

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
“RODRIGO FACIO BRENES”

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO DE MANIPULADOR MECÁNICO DE SOLDADURA
PARA TUBERÍAS DE ALTA PRESIÓN

Informe final sometido a la consideración del Comité de Trabajos Finales de Graduación
de la Escuela de Ingeniería Mecánica para optar por el grado y título de Licenciado en
Ingeniería Mecánica

DAVID ASTORGA SÁNCHEZ A70721

JORGE EDUARDO VARGAS HERRERA A13805

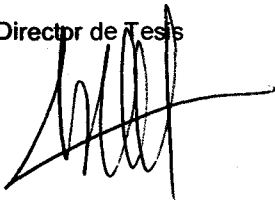
2013

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
“RODRIGO FACIO BRENES”

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

TRIBUNAL EXAMINADOR

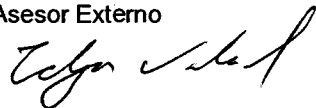
Ing. Mauricio Villarreal Castro
Director de Tesis



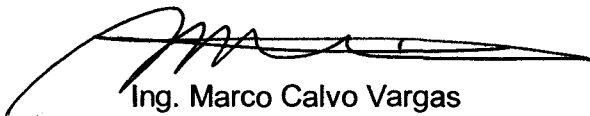
Ing. Juan Gabriel Monge Gapper
Asesor Interno



Ing. Edgar Varela Cascante
Asesor Externo



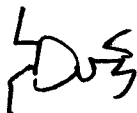
Ing. Jhymer Rojas Vásquez
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica



Ing. Marco Calvo Vargas
Coordinador de Proyectos de Trabajo Final de Graduación

SUSTENTANTES

David Astorga Sánchez



Jorge Eduardo Vargas Herrera



AGRADECIMIENTOS

David Astorga Sánchez:

Mi gratitud, principalmente está dirigida al Dios Todopoderoso por haberme dado la existencia y permitido llegar al final de nuestra carrera.

Igualmente agradezco muy profundamente a todas las personas del MET por su apoyo en la elaboración de este proyecto y a mis padres por su valiosa colaboración. También agradezco muy estimablemente al señor Ingeniero Jorge Arredondo de la empresa IIMA por habernos atendido tanto a mí como a Jorge Eduardo y también por su gran ayuda en la confección de datos los cuales fueron al final de valioso provecho para poder complementar mucho mejor este trabajo.

Jorge Eduardo Vargas Herrera:

A Dios primero, le agradeceré por siempre el regalo de la existencia, y también el don de poseer cualidades especiales. A mis padres les agradeceré que me hayan dado su amor, su apoyo y la posibilidad de poder culminar esta carrera.

A Marco, Mauricio, Juan Gabriel y Jhymer, quienes durante todos estos años me enseñaron con su humildad, sacrificio y espíritu noble de trabajo el valor de la profesión de la ingeniería mecánica a través de sus valiosos conocimientos, ejemplos y consejos.

A todos mis compañeros universitarios, que durante muchas generaciones pude conocer y compartir con ellos grandes momentos de amistad. A todos ellos los voy a extrañar.

San José, C.R.
12 de Julio de 2013

DEDICATORIAS

David Astorga Sánchez:

Esta tesis la dedico a mis seres queridos quienes me han apoyado para poder llegar a esta instancia de mis estudios, ya que ellos siempre han estado presentes para ayudarme.

Jorge Eduardo Vargas Herrera:

Esta tesis se la dedico a las personas que siempre creyeron en mí, que confiaron en mis capacidades y quienes también me inspiraron con su hidalguía para poder culminar con éxito este maravilloso trabajo.

A mi madre Ana Isabel Herrera Quesada, a mi padre Luis Ángel Vargas Vásquez y a mis dos hermanos Manuel Emilio y Luis Ángel, les dedico también este trabajo porque es parte de ellos y también por todo lo que significaron para mí durante toda mi vida. A mis abuelos, Luis Herrera Rodríguez, Primitiva Quesada Castro, Sofía Vásquez Rojas y Filiberto Vargas Araya, este trabajo también se los dedico a ustedes. A mis padrinos Luis Antonio Herrera y Edith Rodríguez, a mis primos Luis Iván, Sergio, Alfredo Enrique, Kattia, Marianella y Ronald, gracias a ustedes también porque de ustedes aprendí muchas cosas en mi vida y los voy a llevar siempre en mi corazón.

A todos los grandes ingenieros de mi familia, Rolando Herrera Quesada, Rocío Herrera Quesada, Luis Ángel Vargas Herrera y Manuel Emilio Vargas Herrera, y en especial a mi bisabuelo Antonio Herrera por su gran espíritu ingenioso y progresista. Este trabajo es de ustedes también.

A mis primos, Fabiola, Luis Alonso, Adrián, Mauricio, Viviana, Bernal, Jorge Mario, Randall, Luis Fernando, Oscar Leandro, Ileana, Gabriel, Alfonso, Mairene y demás familiares, este trabajo va dedicado también con mucho amor para ustedes.

A Vanessa, Laura, Nelson y Daniela, y especial a toda la familia Vargas y Morera de Palmares, que con mucho gusto este trabajo también va dedicado a ustedes. A mis primos Jonathan y Lupita Vargas Chavarría, siempre los voy a querer mucho y los voy a guardar en mi corazón.

A mis amigos y ex compañeros de carrera, Gabriel Páez Zamora y Jorge Vargas Peraza, quienes entre los tres formamos un equipo de gran visión profesional, este trabajo también va dedicado a ustedes.

A mis ex compañeros de colegio, Luis Diego Sánchez Ramírez, Karina Ramírez, Christopher Rojas Vargas y Ana Teresa Fournier, quienes junto a mí formamos parte del equipo que ganó el primer lugar del concurso "Antorcha 2000" difundido por el canal 13 del Sistema Nacional de Radio y Televisión Cultural entre los meses de octubre y noviembre del año 2000, a ellos también les dedico mi trabajo.

Al mejor amigo que tenido en toda mi vida desde mis edades tempranas de la infancia, Marcos Vinicio Ramírez, hijo del gran escritor costarricense Marino Ramírez Huertas, le dedico especialmente a él este gran trabajo.

A todas las personas importantes durante todos los años de mi vida, esta obra es para ustedes.

TABLA DE CONTENIDOS

TRIBUNAL EXAMINADOR	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIAS	iv
TABLA DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE CUADROS	xii
RESUMEN	xiii
CAPÍTULO 1	14
INTRODUCCIÓN	14
1.1 Reseña del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)	16
1.2 Taller de Máquinas, Equipos y Talleres (MET)	20
1.2.1 Aspectos generales del MET	20
1.2.2 Fábrica de tuberías y taller de soldadura	20
1.2.2.1 Taller de soldadura del MET	21
1.3 Antecedentes y descripción del problema	22
1.4 Selección del tema y justificación	23
1.5 Objetivos	24
1.5.1 Objetivo general	24
1.5.2 Objetivos específicos	24
1.6 Alcance y limitaciones	25
1.6.1 Alcance	25
1.6.2 Limitaciones	25
1.7 Metodología	26
1.7.1 Identificación de las necesidades	26
1.7.2 Investigación y recolección de datos	26
1.7.3 Elaboración de esquemas	26
1.7.4 Diseño	27
1.7.5 Simulaciones	27
1.7.6 Estimación de costos	27
CAPÍTULO 2	28
2.1 Manufactura y acabado de tuberías de alta presión	29
2.1.1 Construcción de las tuberías	29
	vi

2.1.2. Etapas de construcción de una tubería de alta presión	30
2.2 Fundamentos de los procesos de soldadura	35
2.2.1 Características generales de los procesos de unión metálica	35
2.2.1.1 Soldadura autógena	35
2.2.1.2 Soldadura por arco eléctrico	36
2.2.2. Tecnología de la soldadura con arco eléctrico	36
2.2.2.1 Electroodos	36
2.2.2.2 Protección del arco eléctrico	37
2.2.3 Principio de funcionamiento	37
2.2.4 Física de la soldadura	38
2.2.5 Soldabilidad	40
2.3 Selección de parámetros de soldadura	41
2.3.1 Corriente de soldadura	41
2.3.2 Tensión de arco	41
2.3.3 Diámetro del alambre	41
2.3.4 Velocidad de avance	42
2.3.5. Ángulo de inclinación del electrodo	42
2.3.6 Alambre para electrodo (material de aporte)	43
2.3.7 Fundentes	43
2.4 Conceptos generales de las máquinas soldadoras	45
2.4.1 Antecedentes técnicos	45
2.4.2 Caracterización y componentes principales de máquinas manipuladoras	52
2.4.3 Aplicaciones más comunes asociadas a máquinas manipuladoras de soldadura	55
2.5 Sistemas de posicionamiento automatizado	59
2.5.1 Posicionadores industriales y actuadores	59
2.5.1.1 Servomotores rotativos	63
2.5.1.2 Servomotores rotativos RotoSpin	65
2.5.1.3 Servomotores rotativos DriveSpin	66
2.5.1.4 Servomotores lineales	69
2.5.2 Controlador lógico programable (PLC)	70
2.6 Elementos estructurales y mecánicos	74
2.6.1 Conceptos generales	74
2.6.2 Vigas	74

2.6.3 Transmisiones	76
2.6.3.1 Cadenas de carga	76
2.6.3.2 Cadenas de tracción	76
2.6.3.3 Cadenas de transmisión de potencia	77
2.6.4 Engranajes	77
2.6.5 Pernos	78
2.6.6 Análisis de pandeo en elementos mecánicos comunes	79
2.6.6.1 Sección compacta	81
2.6.6.2 Sección no compacta	81
2.6.6.3 Sección esbelta	81
2.6.7 Tubería de alta presión	82
2.7 Principales normas de seguridad	83
2.7.1 Condiciones ambientales	83
2.7.1.1 Voltaje de circuito abierto (procesos especiales)	83
2.7.1.2 Terminal de trabajo y conexión a tierra	83
2.7.1.3 Carga de equipo	84
2.7.2 Factores de riesgo	84
2.7.2.1 Riesgos de choque	84
2.7.2.1.1 Choque de alto voltaje	84
2.7.2.1.2 Choque de bajo voltaje	85
2.7.2.2 Riesgo de fuego	85
2.7.2.3 Riesgo de humos y gases	85
CAPÍTULO 3	87
3.1 Esquema de diseño para el manipulador de soldadura	88
3.2 Diseño y selección de la viga pluma	91
3.3 Cálculo de esfuerzos	96
3.3.1 Esfuerzo por momento flector	96
3.3.2 Esfuerzo por cortante	97
3.3.3 Esfuerzos principales	98
3.3.4 Esfuerzo de Von Mises	100
3.3.5 Cálculo de deflexiones absolutas	100
3.4 Modelo numérico para verificación de esfuerzos y desplazamientos	102
3.4.1 Conformación del modelo	102

3.4.2 Resultados de la simulación	103
3.5 Transmisión horizontal de la viga pluma y base giratoria para la columna	105
3.5.1 Diseño del sistema de transmisión para la viga pluma	105
3.5.2 Base giratoria	108
3.5.3 Modelo numérico para análisis de esfuerzo y desplazamientos	109
3.5.4 Esfuerzos de Von Mises en zonas críticas de la base	110
3.5.5 Desplazamientos en zonas críticas de las patas	111
3.6 Elementos auxiliares, parámetros de velocidad y sistema de potencia	112
3.6.1 Elementos de sujeción	112
3.6.2 Espesor de placa para la base de sujeción de la viga pluma	115
3.6.3 Cojinetes	116
3.6.4 Velocidad de soldadura	119
3.6.5 Servomotor de posicionamientos para la viga pluma y equipo de PLC	122
3.6.6 Servomotor lineal para posicionamiento de la cabeza de soldadura	127
3.7 Transmisión vertical de la viga pluma	129
3.7.1 Selección de la cadena	129
3.7.2 Diseño de la Catarina	133
3.8 Diseño de la columna	136
3.8.1 Establecimiento de los parámetros de diseño para la viga columna	136
3.8.2 Ecuaciones de diseño	137
3.8.3 Resultados del análisis de pandeo	138
3.8.4 Esfuerzos máximos de compresión en la viga columna	139
3.9 Estimación inicial de costos de fabricación	142
3.9.1 Precios por tipo de material, tarifas por servicios y costo de accesorios	142
3.9.2 Estimación de horas de trabajo para el desarrollo del proyecto	145
3.9.3 Costos totales estimados para el proyecto	146
CAPÍTULO 4	149
4.1 Conclusiones	150
4.2 Recomendaciones	153
ANEXOS	155
APÉNDICE A	156
APÉNDICE B	158
APÉNDICE C	160

APÉNDICE D	162
APÉNDICE E	177
PLANOS DEL PROYECTO	180
GLOSARIO	189
BIBLIOGRAFÍA	200

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Organigrama del ICE	18
Figura 2: Fábrica de Tuberías de Alta Presión	21
Figura 3: Esquema de una tubería de alta presión	30
Figura 4: Fase 1, laminación con dobladora mecánica	31
Figura 5: Perfiles laminados listos para la soldadura	31
Figura 6: Fase 2, soldadura con arco sumergido	32
Figura 7: Transporte de segmentos de tubería soldada.....	33
Figura 8: Posicionamiento de la soldadura	42
Figura 9: Modelo básico de un manipulador.....	47
Figura 10: Equipos de control del manipulador mecánico	48
Figura 11: Taller de fabricación del IIMA	49
Figura 12: Manipulador perteneciente al IIMA	50
Figura 13: Vista lateral de una máquina Manipuladora	52
Figura 14: Vista frontal de una máquina Manipuladora.....	53
Figura 15: Esquema de cargas para equipo Manipulador	55
Figura 16: Manipulador para soldar tuberías de acero	57
Figura 17: Manipulador implementado en tuberías de acero.....	58
Figura 18: Servomotor Rotacional DC de PM tipo Disco	60
Figura 19: Servomotor Rotacional DC de PM tipo Carcasa.....	61
Figura 20: Representación de un servomotor lineal	62
Figura 21: Servomotor tipo carcasa	63
Figura 22: Familia de servomotores rotacionales.....	64
Figura 23: Motor rotativo RotoSpin	66
Figura 24: Rodamiento reductor TwinSpin	67
Figura 25: Esquema interno de un TwinSpin.....	67

Figura 26: Diseño básico de un servomotor DriveSpin	68
Figura 27: Servomotor lineal, diseño básico.....	69
Figura 28: Manejo de un servomotor con ordenador y unidades.....	72
Figura 29: Esquema de un controlador automático.....	73
Figura 30: Secciones de viga rectangular y tipo H	75
Figura 31: Nomenclatura básica de la geometría de los engranes rectos.....	77
Figura 32: Nomenclatura de los componentes de una unión apernada	78
Figura 33: Esquema de pandeo.....	80
Figura 34: Laminadora para tuberías.....	82
Figura 35: Diagrama de diseño para el manipulador de soldadura	89
Figura 36: Esquema de diseño numerado para el manipulador mecánico.....	90
Figura 37: Combinación de fuerzas aplicadas sobre la superficie de la viga	91
Figura 38: Diagrama de cuerpo libre para la viga pluma.....	92
Figura 39: Plano de distribución de esfuerzos de tensión en la viga pluma	98
Figura 40: Esfuerzo de flexión en el modelo del brazo	103
Figura 41: Perfil de deflexiones del modelo de brazo	103
Figura 42: Diagrama general de la base giratoria para el manipulador	108
Figura 43: Escala de deformación 62.08	110
Figura 44: Escala de Deformación 62.08.....	111
Figura 45: Diagrama de fuerzas aplicadas sobre los pernos	113
Figura 46: Imagen de tubería soldada en el sitio de trabajo	120
Figura 47: Modelo de Motor Eléctrico Baldor DSM	124
Figura 48: Modelo de PLC Simantic Siemens S7-1200	126
Figura 49: Servomotor lineal LSA	128
Figura 50: Factor de servicio K_s para cadenas.....	130
Figura 51: Factores de velocidad y número de dientes.....	131
Figura 52: Simbología de la geometría de la cadena de rodillos	132
Figura 53: Geometría y dimensiones de la catarina	135
Figura 54: Fuerzas y momentos sobre la viga columna.....	136
Figura 55: Distribución porcentual de costos para el presupuesto inicial	148

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Detalles económicos de la industria dedicada en EEUU	46
Cuadro 2: Referencias de la máquina de soldadura	54
Cuadro 3: Fórmulas para la caracterización del engrane piñón.....	106
Cuadro 4: Esfuerzos AGMA determinados para el engrane piñón	107
Cuadro 5: Diámetro de perno contra factor de seguridad	114
Cuadro 6: Datos Técnicos de Cojinete	118
Cuadro 7: Tiempos estimados de duración para soldar secciones de la tubería	121
Cuadro 8: Datos principales para cada modelo de servomotor lineal.....	127
Cuadro 9: Datos para la cadena de rodillos ANSI 80	133
Cuadro 10: Propiedades de la viga columna	137
Cuadro 11: Cargas críticas y esfuerzos críticos de pandeo.....	138
Cuadro 12: Determinación de precios, tarifas y costos	143
Cuadro 13: Determinación de precios, tarifas y costos para otros accesorios	144
Cuadro 14: Estimación de horas de trabajo	145
Cuadro 15: Costos totales estimados del manipulador de soldadura.....	146

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla el diseño de un manipulador mecánico semi automático de soldadura por arco sumergido, para ser usado por el Instituto Costarricense de Electricidad, con el objetivo de mejorar la calidad y el volumen de tuberías de alta presión utilizadas en los diversos proyectos hidroeléctricos desarrollados por la institución.

La propuesta se enfoca en el diseño mecánico de todos los componentes críticos necesarios para el funcionamiento óptimo dentro del rango de operación, mejorando así la eficiencia y volumen de producción.

Dado a la gran importancia de costo final del mecanismo para la empresa se procura una propuesta con un óptimo balance entre el costo y la calidad, para la cual se consideró realizar un diseño de montaje simple y selección de elementos mecánicos fáciles de adquirir en el mercado local.

CAPÍTULO 1
INTRODUCCIÓN

En este proyecto se pretende desarrollar un mecanismo para llevar a cabo una operación repetitiva de soldadura por arco sumergido para tuberías de alta presión destinadas a proyectos hidroeléctricos en donde deben transmitir el agua desde el embalse hasta la casa de máquinas.

Para construir las tuberías se utiliza metal laminado, que se cortan y conforman para luego pasar al taller de soldadura donde se cierran las uniones para que la pieza completa reciba procesos de tratamiento superficial y acabado. Estas láminas son esencialmente semicirculares, de acero y sus bordes están preparados para la soldadura. Se unen por medio del sistema de soldadura por arco sumergido para formar primero cilindros pequeños que se unen entre sí para completar tramos largos.

En la actualidad el ICE cuenta con sistemas de operación de soldadura manual. Sin embargo la necesidad de contar con mejores procesos de soldadura, lo que motivó a la institución a adquirir equipos automatizados provenientes de Suecia.

El alto costo inicial, los gastos en logística y tiempo de entrega señalaban que podría resultar factible el desarrollo y construcción de maquinaria propia.

El Taller de Máquinas, Equipos y Talleres (MET) del ICE es el departamento a cargo de proyectos institucionales relacionados con el mantenimiento de maquinarias y equipos, además de contar con talleres especializados de manufactura en donde se fabrican componentes para los proyectos hidroeléctricos del país. Estas instalaciones se encuentran en Turrúcares, distrito ubicado a una hora de camino desde el centro de Alajuela, carretera hacia el Sur.

En el MET se encuentran estos talleres de soldadura, y también los de conformado de piezas, preparación y acabado superficial.

1.1 Reseña del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)

El Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) fue creado por el Decreto - Ley No.449 del 8 de abril de 1949, su creación fue el resultado de una larga lucha de varias generaciones de costarricenses que procuraron solucionar los problemas de la escasez de energía eléctrica presentada en los años 40 y en apego de la soberanía nacional, en el campo de la explotación de los recursos hidroeléctricos del país¹.

Como objetivos primarios el ICE debe desarrollar, de manera sostenible, las fuentes productoras de energía existentes en todo el país y prestar el servicio de electricidad a todos los residentes de la nación. A su vez, se encarga de desarrollar y prestar los servicios de telecomunicaciones con el fin de promover el mayor bienestar de los habitantes del país y fortalecer la economía nacional².

Como institución encargada del desarrollo de fuentes productoras de energía eléctrica del país, le fueron encomendadas las funciones de solucionar el problema de escasez de energía eléctrica, mediante la construcción y la puesta en servicio de más plantas de generación de electricidad, con sus correspondientes redes de distribución³.

También es su deber promover el desarrollo mediante el uso de la energía eléctrica como fuente de fuerza motriz procurando a su vez el uso racional de los recursos naturales y terminar con la explotación destructiva indiscriminada de éstos.

Con el devenir del tiempo, el Grupo ICE ha evolucionado como un conjunto de empresas estatales, integrado primeramente por el ICE (Sectores Electricidad y Telecomunicaciones) y sus empresas: Radiográfica Costarricense S.A. (RACSA) y la Compañía Nacional de Fuerza y Luz S.A. (CNFL)⁴.

¹ Información correspondiente a la página oficial del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Consultado el 19 de abril, 2012 de <http://www.grupoice.com>

² *Ibid.*

³ *Ibid.*

⁴ *Ibid.*

En el proceso de estudio y ejecución de proyectos de generación, el Sector Electricidad genera una importante cantidad de datos e información técnica en los diferentes puntos de obra y de diferentes especialidades.

Se generan datos que se almacenan en diferentes formatos y redes de información como la sismológica, hidrometeorológica, geodésica y atmosférica, entre otras. Este conjunto constituye la base de cálculos de la ingeniería para el desarrollo de los proyectos, así como para la operación y el mantenimiento óptima de las plantas de generación, el transporte y la distribución de la electricidad⁵.

Específicamente en el sector de Electricidad se realiza una división por *unidades estratégicas de negocios* (UEN). En este grupo se cuenta con la UEN de *Producción* y la UEN de *Proyectos y Servicios Asociados* (PySA). Esta unidad trabaja en proyectos y servicios asociados a la industria eléctrica bajo el principio de desarrollo sostenible⁶.

La experiencia, capacidad y producción intelectual del personal que conforma la UEN-PySA en el desarrollo de proyectos de generación, transmisión y distribución de electricidad, hacen que esta sea líder a nivel nacional en su campo⁷.

Dentro de la división de la UEN PySA se encuentra la *Coordinación General de Proyectos* (CAP) cuyo objetivo es coordinar la ejecución de los proyectos, estableciendo políticas, lineamientos y procedimientos que garanticen su calidad en plazos y costos aceptables. Para ello hacen uso de sistemas de gestión normalizados para conocer el desempeño de los proyectos para efectos de toma de decisiones y, reportar resultados a la administración superior del área de proyectos perteneciente al sector electricidad (ICELEC)⁸.

La misión del CAP consiste en dirigir la fase de ejecución de los proyectos para la industria eléctrica y otros que pueda comisionar la administración superior, por medio de un equipo de trabajo competente⁹.

