
1	90	E6013	1/8	15.8	90
2	90	E6013	1/8	15	40
3*	120	E6010	5/32	20.2	90
4	120	E6010	5/32	25.3	60

Tipo de soldadura y junta: Filete a tope

No. Muestra	Variables Modificadas		
	Corriente (A)	Método de limpieza	Velocidad de soldadura (in/min)
5	160	Ninguno	17.6
6	175	Ninguno	32
7	160	Esmerilado	17.8
8*	160	Esmerilado	14.1

Tipo de soldadura y junta: Filete en T

No. Muestra	Variables Modificadas					
	Corriente (A)	Diámetro (in)	Método de limpieza	Velocidad de soldadura (in/min)	Angulo de trabajo (°)	Angulo de avance (°)
9	150	5/32	Esmerilado	11.1	70	20
10	150	5/32	Ninguno	11.1	70	20
11	200	1/8	Ninguno	10.4	70	30
12*	150	1/8	Esmerilado	16	45	10

Tipo de soldadura y junta: Ranura de bisel doble a tope

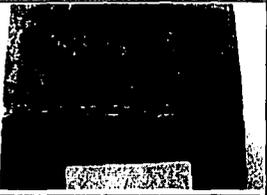
No. Muestra	Variables Modificadas			
	Paso	Método de limpieza	Velocidad de soldadura (in/min)	Angulo de trabajo (°)
13	1	Maquinado	8.7	45
14*	1	Maquinado	5.8	100
13	2-6	Ninguno	12.5	45
14*	2-6	Cepillado	9.2	100

* Muestra "ideal"

6. Resultados

En este capítulo se muestran los resultados experimentales (en términos del reporte de inspección visual) y los obtenidos con el SE (en términos del diagnóstico generado para cada defecto encontrado) con el objetivo de validar al SE.

La "Apariencia de la muestra soldada" es una fotografía de la pieza, tal como se obtuvo de la empresa que la soldó. En la sección "Reporte de Inspección Visual" se comenta si la muestra es aceptable o no, así como los defectos encontrados. En la sección de "Diagnóstico" se muestran las causas y acciones correctivas determinadas por el SE. Las causas marcadas en *itálicas* y que aparecen antes del número de paso son aquellas por default; las otras son las detectadas por cordón o paso.

<p>No. Muestra: M01</p> <p>Apariencia de la muestra soldada:</p> <p>Soldabilidad: Buena</p>		<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
<p>Reporte de Inspección Visual</p> <p>Muestra no aceptable a nivel comercial</p> <p>Apariencia pobre</p> <p>Perfil incorrecto</p>		
<p>Diagnóstico</p> <p>Defecto: Apariencia pobre</p> <p>Causa: <i>Técnica manual inapropiada</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Mayor entrenamiento de soldadura</i></p> <p>Causa: <i>Velocidad de paso irregular</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Permitir práctica y experiencia adicional</i></p> <p>Paso: 1</p> <p>Causa: Electrodo incorrecto</p> <p>Acción correctiva: Usar electrodo fresco o determinar el tipo correcto a utilizar</p> <p>Defecto: Perfil incorrecto</p> <p>Causa: <i>Longitud de arco baja</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Longitud de arco más largo y correcto</i></p> <p>Causa: <i>Técnica manual inapropiada</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Técnica de soldadura adecuada o reducir corriente</i></p> <p>Paso: 1</p> <p>Causa: Electrodo incorrecto</p> <p>Acción correctiva: Usar electrodo apropiado</p>		

<p>No. Muestra: M02</p> <p>Apariencia de la muestra soldada:</p> <p>Soldabilidad: Buena</p> 	<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
--	---

Reporte de Inspección Visual

Muestra no aceptable a nivel comercial
Apariencia pobre
Chisporroteo
Perfil incorrecto
Porosidad

Diagnóstico

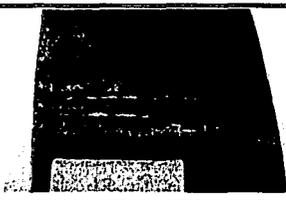
Defecto: Apariencia pobre
Causa: Técnica manual inapropiada
Acción correctiva: Mayor entrenamiento de soldadura
Causa: Velocidad de paso irregular
Acción correctiva: Permitir práctica y experiencia adicional
Paso: I
Causa: Electrodo incorrecto
Acción correctiva: Usar electrodo fresco o determinar el tipo correcto a utilizar

Defecto: Chisporroteo
Causa: Longitud de arco alta
Acción correctiva: Sostener longitud de arco apropiada y usar voltaje correcto
Paso: I
Causa: Electrodo incorrecto
Acción correctiva: Utilizar electrodo apropiado para lugar

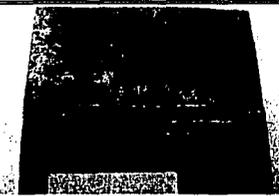
Defecto: Perfil incorrecto
Causa: Longitud de arco baja
Acción correctiva: Longitud de arco más largo y correcto
Causa: Técnica manual inapropiada
Acción correctiva: Técnica de soldadura adecuada o reducir corriente
Paso: I
Causa: Electrodo incorrecto
Acción correctiva: Usar electrodo apropiado

Defecto: Porosidad
Causa: Velocidad de enfriamiento alta
Acción correctiva: Calentar metal base para reducir la velocidad de enfriamiento
Causa: Longitud de arco alta
Acción correctiva: Reducir longitud de arco
Paso: I
No se encontró otra causa del defecto en este cordón

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

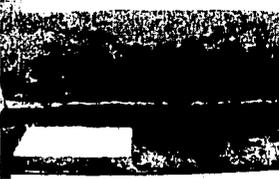
No. Muestra: M03 Apariencia de la muestra soldada: Soldabilidad: Buena		Información operacional Empresa: ATSA Operador: EMP Turno: MAT
Reporte de Inspección Visual Muestra aceptable a nivel comercial		
Diagnóstico No es necesaria su realización		

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

<p>No. Muestra: M04</p> <p>Apariencia de la muestra soldada:</p> <p>Soldabilidad: Buena</p> 	<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
<p>Reporte de Inspección Visual</p> <p>Muestra no aceptable a nivel comercial</p> <p>Apariencia pobre</p> <p>Chisporroteo</p> <p>Perfil incorrecto</p> <p>Unión pobre</p>	
<p>Diagnóstico</p> <p>Defecto: Apariencia pobre <i>Causa: Técnica manual inapropiada</i> <i>Acción correctiva: Mayor entrenamiento de soldadura</i> <i>Causa: Velocidad de paso irregular</i> <i>Acción correctiva: Permitir práctica y experiencia adicional</i> Paso: 1 No se encontró otra causa del defecto en este cordón</p> <p>Defecto: Chisporroteo <i>Causa: Longitud de arco alta</i> <i>Acción correctiva: Sostener longitud de arco apropiada y usar voltaje correcto</i> Paso: 1 Causa: Ángulo electrodo incorrecto Acción correctiva: Cambiar el ángulo de electrodo</p> <p>Defecto: Perfil incorrecto <i>Causa: Longitud de arco baja</i> <i>Acción correctiva: Longitud de arco más largo y correcto</i> <i>Causa: Técnica manual inapropiada</i> <i>Acción correctiva: Técnica de soldadura adecuada o reducir corriente</i> Paso: 1 Causa: Velocidad de paso alta Acción correctiva: Velocidad muy baja</p> <p>Defecto: Unión pobre <i>Causa: Técnica manual inapropiada</i> <i>Acción correctiva: Dar entrenamiento y experiencia adicional</i> Paso: 1 Causa: Ángulo electrodo incorrecto Acción correctiva: Usar ángulo de electrodo correcto o mejorar entrenamiento</p>	