⁵ *Ibíd.*

⁶ *Ibíd.*

⁷ *Ibíd.*

⁸ *Ibíd.*

⁹ *Ibíd.*

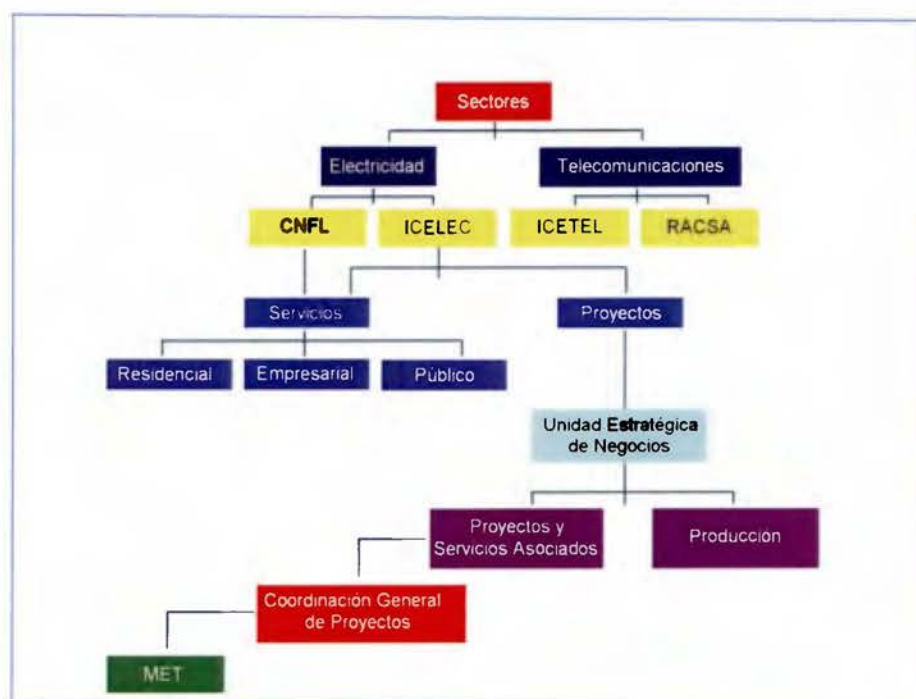


Figura 1: Organigrama del ICE

(Fuente: los autores)

Entre los proyectos que se encuentran bajo la dirección del CAP se encuentra el proyecto de *Maquinarias, Equipos y Talleres* del ICE (MET)¹⁰.

El MET se ubica en la comunidad de Cebadilla, Distrito de Turrúcares, Cantón Central de la Provincia de Alajuela en Costa Rica, y se define como un proyecto reciente del ICE cuyo propósito es llevar a cabo el mantenimiento correctivo a maquinarias y equipos utilizados en los proyectos de generación eléctrica, pero también hay personal que elabora diseños o asesorías como parte del soporte a todos los proyectos del ICE a nivel nacional¹¹.

Se cuenta además con una serie de talleres como lo son el mecánico, el eléctrico, el de pintura, la fábrica de tubos de alta presión, la fábrica de tubos de baja presión, el taller de fundición, redes, entre otros; y en estos mismos se realizan proyectos de diseño para solucionar u optimizar procesos industriales y demás proyectos del ICE¹².

¹⁰ *Ibíd.*

¹¹ Tomado de la información correspondiente a la visita efectuada al MET. Consultado el 27 de Marzo, 2012

¹² *Ibíd.*

Este proyecto busca satisfacer con oportunidad, confiabilidad y calidad las necesidades y expectativas de evolución en todo el ICE mediante el suministro de maquinaria, equipo y servicios técnicos especializados en los talleres mecánicos con la estructura y tecnología adecuada y el mejor recurso humano.

La capacidad para la fabricación y construcción de tuberías forzadas es altamente especializada, tanto por los equipos que se poseen como por el personal que participa en su desarrollo. Se han construido 48 478 metros de tubería para vapor instaladas, 284 válvulas de compuertas de 12" a 36", 30 válvulas de mariposa de 12" a 36", 16 válvulas menores de 3" a 4", 550 venteos y drenajes de 2", 5 143 soportes de tubería y se fabrican e instalan tanques de oscilación. Se cuenta con capacidad para fabricar tuberías de diferentes grosores, lo cual es muy significativo debido a que empresas competidoras o compradoras deben adquirir dichas tuberías en el extranjero¹³.

En la fábrica de tubos de alta presión se ha presentado un problema en la calidad de las soldaduras realizadas. Luego del proceso de laminación de tubos, las soldaduras no están cumpliendo los requerimientos de calidad, por lo que se encomienda al departamento de diseño de control electrónico del taller eléctrico, un mecanismo para garantizar la corrección del problema y proporcionar todas las características necesarias para ser automatizado por el *Departamento Técnico Eléctrico y Mecánico* del MET.

Es para propósito general de este proyecto colaborar con este departamento a través de una solución que muestre las indicaciones necesarias para describir con claridad la progresión del diseño, con lo que se contribuirá un valioso recurso para mejorar los procesos de fabricación de tuberías de alta presión para instalación en proyectos hidroeléctricos.

¹³ Ob. Cit.

1.2 Taller de Máquinas, Equipos y Talleres (MET)

1.2.1 Aspectos generales del MET

En el taller de máquinas, equipos y talleres se especializan en la elaboración mecánica de piezas para la construcción de sistemas que componen estructuras hidráulicas. Se incluyen principalmente tuberías de diferentes grosores, soportes para tubería y cierta variedad de válvulas.

Las tuberías de mayor tamaño se emplean en proyectos hidroeléctricos, específicamente para el transporte hidráulico desde el embalse ubicado a unos cuantos centenares de metros de la estación generadora, hasta la casa de máquinas en donde se le da el aprovechamiento correspondiente a la energía del agua en movimiento de alta presión para producir electricidad.

Para lograr la construcción de estas tuberías de gran tamaño se cuenta con una fábrica especializada de tuberías de alta presión.

1.2.2 Fábrica de tuberías y taller de soldadura

Esta división se compone de tres grandes talleres que conforman un complejo de más de 10 000 metros cuadrados. El primer taller se denomina sección de laminado, en donde los perfiles de acero reciben la forma básica para que puedan conformar la tubería del tamaño correspondiente, y luego de ahí se pasan a la siguiente fase. El segundo taller corresponde a la sección de soldadura; en donde se forman los segmentos de la tubería que luego se unen en el sitio de instalación. Finalmente se encuentra el taller de preparación de superficies y pintura, es ahí donde las tuberías reciben el último acabado según las especificaciones antes de ser transportadas hacia su destino final¹⁴.

¹⁴ Tomado de la información correspondiente a la visita efectuada al MET. Consultado el 27 de Marzo, 2012

1.2.2.1 Taller de soldadura del MET

De los tres talleres con que cuenta la sección de fábrica de tuberías, es éste el que se puede considerar como el más importante. También es el taller que se puede considerar como el más crítico, porque dentro de él se realizan las inspecciones de control de calidad más minuciosas y porque los trabajos son más lentos y elaborados. Además es una zona de alto riesgo para el trabajador y también un lugar donde la habilidad de los mismos debe ser muy desarrollada. Así mismo el cuidado con que se manejan los equipos y piezas de trabajo es muy elevado. La sutileza del operador, la pericia del inspector, el tipo de trabajo efectuado y la clase de estructura que ahí se desarrolla encaminan a este taller como uno de los más importantes del MET.



Figura 2: Fábrica de Tuberías de Alta Presión

(Fuente: Autores, visita a MET el 27 de marzo 2012)

1.3 Antecedentes y descripción del problema

A partir de un estudio de control de calidad elaborado por inspectores del MET se encontró que hay un requerimiento relacionado con la calidad final del producto que no cumple con las expectativas mínimas aceptables. Esta dificultad está ocasionando una falta de consistencia de los procesos de soldadura que actualmente tienen, y es por consiguiente que se considera que la soldadura manual para este tipo de aplicaciones no es la mejor opción en el contexto actual.

Las fallas específicas no se podrán usar ni mencionar en el presente trabajo dado que forman parte de la información confidencial del ICE.

Otro de los problemas es la dificultad con que el operador manual debe lidiar en vista de que debe mantenerse en una posición rígida durante todo el rato que dura el ensamble. Esto ocasiona problemas de cansancio visual y muscular, al tiempo que no debe detenerse mientras hace la unión y además no puede variar la posición de su brazo, puesto que alteraría la efectividad en la soldadura. Esto genera un nuevo problema pues implica que el operador hace frecuentes paradas para comprobar que su trabajo esté bien realizado.

Como no se puede garantizar que la posición y velocidad de avance del brazo del operador sea consistente y estable, la ejecución del proceso puede resultar en soldadura irregular.

1.4 Selección del tema y justificación

La principal dificultad con que cuenta el MET para soldar las tuberías es que en el proceso de inspección final de las soldaduras, la calidad no es aceptable. Esto se ha achacado al proceso manual de soldadura.

Es indispensable para el ICE contar con la disponibilidad y capacidad necesarias en sus talleres y equipos de manera que se reduzcan los procedimientos manuales, de acuerdo a un diseño propio que prescindiera de cotizar con terceros la formulación de proyectos de construcción de maquinarias o estructuras.

El MET no sólo tiene conciencia de la cantidad de equipos automáticos que necesitan para agilizar el proceso de soldadura haciéndola más eficiente, sino que no todo se puede importar dados los altos costos de compra y transporte. Los equipos automáticos de fabricación extranjera son sistemas muy avanzados y relativamente inusuales, por lo que su precio es suficientemente alto como para que el ICE no los considere como una opción viable.

Adicionalmente se debe tomar en cuenta el valor económico que trasciende el costo de mantenimiento de los equipos extranjeros. Gran parte de sus sistemas están compuestos por mecanismos electrónicos, que de fallar, deberán ser reemplazados por componentes nuevos. Esto implica mantener activamente una bodega de repuestos traídos desde Suecia, generando un incremento masivo en los costos de mantenimiento.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Diseñar un brazo mecánico (manipulador) para sistematizar la soldadura de tubería de acero de alta presión para espesores de pared de 63 milímetros (2,5 pulgadas nominales) con un diámetro interno de 2,2 metros.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Proponer una configuración conceptual conveniente para el proceso actual de soldadura de tubería de alta presión.
2. Seleccionar los componentes de potencia necesarios para la operación del equipo.
3. Diseñar los elementos estructurales y mecánicos especiales que forman el equipo.
4. Elaborar diagramas de construcción de la máquina y generar las listas de componentes necesarios.
5. Estimar los costos iniciales y de operación para un análisis básico de factibilidad económica.

1.6 Alcance y limitaciones

1.6.1 Alcance

Se presentará un diseño que incluye aspectos relacionados con la física de materiales, el movimiento de los cuerpos, las partes de máquinas y su funcionamiento. Así mismo se establecerán los criterios básicos de diseño mecánico, la selección de componentes auxiliares, el estudio de factores de seguridad y otros mecanismos que permitan facilitar la conformación de la estructura. Se proveerán diagramas de construcción y listas de materiales y componentes como insumo para que los grupos interesados puedan evaluar la factibilidad de fabricar el equipo.

Finalmente se presentará un análisis mediante modelos matemáticos sobre el funcionamiento del sistema, una estimación de costos iniciales y de operación del equipo.

1.6.2 Limitaciones

- 1) El contenido de información relevante sobre el tipo de sistema depende de publicaciones hechas por fabricantes de equipos de soldadura, o bien de empresas manufactureras dedicadas a la producción de componentes industriales.
- 2) El desarrollo del trabajo de diseño está orientado únicamente a la parte de selección de componentes mecánicos, elementos de estructuras y parámetros de funcionamiento. No se contempla la construcción de prototipos.
- 3) El diseño final del sistema de brazo de soldadura no contempla directamente los métodos para la automatización del equipo haciendo uso de herramientas de programación, solamente se indica la teoría básica de control de equipos automatizables para indicar que debe realizarse un proceso de automatización.
- 4) Este trabajo no contempla la preparación de documentos de especificaciones detallados, redacción de carteles de licitación, manuales de operación, ni planos mecánicos para la elaboración de componentes de precisión donde se requieran.

1.7 Metodología

Este trabajo se llevó a cabo en seis etapas que se sintetizan en esta sección.

1.7.1 Identificación de las necesidades

Compilar información en el ICE respecto a requerimientos y proponer conceptos de operación para ser evaluados antes de seleccionar el modelo final.

1.7.2 Investigación y recolección de datos

Para la investigación, se hará necesario un trabajo en el campo de fundamentos teóricos de los elementos mecánicos y otros principios de ingeniería, mantenimiento o cualquier otro campo adicional. Se hará uso de la base de datos proporcionada por el sistema bibliotecario de la Universidad de Costa Rica.

Además se realizarán visitas al lugar de trabajo para recolectar los datos necesarios para el diseño y asimismo se efectuarán inspecciones cuando sean necesarias. También se consultará con operarios para conocer cómo se debe efectuar el trabajo o qué dificultades presenta el actual método de operación. Adicionalmente se tomarán en cuenta opiniones del comité asesor del presente trabajo de graduación para elaborar el diseño final.

1.7.3 Elaboración de esquemas

Una vez realizada la investigación de sistemas similares a los propuestos en la etapa de análisis, se elaborarán prototipos digitales con software CAD que también se usó para llevar a cabo algunos de los cálculos de cargas y esfuerzos sobre los elementos del ensamble.

1.7.4 Diseño

En esta fase del proyecto se profundizarán todos los aspectos técnicos necesarios para la elaboración del diseño, los cuales darán solución al problema planteado por la empresa.

Todos los aspectos de ingeniería se mostrarán en esta sección al incluirlos en una memoria de cálculo junto con todos los diagramas, ecuaciones, y otro tipo de resultados pertinentes. Esta parte se va a fundamentar por medio de la indagación de las referencias necesarias a las fuentes de investigación que se seleccionaron para el proyecto, con el propósito de respaldar cada ecuación o criterio aplicado durante el proceso de diseño.

Se hará uso también de programas de ingeniería de carácter complementario que buscarán servir una mayor precisión y respaldo a las consideraciones que se tomaron en el momento de realizar los cálculos correspondientes, con el propósito de verificar cualquier aspecto que no se haya tomado en cuenta.

1.7.5 Simulaciones

Una vez efectuado el estudio de ingeniería para la selección de los elementos mecánicos, se respaldarán los resultados por de medio simulaciones cinéticas de prototipos virtuales que servirán para verificar las consideraciones de la fase de diseño.

1.7.6 Estimación de costos

Para esta etapa se tomará en cuenta una cotización y búsqueda de proveedores de cada elemento requerido para ser incluido en el presupuesto de costos. Al final se establecerá un presupuesto aproximado para el costo inicial del equipo, excluyendo aquellos elementos o servicios que estén fuera del alcance de este trabajo.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Manufactura y acabado de tuberías de alta presión

Las tuberías de alta presión se fabrican para conducir el agua en grandes caudales desde el embalse hasta la casa de máquinas. Tienen capacidad para soportar grandes presiones y están diseñadas a base de acero. En algunos proyectos hidroeléctricos su longitud se estima desde 790 metros hasta 1000 metros. Su diámetro generalmente es de 2 metros, pero también hay tuberías con dimensiones superiores. La tubería que se fabrica en el ICE-MET cuenta con un diámetro interno de 2,2 metros y un espesor de pared de 63 milímetros (2,5 pulgadas nominales)¹⁵.

Cualquier tubería de alta presión diseñada para trasegar agua, vapor, gas y aire a altas presiones, se fabrica según la norma ASTM A53 para la mayoría de aplicaciones industriales. Estos tubos tienen la capacidad para adaptarse a operaciones que involucren doblado, rebordeado y cualquier otra formación en frío¹⁶.

Como se elaboran en acero, presentan una serie de ventajas sobre otro tipo de materiales, principalmente alta resistencia al impacto, carencia de notables variaciones en las propiedades mecánicas ya sea por cambios de temperatura o efectos de la radiación solar, son ideales para establecer tendidos largos de tubería y su vida útil es prolongada junto con bajo nivel de reposición.

2.1.1 Construcción de las tuberías

El método de elaboración de las tuberías en mención involucra la conformación de perfiles laminados hechos a base de acero. Estos perfiles en forma de arco se sueldan a lo largo de los bordes de la unión de dos elementos del mismo tipo, en ambas superficies del material. Los dos arcos unidos, en sus extremos, se unen a otros dos formando una fila de arcos consecutivos.

Cuando un segmento se ha terminado, se envía al proceso de desbastado superficial para concluir con la fase de pintura.

¹⁵ Tomado de la información correspondiente a la visita efectuada al MET. Consultado el 27 de Marzo, 2012

¹⁶ *Ibíd.*

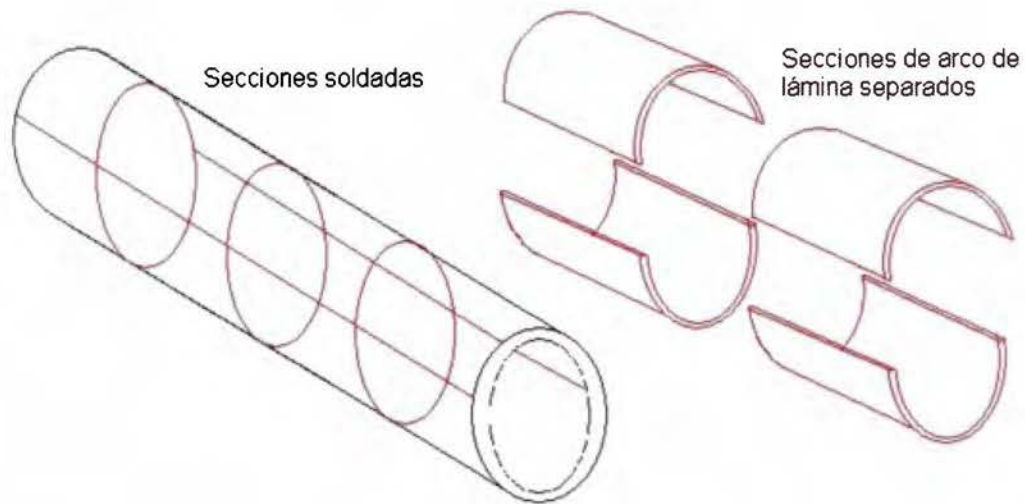


Figura 3: Esquema de una tubería de alta presión

(Fuente: los autores)

2.1.2. Etapas de construcción de una tubería de alta presión

Las tuberías de alta presión se fabrican en tres fases: laminación, soldadura y acabado superficial. Cada una de estas fases se realiza en uno de los talleres específicos con que cuenta la sección de fábrica de tuberías del ICE-MET¹⁷.

La primera etapa consiste en el ingreso del material. Sin estos recursos no es posible la construcción de las tuberías ya que la fábrica no cuenta con una bodega propia donde puedan almacenar temporalmente los perfiles de lámina que se van a usar antes de ser transformadas.

a) Fase de laminación

En esta división los operadores se encargan de darle forma a las láminas hasta que adquieran un perfil de forma de arco. Los arcos son segmentos semicirculares que se conforman en frío con una dobladora mecánica de tambores de gran tamaño, los cuales se encargan de deformar la lámina.

¹⁷ Tomado de la información correspondiente a la visita efectuada al MET. Consultado el 27 de Marzo, 2012

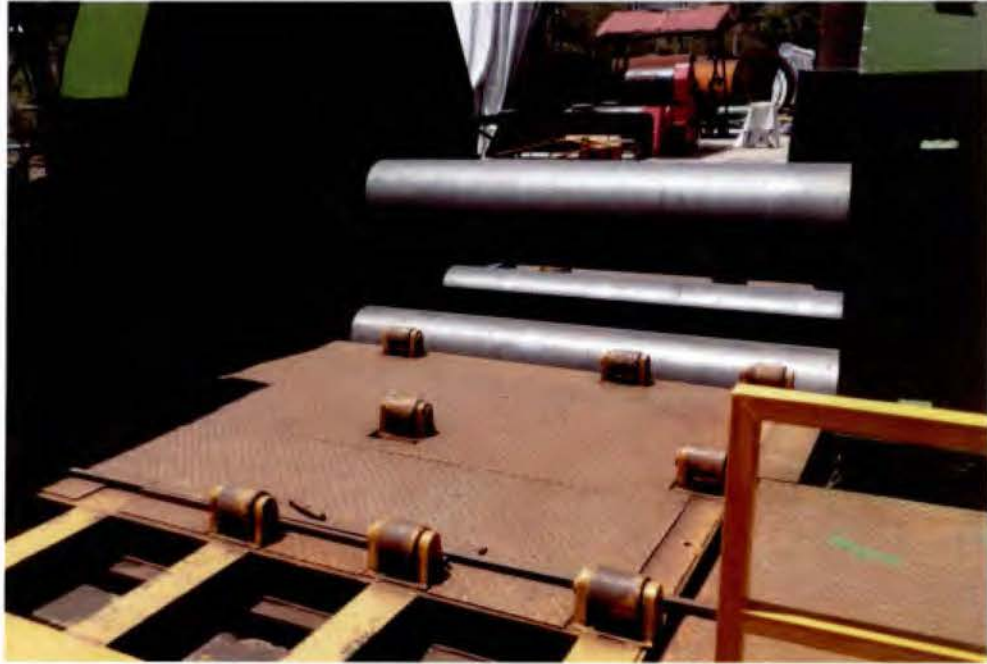


Figura 4: Fase 1, laminación con dobladora mecánica

(Fuente: Autores, visita a MET 27 de marzo de 2012)

Una vez que la lámina está lista se envía a la siguiente fase (soldadura) con la forma básica que a continuación se muestra.



Figura 5: Perfiles laminados listos para la soldadura

(Fuente: Autores, visita a MET 27 de marzo de 2012)

b) Fase de unión

Es la segunda etapa del proceso de fabricación de tuberías. Su objetivo es lograr un ensamble correcto de los componentes estructurales para poder darle forma final a la tubería de alta presión.

El proceso de unión que se lleva a cabo en esta etapa se denomina soldadura por arco sumergido, que es una variante de la soldadura con arco eléctrico. La soldadura con arco eléctrico se centra en la unión de placas metálicas por medio de un circuito eléctrico que ocasiona que los materiales se fundan y que luego al enfriarse queden firmemente unidas entre sí.

La fase de unión se lleva a cabo en el taller de soldadura que se encuentra contiguo al plantel de laminación de placas de acero para tuberías de alta presión. Dentro de este taller se le da forma cilíndrica a la estructura, y una vez que está completa se envía a la tercera etapa de construcción.



Figura 6: Fase 2, soldadura con arco sumergido

(Fuente: Autores, visita a MET 27 de marzo de 2012)

c) Fase de preparación superficial

La preparación superficial es la tercera etapa en la fabricación de tuberías de alta presión una vez que se han terminado de soldar, siempre y cuando las tuberías hayan sido aprobadas por el equipo el equipo encargado de inspeccionar la calidad.

Como las estructuras son tan pesadas se necesita un montacargas de carga pesada para transportarlas hasta la división de preparación superficial. Las tuberías se conectan a los montacargas por medio de bandas que se sujetan desde abajo a las tuberías y que luego se enganchan a la pluma del montacargas.



Figura 7: Transporte de segmentos de tubería soldada

(Fuente: Autores, visita a MET 27 de marzo de 2012)

La fase de preparación superficial se compone principalmente por tres etapas: La primera se caracteriza por una completa remoción de capas de óxido metálico, polvo, suciedad, grasa y cualquier otro contaminante a través de un sistema por bombardeo mecánico de balines de reducido tamaño, conocido también como proceso de granallado metálico. La

segunda etapa consiste en una completa limpieza superficial para remover las capas de grasa y humedad que estén presentes sobre la superficie de la lámina. La tercera etapa se define como la fase de recubrimiento y en esta se hace uso de una herramienta especial para distribuir uniformemente por aspersion una gruesa capa de pintura epoxy.

Una vez que la tubería está preparada se lleva al sitio de instalación en donde se conecta con el resto de los segmentos de tubería que forman el circuito que conecta los puntos del embalse con la casa de máquinas en los proyectos hidroeléctricos.

2.2 Fundamentos de los procesos de soldadura

2.2.1 Características generales de los procesos de unión metálica

Se denomina soldadura a la unión entre dos o más piezas metálicas de la misma forma y composición similar, para poder obtener una unión rígida y permanente. La unión se logra por un efecto de fusión que se produce por el calor generado a muy altas temperaturas, logrando así formar un perfecto ensamble entre los dos elementos que pueden ser dos metales idénticos o una aleación, junto con un material de aporte.

El sistema más utilizado que se emplea para efectuar la unión de piezas metálicas por soldadura es la que se realiza por fusión. Dentro de la soldadura por fusión existen diferentes métodos para operarla; sin embargo a escala industrial los dos procesos más comunes son los de la soldadura autógena y la soldadura por arco eléctrico.

2.2.1.1 Soldadura autógena

En la soldadura autógena el calor lo proporciona una llama producida por la combustión de una mezcla de acetileno y oxígeno (en proporción cercana a la estequiométrica) que ocurre cuando se hacen arder a la salida de una boquilla. La temperatura que se alcanza en la llama es de unos 1300°C.

El calor que se produce realiza la fundición de los elementos que se van a unir después de la solidificación a través de un enlace homogéneo. A pesar de que este tipo de soldadura es muy popular entre los talleres mecánicos, no se recomienda para fusionar piezas que estén sometidas a elevadas temperatura porque se producirán cargas asociadas a defectos como tensiones residuales, lo que resulta en un proceso más lento y costoso que el efectuado por arco eléctrico.

Cuando un soplete oxiacetilénico es usado para realizar las soldaduras entre piezas se le acostumbra completar la unión con un alambre de material de aporte el cual funde al mismo tiempo que los bordes de las piezas, formando en conjunto el cordón de soldadura.

El tamaño de la boquilla del soplete es aproximadamente igual que el espesor de las chapas a unir.

2.2.1.2 Soldadura por arco eléctrico

La soldadura por arco se basa en el empleo de dos conductores de contacto que se les somete a una diferencia de potencial establecida entre ambos por una corriente.

Si posteriormente se les separa se provocará una chispa, cuyo efecto ionizará el gas o el aire que les rodea permitiendo así el paso libre de la corriente, a pesar de no estar los conductores en contacto.

Con esto lo que se ocasiona entre ellos es un arco eléctrico por la transformación de la energía eléctrica en energía luminosa y calorífica.

El calor que se genera por el arco no sólo es intenso, sino que además está muy localizado, lo que resulta ideal para la operación de soldar. Las temperaturas que se alcanzan son del orden de 3500°C o mayores, en algunos casos superando los 5500°C.

En el circuito eléctrico que se forma por los electrodos y el arco eléctrico, la intensidad de la corriente dependerá de la tensión y de la resistencia del circuito. Si los electrodos se acercan o se separan la resistencia y la intensidad variarán. En cualquier caso, la energía consumida se transformará en calor, y una buena operación de soldadura depende de cómo se controlen estos parámetros.

2.2.2. Tecnología de la soldadura con arco eléctrico

2.2.2.1 Electrodo

Para el diseño de la máquina de soldar tuberías de alta presión se tomará en cuenta el uso de electrodos consumibles tipo alambre, ya que estos se pueden alimentar en forma continua al pozo de soldadura.

2.2.2.2 Protección del arco eléctrico

Las altas temperaturas producen reacciones intensas entre los metales de la unión con el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno del aire, provocando que las propiedades mecánicas de la unión se degraden. Esto se soluciona proporcionando algún medio inerte (gas, fundente, o ambos) para rodear el arco, la punta del electrodo y el pozo de soldadura.

2.2.3 Principio de funcionamiento

La soldadura por arco eléctrico sumergido es un proceso de soldadura por fusión. Se funde el material base junto con un metal de aporte para disminuir la energía desperdiciada y aportar volumen a la unión soldada, mejorando de esta manera su resistencia mecánica.

El arco es proporcionado por una descarga de corriente eléctrica a través de una separación en medio de un circuito. Este se mantiene por la presencia de una columna de gas térmicamente ionizada y conocida como plasma, la que conduce la corriente.

Durante esta etapa se forma un pozo de metal fundido, que consiste en metales base y metal de aporte cerca de la punta del electrodo. Conforme el electrodo se mueve a lo largo de la unión, el pozo de metal fundido se solidifica casi inmediatamente.

La capa de fundente granulado cubre completamente la operación de soldadura con arco eléctrico, lo que evita la oxidación del material de aporte, contiene salpicaduras y forma una barrera contra radiación nociva para el operario o superficies cercanas.

El fundente se introduce con ligera anticipación al arco de soldadura por medio de gravedad, desde un alimentador, y el alambre del electrodo se suministra desde un rollo que se opera automáticamente hasta introducirse a la zona de trabajo.

2.2.4 Física de la soldadura

La cantidad de calor que se necesita para fundir un determinado volumen de metal se define como el producto del cuadrado del punto de fusión del metal por una constante característica que depende de las unidades de temperatura¹⁸.

$$U_m = K \times T_m^2 \quad (1)$$

Los valores de U_m y T_m se definen en Joules por milímetro cúbico y Kelvin respectivamente.

Precisamente K es una constante característica que equivale a 0,00000333 W/(mm³K²) para la escala de temperatura Kelvin¹⁹.

Para un acero típico al bajo carbono el valor de la temperatura de fusión es de 1760 Kelvin y de 1700 Kelvin para un acero al medio carbono²⁰.

La rapidez volumétrica de la soldadura en el metal se define como el producto del área de soldadura A_w y la velocidad de viaje v ²¹.

$$WVR = A_w \times v \quad (2)$$

Los valores de WVR , A_w y v se proporcionan en milímetros cúbicos por segundo, milímetros cuadrados y milímetros por segundo respectivamente.

Por otra parte el producto de la energía unitaria para fundir el metal y la rapidez volumétrica se conoce como velocidad de energía calorífica proporcionada para la operación proporcionada en vatios. Esto se muestra como²²:

$$HR_w = U_m \times WVR \quad (3)$$

¹⁸ Groover, M.P. (c1997). *Fundamentos de manufactura moderna : materiales, procesos y sistemas. 1. ed.*. México : Prentice Hall Hispanoamericana.

¹⁹ *Ibid.*

²⁰ Cary, H.B. (c1979). *Modern Welding Technology*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall.

²¹ *Ob. Cit.*

²² *Ob. Cit.*

Además se puede encontrar el valor de la energía suministrada por la fuente como el producto de la corriente por el voltaje. Esto es²³:

$$HR = I \times V \quad (4)$$

Los valores de HR , I y V se proporcionan en Watts, Amperios y Voltios respectivamente.

Existe otra forma de expresar la velocidad de energía calorífica como el producto de las eficiencias de transferencia de calor y fusión por la energía de la fuente²⁴.

$$HR_w = f_1 \times f_2 \times HR \quad (5)$$

Para un proceso de soldadura con arco sumergido, la eficiencia de transferencia de calor f_1 representativa es de 0,95²⁵.

La eficiencia de fusión depende del proceso, de las propiedades térmicas del metal, de la configuración de la unión y del grosor de la pieza. Generalmente una fuente de calor para soldadura de alta intensidad combinada con un material de trabajo de baja conductividad produce una alta eficiencia de fusión²⁶.

Por consiguiente la velocidad de viaje de la soldadura se obtiene combinando las relaciones anteriores para HR_w ²⁷.

$$v = f_1 \times f_2 \times HR \div (U_m \times A_w) \quad (6)$$

Las unidades de velocidad de viaje de la soldadura se definen en milímetros por segundo.

²³ Ob. Cit.

²⁴ Ob. Cit.

²⁵ American Society for Metals (c1983). *Metals Handbook : Welding, Brazing and Soldering. 9. ed.. Metals Park, Ohio.*

²⁶ Ob. Cit.

²⁷ Ob. Cit.

2.2.5 Soldabilidad

Las características de soldabilidad de un metal están determinadas por una consideración propia del ingeniero respecto a qué grado de soldabilidad tiene el metal. Este aspecto de estudio es importante porque ayudará a prevenir posibles fallas en la soldadura.

La característica de soldabilidad de un metal se define como la capacidad del metal o combinaciones de metales para poder ser soldados en una estructura de manera que la unión resultante pueda cumplir los propósitos para los cuales fue diseñada. Esto incluye las propiedades metalúrgicas y el tipo de servicio que debe cumplir.

Una buena soldabilidad se caracteriza por la facilidad con la que se lleva a cabo el proceso, por la ausencia de defectos y por la resistencia, ductilidad y dureza que son aceptables en una determinada unión soldada.

Hay cuatro factores que afectan la soldabilidad, estos son: el proceso de soldadura, las propiedades del metal base, el metal de relleno y las condiciones de la superficie²⁸.

²⁸ Groover, M.P. (c1997). *Fundamentos de manufactura moderna : materiales, procesos y sistemas*. 1. ed.. México : Prentice Hall Hispanoamericana.

2.3 Selección de parámetros de soldadura

Para obtener una soldadura libre de imperfecciones como lo son las porosidades, fisuras y socavaciones, se debe realizar una selección de las condiciones más apropiadas para el espesor de lámina y de la junta que se va a soldar.

2.3.1 Corriente de soldadura

La penetración y la velocidad de deposición dependen directamente de la magnitud de la corriente eléctrica. Esto significa que un exceso de corriente puede ocasionar porosidades y otras fisuras; en contraste, en un proceso de soldadura a una velocidad mayor a la indicada se produce el mismo tipo de defecto.

2.3.2 Tensión de arco

La dilución y el ancho del cordón se incrementan con la tensión aplicada. Además, se incrementa la cantidad de fundente que se mezcla con una igual cantidad de alambre, lo que altera la composición química de la aleación.

Los voltajes relativamente bajos no son suficientes para que el arco atraviese la superficie de la plancha, de manera que la penetración adquiere una sección en forma de tulipán. El ámbito de operación para soldadura a tope es de 35 V a 1000 A.

2.3.3 Diámetro del alambre

Para una corriente eléctrica determinada, a mayor diámetro de alambre, menor penetración existirá; sin embargo el arco es más inestable y se dificulta su encendido.

2.3.4 Velocidad de avance

Las altas velocidades de operación pueden generar porosidades en la soldadura, debido a que el ancho del cordón disminuye y la penetración del arco eléctrico aumenta. Las velocidades excesivas generan cordones con una superficie más rugosa.

2.3.5. Ángulo de inclinación del electrodo

Este parámetro tiene un efecto considerable sobre la penetración y sobre las eventuales socavaduras.

En la siguiente figura se muestra como se debe colocar el electrodo respecto a la pieza de trabajo.

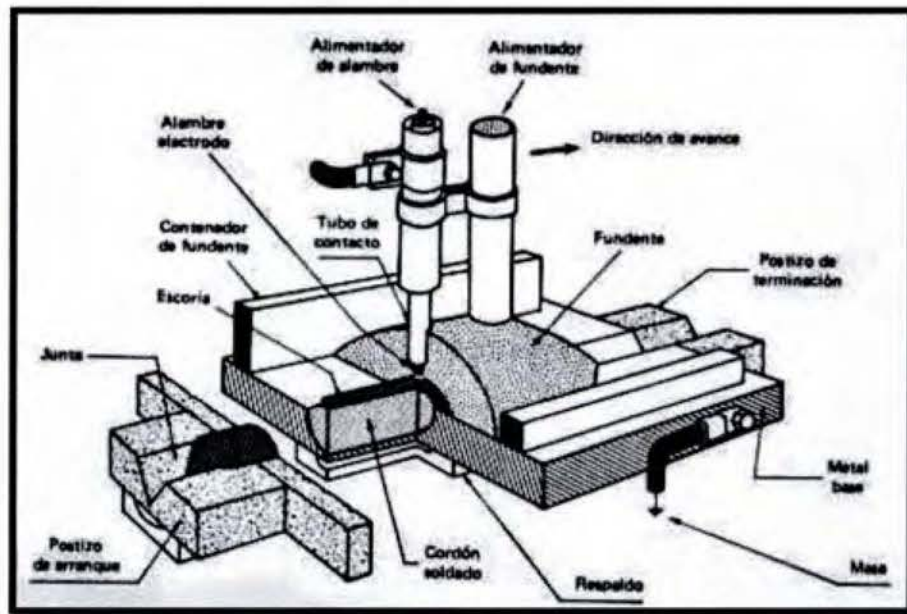


Figura 8: Posicionamiento de la soldadura

(Fuente: Groover, 1997)

2.3.6 Alambre para electrodo (material de aporte)

El alambre metálico para la soldadura por arco sumergido se emplea como un arrollado continuo en forma de bobina, y su acabado de cobre evita la oxidación superficial durante el almacenaje, proporcionando seguridad en el contacto eléctrico. Lo asegura baja resistencia entre el alambre de soldar y los contactos de cobre a través de los que se conduce la corriente. El diámetro del hilo que se utiliza es proporcional a la intensidad de la corriente de soldadura, partiendo de 5 mm de diámetro (para corrientes de 150 A) hasta 10 mm de diámetro (para una corriente de 3000 A)²⁹.

Con una misma intensidad de la corriente, el cordón de soldadura es ligeramente más estrecho con un alambre delgado que con un alambre grueso; pero la penetración es la causa del efecto principal del tamaño del alambre.

La composición de los alambres para soldadura por arco sumergido depende del material que se suelda, puesto que los elementos aleados se añaden generalmente al alambre y no al fundente. En este proceso las variaciones en la técnica pueden alterar las relaciones de las cantidades mezcladas de alambre y fundente. Cuando se utilizan alambres altamente aleados, por ejemplo los aceros inoxidable, puede ser necesario añadir compuestos al fundente, con el propósito de disminuir las reacciones entre el metal y la escoria las cuales ocasionan pérdidas en los elementos aleantes.

2.3.7 Fundentes

Los fundentes para la soldadura por arco sumergido se reducen a granos de un tamaño controlado, y se pueden fundir, aglomerar o sinterizar.

Originalmente se utilizaban fundidos, machacados y calibrados; teniendo como ventajas la ausencia de humedad y la propiedad de no ser higroscópicos. Tanto la composición química como el estado de división de los fundentes presentan una importante influencia sobre la forma de comportarse en la soldadura.

²⁹ Lincoln Electric Co. *Arc Welding Safety – Guide for safe arc welding*. Recuperado el 17 de junio, 2012 de http://www.lincolnelectric.com/assets/en_US/Products/literature/e205.pdf

Los fundentes aglomerados se obtienen mezclando sus constituyentes, los cuales son finamente pulverizados, y mezclados en una solución acuosa de silicato sódico. El propósito es producir partículas de unos pocos milímetros de diámetro que se forman por una masa de partículas más finas de los componentes minerales. Después de la aglomeración el fundente se procesa a una temperatura de hasta 800°C.

Los fundentes sinterizados se obtienen al calentar gránulos de los componentes pulverizados, hasta temperaturas justo por debajo del punto de fusión de algunos de ellos. Las temperaturas que se alcanzan durante la fabricación limitan los componentes de los fundentes. Para producir un fundente las temperaturas deben ser tan altas como sea posible para que los carbonatos y otros minerales se descompongan. Por lo tanto los fundentes básicos que contengan carbonatos deben de hacerse por alguno de los otros procedimientos incluyendo aglomeración.

Por experiencia de muchos años de varias entidades involucradas con la actividad industrial se conoce que la tenacidad baja con la aplicación de fundentes ácidos, y que los fundentes con elevado contenido de silicio tienden a transmitir oxígeno al metal que se está soldando. Los fundentes básicos por el contrario producen una unión más limpia y de buena calidad, con pocas inclusiones no metálicas y elevada tenacidad.

Tanto la composición del fundente como su estado de división influyen en el control de la porosidad. El proceso de arco sumergido es generalmente más susceptible a la porosidad causada por superficies herrumbradas y sucias en comparación con el proceso de arco abierto. Esto se debe a que el proceso de arco abierto contiene vapor de agua y productos gaseosos que abandonan la lámina como consecuencia del calor. Estas sustancias pueden escapar; mientras que con en el arco sumergido tienden a ser retenidas bajo el cojín de fundente. Es por eso que los fundentes tienen mayor tolerancia a la oxidación, a la suciedad y son también los de mayor permeabilidad porque se pueden utilizar como tipos gruesos muy regulares. Sin embargo, cuando sea necesario soldar con intensidades elevadas se requiere un fundente que cubra un espacio más estrecho para dar un buen cierre al arco. Esto se logra haciendo uso de partículas muy finas y además con una mayor variedad de tamaños con el objetivo de mejorar el recubrimiento.

2.4 Conceptos generales de las máquinas soldadoras

Las máquinas soldadoras son esencialmente mecanismos de transporte para instrumentos especializados en unión permanente de partes y componentes industriales para estructuras. La soldadura es un método de unión permanente, y las máquinas soldadoras, a las cuales se les conoce también como manipuladores de soldadura o simplemente manipuladores, efectúan la labor de desplazar en diferentes direcciones a la cabeza de trabajo. El desplazamiento se hace análogamente como si fuera un brazo rígido colocado en posición horizontal, el cual tiene capacidad para moverse vertical y horizontalmente por medio de motores y sistemas de transmisión de potencia.

2.4.1 Antecedentes técnicos

Durante varios años la industria de la soldadura se ha expandido gracias al incremento en las actividades de producción. Ha destacado el aporte de los equipos manufacturados de alta tecnología para consolidar aún más dentro de la industria a este tipo de actividades.

Solamente en Estados Unidos los ingresos económicos generados por el desarrollo de la industria de la soldadura superaron los mil millones de dólares. Para el año de 1997 los ingresos por valor agregado fueron de dos mil millones de dólares, generando empleo para 22 505 personas en 218 compañías y 32 establecimientos. Estas personas devengaron ingresos por unos novecientos millones de dólares. Mientras tanto los trabajadores del área de producción sumaron un total de 14 640 puestos de empleo en ese mismo año, obteniendo salarios por unos quinientos millones de dólares. El total de trabajo fue de treinta millones de horas consumiendo un total de 2500 millones de dólares en materiales. El capital total generado, sólo por concepto de exportaciones, asciende a casi 4500 millones de dólares, con gastos de cerca de 100 millones de dólares³⁰.

En el siguiente cuadro se muestran los datos anteriores ordenados en dos categorías para el año de 1997. La industria total abarca todos los sectores dedicados a la soldadura, y la mencionada de arco eléctrico abarca el sector específico dedicado al arco eléctrico.

³⁰ U.S. Census Bureau. Department of Commerce, Economics and Statistics Administration. *1997 Economic Census : Manufacturing, Industry Series; Welding and Soldering Equipment Manufacturing. 1997.*

Cuadro 1: Detalles económicos de la industria dedicada en EEUU

Año	1997	
	Industria Total	Arco Eléctrico
Ingresos económicos	\$ 1,000.000.000	-
Ingresos por valor agregado	\$ 2,027.004.000	\$ 607.873.000
Empleo total (personas)	22 505	7 019
Salarios (total de personas)	\$ 918.180.000	\$ 332.962.000
Número de compañías	218	34
Número establecimientos	32	-
Empleo (sector producción)	14 640	4 638
Salarios (sector producción)	\$ 485.833.000	\$ 174.916.000
Trabajo (horas hábiles)	29.279.000	8.447.000
Gasto en materiales	\$ 2.453.362.000	\$ 743.213.000
Ingresos por exportaciones	\$ 4.444.978.000	\$ 1.418.821.000
Gasto por exportaciones	\$ 122.871.000	\$ 35.916.000

(Fuente: US Census Bureau)

A pesar de que la industria de la soldadura en Estados Unidos ha experimentado un estancamiento en los últimos años, los ingresos por exportaciones que se generaron producto de la aplicación de equipos de alta tecnología se dispararon.

Para el año de 1997 los ingresos por concepto de exportaciones para productos manufacturados en el área de operación de equipos de soldadura de brazo automático y semiautomático pasaron de \$ 118.410.000 a \$ 158.645.000 en el 2002; mientras que para las máquinas automáticas de propósito especial esa cifra prácticamente se duplicó, pasando de \$ 45.342.000 a \$ 84.903.000 en el 2002, haciendo de ella una gran industria³¹³².

Estos modernos instrumentos han tenido un crecimiento en su desarrollo muy importante en los últimos años. Cada vez son más las compañías que se dedican a comercializar estos equipos en diferentes partes del mundo. Algunas compañías compran estos

³¹ Ibid.

³² U.S. Census Bureau. Department of Commerce, Economics and Statistics Administration. *2002 Economic Census : Manufacturing, Industry Series; Welding and Soldering Equipment Manufacturing. 2002.*

equipos por su bajo costo, otras prefieren pagar más dinero por tener una mayor confiabilidad. Sin embargo la calidad de trabajo que ofrecen estos sistemas muchas veces compensa la inversión hecha por ellas, y por eso en general las empresas prefieren adquirir un equipo de estos en lugar de utilizar otros medios convencionales para trabajo de soldadura, principalmente las que se llevan a cabo manualmente.

Históricamente una serie de compañías basadas en el Reino Unido, Suecia, Noruega y Estados Unidos, han desarrollado diversas tecnologías basadas en el concepto de un sistema de soldadura por arco sumergido, a partir de un brazo mecánico conectado a una especie de grúa montada sobre una estructura fija.

Se enlista una cantidad de empresas que han desarrollado modelos con características similares. Destacan ESAB Global (Suecia), Lincoln Electric Co. (Estados Unidos), MG Welding Plant Ltd. (Reino Unido) y Welmax A.S (Noruega). También existen otras compañías como Weld Plus, Westermans, Cedric Bode Engineering Ltd. y F. Bode & Sons Ltd.

Estas empresas han desarrollado modelos basados en el principio de un mecanismo de soldadura por arco sumergido, gobernado por un sistema de control automático.



Figura 9: Modelo básico de un manipulador

(Fuente: <http://www.cedricbodeengineering.com>, consultado el 16 de junio de 2012)

En la figura 8 se muestra una imagen de cómo es un equipo de soldadura por arco sumergido controlado automáticamente; en la figura 9 se muestra otra imagen relacionada con los equipos de control automático que tienen instalados estos mecanismos.



Figura 10: Equipos de control del manipulador mecánico

(Fuente: <http://www.cedricbodeengineering.com>, consultado el 16 de junio de 2012)

Las dos imágenes anteriores tomadas de la página oficial de Internet de la Compañía Cedric Bode Engineering³³, muestran a manera de ilustración la apariencia de uno de estos equipos. Se hace énfasis en la Figura 9 en donde se muestran a la derecha dos equipos eléctricos para soldadura y en la parte izquierda un panel de control colocado sobre una superficie libre para que el operador pueda maniobrarla. El concepto de este sistema se parece mucho a un robot.

La historia de estos equipos en Costa Rica no es muy extendida. Empresas como SARET introdujeron al país algunos de los primeros equipos de soldadura por arco sumergido automatizados por medio de brazo mecánico, aplicando las recomendaciones y charlas realizadas por la compañía sueca ESAB³⁴.

³³ Cedric Bode Engineering Ltd. *Equipos industriales automáticos de soldadura por arco sumergido tipo brazo-pluma y columna*. <http://www.cedricbodeengineering.com/column-and-booms.html>. Consultado el 16 de junio de 2012.

³⁴ Arredondo, Jorge. Sistema de Manipulación de Soldadura (Entrevista). Empresa IIMA, Junio, 2012.

La empresa IIMA (Instalaciones Industriales M.A. y Asociados), es una de las principales competidoras de SARET que ha comenzado a trabajar con estos sistemas desde el año 2006. La compañía se fundó el 22 de noviembre 1967 incursionando primeramente en los campos de la electromecánica. De 1986 a 2004 la empresa se especializó en las áreas eléctrica y mecánica. Para el año 2004 se iniciaron operaciones en el área de la metalmecánica realizando proyectos para cementeras y construyendo tanques de recipiente a presión. Esta compañía ha elaborado tuberías de alta presión para proyectos hidroeléctricos con Cooperativas, así como también tuberías para empresas como ESPH (Empresa de Servicios Públicos de Heredia), compuertas para proyectos hidroeléctricos y tanques de combustible para aviones. Sus operaciones se han extendido por todo el país y Centroamérica³⁵.