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

<p>No. Muestra: M05</p> <p>Apariencia de la muestra soldada:</p> <p>Soldabilidad: Buena</p>		<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
<p>Reporte de Inspección Visual</p> <p>Muestra no aceptable a nivel comercial</p> <p>Porosidad</p> <p>Socavado</p>		
<p>Diagnóstico</p> <p>Defecto: Porosidad</p> <p>Causa: <i>Velocidad de enfriamiento alta</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Calentar metal base para reducir la velocidad de enfriamiento</i></p> <p>Causa: <i>Longitud de arco alta</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Reducir longitud de arco</i></p> <p>Paso: 1</p> <p>Causa: Limpieza faltante</p> <p>Acción correctiva: <i>Limpiar bisel y área adyacente a soldadura y mantener limpio</i></p> <p>Defecto: Socavado</p> <p>Causa: <i>Técnica manual inapropiada</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Usar ondeo uniforme en pausa de soldadura en ranura en orillas</i></p> <p>Paso: 1</p> <p>No se encontró otra causa del defecto en este cordón</p>		

<p>No. Muestra: M06</p> <p>Apariencia de la muestra soldada:</p> <p>Soldabilidad: Buena</p>		<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
---	---	---

Reporte de Inspección Visual
Muestra no aceptable a nivel comercial
Fusión incompleta
Perfil incorrecto
Socavado

Diagnóstico

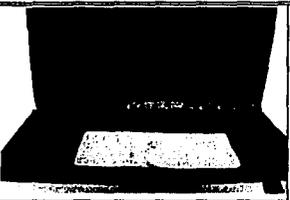
Defecto: Fusión incompleta
Causa: *Longitud de arco irregular*
Acción correctiva: *Mantener longitud de arco apropiada*
Paso: 1
Causa: Velocidad de paso alta
Acción correctiva: Reducir velocidad de soldadura
Causa: Limpieza faltante
Acción correctiva: Limpiar superficie soldada antes de siguiente paso

Defecto: Perfil incorrecto
Causa: *Longitud de arco baja*
Acción correctiva: *Longitud de arco más largo y correcto*
Causa: *Técnica manual inapropiada*
Acción correctiva: *Técnica de soldadura adecuada o reducir corriente*
Paso: 1
Causa: Velocidad de paso alta
Acción correctiva: Velocidad muy baja
Causa: Corriente alta
Acción correctiva: Reducir corriente
Causa: Limpieza faltante
Acción correctiva: Remover escoria en la orilla del cordón y utilizar técnica apropiada para evitar contorno de cordón altamente coronado

Defecto: Socavado
Causa: *Técnica manual inapropiada*
Acción correctiva: *Usar ondeo uniforme en pausa de soldadura en ranura en orillas*
Paso: 1
Causa: Corriente alta
Acción correctiva: Usar corriente adecuada para el electrodo correspondiente
Causa: Velocidad de paso alta
Acción correctiva: Reducir velocidad de viaje

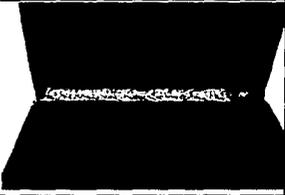
<p>No. Muestra: M07</p> <p>Apariencia de la muestra soldada:</p> <p>Soldabilidad: Buena</p>		<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
<p>Reporte de Inspección Visual</p> <p>Muestra no aceptable a nivel comercial</p> <p>Perfil incorrecto</p> <p>Socavado</p>		
<p>Diagnóstico</p> <p>Defecto: Perfil incorrecto</p> <p>Causa: <i>Longitud de arco baja</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Longitud de arco más largo y correcto</i></p> <p>Causa: <i>Técnica manual inapropiada</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Técnica de soldadura adecuada o reducir corriente</i></p> <p>Paso: 1</p> <p>No se encontró otra causa del defecto en este cordón</p> <p>Defecto: Socavado</p> <p>Causa: <i>Técnica manual inapropiada</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Usar ondeo uniforme en pausa de soldadura en ranura en orillas</i></p> <p>Paso: 1</p> <p>No se encontró otra causa del defecto en este cordón</p>		

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

<p>No. Muestra: M08</p> <p>Apariencia de la muestra soldada:</p> <p>Soldabilidad: Buena</p>		<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
<p>Reporte de Inspección Visual</p> <p>Muestra aceptable a nivel comercial</p>		
<p>Diagnóstico</p> <p>No es necesaria su realización</p>		

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

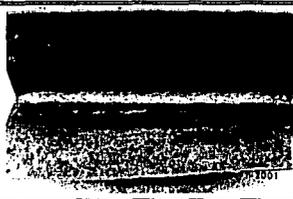
<p>No. Muestra: M09</p> <p>Apariencia de la muestra soldada:</p> <p>Soldabilidad: Buena</p>		<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
<p>Reporte de Inspección Visual</p> <p>Muestra no aceptable a nivel comercial</p> <p>Inclusión sólida</p> <p>Perfil incorrecto</p> <p>Socavado</p>		
<p>Diagnóstico</p> <p>Defecto: Inclusión sólida</p> <p>Causa: <i>Electrodo en mal estado</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Usar electrodos sin dañar</i></p> <p>Causa: <i>Técnica manual inapropiada</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Utilizar técnica de soldadura correcta para tipo de electrodo o diseño de junta</i></p> <p>Paso: 1</p> <p>No se encontró otra causa del defecto en este cordón</p> <p>Defecto: Perfil incorrecto</p> <p>Causa: <i>Longitud de arco baja</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Longitud de arco más largo y correcto</i></p> <p>Causa: <i>Técnica manual inapropiada</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Técnica de soldadura adecuada o reducir corriente</i></p> <p>Paso: 1</p> <p>Causa: Electrodo grande</p> <p>Acción correctiva: Usar electrodo más pequeño</p> <p>Causa: Electrodo incorrecto</p> <p>Acción correctiva: Usar electrodo apropiado</p> <p>Defecto: Socavado</p> <p>Causa: <i>Técnica manual inapropiada</i></p> <p>Acción correctiva: <i>Usar ondeo uniforme en pausa de soldadura en ranura en orillas</i></p> <p>Paso: 1</p> <p>Causa: Electrodo grande</p> <p>Acción correctiva: Usar tamaño de electrodo correcto para tamaño de soldadura correspondiente</p>		

<p>No. Muestra: M10</p> <p>Apariencia de la muestra soldada:</p> <p>Soldabilidad: Buena</p>		<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
<p>Reporte de Inspección Visual</p> <p>Muestra no aceptable a nivel comercial</p> <p>Perfil incorrecto</p> <p>Porosidad</p>		
<p>Diagnóstico</p> <p>Defecto: Perfil incorrecto <i>Causa: Longitud de arco baja</i> <i>Acción correctiva: Longitud de arco más largo y correcto</i> <i>Causa: Técnica manual inapropiada</i> <i>Acción correctiva: Técnica de soldadura adecuada o reducir corriente</i></p> <p>Paso: 1 Causa: Limpieza faltante Acción correctiva: Remover escoria en la orilla del cordón y utilizar técnica apropiada para evitar contorno de cordón altamente coronado Causa: Electrodo grande Acción correctiva: Usar electrodo más pequeño Causa: Electrodo incorrecto Acción correctiva: Usar electrodo apropiado</p> <p>Defecto: Porosidad <i>Causa: Velocidad de enfriamiento alta</i> <i>Acción correctiva: Calentar metal base para reducir la velocidad de enfriamiento</i> <i>Causa: Longitud de arco alta</i> <i>Acción correctiva: Reducir longitud de arco</i></p> <p>Paso: 1 Causa: Limpieza faltante Acción correctiva: Limpiar bisel y área adyacente a soldadura y mantener limpio</p>		