En la actualidad el IIMA forma parte del Grupo IIMA, el cual incluye también a Clima Ideal y Soltec. La empresa CMI adquirió las operaciones del área de electromecánica. Hoy se conoce a la empresa como un consorcio denominado CMI IIMA³⁶.

Sin embargo cabe destacar que sólo durante dos años, de 2004 a 2006, se trabajó únicamente con soldadura manual. La soldadura manual era tan lenta que se debió sustituir por equipos comprados a ESAB³⁷.



Figura 11: Taller de fabricación del IIMA

(Fuente: <http://www.iimacr.com>, consultado el 27 de junio de 2012)

³⁵ *Ibíd.*

³⁶ *Ibíd.*

³⁷ *Ibíd.*

Un trabajo de soldadura manual según datos del experto consultado quien labora en el IIMA³⁸ rinde sólo una sexta parte de la cantidad de trabajo que se puede hacer con la soldadura automática. Es decir, un trabajo longitudinal de 4 metros con soldadura manual que se puede hacer en 7 u 8 minutos, equivale a un trabajo longitudinal de 24 metros durante la misma cantidad de tiempo. Es debido a esta razón que la soldadura manual es más lenta, y además se necesita de un mayor gasto en el salario de operador en comparación con lo devengado por un maniobrador de soldadura automática.

Por otro lado la soldadura manual requiere de la instalación de unas guías (el equipo hace uso de un mecanismo de angulares), las cuales sirven de fijación para la pieza de trabajo, por lo que deben ponerse y quitarse de nuevo cada vez que se comienza o termina una nueva etapa. Esto lo hace todavía más lento. Además el avance depende de la persona que maneja la soldadura manual. En la soldadura automática el maniobrador no debe preocuparse por el avance, pero si por corregir la dirección cada vez que deba de reorientar el sistema por imperfecciones en el corte de lámina.



Figura 12: Manipulador perteneciente al IIMA

(Fuente: <http://www.iimacr.com>, consultado el 27 de junio de 2012)

El valor de una unidad manipuladora depende ciertamente de la marca. Para un equipo fabricado por una compañía de renombre su precio en el mercado es de aproximadamente \$ 200 000 (doscientos mil dólares americanos). Para un equipo

³⁸ Ibid.

fabricado por otra compañía, con normas de calidad menos rigurosas, su valor es cercano a los \$ 100 000 (cien mil dólares americanos)³⁹.

Independiente del precio de venta de la máquina, el costo de mantenimiento es bastante bajo. No requiere sustitución de partes mecánicas importantes en corto tiempo, ni del uso de ningún tipo de mantenimiento predictivo, debido a que el daño físico de la estructura por la operación del sistema no necesita atención inmediata⁴⁰. Lo anterior en otras palabras quiere decir que un manipulador de soldadura típico empleado en la industria (empresa IIMA por ejemplo) sufre muy poco, porque la operación del sistema se lleva a cabo de forma lenta y controlada, minimizando de esta manera las vibraciones excesivas y los impactos fuertes a la estructura.

Un caso particular lo representa el manipulador instalado en el IIMA, ya que en los años que tiene de estar instalada en el taller de la empresa la afectación física que recibió fue mínima por todo el trabajo realizado. Esto se pudo atestiguar durante la visita efectuada al plantel de la mencionada compañía en el mes de junio del año 2012.

Lo que si necesita reposición regular son los filtros, las boquillas, las tarjetas electrónicas y cualquier otra parte relacionada con el equipo de soldadura⁴¹.

A pesar de ello, ésta máquina tiene costos de operación relativamente altos. La potencia que consume es de unos 288 kW, en un ámbito de 240 kW a 384 kW. Si la cantidad de horas de trabajo por día es de 12, entonces la cantidad de energía que se gasta diariamente oscila entre 2 880 kWh y 4 608 kWh. Esto significa que a razón de una hora de consumo eléctrico, la máquina soldadora requerirá de al menos 240 kW de potencia multiplicada por una hora de trabajo, es decir 240 kWh; y en una jornada diaria de trabajo consumirá por lo menos esta cifra multiplicada por 12, o sea, 2 880 kWh. Si el máximo de potencia requerida es de 384 kW, entonces la cantidad de energía consumida en una hora será de 384 kWh, y en una jornada laboral completa un total de 4 608 kWh. Si la tarifa eléctrica promedio (sin tomar en cuenta otros factores como horarios de consumo,

³⁹ Ibid.

⁴⁰ Ibid.

⁴¹ Ibid.

carga plena, hora pico y hora valle) para uso industrial es de ¢ 110,00 por kilowatt-hora⁴², entonces el gasto diario promedio se encontrará entre los valores en colones de ¢ 317 000 a ¢ 507 000 por concepto de consumo de electricidad. En un mes la factura eléctrica podría ascender de ¢ 9 500 000 a ¢ 15 200 000.

2.4.2 Caracterización y componentes principales de máquinas manipuladoras

Este tipo de máquinas se componen de un mecanismo básico, automatizado o no, que comprende generalmente uno o más brazos de manipulación. Sus partes principales son en general una viga, una columna, un equipo de soldadura y un equipo eléctrico, todos montados sobre una estructura móvil apoyada por rodillos o patines en su base a un sistema de rieles. También es posible encontrar estructuras montadas sobre bases estacionarias.

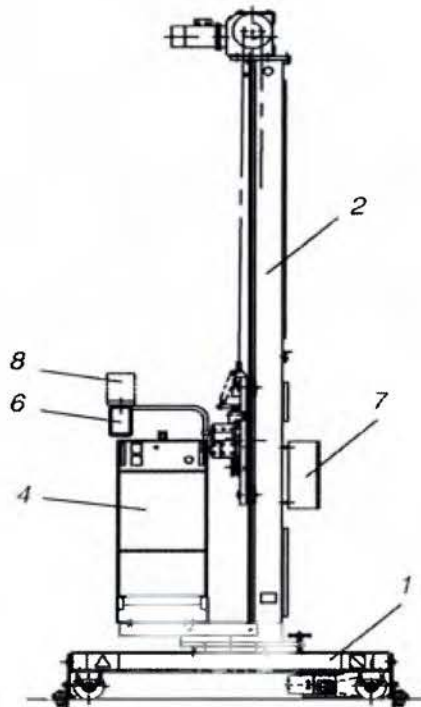


Figura 13: Vista lateral de una máquina Manipuladora

(Fuente: MKR 300 ESAB Welding Equipment Instruction Manual)

⁴² Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). *Listado de precios vigentes de la energía eléctrica para el suministro de electricidad y alumbrado público, Abril 2012.*
<http://www.aresep.go.cr/docs/LISTA DE PRECIOS - 2012 - 6.xls>

Adicionalmente se cuentan con unidades de control para poner en funcionamiento los sistemas de la fuente de poder para la soldadura y también para la máquina de soldadura automática.

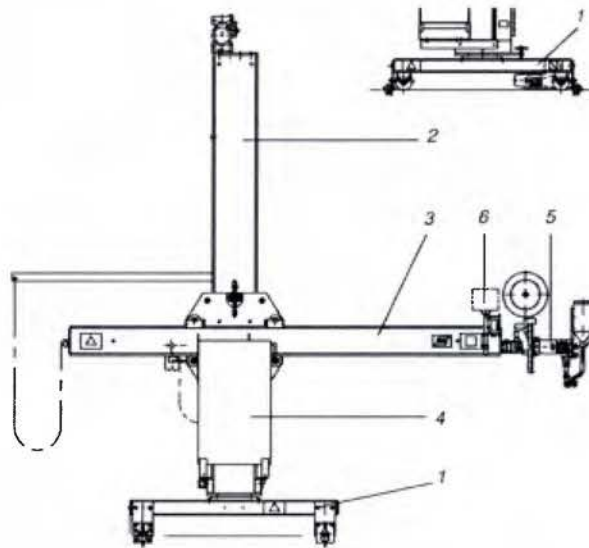


Figura 14: Vista frontal de una máquina Manipuladora
(Fuente: MKR 300 ESAB Welding Equipment Instruction Manual)

La columna generalmente mide alrededor de 6 metros de altura para sistemas montados tanto sobre bases estacionarias como para bases móviles.

Por otro lado la viga (brazo horizontal) tiene una longitud promedio de 5 metros y un peso que en general supera los 200 kilogramos.

Basándose en las figuras 12, 13 y 14 obtenidas del fabricante sueco ESAB⁴³, se señalan los principales componentes de un sistema de soldadura por arco sumergido tipo columna-pluma. En el siguiente cuadro se presenta la información respectiva con los datos numerados que hacen referencia a cada componente de la máquina.

⁴³ ESAB Welding Equipment AB. *MKR 300 Welding Column Boom Instruction Manual*. ESAB Industries. Laxa, Sweden.

Cuadro 2: Referencias de la máquina de soldadura

Referencia	Elemento representado
1	Base
2	Columna
3	Viga pluma
4	Fuente de poder
5	Máquina de soldadura
6	Unidad de control de programación
7	Central de control de la estación
8	Controlador de viaje del brazo

(Fuente: MKR 300 ESAB Welding Equipment Instruction Manual)

Estos equipos por lo general son bastante silenciosos. Según mediciones realizadas por la misma compañía ESAB en los niveles de presión sonora, se encontró que para un modelo en particular su nivel de ruido alcanzó los 52 dB(A)⁴⁴. La escala de presión sonora A es un tipo de medición de sonido basado en parámetros de variación de intensidad logarítmica, cuya forma de precisión en los niveles es muy parecida a la manera en como lo percibe el oído humano.

El desplazamiento del brazo representado por la viga se hace de dos maneras: una como movimiento vertical y otra como movimiento horizontal. Las cargas permisibles sobre la base y sobre el extremo de la viga no pueden superar 6 000 N y 2 000 N respectivamente para un modelo en particular⁴⁵. Por otra parte el máximo torque sobre el acople entre la viga y la columna no debe sobrepasar los 7 670 Nm. La longitud de trabajo para una viga generalmente es de 5 metros aproximadamente.

⁴⁴ Ibid.

⁴⁵ Ibid.

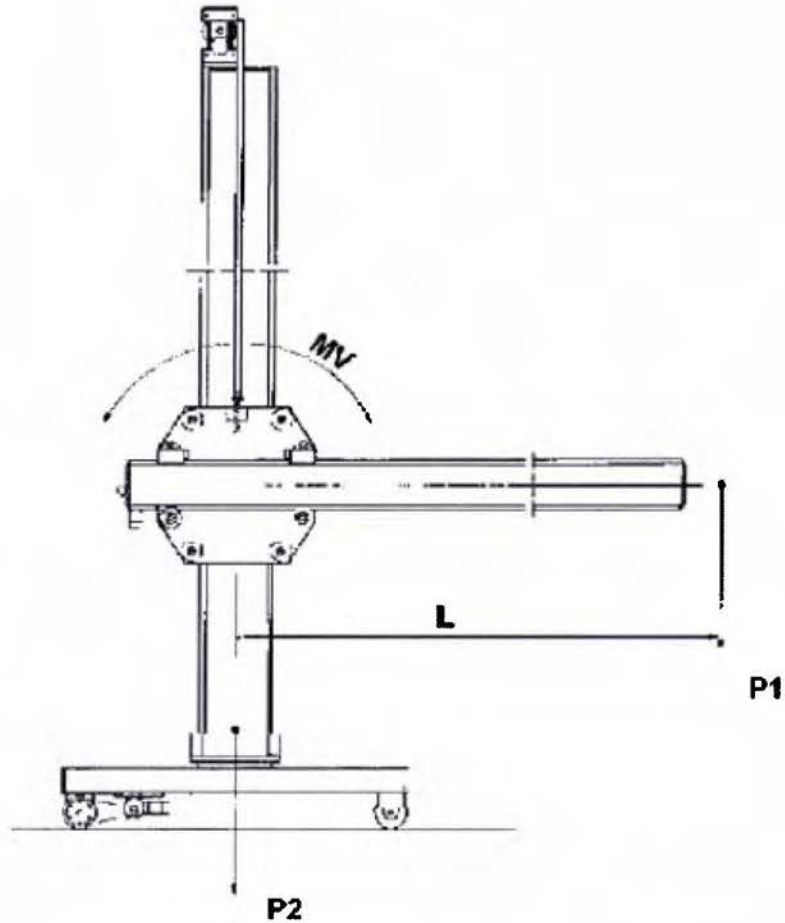


Figura 15: Esquema de cargas para equipo Manipulador
 (Fuente: MKR 300 ESAB Welding Equipment Instruction Manual)

2.4.3 Aplicaciones más comunes asociadas a máquinas manipuladoras de soldadura

Hay muchas empresas que prestan sus servicios para realizar proyectos de soldadura en diferentes áreas. Las principales actividades se enfocan en la industria naval, la industria de transporte, la industria pesada y la industria de tuberías.

El sector de la industria pesada hace referencia a un amplio ámbito de actividades dentro de las que destacan los recipientes a presión, las torres eólicas, los puentes y los

fabricantes de perfiles de acero. En Costa Rica una de las empresas que más destacan dentro de ésta área es SARET Metalmecánica.

Las tuberías forman parte de una serie de proyectos que corresponden a un tipo de compañía determinada, dentro de las que destaca el transporte de petróleo, gas y agua que hacen uso de tuberías de acero. Dentro de los tipos de actividad en que se usan las tuberías de acero para el trasiego de fluidos se menciona como ejemplo el sector de la energía, destacando principalmente el taller del MET, en donde se fabrican las tuberías de alta presión para los proyectos hidroeléctricos.

Para el tipo de modelo brazo pluma y columna se han desarrollado una serie de aplicaciones dentro de la industria de recipientes a presión, tanques y tuberías. Las tuberías son las aplicaciones más importantes para el modelo debido a la facilidad con que se puede operar a lo largo de las mismas, y también por su forma de desplazamiento vertical y movimiento de la base (base montada sobre rieles) para poder colocarse sobre varias estaciones de trabajo. Su uso está más extendido al área de tuberías, siendo la herramienta más conveniente para realizar este tipo de trabajos.

En las figuras 15 y 16, obtenidas del fabricante Cedric Bode⁴⁶, se muestran varios ejemplos de equipos tipo brazo columna y pluma que se emplean para efectuar labores de unión por soldadura para construir tuberías de alta presión.

⁴⁶ Cedric Bode Engineering Ltd. *Equipos industriales automáticos de soldadura por arco sumergido tipo brazo-pluma y columna.* <http://www.cedricbodeengineering.com/column-and-booms.html>. Consultado el 16 de junio de 2012.



Figura 16: Manipulador para soldar tuberías de acero

(Fuente: <http://www.cedricbodeengineering.com>, consultado el 16 de junio de 2012)



Figura 17: Manipulador implementado en tuberías de acero

(Fuente: <http://www.cedricbodeengineering.com>, consultado el 16 de junio de 2012)

2.5 Sistemas de posicionamiento automatizado

2.5.1 Posicionadores industriales y actuadores

Uno de los motores más utilizados es el servomotor rotacional de corriente directa con imán permanente. Generalmente se clasifican como de dos tipos: motores con escobilla o motores sin escobilla. Los servomotores rotacionales de corriente directa con imán permanente están diseñados para ser confiables en circunstancias donde haya aplicaciones que presenten características como una alta eficiencia y un elevado par de arranque⁴⁷.

Existen varios tipos de motor de corriente directa con imán permanente. Se mencionan dos tipos para efectos del presente trabajo: los motores tipo disco y los motores tipo carcasa.

Los motores tipo disco presentan características similares a las que se observan en la figura 18. Estos motores cuentan con armaduras de disco en forma de estrella y también con devanados estampados y laminados hechos a base de cobre. La ventaja de los motores de este tipo es que permiten concentrar su centro de masa cerca del plato de montura, permitiendo la fácil instalación sobre la superficie de montaje. También son muy utilizados para aplicaciones en robótica debido a que permiten acomodarse en lugares donde el espacio sea muy reducido⁴⁸.

⁴⁷ Sclater, N.; Chironis, N.P. (c2007). *Mechanisms and mechanical devices sourcebook*. 4. ed.. New York : McGraw-Hill.

⁴⁸ *Ibíd.*

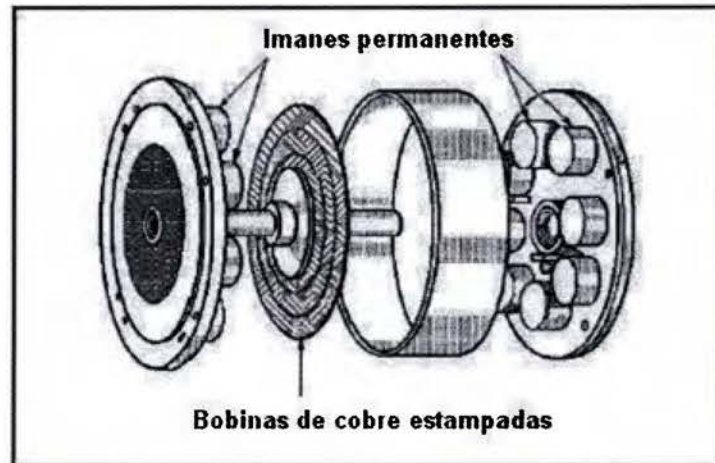


Figura 18: Servomotor Rotacional DC de PM tipo Disco

(Fuente: Sclater & Chironis, 2007)

Los servomotores rotacionales tipo carcasa de corriente directa con imán permanente ofrecen baja inercia y baja inductancia, al mismo tiempo que presentan altas aceleraciones, los cuales convierten a este tipo de motores en instrumentos muy útiles en diversas servo aplicaciones⁴⁹.

Estos motores presentan una amadura de cilindro agujereado hecha a base de aluminio o cobre cubierta por una resina polimérica y fibra de vidrio, para formar una estructura rígida que se sujeta a un eje axial⁵⁰.

⁴⁹ Ibid.

⁵⁰ Ibid.

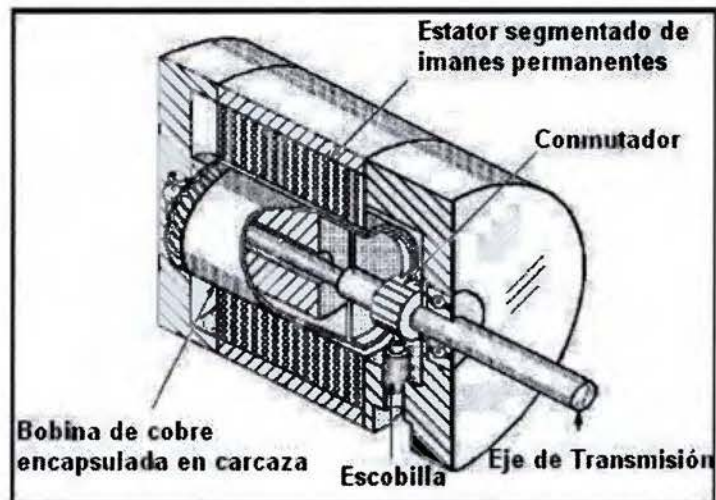


Figura 19: Servomotor Rotacional DC de PM tipo Carcasa
(Sclater & Chironis, 2007)

En la Figura 19 se aprecia una imagen de como se ve por dentro un servomotor rotacional tipo carcasa. Este motor cuenta con un conmutador, un sistema de estator magnético permanente, un cilindro de cobre encapsulado, un equipo de escobillas y un eje de transmisión de potencia.

Debido a que la armadura de este tipo de motor no tiene carcasa de hierro, como sí lo tiene el motor de tipo disco, su inercia es extremadamente baja y presenta una relación de torque contra inercia muy alta. Esto permite que el motor acelere rápidamente en las aplicaciones donde se necesita una respuesta de movimiento rápida.

Algunos sistemas para el control del movimiento son dirigidos por medio de un servomotor lineal. Estos equipos son muy utilizados en aplicaciones en donde los errores introducidos por el accionar de los motores rotacionales y por la carga aplicada pueden ocasionar errores de posición.

Un servomotor lineal es esencialmente un motor rotacional cuyo radio de acción circular se abre sobre un plano (como si fuera la cuerda envolvente de un círculo que se desenrolla para formar una recta), pero opera con los mismos principios. Un servomotor lineal de corriente directa con imán permanente es similar a un motor rotacional de imán permanente. La misma fuerza electromagnética que produce torque en un motor

rotacional se produce también en el motor lineal. Los motores lineales usan los mismos controles y los mismos controladores de posición programables que utilizan los motores rotacionales⁵¹.

El servomotor lineal está compuesto por dos ensambles mecánicos: una carcasa y un magneto, tal y como se muestra en la Figura 20. La corriente fluye a través de los devanados de cobre generando un campo magnético que producirá una fuerza. Los devanados de cobre conducen la corriente I y el ensamble genera la densidad de flujo magnético B . Cuando la corriente y la densidad de flujo magnético interactúan, una fuerza vectorial F se genera en la dirección mostrada en la Figura 20 y se representa como el producto de la corriente por la densidad de flujo.

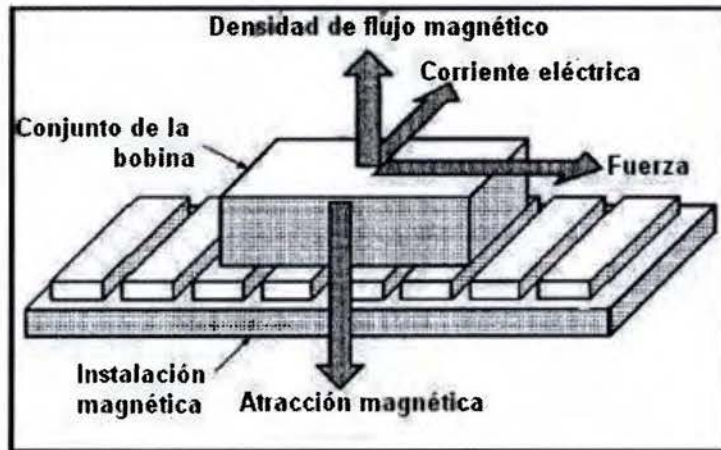


Figura 20: Representación de un servomotor lineal
(Sclater & Chironis, 2007)

Comercialmente existen dos tipos de motores lineales disponibles: los de núcleo ferroso y los de núcleo epóxico, que presentan características óptimas para diferentes aplicaciones.

Los servomotores lineales pueden lograr precisiones de hasta $0,1\mu\text{m}$. Las aceleraciones normales son de 2 a $3g$ ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$), sin embargo algunos motores pueden alcanzar $15g$. Las velocidades están limitadas por un rango de datos codificados y por un amplificador de voltaje. Las velocidades pico normales se encuentran entre 1 mm/s ($0,2 \text{ ft/min}$) hasta

⁵¹ Ibid.

2000 mm/s (396 ft/min), pero la velocidad de algunos modelos puede exceder los 8000 mm/s (1560 ft/min) (Sclater & Chironis, 2007).

Los motores lineales tipo de núcleo epóxico pueden tener ámbitos continuos de fuerza de 22 N a 245 N (5 lbf a 55 lbf) y valores picos de fuerza de 110 N a 800 N (25 lbf a 180 lbf). En contraste los motores de núcleo ferroso presentan ámbitos de fuerza de alrededor de 130 N a 4900 N (30 lbf a 1100 lbf) y picos de fuerza de 270 N a 8000 N (60 lbf a 1800 lbf) (Sclater & Chironis, 2007).

2.5.1.1 Servomotores rotativos

Los servomotores rotativos de aplicación general son básicamente motores tipo carcasa con un eje de transmisión conectado en su centro. Existe gran cantidad de modelos, limitados sólo por el fabricante que vende para ciertas aplicaciones.

Dentro de los modelos presentes en el mercado se muestra un ejemplo básico ilustrado en la Figura 21 de cómo es un servomotor rotativo tipo carcasa.



Figura 21: Servomotor tipo carcasa

(Fuente: <http://industrial.omron.eu>, consultado el 19 de junio de 2012)

Este motor en particular presenta un valor medio de inercia con una relación de torque contra inercia muy elevado. Además están diseñados para tener un desempeño óptimo de movimiento de la carga que se desplaza. Cuenta adicionalmente con un ámbito de

potencias desde los 100 W hasta 1500 W, con velocidades de hasta 3000 rpm. Por otra parte el pico de torque dura alrededor de 3 segundos⁵². También se han diseñado diferentes modelos que cubren amplias aplicaciones. Dentro de ellos se encuentran los modelos ilustrados en la Figura 22.

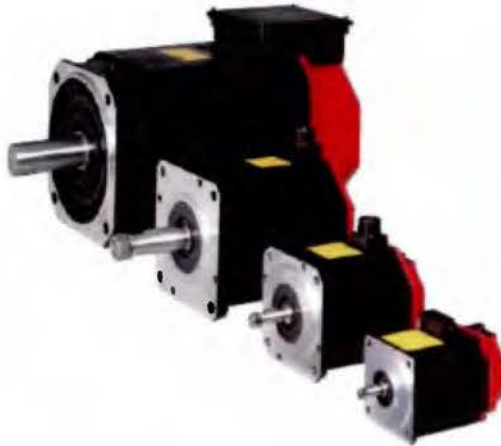


Figura 22: Familia de servomotores rotacionales

(Fuente: <http://www.automation-drive.com>, consultado el 19 de junio de 2012)

En general los modelos de servomotor rotacional tipo carcasa están diseñados para operar a temperaturas extremas de 0°C a 40°C sin condensación. Algunos son de entre 0,30 kilogramos hasta 6,5 kilogramos, tienen un diámetro del eje de transmisión desde los 6 mm hasta los 22 mm, una velocidad máxima de 4500 a 5000 rpm, un torque estabilizado continuo de 0,108 a 4,90 N*m (0,956 a 43,368 lb*in), corriente continua de 1,2 a 8,3 A, pico de corriente de 5,1 a 26,5 A, constante de torque de 0,090 a 0,656 N*m/A (0,796 a 5,806 lb*in/A), constante de voltaje de 9,4 a 22,9 V por cada 1000 rpm y momento de inercia del rotor de 0,004633 a 0,746022 kg*m² (0,003417 a 0,550164 lb*in²)⁵³.

Los modelos más pequeños para este tipo incluyen potencias de 30W a 50W⁵⁴.

⁵² Omron, Europe. *Motores Servo Rotacionales Sigma*. http://industrial.omron.eu/en/products/catalogue/motion_and_drives/servo_systems/rotary_servo_motors/sigma_ii/sgmph/default.html. Consultado el 19 de junio de 2012.

⁵³ Omron, Europe. *Motores Servo Rotacionales Sigma*. http://industrial.omron.eu/en/products/catalogue/motion_and_drives/servo_systems/rotary_servo_motors/sigma_ii/sgmph/default.html. Consultado el 19 de junio de 2012.

⁵⁴ *Ibíd.*

2.5.1.2 Servomotores rotativos RotoSpin

El módulo de denominación comercial *RotoSpin* es un tipo de motor especial utilizado en la industria. Puede funcionar como servomotor o bien como un motor convencional según los requerimientos de la aplicación. Su diseño se basa por lo general en un sistema reductor integrado, el cual garantiza una excelente capacidad de posicionamiento durante el funcionamiento del motor. Estos motores son especialmente aptos para tareas donde se requiera un manejo muy cuidadoso de la operación y sirven para controlar los procesos a muy baja velocidad.

Este módulo es usado para aplicaciones donde se requiere asegurar el control rotacional de los movimientos con alta repetitividad y precisión de posicionamiento. Además no es necesario colocar cables de electricidad y señales cerca del eje de rotación del motor. Debido a su alta precisión cinemática, su alto par de torsión, reducidas dimensiones y bajo peso, el módulo *RotoSpin* tiene amplia variedad de aplicaciones. El uso más frecuente que se les da es en el posicionamiento de partes para equipos en lugares de trabajo automatizados para tecnologías de soldadura, corte, maquinado y ensamble.

En el mercado se producen unidades con capacidad de manejo para carga establecidas en 60, 250, 500 y 1000kg⁵⁵.

⁵⁵ Spinea, Slovakia. *Servomotores Rotativos RotoSpin*. <http://spinea2011.en.ec21.com/RotoSpin--5335560.html>. Consultado el 19 de junio de 2012.



Figura 23: Motor rotativo RotoSpin

(Fuente: <http://spinea2011.en.ec21.com>, consultado el 19 de junio de 2012)

2.5.1.3 Servomotores rotativos DriveSpin

Estos módulos son actuadores compactos que se basan en un sistema integrado que une una caja de engranes de alta precisión con rodamientos radial-axial conocidos como rodamientos reductores; y un servomotor.

Un rodamiento reductor es un elemento que integra el engrane de alta precisión y el rodamiento radial-axial dentro de una unidad compacta. Este nuevo sistema de transmisión permite utilizar el rodamiento reductor conocido por su nombre comercial como *TwinSpin* en robótica y automatización, máquinas herramienta, equipos de dimensionado, sistemas de navegación, industria aeronáutica, medicina, impresoras y otras aplicaciones.

En la figuras 24 y 25 se muestran los esquemas de un *TwinSpin* obtenidos de la página de Internet del fabricante europeo Spinea⁵⁶.



Figura 24: Rodamiento reductor TwinSpin

(Fuente: <http://spinea2011.en.ec21.com>, consultado el 20 de junio de 2012)



Figura 25: Esquema interno de un TwinSpin

(Fuente: <http://spinea2011.en.ec21.com>, consultado el 20 de junio de 2012)

Los servomotores *DriveSpin* hacen uso de los reductores *TwinSpin* para aprovechar su ventaja mecánica. Estos actuadores compactos combinan excelentemente las propiedades del reductor cicloidal *TwinSpin* con los servomotores de imanes permanentes.

⁵⁶ Spinea, Slovakia. *Sistemas reductores especiales TwinSpin*. <http://spinea2011.en.ec21.com/TwinSpin--5335541.html>. Consultado el 20 de junio de 2012.

Las características de un servomotor *DriveSpin* incluyen el diseño compacto, baja reacción violenta, excelentes parámetros dinámicos, alta rigidez torsional, tamaño reducido, bajo peso, fácil instalación, alta capacidad de carga y mantenimiento sencillo.

Sus aplicaciones incluyen robótica, manipuladores, máquinas CNC y mesas de corte CNC, aplicaciones en aviación, simuladores, manufactura de semiconductores, sistemas de radar, equipo médico, dobladoras mecánicas, entre otras aplicaciones.

Algunas de las propiedades para varios modelos de *DriveSpin* son la velocidad nominal de 2000rpm, el torque nominal del motor de 0,24 N*m a 3,2 N*m, la potencia nominal del motor de 100 W a 1000 W, la masa de 1 kg a 10 kg, una constante de torque de 0,03 N*m/A a 1,19 N*m/A, un torque máximo del motor de 1 N*m a 11,1 N*m y una velocidad máxima de 4500 a 5000 rpm⁵⁷.

En la figura 26 se muestra la imagen de un actuador básico *DriveSpin*.

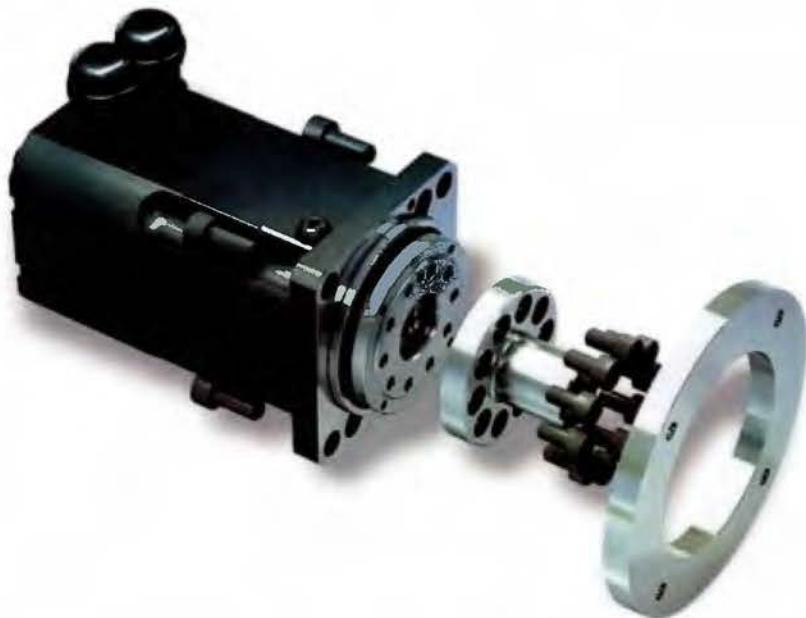


Figura 26: Diseño básico de un servomotor DriveSpin

(Fuente: <http://spinea2011.en.ec21.com>, consultado el 20 de junio de 2012)

⁵⁷ Spinea, Slovakia. *Servomotores Rotativos DriveSpin*. <http://spinea2011.en.ec21.com/DriveSpin--5335543.html>. Consultado el 19 de junio de 2012.

La diferencia entre un motor *DriveSpin* con respecto a un *RotoSpin*, es que el primero es una unidad compacta *TwinSpin* con servomotor, mientras que un *RotoSpin* es básicamente una mesa rotativa. El *DriveSpin* tiene una amplia variedad de usos en los campos de la automatización y manipulación de objetos en la industria robótica, aeronáutica, militar, médica; mientras que el *RotoSpin* se concentra principalmente en las aplicaciones de soldadura, corte, maquinado y ensamble.

2.5.1.4 Servomotores lineales

Los servomotores lineales son esencialmente equipos de alta velocidad, alta aceleración y alta precisión, con capacidad de manipulación de cargas de hasta 30 kg en algunos modelos. Tienen una distancia de trabajo que cubre una longitud de 4150 mm y una tolerancia de posicionamiento de $\pm 0,005$ mm⁵⁸.

En las operaciones de alta velocidad la aceleración máxima de este equipo es superior a 3 g y puede desplazarse a una velocidad superior a los 2500 mm/s⁵⁹.

El ancho del actuador oscila entre 100 y 150 mm y el ámbito de extensiones del brazo de trabajo oscila entre 100 y 4100 mm, mientras que la carga que puede transportar oscila entre 54 N y 125 N⁶⁰.

En la figura 27 se aprecia el diseño básico de un servomotor lineal.



Figura 27: Servomotor lineal, diseño básico

(Fuente: <http://www.intelligentactuator.com>, consultado el 20 de junio de 2012)

⁵⁸ LSA Linear Servo Actuator. *Servo actuadores lineales de alta velocidad, alta aceleración y alta repetitividad para uso de capacidad media.* <http://www.intelligentactuator.com/lisa-linear-servo-actuator-lsa-n10-15/>. Consultado el 20 de junio de 2012.

⁵⁹ *Ibíd.*

⁶⁰ *Ibíd.*

2.5.2 Controlador lógico programable (PLC)

Un controlador lógico programable es una computadora digital especialmente compacta y robusta utilizada para automatizar procesos electromecánicos, tales como control de máquinas en líneas de ensamble⁶¹.

Los controladores lógicos programables datan de la década de los años 70 y en la actualidad su uso está muy extendido en las industrias y máquinas de propósito especial⁶².

Son controladores que dan respuesta a un sistema en tiempo real después de haber incorporado los datos de entrada en un corto tiempo. Esta unidad de control incluye total o parcialmente todas las interfaces presentes con las señales de proceso, lo que califica al PLC como una central de información que analiza todas las variables que se presentan en cada una de las entradas y salidas del sistema en estudio⁶³.

Los PLC están diseñados para diversos propósitos de entrada y salida de información. Están preparados para soportar diferentes rangos de temperatura, tienen inmunidad al ruido y presentan resistencia a la vibración, al impacto, al polvo y a la humedad⁶⁴.

Algunas de sus ventajas son la flexibilidad en su implementación, esto en cuanto a la capacidad de ampliar, modificar y depurar su programación, lo que los hace muy versátiles. Se pueden comunicar con otros PLCs y con computadoras de registro de procesos y tienen gran robustez para uso industrial, lo que significa que se adaptan fácilmente a las condiciones del medio⁶⁵.

⁶¹ Wikipedia Enciclopedia. *Programmable logic controller*.
http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_logic_controller. Consultado el 19 de junio de 2012.

⁶² *Ibíd.*

⁶³ *Ibíd.*

⁶⁴ *Ibíd.*

⁶⁵ Universidad Nacional de Rosario (UNR). Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Departamento de Sistemas e Informática. *Introducción a los Controladores Lógicos Programables (PLC)*.
http://www.dsi.fceia.unr.edu.ar/downloads/digital/_/Apunte_PLC.pdf. Consultado el 19 de junio de 2012.

La tendencia que se está mostrando en la actualidad en el control de procesos es utilizar PLC en red o como periféricos de un computador, logrando combinar su potencia de cálculo, la facilidad de interfaces y robustez que ofrece el PLC⁶⁶.

Los sistemas servo compactos y los controles de máquina son literalmente el cerebro de la automatización en aplicaciones que van desde los robots industriales hasta las impresoras de oficina. En los servo sistemas para control de movimiento los beneficios de calidad y confiabilidad son altos, se reduce el tiempo de carga del sistema en la máquina, son más rápidos y hay una respuesta más controlada de las mismas⁶⁷.

En la figura 28 se muestra un esquema básico de cómo es un sistema integrado de PLC con una computadora.

⁶⁶ Ibid.

⁶⁷ Ob. Cit.

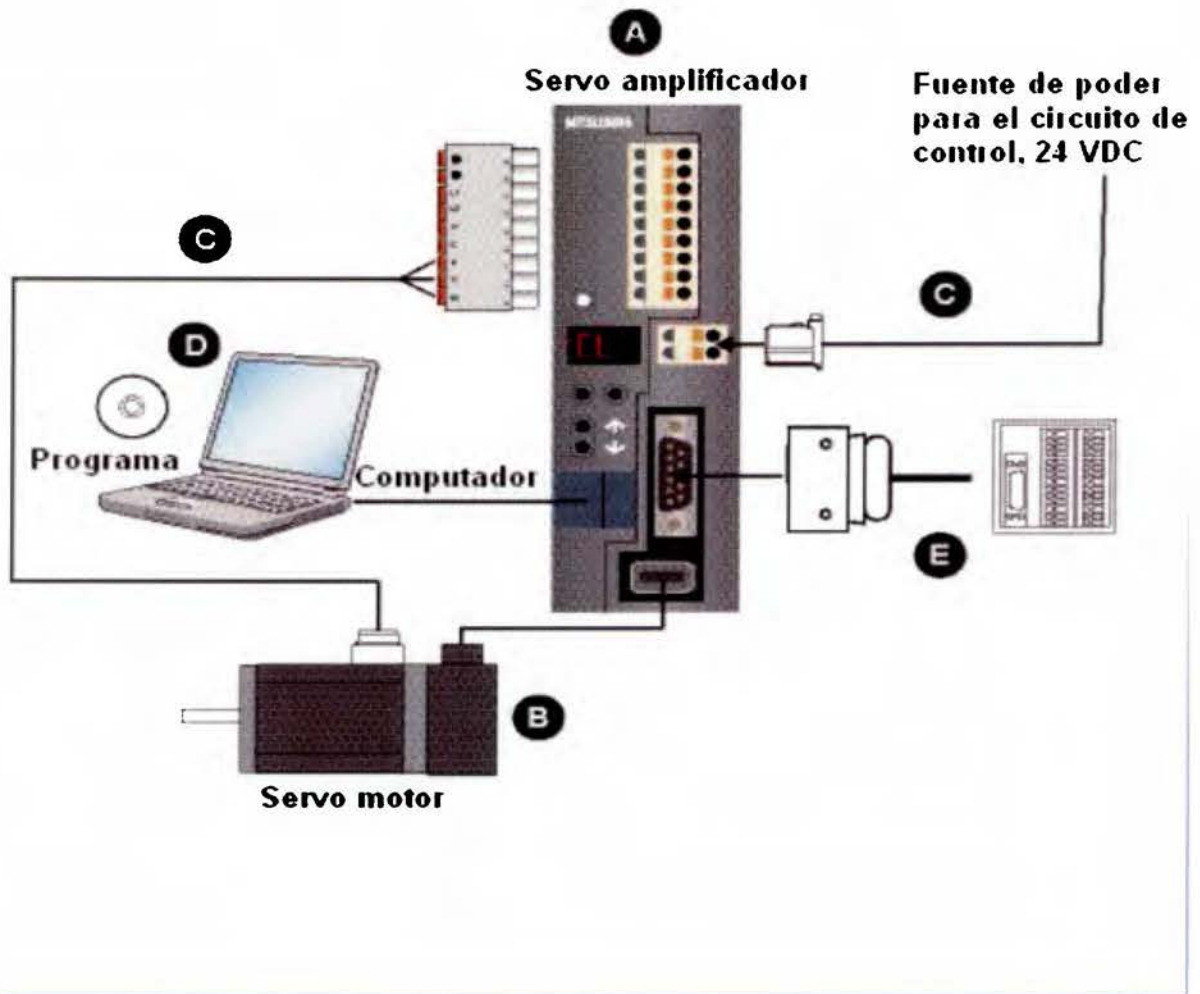


Figura 28: Manejo de un servomotor con ordenador y unidades

(Fuente: <http://www.meau.com>, consultado el 19 de junio de 2012)

En la figura 28, las letras del esquema significan lo siguiente: A es el amplificador rotacional, B es el servomotor, C son los cables y conectores, D es el software y E son las opciones del sistema.

El sistema integrado ofrece una serie de características que incluye un sistema programable con considerable potencia de cálculo, y excelente variedad de software para gestión y visualización de la información.

Existe adicionalmente una forma de controlar el movimiento de un motor de corriente directa sin escobillas. El sistema opera por medio de un sensor de posición que se

conecta a un comparador de señal con datos provenientes desde un pulso de control que se convierte a una señal cuantificable en el comparador por medio de un convertidor de voltaje. La señal resultante se reenvía al motor eléctrico para que establezca su operación de acuerdo a las condiciones que se presenten. Esto se ilustra en la figura 29.

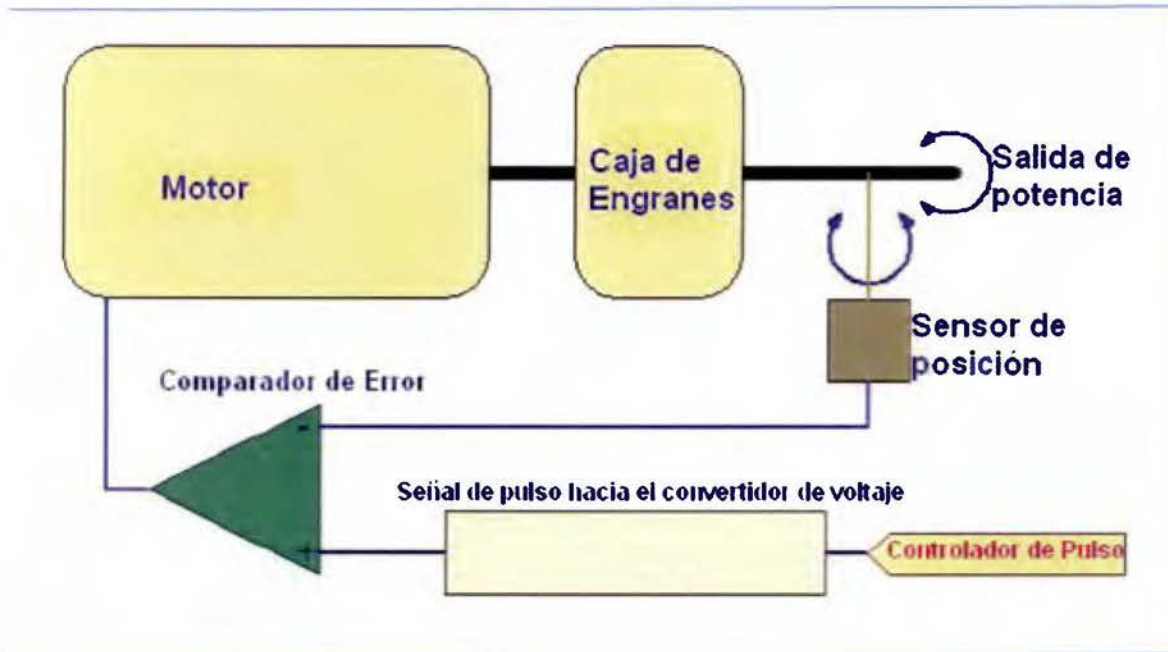


Figura 29: Esquema de un controlador automático

(Fuente: <http://www.automation-drive.com>, consultado el 19 de junio de 2012)

Para finalizar los controladores se pueden conseguir de múltiples capacidades dependiendo del orden de potencia eléctrica, voltaje de consumo, frecuencia eléctrica y del número y tipo de entradas y salidas necesarias. Su precio ronda los \$500, aunque en algunos casos pueden valer más de \$1000 (incluso hasta \$8000) si se necesitara de un dispositivo con mayor capacidad de control y robustez industrial⁶⁸.

⁶⁸ Ob. Cit.

2.6 Elementos estructurales y mecánicos

2.6.1 Conceptos generales

El diseño estructural y mecánico requiere criterio de ingeniería para que resulten soluciones certeras a un determinado problema. Una vez que se haya definido el concepto de solución, se aplican modelos matemáticos a sus componentes para elegir las soluciones comerciales que mejor cumplan con las prestaciones demandadas según la buena práctica de la ingeniería.

2.6.2 Vigas

Las vigas son elementos estructurales diseñados para soportar cargas que sean aplicadas en varios puntos a lo largo del elemento. En la mayoría de los casos prácticos las cargas son perpendiculares al eje de la viga; de esta forma se tienden a ocasionar efectos de corte y flexión en la estructura. Sin embargo si existe alguna carga dada que no se aplique formando un ángulo recto sobre la superficie de la misma, se producirán fuerzas axiales debidas a las componentes de fuerza a lo largo del eje longitudinal.

Por lo general las vigas son barras prismáticas rectas y largas. Existe gran variedad en el tipo de secciones transversales de estos elementos; sin embargo las secciones más comunes de trabajo son las denominadas vigas tipo H y vigas de sección rectangular.

A continuación se muestra un diagrama de las secciones transversales de los dos tipos de viga antes mencionados.

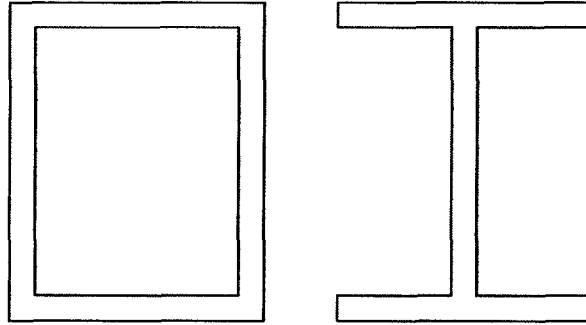


Figura 30: Secciones de viga rectangular y tipo H

(Fuente: los autores)

La gran mayoría de vigas estructurales son conformadas a partir de acero. Este material es uno de los más importantes a nivel comercial dado que tienen buena resistencia y además proveen la seguridad que la falla sea dúctil.

Otras ventajas importantes en el uso del acero son su amplia disponibilidad y considerable resistencia a la fatiga.

Dentro del estudio del comportamiento de un sistema estructural en acero se debe analizar el comportamiento de los elementos que constituyen este sistema. El comportamiento a su vez de los elementos depende de la geometría, de las condiciones de frontera y de la sección transversal de la viga.

La sección transversal a su vez va a depender de las propiedades del material y de la geometría de los componentes que conforman la sección transversal, específicamente en las placas de acero.