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

<p>No. Muestra: M11</p> <p>Apariencia de la muestra soldada:</p> <p>Soldabilidad: Buena</p>		<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
<p>Reporte de Inspección Visual</p> <p>Muestra no aceptable a nivel comercial</p> <p>Chisporroteo</p> <p>Fusión incompleta</p> <p>Perfil incorrecto</p> <p>Socavado</p>		
<p>Diagnóstico</p> <p>Defecto: Chisporroteo Causa: Longitud de arco alta Acción correctiva: Sostener longitud de arco apropiada y usar voltaje correcto Paso: 1 Causa: Corriente alta Acción correctiva: Ajustar la corriente apropiada para el tamaño de electrodo usado Causa: Ángulo electrodo incorrecto Acción correctiva: Cambiar el ángulo de electrodo</p> <p>Defecto: Fusión incompleta Causa: Longitud de arco irregular Acción correctiva: Mantener longitud de arco apropiada Paso: 1 Causa: Limpieza faltante Acción correctiva: Limpiar superficie soldada antes de siguiente paso</p> <p>Defecto: Perfil incorrecto Causa: Longitud de arco baja Acción correctiva: Longitud de arco más largo y correcto Causa: Técnica manual inapropiada Acción correctiva: Técnica de soldadura adecuada o reducir corriente Paso: 1 Causa: Velocidad de paso baja Acción correctiva: Velocidad muy alta Causa: Corriente alta Acción correctiva: Reducir corriente Causa: Limpieza faltante Acción correctiva: Remover escoria en la orilla del cordón y utilizar técnica apropiada para evitar contorno de cordón altamente coronado</p> <p>Defecto: Socavado Causa: Técnica manual inapropiada Acción correctiva: Usar ondeo uniforme en pausa de soldadura en ranura en orillas Paso: 1 Causa: Corriente alta Acción correctiva: Usar corriente adecuada para el electrodo correspondiente Causa: Ángulo electrodo incorrecto Acción correctiva: Ajustar ángulo de electrodo para llenar el socavado</p>		

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

No. Muestra: M12 Apariencia de la muestra soldada: Soldabilidad: Buena		Información operacional Empresa: ATSA Operador: EMP Turno: MAT
Reporte de Inspección Visual Muestra aceptable a nivel comercial		
Diagnóstico No es necesaria su realización		

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

No. Muestra: M13		Información operacional	
Apariencia de la muestra soldada		Empresa:	ATSA
Soldabilidad: Regular		Operador:	EMP
		Turno:	MAT

Reporte de Inspección Visual

Muestra no aceptable a nivel comercial

Apariencia pobre

Baja penetración

Fusión incompleta

Inclusión sólida

Perfil incorrecto

Porosidad

Diagnóstico

Defecto: Apariencia pobre

Causa: *Técnica manual inapropiada*

Acción correctiva: *Mayor entrenamiento de soldadura*

Causa: *Velocidad de paso irregular*

Acción correctiva: *Permitir práctica y experiencia adicional*

Paso: 1-6

No se encontró otra causa del defecto en este cordón

Defecto: Baja penetración

Paso: 1-6

Causa: *Velocidad de paso alta*

Acción correctiva: *Disminuir velocidad*

Causa: *Ángulo electrodo incorrecto*

Acción correctiva: *Usar ángulo de electrodo correcto*

Defecto: Fusión incompleta

Causa: *Longitud de arco irregular*

Acción correctiva: *Mantener longitud de arco apropiada*

Paso: 1

Causa: *Velocidad de paso alta*

Acción correctiva: *Reducir velocidad de soldadura*

Paso: 2-6

Causa: *Velocidad de paso alta*

Acción correctiva: *Reducir velocidad de soldadura*

Causa: *Limpieza faltante*

Acción correctiva: *Limpiar superficie soldada antes de siguiente paso*

Defecto: Inclusión sólida

Causa: *Electrodo en mal estado*

Acción correctiva: *Usar electrodos sin dañar*

Causa: *Técnica manual inapropiada*

Acción correctiva: *Utilizar técnica de soldadura correcta para tipo de electrodo o diseño de junta*

Paso: 1

No se encontró otra causa del defecto en este cordón

Paso: 2-6

Causa: *Limpieza faltante*

Acción correctiva: *Remover escoria solidificada después de cada paso*

Causa: *Limpieza de junta faltante*

Acción correctiva: *Remover escoria en la orilla del cordón y utilizar técnica apropiada para evitar contorno de cordón altamente coronado. Dar superficie de bisel suave y esmerilar si fuera necesario*

Defecto: Perfil incorrecto

Causa: *Longitud de arco baja*

Acción correctiva: *Longitud de arco más largo y correcto*

Causa: *Técnica manual inapropiada*

Acción correctiva: *Técnica de soldadura adecuada o reducir corriente*

Paso: 1

Causa: *Velocidad de paso alta*

Acción correctiva: *Velocidad muy baja*

Paso: 2-6

Causa: *Velocidad de paso alta*

Acción correctiva: *Velocidad muy baja*

Causa: *Limpieza faltante*

Acción correctiva: *Remover escoria en la orilla del cordón y utilizar técnica apropiada para evitar contorno de cordón altamente coronado*

Defecto: Porosidad

Causa: *Velocidad de enfriamiento alta*

Acción correctiva: *Calentar metal base para reducir la velocidad de enfriamiento*

Causa: *Longitud de arco alta*

Acción correctiva: *Reducir longitud de arco*

Paso: 1

No se encontró otra causa del defecto en este cordón

Paso: 2-6

Causa: *Limpieza faltante*

Acción correctiva: *Limpiar biseles y área adyacente a soldadura y mantener limpio*

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

<p>No. Muestra: M14</p> <p>Apariencia de la muestra soldada</p> <p>Soldabilidad: Regular</p>		<p>Información operacional</p> <p>Empresa: ATSA</p> <p>Operador: EMP</p> <p>Turno: MAT</p>
<p>Reporte de Inspección Visual</p> <p>Muestra aceptable a nivel comercial</p>		
<p>Diagnóstico</p> <p>No es necesaria su realización</p>		

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

7. Análisis de resultados

En general, los diagnósticos realizados han sido exitosos, ya que las causas que originaron a los defectos observados en las uniones soldadas en planta concuerdan con las modificaciones realizadas a las variables correspondientes, validando así el sistema experto.

En la sección "5.3 Datos experimentales", se establecieron cuatro grupos de muestras de acuerdo al tipo de soldadura y junta empleados. Las muestras 01 a 04 corresponden a la ranura cuadrada a tope; de 05 a 08, al filete a tope; de 09 a 12, al filete en T; y finalmente, las muestras 13 y 14, a la ranura de bisel doble a tope. En cada grupo, existe una muestra ideal: 03, 08, 12 y 14, respectivamente. En éstas se cumple con lo sugerido por la bibliografía, los fabricantes, los manuales de soldadura y los llamados "Best Practices" de algunas empresas. Los otros casos sufrieron modificaciones en las variables para forzar la aparición de defectos.

Muestra M01

Considerando el primer grupo de muestras: para la muestra M01 se usó un electrodo que no era el adecuado: un E6013 de 1/8" de diámetro. Tanto por su clase como por su diámetro se obliga a un cambio en las variables de operación, mismas que no garantizan el desempeño y la calidad requerida. Los defectos y los diagnósticos encontrados son los siguientes:

- Apariencia pobre, cuyas causas fueron técnica manual inapropiada, electrodo incorrecto y velocidad de paso irregular.
- Perfil incorrecto, el cual fue ocasionado por longitud de arco baja, técnica manual inapropiada y electrodo incorrecto.

Definitivamente, lo más crítico en este caso fue haber utilizado un electrodo incorrecto tanto por la clase como por el diámetro. Con esta variación, la técnica manual

se ve afectada también si se considera que el electrodo no es el apropiado. Un E6010 de 5/32" es uno de los electrodos recomendados para este tipo de junta y soldadura. Este fue empleado en la muestra ideal, la M03.

Muestra M02

Para la muestra M02 se usó otra vez un electrodo que no era el adecuado: el mismo que para M01 y con otras modificaciones sobre las variables operativas (velocidad y ángulo de trabajo), lo cual desencadenó otros defectos:

- Apariencia pobre, cuyo diagnóstico fue técnica manual inapropiada, electrodo incorrecto y velocidad de paso irregular.
- Chisporroteo, debido a longitud de arco alta y electrodo incorrecto.
- Perfil incorrecto, cuyas causas fueron longitud de arco baja, técnica manual inapropiada y electrodo incorrecto.
- Porosidad, causado por velocidad de enfriamiento alta y longitud de arco alta.