Se asume que cualquier sección transversal puede ser idealizada como un conjunto de placas entre sí, donde cada placa es un componente de la sección transversal.

2.6.3 Transmisiones

Dentro de las transmisiones mecánicas con enlace flexible entre el elemento motriz y la máquina movida se encuentran la transmisión por cadena como una de las más utilizadas para transmitir potencia mecánica de forma eficiente, con sincronismo de velocidad angular entre los elementos vinculados, y cuando existe demanda de grandes cargas en los accionamientos.

La transmisión por cadena está compuesta de una rueda dentada motriz, una o varias ruedas dentadas conducidas y un tramo de cadena unido por ambos extremos que engrana sobre las ruedas dentadas. La flexibilidad de la transmisión, que en este caso se relaciona con su versatilidad, es garantizada con la cadena, la cual consta de eslabones unidos por pasadores, que permiten asegurar la necesaria flexibilidad de la cadena durante el engrane con las ruedas dentadas.

En el caso más simple, la transmisión por cadena consta de una cadena y dos ruedas dentadas o, *catarinas*, una de las cuales es conductora y la otra conducida. Dependiendo de la aplicación que se le da a la cadena puede dividirse en tres categorías.

2.6.3.1 Cadenas de carga

Son utilizadas para suspender, elevar y bajar cargas. Ellas son empleadas predominantemente en las máquinas elevadoras de carga. Estas trabajan con bajas velocidades (hasta 0,25 m/s) y grandes cargas. Se pueden usar cadenas de rodillos, pero también pueden ser cadena simple o de brida sencilla.

2.6.3.2 Cadenas de tracción

Son empleadas para mover cargas en las máquinas transportadoras, trabajan con velocidades medias (hasta 2-4 m/s). En su fabricación se emplean eslabones de rodillos modificados con paso múltiple, por lo general de entre los 50 y 1000 mm.

2.6.3.3 Cadenas de transmisión de potencia

En estos accionamientos, la cadena y la rueda son usadas como engranaje flexible para transmitir torque desde un eje de rotación a otro. Generalmente son empleados eslabones de rodillos o de lámina múltiple (cadena silenciosa) de gran precisión en sus dimensiones, con pasos entre 4 y 63,5 mm, con el objetivo de reducir las cargas dinámicas y mejorar su eficiencia.

2.6.4 Engranés

La implementación de este elemento mecánico constituye uno de los mejores medios disponibles para transmitir el movimiento, cuando en las máquinas la transmisión de potencia se hace desde un eje a otro eje paralelo cercano a él, y son utilizados en una gran gama de aplicaciones industriales.

Dentro de los diferentes tipos de engranes existentes los cilíndricos de dientes rectos son los más utilizados debido a su simplicidad en el diseño; presentando ventajas en el proceso de manufactura, además de que se logra trabajar de una forma más eficiente en un gran número de funciones para la transmisión de movimiento. Estas transmisiones son eficientes, duraderas y confiables.

En la siguiente figura se muestra la nomenclatura de la geometría de los engranes:

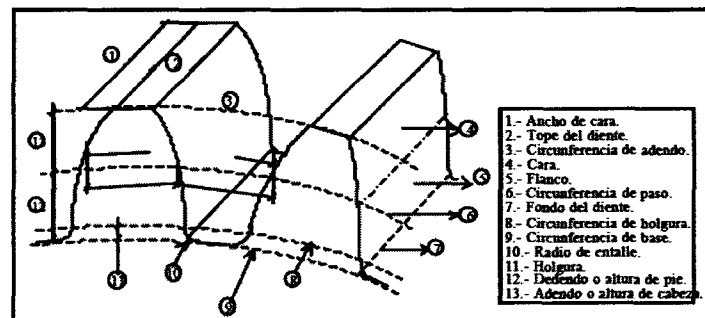


Figura 31: Nomenclatura básica de la geometría de los engranes rectos

(Fuente: <http://www.uclm.es>, consultado el 18 de junio de 2012)

En el diseño de un sistema de engranaje ya sea con dos o más engranes, o bien con una unión de engrane y cremallera, se deben considerar los esfuerzos los cuales se concentran mayoritariamente en la raíz de los dientes, aparte de considerar los efectos ocasionados por la interferencia en la transmisión, con el propósito de evitar vibraciones anormales y a su vez impedir el daño sobre otros elementos de la máquina.

Los métodos con que se fabrican los engranes también influyen en su calidad la que va de la mano con la aplicación para la que se desempeñan. Los procedimientos más comunes son los de conformación, formado y generación.

2.6.5 Pernos

Estos elementos son muy utilizados en la unión de estructuras y maquinaria a nivel industrial debido a que representan un método de unión semipermanente, lo cual puede ser ventajoso en ciertas aplicaciones. Además se evita dañar las piezas que se unen por remaches o por soldadura cuando sea necesario separarlas por alguna razón.

Los pernos se caracterizan por tener filetes enrollados en forma de hélice sobre una superficie cilíndrica. Son tornillos de unión que son utilizados para unir o asegurar dos o más partes estructurales y también de maquinaria. A continuación se tiene una representación gráfica de una unión por perno.

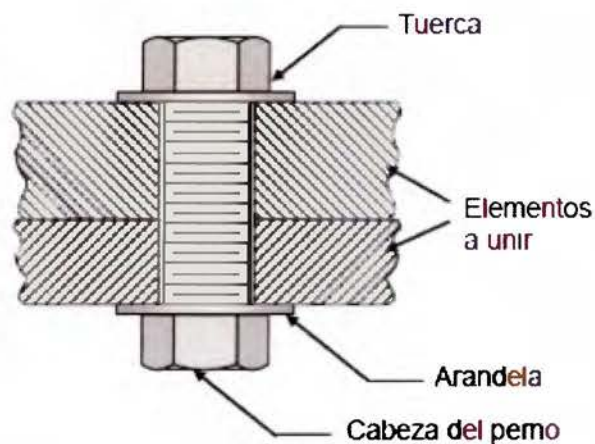


Figura 32: Nomenclatura de los componentes de una unión apornada

(Fuente: <http://www.uclm.es>, consultado el 18 de junio de 2012)

Estas uniones usadas en conjuntos pueden soportar diferentes tipos de carga ya sea por torsión, carga axial, flexión y picadura, siempre que sean una composición de cargas de tracción o cortantes. Pequeñas imprecisiones en las piezas por lo general inducen una carga por flexión que es relativamente pequeña en comparación con la de tracción, al igual que las cargas menores de torsión que puedan sufrir los pernos individuales cuando se aprieta su cabeza.

2.6.6 Análisis de pandeo en elementos mecánicos comunes

Aquellas cargas externas a las cuales estará sometido el elemento provocarán un estado de esfuerzos a nivel interno de la sección de la viga, en donde los mismos actuarán por compresión hasta provocar una falla de la sección por pandeo elástico. A este tipo de falla se le conoce como falla por "pandeo local", que se produce por la formación de ondas, abolladuras y torceduras en los componentes de la sección transversal.

El problema de pandeo pertenece al campo del estudio de estabilidad de estructuras, e inicia con un planteamiento de la siguiente ecuación diferencial.

$$\frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \frac{\delta^4 w}{\delta x^4} + 2 \frac{\delta^4 w}{\delta x^2 \delta y^2} + \frac{\delta^4 w}{\delta y^4} = -N_x \frac{\delta^2 w}{\delta x^2} \quad (7)$$

Esta ecuación diferencial únicamente se muestra para representar el concepto, dado que la complejidad de su solución no permite su uso para fines prácticos. Por ello en este trabajo se usan soluciones particulares derivadas de métodos numéricos para resolver el problema de pandeo en la viga.

En la siguiente figura se ilustra un poco este comportamiento, y deja claro que existen posibilidades de encontrarle una solución práctica al problema, que luego será manejado con el paquete de software.

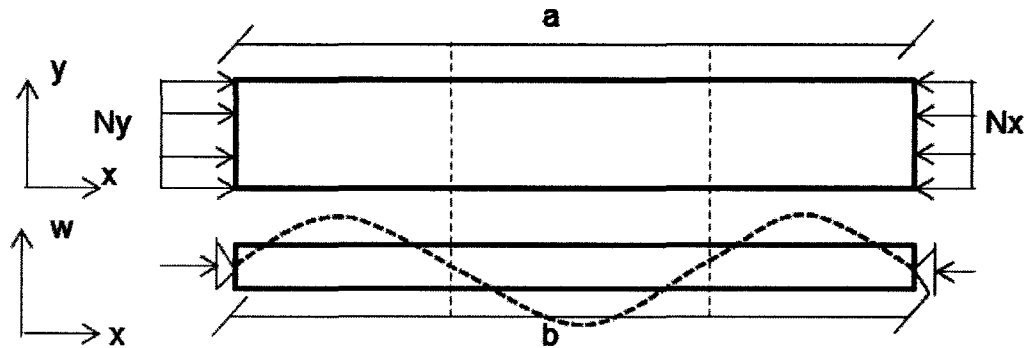


Figura 33: Esquema de pandeo

(Fuente: Ugural & Fenster, 2003)

Resolviendo la ecuación anterior y normalizando la solución con respecto a un parámetro de esbeltez " λ_c ", se extiende la solución elástica al rango inelástico por medio de:

$$\frac{b}{t} \leq \frac{\lambda_0^2 \pi^2 E}{12 F_y (1 - \mu^2)} k \quad (8)$$

Dónde:

μ : Módulo de Poisson de aproximadamente 0.30

k: Depende de la condición de frontera

λ_0 : Parámetro experimental para considerar la plasticidad

Para evitar los efectos de pandeo local en los elementos de la sección se debe cumplir la desigualdad anterior; el factor de frontera K se elige según la configuración de los apoyos del elemento (ver anexos "Description of support at the unloaded edges").

Según la Tabla (Apéndice C) de la norma AISC 360-055 las razones de esbeltez para diferentes componentes de la sección transversal se indican usando los datos que proporciona. Se debe realizar seguidamente un análisis más detallado a fin de clasificar los elementos por su grado de esbeltez en cada una de las siguientes tres categorías:

2.6.6.1 Sección compacta

Se caracteriza por ser lo suficientemente robusta como para distribuir los esfuerzos plásticos antes de fallar por inestabilidad elástica (Pandeo), en donde toda la sección alcanza el valor de fluencia y el material se deforma dentro el rango plástico. El alma de la sección debe de estar conectada de manera continua y todos los componentes deben de cumplir con:

$$\frac{b}{t} \leq \lambda_p \quad \text{ó} \quad \frac{h}{t} \leq \lambda_p \quad (9)$$

2.6.6.2 Sección no compacta

En la zona de compresión se alcanza un esfuerzo de fluencia, sin embargo este no logra llegar a la zona de esfuerzo plástico, porque en el componente de la sección transversal la razón de esbeltez de uno o más componentes cumple con la ecuación:

$$\lambda_p < \frac{b}{t} \leq \lambda_r \quad \text{ó} \quad \lambda_p < \frac{h}{t} \leq \lambda_r \quad (10)$$

2.6.6.3 Sección esbelta

Este tipo de sección presentará inestabilidad y se pandeará localmente antes de alcanzar el esfuerzo de fluencia en cualquier punto de la sección transversal. Se requiere de un procedimiento especial para realizar un diseño bajo estas condiciones y la razón de la esbeltez de cualquiera de sus componentes cumple con:

$$\frac{b}{t} \geq \lambda_r \quad \text{ó} \quad \frac{h}{t} \geq \lambda_r \quad (11)$$

2.6.7 Tubería de alta presión

La tubería puede construirse de varias formas. Existen métodos por soldadura eléctrica o a tope, por plancha para formado de tubos, por perforación y extrusión. Debido al gran tamaño que caracteriza a la tubería para la canalización de aguas en proyectos hidroeléctricos, el método de fabricación que se emplea es de laminado en frío, por medio de una placa de acero que se prepara para la operación de soldadura. La forma circular se desarrolla atravesando la placa por un tren continuo de rodillos conocido como *roladora* o *dobladora mecánica*. Este es el método más conocido que existe para el laminado.



Figura 34: Laminadora para tuberías

(Fuente: Autores, visita a MET el 27 de marzo de 2012)

En la figura anterior se observa el perfil de una máquina laminadora para producir segmentos de tubería que luego serán soldados. Esta máquina se encuentra actualmente en uso en los talleres del MET.

2.7 Principales normas de seguridad

2.7.1 Condiciones ambientales

Cuando se trabaja con corriente alterna (ac) o con máquinas de soldadura de arco de corriente directa (dc), el operador deberá tener un especial cuidado en evitar lesiones por descargas eléctricas. Es práctica común consultar al fabricante de equipos de soldadura cuando se opere en condiciones inusuales de servicio.

2.7.1.1 Voltaje de circuito abierto (procesos especiales)

En ciertos tipos de procesos de soldadura se requieren voltajes de circuito abierto superiores a las que especifica la norma ANSI (American National Standard Institute). Un aislamiento adecuado y otros medios de seguridad deben ser provistos para proteger al operador con el fin de evitar que haya contacto para protegerlo de una lesión.

Algunos otros procesos de soldadura hacen uso de circuitos abiertos con voltajes de hasta 400 V (dc). El equipo debe estar minuciosamente rotulado, por medio de etiquetas y placas de seguridad en donde se indiquen los riesgos en cada zona. Además debe haber suficiente capacitación del personal para casos en donde haya alto voltaje.

2.7.1.2 Terminal de trabajo y conexión a tierra

No es recomendable conectar la pieza de trabajo a la terminal de la fuente de alimentación. Es probable que el operador remueva la conexión de soldadura entre la abrazadera y la pieza de trabajo, lo que puede ocasionar que la corriente de soldadura fluya a través de la conexión hasta llegar a tierra. Se deben adoptar medidas necesarias para bloquear el flujo de la corriente de soldadura a través de los conductores que se ponen a tierra. El tamaño de estos conductores se seleccionan dependiendo de la cantidad de voltaje y corriente que circule por la fuente, así como también para corrientes pico de soldadura con determinada magnitud para conductores de puesta a tierra.

2.7.1.3 Carga de equipo

Cuando se utilizan equipos de soldadura por arco es importante tener precaución para garantizar que el amperaje ha sido seleccionado correctamente y que sea lo óptimo para realizar el trabajo determinado. Las máquinas de soldadura no deben operar por encima del amperaje recomendado correspondiente a los ciclos de trabajo que especifica el fabricante del equipo. Además no deben utilizarse para aplicaciones distintas a las que el mismo especifique en su catálogo.

2.7.2 Factores de riesgo

Debido al método con que se realiza el proceso de soldadura por arco sumergido, existen ciertos factores de riesgo que son inevitables. Es por ello que a continuación se mencionan algunos de los factores más importantes que deben tomarse en cuenta cuando se implemente la actividad que implique el uso de soldadura por arco sumergido.

2.7.2.1 Riesgos de choque

Un choque eléctrico es uno de los más posibles y serios riesgos que se toman al realizar una soldadura. El contacto con partes que están “eléctricamente calientes” pueden causar lesiones graves o muy graves. Esto se debe al efecto con que el choque actúa sobre el cuerpo humano, provocando a su vez una caída de la persona causada por la reacción. El choque eléctrico asociado a la soldadura se divide en dos categorías.

2.7.2.1.1 Choque de alto voltaje

Comprende ámbitos de voltaje entre los 230 V a 460 V. Puede darse al tocar partes internas del equipo sin tenerlo aterrizado. Se debe desconectar por completo el equipo antes de realizar este tipo de acciones. Además nunca se deben remover los paneles del equipo de soldadura si no se cuenta con la presencia de un técnico especializado para realizar el trabajo necesario.

2.7.2.1.2 Choque de bajo voltaje

Se manifiesta en ámbitos de 20 V a 100 V y cuando hay contacto entre el electrodo y el circuito. Para recibir una descarga de este tipo el cuerpo debe contactar ambos extremos de la soldadura: el electrodo y la pieza de trabajo. Para evitar descargas de este tipo se deben desarrollar hábitos de trabajo seguros, ya que la tensión en el electrodo es más alta cuando no se está soldando (voltaje de circuito abierto).

2.7.2.2 Riesgo de fuego

Debido a las extremas temperaturas asociadas en cualquier trabajo por soldadura de arco se deben de tomar las precauciones necesarias. El calor de la soldadura puede alcanzar temperaturas de hasta 5500°C (10 000°F), sin embargo la fuente eléctrica generalmente no es un riesgo de fuego, sino más bien los efectos que resultan por la exposición al gran calor que se genera como chispas y metales fundidos que pueden ser disparados hasta 10 m de la zona de trabajo.

Por lo general se deben identificar y proteger todos los materiales inflamables de las chispas del arco eléctrico. Es importante asegurar que no exista contacto entre el trabajo realizado y cualquier materia combustible.

2.7.2.3 Riesgo de humos y gases

Los gases dispersos contienen partículas sólidas de los electrodos, incluyendo metal base y revestimiento. En el acero suave común para soldadura por arco, la cantidad y la duración de la exposición a estos vapores tienen efectos que duran por un periodo inmediato y son temporales. Estos incluyen daños a la vista y a la piel, así como otros aspectos tales como náuseas, mareos y afecciones respiratorias.

Las exposiciones por periodos largos de tiempo a humos de soldadura pueden causar siderosis (es una deposición de hierro en los pulmones), lo cual afecta la función pulmonar, produce bronquitis y además fibrosis pulmonar. Varios compuestos han sido

encontrados como aquellos que tienen posibles efectos en la salud. Dentro de estos principales elementos se mencionan los siguientes:

Los compuestos de bario solubles pueden causar severo dolor de estómago, pulso lento, latido irregular del corazón, zumbidos en los oídos, convulsiones y espasmos musculares. En casos de exposición continua pueden provocar la muerte.

El contacto con cadmio requiere evitarse con precauciones adicionales. Este metal tóxico se encuentra en algunos aceros y sujetadores de acero como chapado y en soldadura de plata. Los vapores de cadmio pueden ser fatales incluso ante breves exposiciones, con síntomas como los de la fiebre del humo de metal. Una sobreexposición al cadmio puede ser suficiente para causar la muerte, con síntomas que aparecen repentinamente, y en algunas circunstancias con pocos días de antelación.

El cromo se encuentra identificado en la lista de la IARC (Agencia Internacional para la Investigación sobre el Cáncer) y de la NTP (Programa Nacional de Toxicología de los Estados Unidos de Norteamérica) como un riesgo cancerígeno para los seres humanos. Los vapores formados por el uso de acero inoxidable y otros tipos de consumibles contienen cromo y níquel. El tipo de cáncer más asociado a este tipo de sustancias es el de pulmón, el cual se ha reportado en personal asociado a la ejecución rutinaria de procesos de soldadura.

Por todo ello se recomienda tomar precauciones para mantener exposiciones libres tan bajas como sean posibles. Se han adoptado mecanismos para reducir la exposición al cromo a través de la instalación de un sistema de ventilación local o haciendo uso de un respirador certificado.

Los revestimientos del metal a soldar tales como pinturas pueden también contener sustancias tóxicas, como el plomo, el cromo y el zinc. En general se recomienda remover con alguna espátula u otro equipo abrasivo el revestimiento del metal base antes de efectuar el proceso de soldadura.

CAPÍTULO 3

DISEÑO DE LA MÁQUINA

3.1 Esquema de diseño para el manipulador de soldadura

El manipulador de soldadura se debe diseñar con base en una serie de dispositivos colocados estratégicamente para que su funcionamiento se desarrolle de acuerdo a los intereses del proyecto para soldar tuberías de alta presión.

Se requiere de un mecanismo principal conocido como cabeza de soldadura, este sistema se define como la herramienta fundamental de trabajo, ya que todo el proceso de unión por soldadura ocupa de un sistema de proceso específico. Para este caso el proceso específico es básicamente soldadura por arco sumergido. La cabeza se coloca en un extremo del brazo de soldadura conocido también como la viga pluma.

Para desplazar al mecanismo principal (cabeza de soldadura) se necesita de un conjunto de servomotores. Estos proporcionan los desplazamientos del brazo de soldadura tanto para la posición vertical como para la horizontal. Se requiere además de un servomotor lineal puesto sobre el extremo del brazo, el cual se conecta a la cabeza de soldadura, y que la desplaza en dirección horizontal con el fin de que el procedimiento sea más riguroso y preciso.

Sobre la viga pluma se colocan los equipos de unidad de control para la cabeza de soldadura, tanto para manipular la velocidad del proceso como su intensidad. También se colocan otros elementos como el rodete alimentador de electrodos para soldadura por arco sumergido y los electrodos de soldadura.

Para sostener a la viga pluma se hace uso de una columna de material fuerte, el cual se capaz de soportar tanto su propio peso como el de la viga pluma y sus accesorios con el fin de que resista todos los esfuerzos normales ejercidos sobre su sección transversal. Además se incluye una caja base que sostenga la viga pluma a la columna y accesorios internos para mover la caja y la viga pluma tales como lo son rodamientos. Finalmente se encuentra dentro del diseño una cadena de cierto tipo comercial que sostiene y desplaza a la viga pluma en dirección paralela a la columna.

En la siguiente figura se muestra el esquema de diseño básico para el manipulador de soldadura.

Diagrama esquemático del manipulador mecánico

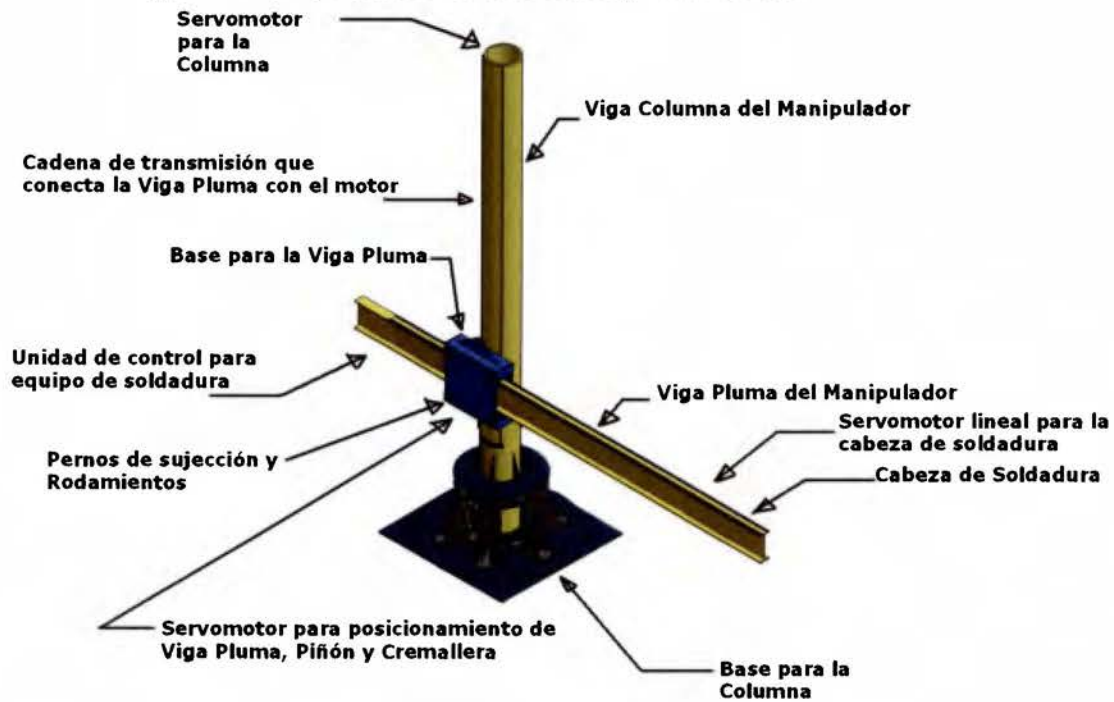


Figura 35: Diagrama de diseño para el manipulador de soldadura

(Fuente: los autores)

Es importante destacar los elementos que componen esta máquina para que se les preste la atención necesaria en todos los apartados de diseño del manipulador mecánico de soldadura. Algunos de estos elementos como la base giratoria para la columna y la viga pluma requieren de complejos modelados en los cuales se hace uso del diseño asistido por computadora.