Nuevamente, la variable más crítica fue el electrodo incorrecto que se usó. Esto contribuyó a dificultar el desempeño del soldador en su técnica manual, lo cual pudo desencadenar también cambios puntuales en las longitudes de arco que pudieron causar defectos tales como el chisporroteo y la porosidad.

Muestra M04

En cuanto a la muestra M04, se utilizaron el mismo electrodo y el mismo diámetro que en la M03, pero aumentando la velocidad (de 20.2 a 25.3 in/min) y cambiando el ángulo de trabajo (de 90° a 60°), lo cual desencadenó varios defectos:

- Apariencia pobre ocasionada por técnica manual inapropiada y velocidad de paso irregular.
- Chisporroteo atribuido a longitud arco alta y ángulo de electrodo incorrecto.

- Perfil incorrecto diagnosticado por velocidad de paso alta, longitud de arco baja y técnica manual inapropiada.
- Unión pobre, debida a ángulo de electrodo incorrecto y técnica manual inapropiada.

En este caso las dos variables que más afectaron el proceso fueron claramente la velocidad y el ángulo de electrodo. Incluso, la presencia de apariencia pobre hace pensar en variaciones de la velocidad en algunos puntos. Las otras causas por *default* pueden considerarse como menos probables o de mucho menor impacto.

Muestra M05

Pasando al segundo grupo, la muestra M05 se soldó a una velocidad ligeramente mayor a la recomendada (de 14.1 a 17.6 in/min) y sin limpieza alguna. Esto favoreció la aparición de los siguientes defectos:

- Porosidad, cuyas causas fueron limpieza faltante, velocidad de enfriamiento alta y longitud de arco alta.
- Socavado, debido a técnica manual inapropiada.

Los factores que más afectaron la muestra fueron la falta de limpieza y la técnica manual del soldador. En el caso de la mayor velocidad de paso, ésta ocasiona un menor calentamiento, y por tanto, una velocidad de enfriamiento más alta, con lo cual la porosidad se puede ver favorecida.

Muestra M06

En lo que respecta a la muestra M06, el valor de la corriente se incrementó (de 160 a 175 A), no se aplicó limpieza alguna, y se aumentó mucho la velocidad (de 14.1 a 32 in/min). Todo esto impactó significativamente la calidad de la muestra:

- Fusión incompleta, cuyo diagnóstico fue velocidad de paso alta, limpieza faltante y longitud arco irregular.
- Perfil incorrecto causado por velocidad de paso alta, corriente alta, longitud de arco baja, limpieza faltante y técnica manual inapropiada.
- Socavado atribuido a técnica manual inapropiada, corriente alta y velocidad de paso alta.

Para este caso se puede notar la gran influencia de la velocidad alta, la corriente alta y la falta de limpieza, que se conjugaron para causar los problemas de calidad ya mencionados.

Muestra M07

Para la muestra M07, sólo hubo un ligero aumento en la velocidad (de 14.1 a 17.8). Los principales defectos encontrados fueron los siguientes:

- Perfil incorrecto, ocasionado por longitud de arco baja y técnica manual inapropiada
- Socavado, debido a técnica manual inapropiada

En este caso, la técnica manual parece ser la principal causa de los problemas presentados. Aumentar la velocidad de aplicación puede provocar cambios en el arco eléctrico y el operador corre mayores riesgos para conservar la técnica manual apropiada.

Muestra M09

Para el tercer grupo se aplicaron diversas modificaciones. En la muestra M09, se usaron un diámetro mayor (de 1/8" a 5/32"), una menor velocidad (de 16 a 11.1 in/min) y cambios en los ángulos de trabajo y avance (de 45° y 10° a 70° y 20°), obteniéndose así varios defectos:

- Inclusión sólida, originada por electrodo en mal estado y técnica manual inapropiada.
- Perfil incorrecto, debido a longitud de arco baja, técnica manual inapropiada, electrodo grande y electrodo incorrecto.
- Socavado, diagnosticado por una técnica manual inapropiada y electrodo grande.

En este caso el principal problema fue que el electrodo era de diámetro mayor al recomendado, lo cual afectó a todas las otras variables de operación. El sistema da prioridad como causa de defecto a los electrodos incorrectos y de diámetros diferentes para los diagnósticos que realice. Al aumentar el diámetro, la técnica manual de aplicación también se ve alterada y se requiere un ajuste en todas las otras variables operativas.

Muestra M10

Respecto a la muestra M10, se utilizó un mayor diámetro (de 1/8" a 5/32"), ninguna limpieza fue aplicada, la velocidad fue menor (de 16 a 11.1 in/min) y los ángulos de trabajo y avance fueron diferentes a los recomendados (de 45° y 10° a 70° y 20°). Los defectos encontrados son los siguientes:

- Perfil incorrecto, cuyo diagnóstico fue longitud de arco baja, limpieza faltante, técnica manual inapropiada, y electrodo grande e incorrecto.
- Porosidad, originada por limpieza faltante, velocidad de enfriamiento alta y longitud de arco alta.

En este caso, un mayor diámetro implica una modificación de todas las otras variables operativas, por lo que se establece como la causa original del perfil incorrecto, junto como la falta de limpieza (en el caso de la porosidad). La limpieza es básica para obtener soldaduras libres de defectos y facilitar el proceso, mismo que presenta "resistencias" cuando aparecen suciedades. Tal vez se pudo haber utilizado algún otro electrodo más propicio para dichas condiciones.

Muestra M11

En cuanto a la muestra M11, se empleó mayor corriente (de 150 a 200 A), ninguna limpieza, menor velocidad (de 16 a 10.4 in/min) y ángulos diferentes (de 45° y 10° a 70° y 30°), que ocasionaron:

- Chisporroteo, cuyo diagnóstico fue corriente alta, longitud de arco alta y ángulo incorrecto
- Fusión incompleta, debida a limpieza faltante y longitud de arco irregular
- Perfil incorrecto, originado por velocidad de paso baja, corriente alta, longitud de arco baja, limpieza faltante y técnica manual inapropiada.
- Socavado, por técnica manual inapropiada, corriente alta y ángulo incorrecto.

Los principales factores que afectan la integridad y calidad de la pieza fueron claramente: corriente alta, limpieza faltante y los ángulos incorrectos, los cuales deben ser ajustados. La velocidad baja contribuyó también al perfil incorrecto. Las causas por *default* -los cambios de longitud de arco y la técnica manual inapropiada- pueden ser minimizadas o descartadas como posibles causas.

Muestra M13

Con lo que respecta al cuarto y último grupo, para M13 se modificaron la velocidad (de 5.8 en paso 1 y 9.2 en pasos 2 a 6, a 8.7 y 12.5 in/min, respectivamente), el ángulo de trabajo (de 100° a 45°) y la nula aplicación de limpieza en los cordones 2 a 6. Los defectos más notables fueron:

- Apariencia pobre, adjudicable a técnica manual inapropiada y velocidad irregular.
- Baja penetración, ocasionada por velocidad de paso alta y ángulo incorrecto.
- Fusión incompleta, diagnosticada por velocidad alta, limpieza faltante y longitud de arco irregular.

- Inclusión sólida, originada por limpieza faltante, limpieza de junta faltante, electrodo en mal estado y técnica manual inapropiada.
- Perfil incorrecto, debido a velocidad alta, longitud de arco baja, limpieza faltante y técnica manual inapropiada
- Porosidad, causada por velocidad de enfriamiento alta, longitud de arco alta y limpieza faltante.

Como se puede apreciar, las variables que más afectaron el proceso fueron la velocidad alta y la limpieza faltante. En la soldabilidad regular, el control debe ser más estricto; esto se complica cuando se usan varios cordones y hay modificaciones en las variables que se utilizan para su depositación, pudiendo afectar, incluso, a los otros que han sido aplicados o que se aplicarán.