El orden de cómo se va a desarrollar la etapa del diseño es importante para establecer una secuencia lógica con los apartados siguientes del Capítulo Tres. Para ello se mostrará otro diagrama en donde se muestre la numeración de los temas que se desarrollan posteriormente asociados a cada uno de los elementos que componen el manipulador de soldadura. Este segundo diagrama se muestra a continuación.

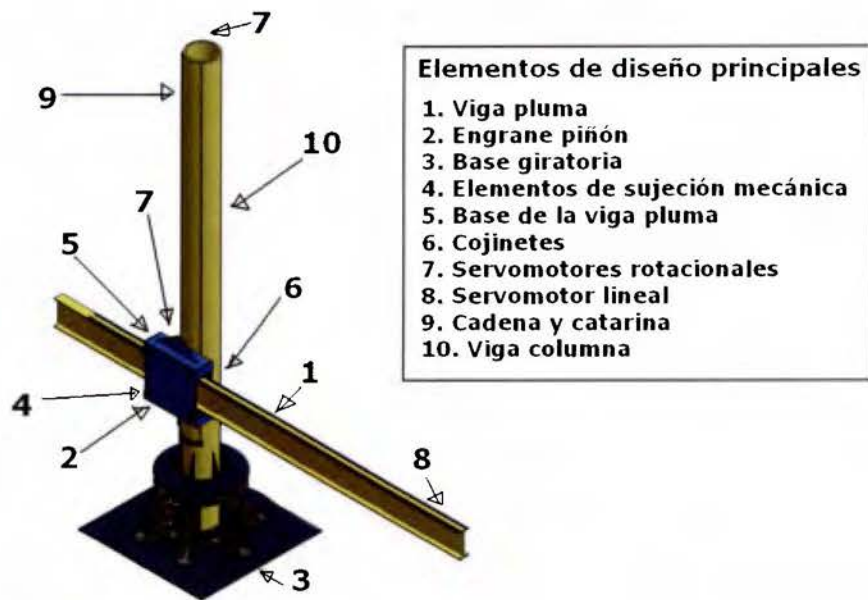


Figura 36: Esquema de diseño numerado para el manipulador mecánico

(Fuente: los autores)

Estos dos diagramas anteriores ilustrados en las figuras 35 y 36 servirán para orientar al lector en las siguientes etapas de diseño, comenzando primero por la viga pluma.

3.2 Diseño y selección de la viga pluma

Este elemento está sometido a una combinación de fuerzas que produce un esfuerzo neto provocado por un momento flector inducido por el peso combinado de la viga y el equipo de soldadura (Beer, Johnston & DeWolf, 2001).

Para ilustrar cómo es que se muestra esta combinación de fuerzas se presenta a continuación la siguiente figura.

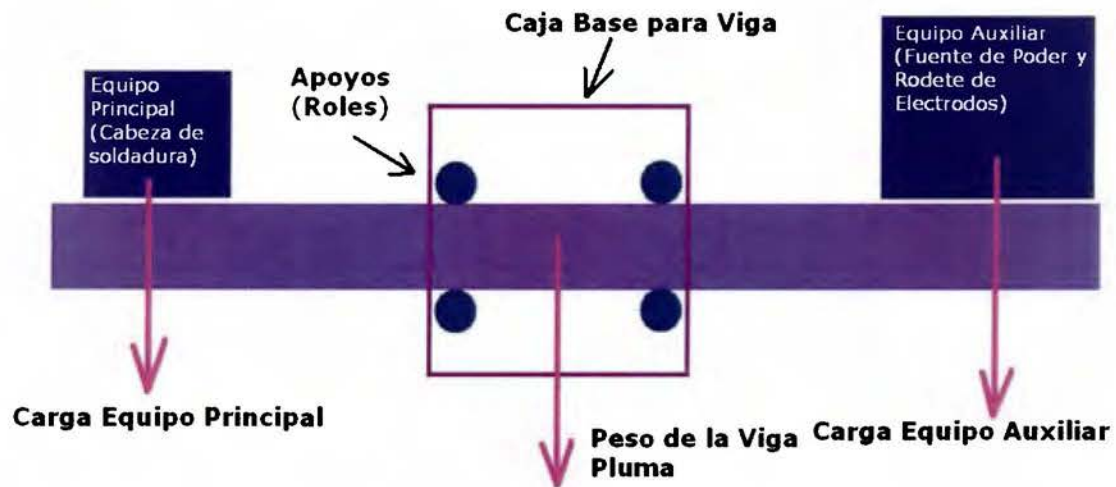


Figura 37: Combinación de fuerzas aplicadas sobre la superficie de la viga

(Fuente: los autores)

Más detalladamente se necesita un diagrama de cuerpo libre⁶⁹ para efectuar un análisis directo de cada una de las fuerzas que actúan sobre la viga, con el propósito de determinar cuáles serán las reacciones en los puntos de apoyo. Esto se ilustra con más claridad en la figura 38.

⁶⁹ Beer, F.P.; Johnston, E.R.Jr.; (c1997). *Mecánica vectorial para ingenieros. Estática*. 6. ed.. México : McGraw-Hill.

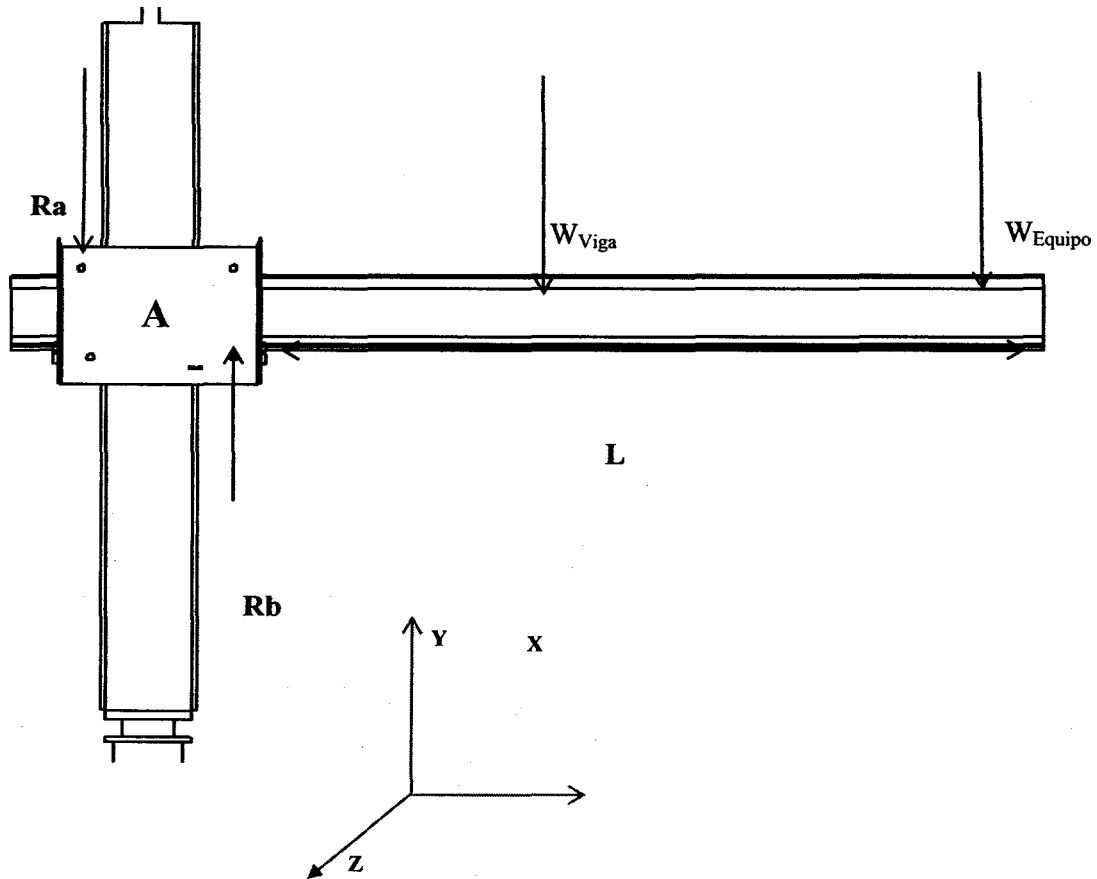


Figura 38: Diagrama de cuerpo libre para la viga pluma
(Fuente: los autores)

En la figura 38 se muestran las fuerzas aplicadas sobre la viga pluma en la condición crítica de operación, es decir donde la magnitud "L" es mayor durante la operación. Se procede a calcular cada uno de estos esfuerzos para poder obtener un esfuerzo equivalente de Von Mises⁷⁰ y compararlo con las propiedades del acero elegido.

⁷⁰ Shigley, J.E. ; Mischke, Ch.R. (c2002). *Diseño en ingeniería mecánica*, 6.ed.. México, D.F. ; McGraw Hill.

Previo al cálculo de esfuerzos hay que determinar las reacciones en los apoyos, a través de un análisis de equilibrio estático. Los apoyos consisten en ruedas que ruedan en angulares colocados a lo largo de la cara superior e inferior de la viga pluma. En tal caso las reacciones en el eje z (Ver figura 38) se anulan dada la simetría de los angulares, conjuntamente el sistema cuasi estático dado que la se desplaza a velocidad constante cuando se encuentra en operación; por ello se consideran únicamente las reacciones en el eje vertical (eje Y). En el diseño de la sección transversal de la viga pluma, se consideran solamente dos apoyos, para evitar un sistema estáticamente indeterminado que demandaría otros métodos de cálculo más complejos y en todo caso resulta un diseño más conservador.

Se utilizan los datos de la viga W14x26 de 6 m de longitud, tiene un peso de 26 lb por pie lo que equivale a 37.98 kg/m⁷¹, con una longitud de 6 m tiene un total de masa de 230 kg.

Además del peso de la viga se suma el peso de la cabeza de soldadura que corresponde a una cabeza de soldadura Lincoln Electric NA5-S⁷² junto con la caja de control NA5-N⁷³ con un peso total de 42 kg⁷⁴.

También se considera un rodete de electrodos de soldadura con un peso no mayor de 40 kg⁷⁵.

Para cubrir la posibilidad de utilizar equipos más pesados o modificación futuras al diseño para otros fines que requiera la empresa, se consideran 100 kg más de peso como factor de seguridad.

Por lo tanto se tiene:

- Peso de viga : 2354 N
- Equipo de soldadura total: 2000 N

⁷¹ Structural Steel W Flange Section Properties - Engineers Edge LLC. <http://www.engineersedge.com>

⁷² Lincoln Electric Co. *Automatic Welding Systems. NA-5 Manual*. Publication E9.30 10/07 St. Clair Ave., Cleveland, Ohio. Recuperado el 18 de enero, 2013 de <http://www.unimaq.com.pe>

⁷³ *Ibíd.*

⁷⁴ *Ibíd.*

⁷⁵ *Ibíd.*

Al realizar sumatoria de momentos en A se tiene⁷⁶:

(12)

$$Ma = -R_b r_b + W_{viga} L_{viga} + W_{equip} L_{equip} = 0$$

Solucionando para Rb:

(13)

$$R_b = \frac{W_{viga} L_{viga} + W_{equip} L_{equip}}{r_b}$$

Sustituyendo valores:

(14)

$$R_b = \frac{2354 \text{ N} \times 2.4 \text{ m} + 2000 \text{ N} \times 5.4 \text{ m}}{0.40 \text{ m}}$$

$$R_b = 41125 \text{ N}$$

⁷⁶ Beer, F.P.; Johnston, E.R.Jr.; DeWolf J.T. (c2001). *Mecánica de Materiales*. 3.ed..México.; McGraw-Hill.

Al realizar sumatoria de momentos en B se tiene⁷⁷:

(15)

$$M_b = -R_a r_a + W_{viga} L_{viga} + W_{equip} L_{equip} = 0$$

Solucionando para R_b:

(16)

$$R_a = \frac{W_{viga} L_{viga} + W_{equip} L_{equip}}{r_a}$$

(17)

$$R_a = \frac{2354 \text{ N} \times 2 \text{ m} + 2000 \text{ N} \times 5 \text{ m}}{0.40 \text{ m}}$$

$$R_a = 36700 \text{ N}$$

⁷⁷ Ibid.

3.3 Calculo de esfuerzos

Al contar con la magnitud de las reacciones se puede realizar un estudio de esfuerzos en la zona de interés, para el caso de análisis de la viga pluma dicha zona corresponde al área que se encuentra sujeta, considerándola como una viga empotrada en un extremo y libre del otro extremo (Beer, Johnston & DeWolf, 2001), por lo tanto las fuerzas y momentos presentes son transferidos a esta zona. En este punto crítico se da la combinación de los tres orígenes de esfuerzos involucrados.

3.3.1 Esfuerzo por momento flector

Los esfuerzos por momento flector se determinan a partir de la siguiente ecuación (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

$$\sigma_F = \frac{M * c}{I} \quad (18)$$

Donde:

M: Momento en Nm

c: distancia del centroide al punto de estudio en m

I: Momento de Inercia de la sección transversal en m⁴

Para una viga W 14x 26 se cuenta con las siguientes propiedades:

- $I = 1,02 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ ⁷⁸
- $c = 0,178 \text{ m}$ ⁷⁹
- $M: 16517 \text{ Nm}$

⁷⁸ Structural Steel W Flange Section Properties – Engineers Edge LLC. <http://www.engineersedge.com>

⁷⁹ Ibid.

Al sustituir los valores en la ecuación se tiene:

(19)

$$\sigma_F = \frac{16517 \text{ N m} * 0,178 \text{ m}}{1,02 \times 10^{-4} \text{ m}}$$

$$\sigma_F = 28,63 \text{ MPa}$$

3.3.2 Esfuerzo por cortante

Es causado por la reacción de la rueda sobre la sección transversal del riel y se calcula con la siguiente formula (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

(20)

$$\tau = \frac{VQ}{It}$$

Donde:

V: 41125 Reacción del rueda sobre el riel en N

Q: Es el primer momento con respecto al eje neutral de la sección en m³

I: Momento de Inercia de la sección transversal en m⁴

t: espesor de la sección en m

Al sustituir valores se tiene:

(21)

$$\tau = \frac{41125 \text{ N} \cdot 0,00675 \text{ m} * 0,017 \text{ m} * 0,1715 \text{ m}}{1,02 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot 0,006 \text{ m}}$$

$$\sigma_c = 31,46 \text{ MPa}$$

3.3.3 Esfuerzos principales

Para calcular la condición de resistencia a la fluencia de la viga W 14 x 26, hay que conocer la tensión equivalente de Von Mises⁸⁰, lo que requiere calcular los esfuerzos principales.

Una vez localizados los esfuerzos presentes en la sección se identifican en que ejes están ubicados:

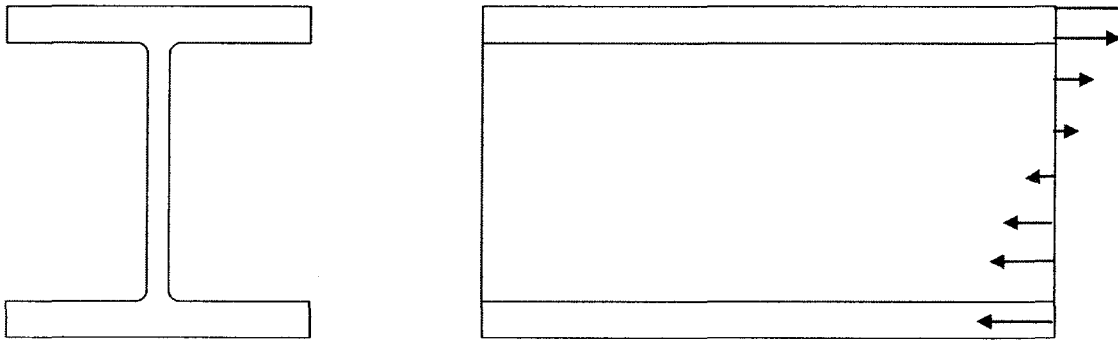


Figura 39: Plano de distribución de esfuerzos de tensión en la viga pluma

(Fuente: los autores)

Para determinar las ubicaciones de estos esfuerzos en el plano de esfuerzos principales se debe obtener primero la ubicación de los planos principales (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

(22)

$$\tan 2\theta_p = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} =$$

$$\Rightarrow \theta_p = -32,76^\circ$$

La magnitud de los esfuerzos principales se obtiene utilizando la fórmula (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

⁸⁰ Shigley, J.E. ; Mischke, Ch.R. (c2002). *Diseño en ingeniería mecánica*, 6.ed.. México, D.F. ; McGraw Hill.

(23)

$$\sigma_{max,min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} + \tau_{xy}^2}$$

Sustituyendo los datos obtenidos en (23) se obtiene lo siguiente:

(24)

$$\sigma_{max,min} = \frac{28,63 + 0}{2} \pm \sqrt{\frac{28,63 - 0}{2} + 31,46^2}$$

Se obtienen las dos soluciones esperadas que son las siguientes:

$$\sigma_{max} = 51,72 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = -23,09 \text{ MPa}$$

Por su parte el cortante máximo por carga transversal se obtiene de la siguiente ecuación (Beer, Johnston & De Wolf, 2001):

(25)

$$\tau_{max} = \sqrt{\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} + \tau_{xy}^2} = \sqrt{\frac{28,63 - 0}{2} + 31,46^2} = 34,55 \text{ MPa}$$

$$\tau_{max} = 34,55 \text{ MPa}$$

3.3.4 Esfuerzo de Von Mises

Se utiliza la tensión de Von Mises⁸¹ para la selección del material de la pluma, debido a que relaciona el efecto de cada esfuerzo en un punto que se calcula con la ecuación (26) (Shigley & Mischke, 2002):

$$\sigma_{FVM} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \quad (26)$$

Donde debe cumplirse que:

$$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$$

Para los valores asociados a este caso, se tiene:

$$\sigma_1 = 51,72 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = -34,55 \text{ MPa}$$

$$\sigma_3 = -23,09 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{FVM} = 116 \text{ MPa}$$

Se determina que el esfuerzo equivalente de Von Mises es menor al esfuerzo de fluencia del acero estructural A-36, que es de 250 MPa (Beer, Johnston & DeWolf, 2001).

3.3.5 Cálculo de deflexiones absolutas

Dentro de los aspectos más importantes en el funcionamiento de la maquina es la precisión y rigidez de los elementos que la componen, por esto se verifican las principales deformaciones elásticas presentes en la máquina.

Para la deflexión de la pluma el cálculo se realiza considerando la pluma como un elemento empotrado en uno de sus extremos y libre en el otro extremo. La deflexión en su extremo se calcula con la siguiente ecuación (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

$$y_{\max} = \frac{PL^3}{3EI} \quad (27)$$

⁸¹ Shigley, J.E. ; Mischke, Ch.R. (c2002). *Diseño en ingeniería mecánica*, 6.ed.. México, D.F. ; McGraw Hill.

En dónde:

- y_{\max} : Deflexión máxima en m
P: 2000 Fuerza aplicada al extremo de la viga en N
L: 6 Longitud de la viga en metros
E: $7,93 \times 10^{10}$ Módulo de Rigidez en N/m²
I: $1,02 \times 10^{-4}$ m Momento de Inercia de la viga en m⁴

Al sustituir los valores se obtiene:

(28)

$$y_{\max} = \frac{2000 \text{ N} \times (6 \text{ m})^3}{3 \times 7,93 \times 10^{10} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \times 1,02 \times 10^{-4} \text{ m}^4}$$

$$y_{\max} = 0,0178 \text{ m} = 1,78 \text{ cm}$$

La deflexión presente puede ser fácilmente compensada por el mecanismo de desplazamiento vertical de la viga, en la parte donde se encuentra montada la cabeza de soldadura. Por lo tanto no existe ningún problema relacionado con este aspecto, debido a la que la deflexión es despreciable con la viga completamente extendida.

3.4 Modelo numérico para verificación de esfuerzos y desplazamientos

3.4.1 Conformación del modelo

El análisis teórico antes descrito es confirmado mediante el método de elementos finitos con el uso del módulo Simulia de *SolidWorks*⁸², el cual es un programa especializado en modelos numéricos del comportamiento cinético, elástico y térmico de componentes y ensambles de sistemas de ingeniería.

Se seleccionó de la biblioteca de materiales de *SolidWorks*⁸³, el Acero ASTM A-36 correspondiente al acero de la Viga W 14x26, con las propiedades necesarias del material para realizar el estudio son (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

- Esfuerzo de fluencia: 250 MPa
- Coeficiente de Poisson: 0,26
- Módulo de elasticidad de 2×10^{11} Pa.

Las condiciones de frontera se definen en el modelo para eliminar grados de libertad de desplazamiento en todas las direcciones y se señalan con las flechas azules en la figura 40.

Solamente existe una carga externa aplicada a la viga que es, el peso de la cabeza de soldadura, rodete del electrodo de soldadura y demás accesorios necesarios para su operación. Se ubica en el extremo libre de la viga, con una magnitud de 2000 N, y se distribuye a lo largo sección transversal de la viga pluma.

Se realiza un mallado de elementos tetraédricos, con interpolación Jacobiana de cuatro puntos⁸⁴. El tamaño de los elementos en promedio es de 24 mm, lo que resulta en un total de 33 411 elementos⁸⁵.

⁸² SolidWorks, Corp. *SolidWorks* (Programa de Computadora). 2008.

⁸³ Ibid.

⁸⁴ Ibid.

⁸⁵ Ibid.

3.4.2 Resultados de la simulación



Figura 40: Esfuerzo de flexión en el modelo del brazo
(Fuente: los autores)

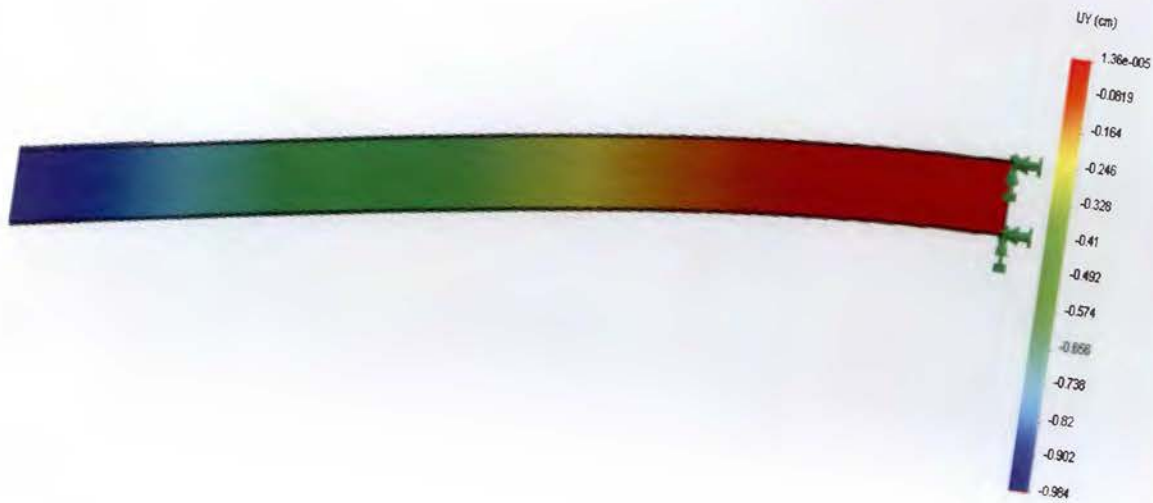


Figura 41: Perfil de deflexiones del modelo de brazo
(Fuente: los autores)

En la figura 40 se muestra un valor de esfuerzo máximo de 29,9 MPa, esto corresponde al esfuerzo por flexión y difiere en tan solo un 4% con respecto al dato obtenido en la Sección 3.3.1, correspondiente al cálculo obtenido por el método teórico de esfuerzo de flexión, en donde se obtuvo un valor de 28,63 MPa. Este resultado es muy conservador y verifica la consistencia del análisis teórico antes expuesto; además en la figura 41 se observa que la máxima deflexión de la viga es de aproximadamente 10 mm, y dicho valor es aún menor al obtenido en la Sección 3.3.5 en donde se obtuvo un resultado de 17,8 mm. Esto significa que no existe ningún problema con el resultado obtenido en el diseño de la viga, ya que la deflexión máxima presente puede ser compensada con el sistema de desplazamiento vertical de la cabeza de soldadura, y de esta manera no se afecta la distancia que debe existir entre la lámina de acero y el electrodo.