Adicionalmente, se encontraron algunos hechos que se presentaron en el SE y que deben ser comentados, aclarados, e incluso modificados en una versión posterior:

- Hay restricciones en cuanto a las variables, ya que algunas quedan fijas y no se pueden cambiar de valor o nombre, ya que vienen declaradas directamente en la ventana. Obviamente, en la base de datos se requeriría que todos los datos coincidieran; en caso contrario el diagnóstico fallaría o se pondría en duda.
- La restricción en el uso de los electrodos según la clase a la que corresponden y los diámetros en que se presentan. En el caso de las muestras M01 y M02, el electrodo que realmente se utilizó fue un E6013 con un diámetro de 1/8", los cuales no aparecen registrados en la ventana correspondiente; esto implica un inconveniente, el cual, sin embargo, es revelado como causa durante el diagnóstico: electrodo incorrecto y electrodo grande. Esto podría implicar que se deben alimentar bien los datos, o mejor abstenerse de ello. Faltaría algún aviso o mensaje emitido por la computadora para prevenir esta situación. Por otro lado, el Sistema Experto ya considera el empleo de los electrodos y tamaños más

propicios para el proceso. El hecho de que algunos no se incluyan, podrían hacer suponer al usuario que de entrada utilizó los electrodos y diámetros incorrectos.

- En algunos casos podría parecer que todas las variables requeridas son correctas o están en el rango adecuado, tal como ocurrió en la muestra M07; en estos casos, una de las causas consideradas por *default*, sería la más factible en haber ocurrido. De hecho, hay algunos inconvenientes en lo referente a este tipo de causas, ya sea porque es difícil tener un parámetro para medirlas, o porque su medición en la práctica es muy complicada; por ejemplo, la longitud de arco se constituye como una variable muy importante, la cual en muchas ocasiones es la causa de diversos defectos, sin embargo, es muy difícil de medir, ya que se requerirían medir unas pequeñas fracciones de pulgada durante la formación del arco y todo el paso de la soldadura. Para este caso en particular, es más fácil indicarle al soldador que acerque o aleje más el electrodo mientras está soldando.
- Cuando la soldadura sea aceptable (M03, M08, M12 y M14), se supone que todas las variables debieron ser correctas; si se utilizara esta versión del Sistema Experto, aparecerían las causas por default como aquellas directamente relacionadas con los defectos. Si para el inspector y/o el soldador, la muestra de soldadura es aceptable, se sobreentiende que ya no será necesario realizar el diagnóstico.
- Por lo que respecta a la soldabilidad, a mayores espesores, se espera que la composición de los aleantes aumente, y por ende, el valor del carbono equivalente, lo cual irá dificultando la soldabilidad del acero. Recurrir a varios pasos de soldadura también hace que el proceso se vaya dificultando.
- En el caso de la soldabilidad regular, se emplea el criterio de precalentamiento. Las muestras M13 y M14 realmente no lo requieren, ya que su espesor es de $\frac{3}{4}$ ", para lo cual, según se ha sugerido por AWS, no es necesario el precalentamiento. Para este caso en particular, faltó adecuar el criterio y su regla para que el Sistema

Experto lo pudiera considerar sin repercutir en el diagnóstico, ya que, evidentemente no era necesaria su utilización.

Una gran ventaja, es que se puede utilizar una serie de datos parecidos de otro procedimiento para establecer causas de otros defectos o revisar si ya se han ajustado las mismas y el defecto ya no ocurre.

Partiendo de valores operacionales se podría establecer un mecanismo inverso que diera como resultado todos los posibles defectos y sus acciones correctivas. Cabe mencionar que en este caso se prefirió partir del defecto y llegar a su diagnóstico, de tal manera que el mismo operador identifique lo que ha obtenido como defecto, reconozca las causas que lo han provocado y pueda hacer las correcciones pertinentes.

Los defectos más comúnmente encontrados fueron el perfil incorrecto, la apariencia pobre, el chisporroteo, la porosidad, el socavado, la fusión incompleta, la inclusión sólida, la baja penetración y la unión pobre. Las causas más frecuentes fueron la velocidad de soldadura, el método de limpieza, la corriente, los ángulos de trabajo y avance; en menor grado: el tipo de corriente, la clase y el diámetro de electrodo.

En cuanto a los casos de soldabilidad regular, los defectos fueron más notorios y frecuentes que los originados en los casos de soldabilidad buena. Esto se debe a la mayor dificultad que representa soldarlos, requiriendo de mayor control del proceso, así como de operaciones adicionales.

En los casos donde se aplican varios pasos, se tendría que recurrir a pruebas no destructivas tales como la radiografía y el ultrasonido, las cuales son las únicas que podrían mostrar defectos internos. Para este trabajo, la determinación de defectos se realizó únicamente basándose en la inspección visual.

Por otro lado, a través de este trabajo se muestra la complejidad que representa el proceso de soldadura, dadas sus variables, principios, consideraciones e interacciones,

por lo cual se podría pensar en muchas otras aplicaciones a desarrollar en un Sistema Experto. Una de las tantas posibilidades de este tipo de sistemas es que puede ser depurado y enriquecido con el tiempo, dependiendo, incluso, de las necesidades del usuario. De hecho, este Sistema Experto debería poderse adaptar a cada planta, en función de las necesidades, agregando a su vez, otro tipo de pruebas.

8. Conclusiones

Una vez culminado el presente trabajo, se pueden enunciar las siguientes conclusiones:

- Se diseñó y construyó un sistema experto para diagnosticar y corregir las causas de defectos en productos fabricados con soldadura metálica con arco protegido (SMAW).
- El uso de esta tecnología permite que las compañías reduzcan su tasa de rechazos, evitando la reparación costosa y el riesgo de fallas en servicio, así como contar con una herramienta con propósitos de optimización, entrenamiento y educativos.
- La utilización de programación lógica para resolver este problema se justifica porque evita la necesidad de diseñar algoritmos de búsqueda: se le da la descripción de un problema y busca la solución. Esto reduce el número de líneas de programación, siendo capaz de deducir soluciones y adquirir conocimientos, ya que manipula adecuadamente las estructuras de datos complejas.
- No se utilizó un modelo matemático particular, ya que las ecuaciones empleadas y los rangos de valores más apropiados, ya han sido establecidos previamente. En este sentido, se desarrolló un Sistema Experto “puro”, es decir, que está sustentado en una base de conocimiento.
- Algunas de las variables operativas que se solicitan en el sistema experto se incluyen también en las especificaciones de procedimiento de soldadura.
- La validación del sistema experto fue muy exitosa, ya que las causas diagnosticadas concuerdan con las variables modificadas.

- La principal ventaja que ofrece el sistema es su posibilidad de crecimiento y adaptabilidad a la medida de cualquier planta en particular, ya que en el lenguaje en que está programado se permite la inclusión de nuevos casos y la modificación continua del mismo.
- Los resultados arrojados por el trabajo experimental con base a las recomendaciones del Sistema Experto elaborado sugieren que este sistema es una herramienta efectiva para establecer procedimientos para controlar el proceso de soldadura, regular sus operaciones, reducir responsabilidades y aumentar la economía de la planta.
- Para perfeccionar este Sistema Experto se sugieren los siguientes aspectos en futuras versiones: acciones correctivas que incluyan valores fijos y rangos de variables para los ajustes de corrección, ampliación de la base de datos, así como la adición de casos de estudio.

9. Bibliografía

1. Groover, M. K. *Fundamentos de Manufactura Moderna*. Prentice-Hall. México. 1997.
2. Horwitz, H. *Soldadura: Aplicaciones y Práctica*. Alfaomega. México. 1990.
3. Cary, H. B. *Modern Welding Technology*. Prentice-Hall. EUA. 1998.
4. Séférián, D. *Las Soldaduras*. Urmo. España. 1981.
5. AWS. *Certification Manual for Welding Inspectors*. AWS. EUA. 1993. PP. 4.1-13, 6.1-18, 8.1-21, 10.1-25
6. AWS. *Welding Handbook V. 4*. AWS. EUA. 1982.
7. AWS. *Welding Technology Vol. 1 Welding Handbook*. AWS. EUA. 1987.
8. Lincoln Electric Co. *The Procedure Handbook of Arc Welding*. Lincoln Electric Co. EUA. 1973.
9. Althouse, A. D., Turnquist, Carl H., et al. *Modern Welding*. Goodheart-Willcox. EUA. 1992.
10. James F. Lincoln Arc Welding Foundation. *Fabricators' and Erectors' Guide to Welded Steel Construction*. James F. Lincoln Arc Welding Foundation. EUA. 1999. PP. 1-46
11. US Army Corps of Engineers. *Welding - Design Procedures And Inspections*. US Army Corps of Engineers. EUA. 2000. PP. 3.1-6, 4.1-13, 7.1-2, C.1-3

12. Patton, W. J. *Ciencia y Técnica de la Soldadura*. Urmo. España. 1982.
13. Easterling, K. *Introduction to the Physical Metallurgy of Welding*. Butterworth-Heinemann. Reino Unido. 1992.
14. Hrivňak, I. *Theory of Weldability of Metals and Alloys*. Elsevier. EUA. 1992.
15. Lancaster, J. F. *Metallurgy of Welding*. Chapman & Hall. Reino Unido. 1993.
16. Liu, S., Indacochea, J. *Weldability of Steels*. ASM Handbook Vol. 6: Welding, Brazing and Soldering. ASM. EUA. 1993.
17. Linnert, G. E. *Welding Technology. Vol. 1*. AWS. EUA. 1994.
18. Badiru, A. B. *Expert Systems Applications in Engineering and Manufacturing*. Prentice-Hall. EUA. 1992.
19. Bratko, I. *Prolog Programming for Artificial Intelligence*. Addison-Wesley Ltd. EUA. 1986.
20. Bowen, K. A. *Prolog and Expert Systems*. McGraw-Hill. EUA. 1991.
21. Jackson, P. *Introduction to Expert Systems*. Addison-Wesley. EUA. 1990.
22. Merrit, D. *Building Expert Systems in Prolog*. Springer-Verlag. EUA. 1989.
23. Peralta, O. *Sistema Experto para Procesos DOX*. Tesis M. en C. UNAM. Fac. Química. México. 2000.
24. Prolog Development Center A/S. *Getting Started: Visual Prolog Vers. 5.0, 5.2*. Dinamarca. 1997.

25. Argyropoulos, S. Artificial Intelligence in Materials Processing Operations: A Review and Future Directions. ISIJ International Vol. 30 (1990) No. 2, Japón. 1990. PP. 83-89
26. Reduct & Lobbe Technologies Inc. <http://www.reduct.com>; Canada. 2001.
27. Amano, S., Takarabe, T. et al. Expert System for Blast Furnace Operation at Kimitsu Works. ISIJ International Vol. 30 (1990) No. 2. Japón. 1990. PP. 105-110
28. Niwa, Y., Sumigama, T. et al. Application of Self-learning Function to an Expert System for Blast Furnace Heat Control. ISIJ International Vol. 30 (1990) No. 2. Japón. 1990. PP. 111-117
29. Lock Lee, L. G., McNamara, A. R. et al. Rapid Prototyping Tools for Real-time Expert Systems in the Steel Industry. ISIJ International Vol. 30 (1990) No. 2. Japón. 1990. PP. 90-97
30. Fukuda, S., Morita, H. et al. Expert System for Determining Welding Condition for a Pressure Vessel. ISIJ International Vol. 30 (1990) No. 2. Japón. 1990. PP. 150-154
31. Kiuchi, M., Yanagimoto, J. Computer Aided Simulation of Universal Rolling Processes. ISIJ International Vol. 30 (1990) No. 2. Japón. 1990. PP. 142-149
32. Narazaki, H., Iwatani, T., et al. An AI Tool and Its Applications to Diagnosis Problems. ISIJ International Vol. 30 (1990) No. 2. Japón. 1990. PP. 98-104

Apéndice A.

Clasificación de los electrodos para SMAW

La forma en que se efectúa la clasificación AWS de electrodos más comunes, como son los utilizados para soldar aceros al carbón y aceros baja aleación, se incluye en el siguiente cuadro:

Clasificación AWS	Relación de depósito	Apariencia del cordón	Salpicaduras	Eliminación de escoria
E-XX10	Suficiente	Rizado, plano	Abundantes	Difícil
E-XX11	Suficiente	Rizado, plano	Moderadas	Bastante fácil
E-XX12	Buena	Liso, convexo	Pocas	Fácil
E-XX13	Buena	Liso, plano, ligeramente convexo	Pocas	Fácil
E-XX14	Alta	Liso, plano, ligeramente convexo	Moderadas	Muy fácil
E-XX15	Buena	Liso, convexo	Muy pocas	Fácil
E-XX16	Buena	Liso, convexo	Muy pocas	Fácil
E-XX18	Alta	Liso, plano, ligeramente convexo	Muy pocas	Fácil
E-XX20	Alta	Liso, plano, ligeramente convexo	Moderadas	Fácil
E-XX24	Muy alta	Liso, ligeramente convexo	Muy pocas	Fácil
E-XX27	Muy alta	Plano, ligeramente cóncavo.	Pocas	Muy fácil
E-XX28	Muy alta	Liso, plano, ligeramente convexo	Muy pocas	Muy fácil

Apéndice B.

Condiciones típicas de almacenaje y reacondicionamiento de electrodos recubiertos de acero al carbono, de acuerdo con la especificación A 5.1 de la American Welding Society

A continuación se muestra una tabla con las condiciones típicas de almacenaje y reacondicionamiento para los electrodos de acero al carbón, recomendadas por la AWS. La primera columna de la derecha, describe el procedimiento para la recuperación de los electrodos que por alguna razón han absorbido humedad más allá de los límites que permiten un funcionamiento adecuado. La segunda columna, de derecha a izquierda, indica el rango de temperatura a la que deben mantenerse dentro del horno los electrodos que han sido extraídos del empaque original. Finalmente, la tercera columna muestra las recomendaciones para el almacenamiento en empaque cerrado.

Clasificación AWS	Almacenamiento en empaque cerrado HR = Humedad relativa	Almacenamiento del empaque abierto dentro del horno de sostenimiento	Temperatura y tiempo de reacondicionamiento
E6010, E6011	Almacénese a temperatura ambiente	No recomendado	No recomendado
E6012, E6013, E6019, E6020, E6022, E6027, E7014, E7024, E7027	80°F±20°F (30±10°C) HR 50% Max.	20°F (12°C) a 40°F (24°C) arriba de la temperatura ambiente	Una hora a 275±5°F (135±15°C)
E7015, E7016, E7018, E7028, E7018M, E7048	No recomendado	50°F (30°C) a 250°F (140°C) arriba de la temperatura ambiente	De una a dos horas a temperaturas entre 500 a 800°F (260 a 427°C)

Nota:

Debido a la diferencia que existe entre la composición de los recubrimientos, es recomendable consultar al fabricante acerca de la temperatura de reacondicionamiento para sus electrodos.

Apéndice C.
Datos Experimentales

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

No. Muestra: M01

Esquema de la junta



Ranura cuadrada

Soldabilidad del metal base

Composición química del acero soldado

% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Información operacional

Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo

Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Características de la geometría

Datos de la soldadura

Espesor (in):	0.105
Pasos:	I

Dimensiones de la soldadura y junta

Abertura de raíz(in):	0.0625
-----------------------	--------

Características del tipo de soldadura y junta

Propiedades mecánicas del metal base

Resistencia a la tracción (psi):	25020
----------------------------------	-------

Características eléctricas

Tipo y polaridad de corriente:	DC+
Corriente (A):	90
Voltaje (V, opcional):	NA

Número de paso: I

Características del electrodo

Posición:	Plana
Clase:	E6013
Diámetro (in):	1/8

Características de la técnica

Método de limpieza:	Decapado
Velocidad de soldadura (in/min):	15.8
Angulo de trabajo:	90
Angulo de avance:	10

No. Muestra: M02

Esquema de la junta



Ranura cuadrada

Soldabilidad del metal base

Composición química del acero soldado

% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Información operacional

Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo

Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Características de la geometría

Datos de la soldadura

Espesor (in):	0.105
Pasos:	1

Dimensiones de la soldadura y junta

Abertura de raíz(in):	0.0625
-----------------------	--------

Características del tipo de soldadura y junta

Propiedades mecánicas del metal base

Resistencia a la tracción (psi):	25020
----------------------------------	-------

Características eléctricas

Tipo y polaridad de corriente:	DC+
Corriente (A):	90
Voltaje (V. opcional):	NA

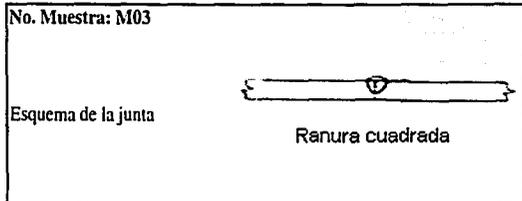
Número de paso: 1

Características del electrodo

Posición:	Plana
Clase:	E6013
Diámetro (in):	1/8

Características de la técnica

Método de limpieza:	Decapado
Velocidad de soldadura (in/min):	15
Angulo de trabajo:	40
Angulo de avance:	10



Información operacional	
Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

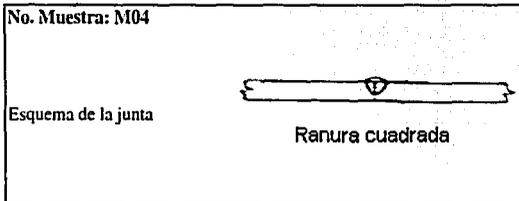
Condiciones de trabajo	
Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Soldabilidad del metal base	
<u>Composición química del acero soldado</u>	
% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Características de la geometría	
<u>Datos de la soldadura</u>	
Espesor (in):	0.105
Pasos:	1
<u>Dimensiones de la soldadura y junta</u>	
Abertura de raíz(in):	0.0625

Características del tipo de soldadura y junta		Número de paso:		1
<u>Propiedades mecánicas del metal base</u>		<u>Características del electrodo</u>		
Resistencia a la tracción (psi):	25020	Posición:	Plana	
<u>Características eléctricas</u>		Clase:	E6010	
Tipo y polaridad de corriente:	DC+	Diámetro (in):	5/32	
Corriente (A):	120	<u>Características de la técnica</u>		
Voltaje (V, opcional):	NA	Método de limpieza:	Decapado	
		Velocidad de soldadura (in/min):	20.2	
		Angulo de trabajo:	90	
		Angulo de avance:	10	

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



Información operacional	
Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo	
Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

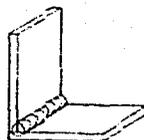
Soldabilidad del metal base	
<u>Composición química del acero soldado</u>	
% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Características de la geometría	
<u>Datos de la soldadura</u>	
Espesor (in):	0.105
Pasos:	1
<u>Dimensiones de la soldadura y junta</u>	
Abertura de raíz(in):	0.0625

Características del tipo de soldadura y junta		Número de paso:		1
<u>Propiedades mecánicas del metal base</u>		<u>Características del electrodo</u>		
Resistencia a la tracción (psi):	25020	Posición:	Plana	
<u>Características eléctricas</u>		Clase:	E6010	
Tipo y polaridad de corriente:	DC+	Diámetro (in):	5/32	
Corriente (A):	120	<u>Características de la técnica</u>		
Voltaje (V, opcional):	NA	Método de limpieza:	Decapado	
		Velocidad de soldadura (in/min):	25.3	
		Angulo de trabajo:	60	
		Angulo de avance:	10	

No. Muestra: M05

Esquema de la junta



Flete a tope

Soldabilidad del metal base

Composición química del acero soldado

% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Información operacional

Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo

Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Características de la geometría

Datos de la soldadura

Espesor (in):	0.105
Pasos:	1

Dimensiones de la soldadura y junta

Abertura de raíz(in):	NA
-----------------------	----

Características del tipo de soldadura y junta

Propiedades mecánicas del metal base

Resistencia a la tracción (psi):	25020
----------------------------------	-------

Características eléctricas

Tipo y polaridad de corriente:	Alterna
Corriente (A):	160
Voltaje (V, opcional):	NA

Número de paso:	1
-----------------	---

Características del electrodo

Posición:	Plana
Clase:	E6013
Diámetro (in):	5/32

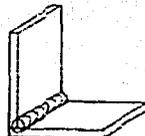
Características de la técnica

Método de limpieza:	Ninguno
Velocidad de soldadura (in/min):	17.6
Angulo de trabajo:	90
Angulo de avance:	10

TESIS CON
FALLA DE CUIBEN

No. Muestra: M06

Esquema de la junta



Filete a tope

Soldabilidad del metal base

Composición química del acero soldado

% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Información operacional

Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo

Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Características de la geometría

Datos de la soldadura

Espesor (in):	0.105
Pasos:	1

Dimensiones de la soldadura y junta

Abertura de raíz(in):	NA
-----------------------	----

Características del tipo de soldadura y junta

Propiedades mecánicas del metal base

Resistencia a la tracción (psi):	25020
----------------------------------	-------

Características eléctricas

Tipo y polaridad de corriente:	Alterna
Corriente (A):	175
Voltaje (V, opcional):	NA

Número de paso:	1
-----------------	---

Características del electrodo

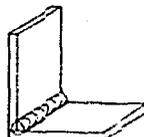
Posición:	Plana
Clase:	E6013
Diámetro (in):	5/32

Características de la técnica

Método de limpieza:	Ninguno
Velocidad de soldadura (in/min):	32
Angulo de trabajo:	90
Angulo de avance:	10

No. Muestra: M07

Esquema de la junta



Filete a tope

Soldabilidad del metal base

Composición química del acero soldado

% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Información operacional

Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo

Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Características de la geometría

Datos de la soldadura

Espesor (in):	0.105
Pasos:	1

Dimensiones de la soldadura y junta

Abertura de raíz(in):	NA
-----------------------	----

Características del tipo de soldadura y junta

Propiedades mecánicas del metal base

Resistencia a la tracción (psi):	25020
----------------------------------	-------

Características eléctricas

Tipo y polaridad de corriente:	Alterna
Corriente (A):	160
Voltaje (V, opcional):	NA

Número de paso: 1

Características del electrodo

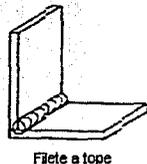
Posición:	Plana
Clase:	E6013
Diámetro (in):	5/32

Características de la técnica

Método de limpieza:	Esmerilado
Velocidad de soldadura (in/min):	17.8
Angulo de trabajo:	90
Angulo de avance:	10

No. Muestra: M08

Esquema de la junta



Filete a tope

Soldabilidad del metal baseComposición química del acero soldado

% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Información operacional

Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo

Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Características de la geometríaDatos de la soldadura

Espesor (in):	0.105
Pasos:	1

Dimensiones de la soldadura y junta

Abertura de raíz(in):	NA
-----------------------	----

Características del tipo de soldadura y juntaPropiedades mecánicas del metal base

Resistencia a la tracción (psi):	25020
----------------------------------	-------

Características eléctricas

Tipo y polaridad de corriente:	Alterna
Corriente (A):	160
Voltaje (V. opcional):	NA

Número de paso:

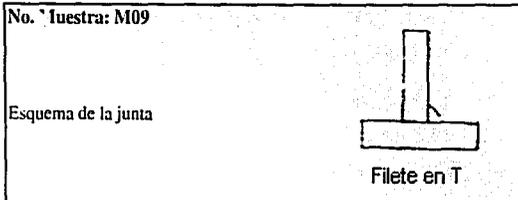
1

Características del electrodo

Posición:	Plana
Clase:	E6013
Diámetro (in):	5/32

Características de la técnica

Método de limpieza:	Esmerilado
Velocidad de soldadura (in/min):	14.1
Angulo de trabajo:	90
Angulo de avance:	10



Información operacional	
Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo	
Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Soldabilidad del metal base	
<u>Composición química del acero soldado</u>	
% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

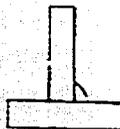
Características de la geometría	
<u>Datos de la soldadura</u>	
Espesor (in):	0.105
Pasos:	1
<u>Dimensiones de la soldadura y junta</u>	
Abertura de raíz(in):	NA

Características del tipo de soldadura y junta		
<u>Propiedades mecánicas del metal base</u>		
Resistencia a la tracción (psi):	25020	
<u>Características eléctricas</u>		
Tipo y polaridad de corriente:	Alterna	
Corriente (A):	150	
Voltaje (V, opcional):	NA	
<u>Características del electrodo</u>		
Número de paso:		1
Posición:		Horizontal
Clase:		E7024
Diámetro (in):		5/32
<u>Características de la técnica</u>		
Método de limpieza:		Esmerilado
Velocidad de soldadura (in/min):		11.1
Angulo de trabajo:		70
Angulo de avance:		20

TESTS CON
PALLA DE OXIGEN

No. Muestra: M10

Esquema de la junta



Filete en T

Soldabilidad del metal baseComposición química del acero soldado

% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Información operacional

Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo

Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Características de la geometríaDatos de la soldadura

Espesor (in):	0.105
Pasos:	1

Dimensiones de la soldadura y junta

Abertura de raíz(in):	NA
-----------------------	----

Características del tipo de soldadura y juntaPropiedades mecánicas del metal base

Resistencia a la tracción (psi):	25020
----------------------------------	-------

Características eléctricas

Tipo y polaridad de corriente:	Alterna
Corriente (A):	150
Voltaje (V, opcional):	NA

Número de paso: 1

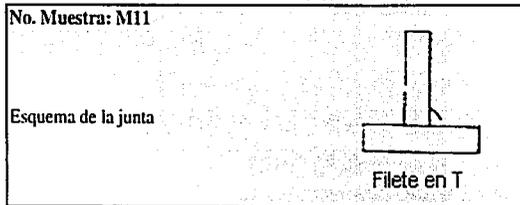
Características del electrodo

Posición:	Horizontal
Clase:	E7024
Diámetro (in):	5/32

Características de la técnica

Método de limpieza:	Ninguno
Velocidad de soldadura (in/min):	11.1
Angulo de trabajo:	70
Angulo de avance:	20

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN



Información operacional	
Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

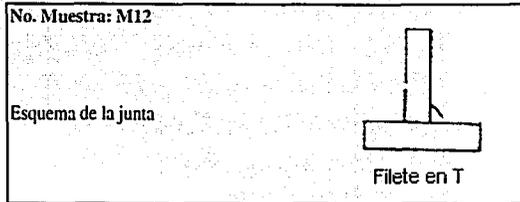
Condiciones de trabajo	
Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Soldabilidad del metal base	
<u>Composición química del acero soldado</u>	
% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Características de la geometría	
<u>Datos de la soldadura</u>	
Espesor (in):	0.105
Pasos:	1
<u>Dimensiones de la soldadura y junta</u>	
Abertura de raíz(in):	NA

Características del tipo de soldadura y junta	
<u>Propiedades mecánicas del metal base</u>	
Resistencia a la tracción (psi):	25020
<u>Características eléctricas</u>	
Tipo y polaridad de corriente:	Alterna
Corriente (A):	200
Voltaje (V, opcional):	NA
Número de paso:	
1	
<u>Características del electrodo</u>	
Posición:	Horizontal
Clase:	E7024
Diámetro (in):	1/8
<u>Características de la técnica</u>	
Método de limpieza:	Ninguno
Velocidad de soldadura (in/min):	10.4
Angulo de trabajo:	70
Angulo de avance:	30

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN



Información operacional	
Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo	
Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Soldabilidad del metal base	
<u>Composición química del acero soldado</u>	
% Carbono:	0.040
% Manganeso:	0.251
% Silicio:	0.014
% Fósforo:	0.015
% Azufre:	0.014
% Cobre:	0.000

Características de la geometría	
<u>Datos de la soldadura</u>	
Espesor (in):	0.105
Pasos:	1
<u>Dimensiones de la soldadura y junta</u>	
Abertura de raíz(in):	NA

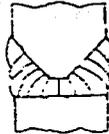
Características del tipo de soldadura y junta		
<u>Propiedades mecánicas del metal base</u>		
Resistencia a la tracción (psi):	25020	
<u>Características eléctricas</u>		
Tipo y polaridad de corriente:	Alterna	
Corriente (A):	150	
Voltaje (V, opcional):	NA	
<u>Características del electrodo</u>		
Número de paso:		1
<u>Características de la técnica</u>		
Posición:		Horizontal
Clase:		E7024
Diámetro (in):		1/8
Método de limpieza:		Esmerilado
Velocidad de soldadura (in/min):		16
Angulo de trabajo:		45
Angulo de avance:		10

134

TESIS CON
 FALTA DE CREEN

No. Muestra: M13

Esquema de la junta



Ranura de bisel doble a tope

Soldabilidad del metal base

Composición química del acero soldado

% Carbono:	0.258
% Manganeso:	0.725
% Silicio:	0.245
% Fósforo:	0.020
% Azufre:	0.022
% Cobre:	0.000

Información operacional

Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo

Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Características de la geometría

Datos de la soldadura

Espesor (in):	0.75
Pasos:	6
Dimensiones de la soldadura y junta	
Abertura de raíz(in):	0.15

Características del tipo de soldadura y junta

Propiedades mecánicas del metal base

Resistencia a la tracción (psi):	79520
----------------------------------	-------

Características eléctricas

Tipo y polaridad de corriente:	Directa positiva
Corriente (A):	240
Voltaje (V. opcional):	NA

Número de paso:	1	2-6
-----------------	---	-----

Características del electrodo

Posición:	Horizontal	Horizontal
Clase:	E7018	E7018
Diámetro (in):	3/16	3/16

Características de la técnica

Método de limpieza:	Maquinado	Ninguno
Velocidad de soldadura (in/min):	8.7	12.5
Angulo de trabajo:	45	45
Angulo de avance:	5	5

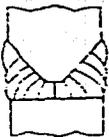
Precalentamiento y poscalentamiento

Precalentamiento

Temperatura inicial (F):	NA
Temperatura mantenida (F):	NA
Temperatura entre pasos (F):	NA

Poscalentamiento

Rango de temperaturas (F):	NA
Tiempo (min):	NA

No. Muestra: M14	
Esquema de la junta	Ranura de bisel doble a tope

Soldabilidad del metal base	
<u>Composición química del acero soldado</u>	
% Carbono:	0.258
% Manganeso:	0.725
% Silicio:	0.245
% Fósforo:	0.020
% Azufre:	0.022
% Cobre:	0.000

Información operacional	
Empresa:	ATSA
Operador:	EMP
Turno:	MAT

Condiciones de trabajo	
Temperatura ambiente (°C):	17.5
Humedad relativa (%):	43

Características de la geometría	
<u>Datos de la soldadura</u>	
Espesor (in):	0.75
Pasos:	6
<u>Dimensiones de la soldadura y junta</u>	
Abertura de raíz(in):	0.15

Características del tipo de soldadura y junta			
<u>Propiedades mecánicas del metal base</u>		<u>Número de paso:</u>	
Resistencia a la tracción (psi):	79520	1	2-6
<u>Características eléctricas</u>		<u>Características del electrodo</u>	
Tipo y polaridad de corriente:	Directa positiva	Posición:	Horizontal Horizontal
Corriente (A):	240	Clase:	E7018 E7018
Voltaje (V. opcional):	NA	Diámetro (in):	3/16 3/16
<u>Pre calentamiento y pos calentamiento</u>		<u>Características de la técnica</u>	
Pre calentamiento		Método de limpieza:	Maquinado Cepillado
Temperatura inicial (F):	NA	Velocidad de soldadura (in/min):	5.8 9.2
Temperatura mantenida (F):	NA	Angulo de trabajo:	100 100
Temperatura entre pasos (F):	NA	Angulo de avance:	5 5

<u>Pre calentamiento y pos calentamiento</u>		<u>Pre calentamiento</u>		<u>Pos calentamiento</u>	
Temperatura inicial (F):	NA	Rango de temperaturas (F):	NA	Tiempo (min):	NA
Temperatura mantenida (F):	NA				
Temperatura entre pasos (F):	NA				

TESIS CON
 FALTA DE ORIGEN