3.5 Transmisión horizontal de la viga pluma y base giratoria para la columna

3.5.1 Diseño del sistema de transmisión para la viga pluma

Para el movimiento horizontal de la pluma se utiliza un sistema de piñón-cremallera, usando un servomotor como fuente de potencia. El servomotor es colocado sobre la columna y entra en contacto con la cremallera instalada a lo largo de una de las alas de la viga pluma.

Para dicho diseño se realiza un estudio de esfuerzos flexión y contacto en los dientes del piñón implementando las ecuaciones AGMA⁸⁶. Se define como punto de partida la velocidad de desplazamiento del electrodo de soldadura ya que la pluma del manipulador debe viajar a la misma velocidad que lo hace la punta del electrodo, por esta razón la cremallera debe viajar a una velocidad mínima de 300 mm/min (Ver Sección 3.6.4).

Resulta importante calcular la potencia necesaria para transportar la viga a su velocidad máxima ya que a mayor velocidad existe una relación directamente proporcional entre la potencia y la velocidad de desplazamiento que en este caso tiene una magnitud de 2000 mm/min⁸⁷, el cálculo se realiza utilizando la ecuación (Beer, Johnston & Clausen, 2005):

$$\text{Pot} = F \times v \quad (29)$$

En donde:

Pot: Potencia en W

F: Fuerza en N

V: Velocidad en m/s

Según se indica de acuerdo a fabricantes de equipos manipuladores de soldadura, la velocidad máxima es de 2000 mm/min⁸⁸ y de acuerdo con los cálculos obtenidos en la

⁸⁶ American Gear Manufacturers Association: AGMA

⁸⁷ ESAB *MKR 300 Welding Column and Boom Instruction Manual*

⁸⁸ ESAB *MKR 300 Welding Column and Boom Instruction Manual*

viga con una fuerza (peso de la viga) de 4905 N, se obtiene como resultado que la potencia necesaria para desplazar al elemento mecánico es de:

$$\text{Pot} = 163,5 \text{ W}$$

En el diseño del piñón se utilizan las siguientes fórmulas de manera iterativa mediante la siguiente tabla que se muestra a continuación:

Cuadro 3: Fórmulas para la caracterización del engrane piñón

Valor	Ecuación
Diámetro de paso:	$d_p = \frac{N}{P_d}$
Velocidad de paso:	$v_p = \frac{n \pi \text{Pot}}{12}$
Carga Transversal:	$W^t = \frac{\text{Pot} 33000}{V_p}$
Ancho de Cara:	$F = \frac{\alpha \pi}{P_d}$
Número de esfuerzo de contacto AGMA:	$\sigma_c = \frac{C_p \sqrt{W^t K_o K_v K_s K_m C_f}}{d_p F I}$
Número de esfuerzo de flexión AGMA	$\sigma_f = \frac{W^t k_o k_v k_s k_m k_b P_d}{J F}$
Número de esfuerzo admisible de flexión AGMA	$\sigma_{f \text{ adm}} = \frac{\text{Sat } Y_n}{\eta K_t K_r}$
Número de esfuerzo admisible de contacto AGMA	$\sigma_{c \text{ adm}} = \frac{\text{Sac } Z_n C_H}{\eta K_t K_r}$

(Fuente: American Gear Manufacturers Association, AGMA)

Así que para los siguientes datos iniciales que se muestran a continuación:

- Potencia: 200 W
- Paso diametral: 3,175 mm/diente (8 dientes/in)
- Velocidad Angular: 1 rpm

- Número de dientes: 30
- Relación ancho de cara: 15
- Ángulo de presión: 20°
- Ángulo de hélice: 25°
- Vida útil: 16 000 horas

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Cuadro 4: Esfuerzos AGMA determinados para el engrane piñón

Esfuerzo flexión AGMA	σ_f	400,9	MPa	Esfuerzo admisible (flexión)	$\sigma_{f,adm}$	500,3	MPa
Esfuerzo contacto AGMA	σ_c	632,9	MPa	Esfuerzo admisible (contacto)	$\sigma_{c,adm}$	846,2	MPa

(Fuente: los autores)

- Diámetro de paso (D_p) = 95,25 mm (3,75 in)
- Diámetro de addendum (D_a) = 101,6 mm (4 in)
- Diámetro de dedendum (D_d) = 87,313 mm (3,44 in)
- Ancho de cara (F) = 149,62 mm (5,89 in)

3.5.2 Base giratoria

Este mecanismo consiste en un sistema de apoyos para soportar toda la estructura y poderla rotar, para esto se apoya en seis patas distribuidas de forma circular alrededor de la columna. Este arreglo permite la rotación del conjunto por se cuenta con dos sistemas de ruedas apoyados en chumaceras como indica en la figura 42.

En el diseño de este soporte hay que considerar el peso de toda la estructura de aproximadamente 1 200 kg, La condición de falla probable es la inestabilidad elástica de las patas, por lo que se refuerza con cuatro costillas como se aprecia en la figura 42.

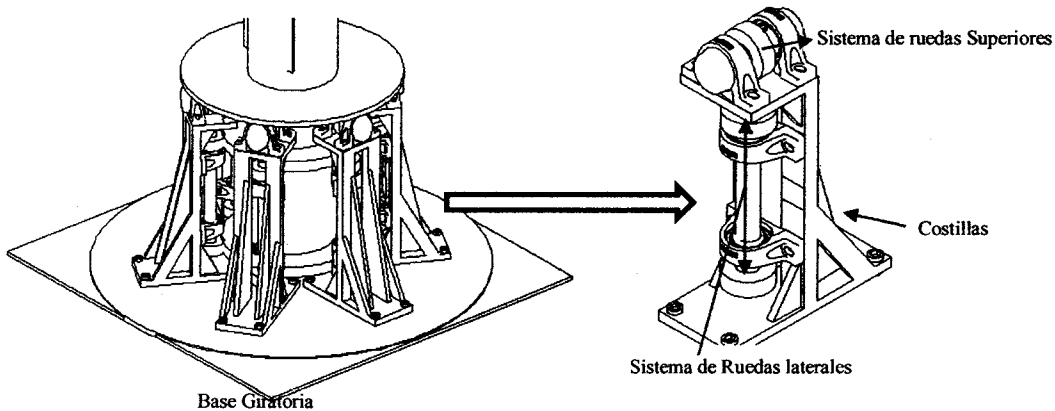


Figura 42: Diagrama general de la base giratoria para el manipulador

(Fuente: los autores)

3.5.3 Modelo numérico para análisis de esfuerzo y desplazamientos

Dada la complejidad geométrica de los elementos de esta estructura de soporte se calcularon los esfuerzos y desplazamientos con un modelo numérico usando un paquete de cómputo conocido como *SolidWorks*⁸⁹.

Como condición de frontera tipo geometría fija se seleccionan las caras con flechas verdes como se indica en la figura 43, dado a que las mismas se encuentran sujetas a una placa en la parte inferior eliminando todos los grados de libertad.

Hay tres cargas aplicadas en los soportes, la primera corresponde al peso que soporta toda la base con un valor de 12 000 N, y como son seis patas se supondrá que se distribuye uniformemente, lo que resulta en una carga vertical de 2 000 N en cada una.

La segunda y la tercer carga corresponde a una de tipo horizontal debido por el momento generado por el peso de la pluma extendida y el equipo de soldadura instalado en el extremo. Ambas cargas producen un efecto combinado sobre cada pata que al final se puede interpretar como si fuera una sola fuerza que actúa en dirección perpendicular a la superficie. Un análisis estático indica que la magnitud de esa carga es de aproximadamente 35kN en cada uno de las patas que tiene la base.

Se realiza un mallado de tipo sólido, con interpolación de cuatro Jacobiano⁹⁰, y el tamaño de cada elemento es de 24,08 mm lo que resulta un total de 33 411 elementos⁹¹.

⁸⁹ SolidWorks, Corp. *SolidWorks* (Programa de Computadora). 2008.

⁹⁰ Ibid.

⁹¹ Ibid.

3.5.4 Esfuerzos de Von Mises en zonas críticas de la base

Los esfuerzos de Von Mises⁹² se muestran en la figura 43, que muestra a lo largo de las costillas un aumento paulatino de los esfuerzos en la pata con una magnitud pico de aproximadamente 132,75 MPa. En las demás zonas concentradoras de esfuerzos estas magnitudes varían en un ámbito de 90 MPa a 33 MPa aproximadamente; también se aprecia que la parte izquierda de la pata tiende a comprimirse mientras que la parte derecha tiende a entrar en tensión.

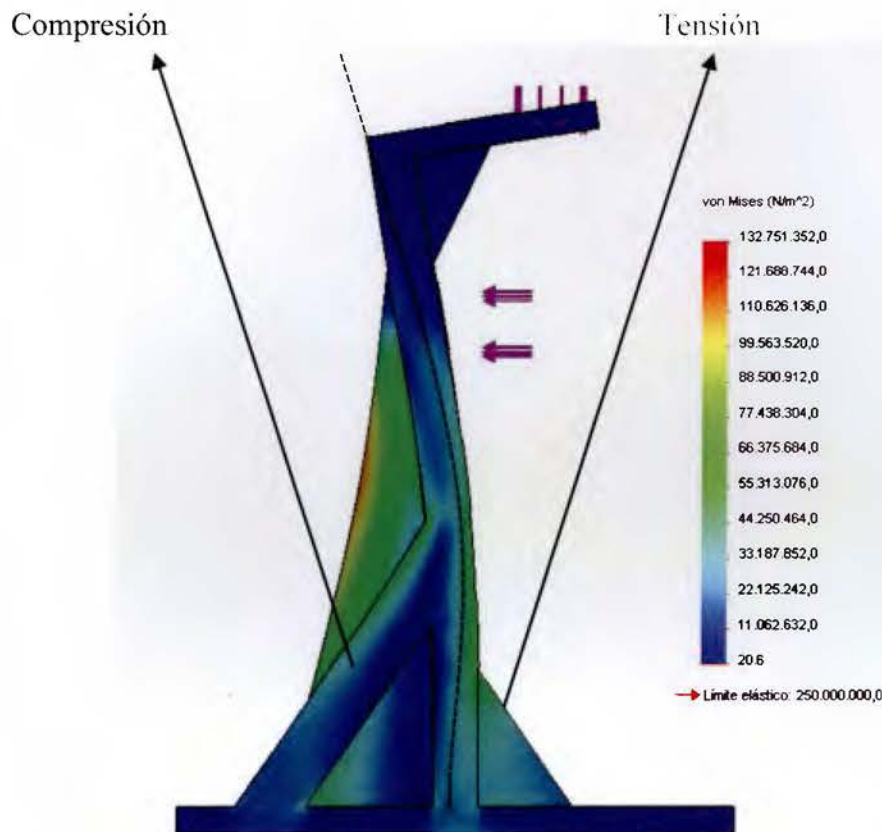


Figura 43: Escala de deformación 62.08

(Fuente: los autores)

Con la información anterior se obtiene el factor de seguridad para el diseño de las patas del manipulador, usando como referencia los valores de la biblioteca de materiales de

⁹² Shigley, J.E. ; Mischke, Ch.R. (c2002). *Diseño en ingeniería mecánica*. 6.ed.. México, D.F. ; McGraw Hill.

SolidWorks⁹³, Acero A36 tiene un límite elástico de 250 MPa (Beer, Johnston & DeWolf, 2001), por lo tanto el factor de seguridad de 1,88 es de:

(30)

$$f = \frac{\sigma_y}{\sigma_{dis}} = \frac{250}{132,75} = 1,88$$

3.5.5 Desplazamientos en zonas críticas de las patas

Dado a que las magnitudes de las fuerzas horizontales son mayores que la de la fuerza vertical, se obtiene un ligero desplazamiento hacia la izquierda de la figura 44.

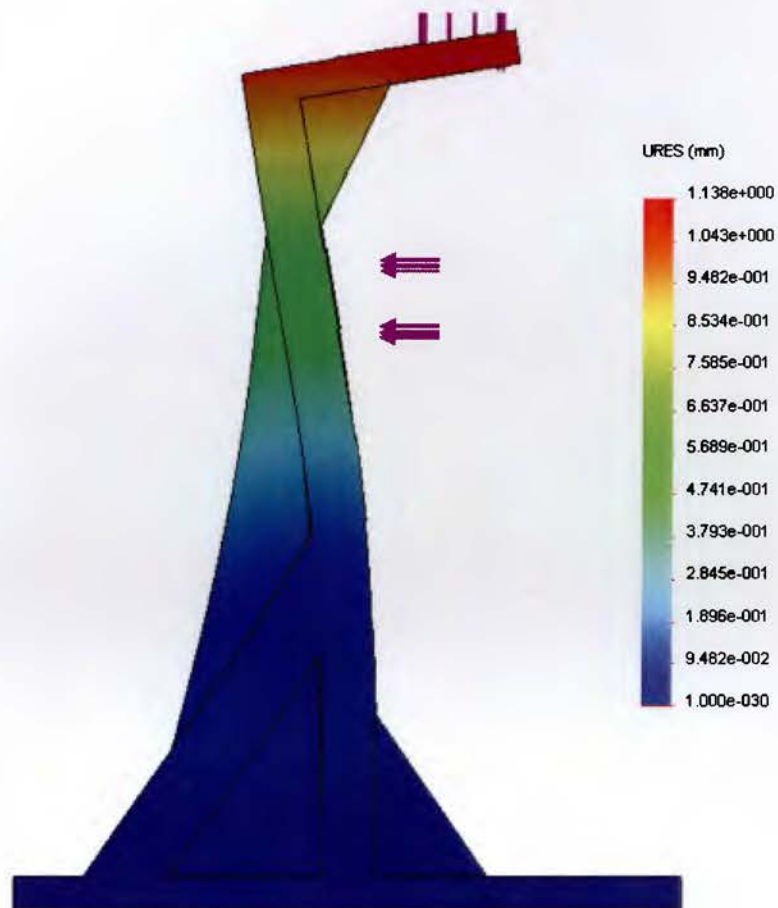


Figura 44: Escala de Deformación 62.08

(Fuente: los autores)

⁹³ 3D CAD Design Software SolidWorks, SolidWorks, Corp.

3.6 Elementos auxiliares, parámetros de velocidad y sistema de potencia

3.6.1 Elementos de sujeción

Los pernos que sostienen los cojinetes y la placa base se diseñan por esfuerzo cortante simple⁹⁴ con el propósito de simplificar los cálculos numéricos.

El esfuerzo cortante admisible se obtiene al despejar la siguiente relación (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

$$f_s = T_y \div T_{perm} \quad (31)$$

En donde el numerador es el límite de fluencia a corte, el denominador es el cortante permisible y el término de la igualdad es el factor de seguridad asociado.

La siguiente ilustración muestra un esquema sencillo del caso mostrado. Dentro del dibujo se muestran los principales elementos de estudio tales como la fuerza aplicada, el elemento de sujeción y su correspondiente área y por último las ecuaciones que describen el fenómeno físico.

⁹⁴ Beer, F.P.; Johnston, E.R.Jr.; DeWolf, J.T. (c. 2001). *Mecánica de Materiales*, 3.ed.. México, D.F. ; McGraw Hill.

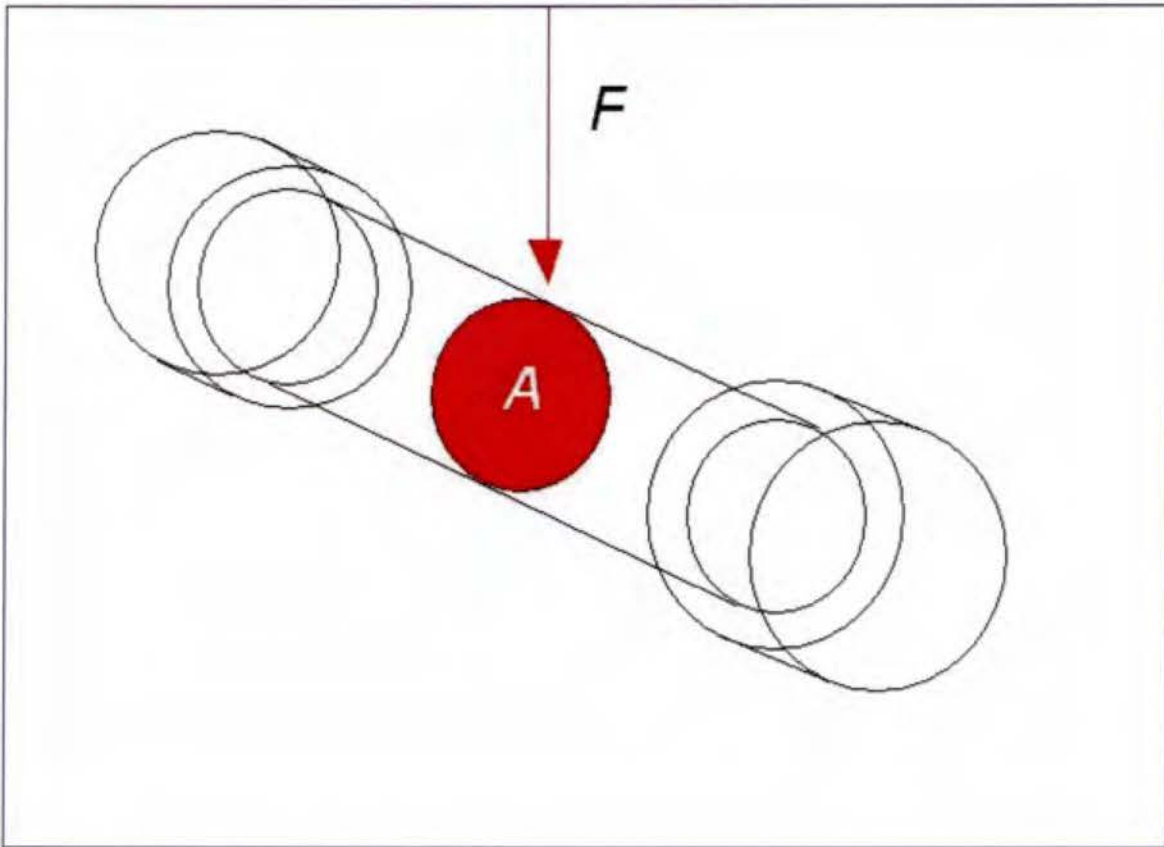


Figura 45: Diagrama de fuerzas aplicadas sobre los pernos

(Fuente: los autores)

En esta imagen se observa un aspecto principal: el diámetro que necesita tener el perno se encuentra en función directa de la carga aplicada y el factor de seguridad, lo que significa que entre mayor sea cualquiera de estos dos valores, mayor deberá ser el diámetro del perno.

Por otra parte el diámetro del perno se encuentra en función inversamente proporcional a la capacidad de resistencia mecánica del material del perno, por lo que a mayor capacidad de resistencia mecánica (esfuerzos de fluencia), menor deberá ser el diámetro del perno.

Si el perno está hecho de un material semejante al acero estructural A-36 su esfuerzo de fluencia a cortante deberá ser de 145 MPa (Beer, Johnston & DeWolf, 2001).

Idealmente la carga que recibe el perno es equivalente al valor de la fuerza horizontal que actúa sobre la superficie del mismo y que equivale al valor de la reacción obtenida de los cálculos para carga estática sobre la viga pluma del manipulador de soldadura. Esta magnitud corresponde a 41 125 N.

Los cálculos numéricos indican que el diámetro del perno debe ser superior o igual a 26,8 mm si se utilizara un factor de seguridad arbitrario de dos. Para efectos de presentar los resultados de una forma más completa se sugiere leer la siguiente tabla de resultados, en la que se asocian varias combinaciones de factores de seguridad y diámetros.

Cuadro 5: Diámetro de perno contra factor de seguridad

Factor de seguridad	Diámetro del perno (mm)
2	26,8
3	32,8
4	37,9
5	42,4
6	46,4
7	50,2

(Fuente: los autores)

Como no existe un factor de seguridad recomendado para este tipo de sujeciones, se puede asumir un valor promedio entre los resultados con el factor de seguridad más bajo que se analizó y el factor de seguridad más alto. Por consiguiente el perno que se deba seleccionar tiene que tener un diámetro de sección transversal equivalente 38,5 mm. Lo más recomendable es buscar modelos de cojinetes cuyo diámetro interno se ajuste al tamaño del perno, siempre y cuando este valor no sea más pequeño que lo obtenido al calcular el promedio.

3.6.2 Espesor de placa para la base de sujeción de la viga pluma

La placa base se diseña por esfuerzo de aplastamiento tomando en cuenta el esfuerzo de fluencia del acero constituyente. En este caso se trata de un acero estructural A-36 cuyo módulo de fluencia corresponde a 250 MPa (Beer, Johnston & DeWolf, 2001).

Considerando que el diámetro del perno que lo atraviesa es de 40 milímetros y el máximo esfuerzo de tensión corresponde al que se genera producto de la máxima reacción en los apoyos (41 125 N), se procede a calcular cuál es el esfuerzo de aplastamiento permisible tomando en cuenta un factor de seguridad igual a dos.

El esfuerzo de aplastamiento se calcula con base en la fórmula⁹⁵:

$$\sigma_{aplast} = P \div (t \times b) \quad (32)$$

Donde σ_{aplast} es el esfuerzo de aplastamiento permisible, P es la carga aplicada sobre la placa, t es el espesor de placa y b es el diámetro del perno.

En este caso el espesor de placa es una incógnita y el esfuerzo de aplastamiento permisible se puede calcular con la ecuación (33) que asocia al esfuerzo de aplastamiento, el esfuerzo de fluencia y el factor de seguridad de la placa⁹⁶.

$$f_s = S_y \div \sigma_{perm} \quad (33)$$

Considerando que el factor de seguridad es igual a dos, se despeja el esfuerzo de aplastamiento permisible y se demuestra que este es:

$$\sigma_{perm} = 125 \text{ MPa}$$

⁹⁵ Beer, F.P.; Johnston, E.R.Jr.; DeWolf J.T. (c2001). *Mecánica de Materiales*. 3.ed.. México.; McGraw-Hill.

⁹⁶ *Ibid.*

Con base en un espesor de la placa de 10 mm, diámetro de perno de 40 mm y carga P de 41 125 N, se determina que el esfuerzo de aplastamiento es de:

$$\sigma_{\text{aplast}} = 102,82 \text{ MPa}$$

Lo cual es menor que el esfuerzo de aplastamiento permisible.

3.6.3 Cojinetes

De acuerdo a las necesidades del modelo es importante para este servicio un sistema de rodamientos que garantice rigidez suficiente de la caja base para la viga pluma. Lo ideal sería un sistema a la medida de poleas o ruedas industriales de hierro fundido o acero para cumplir con esta tarea; pero otra opción menos costosa es seleccionar un mecanismo alternativo por medio de cojinetes cónicos.

Los cojinetes cónicos permiten que la base se encuentre lo suficientemente sujeta como para que no se pueda desplazar en cualquier dirección que no sea la de su movimiento propuesto.

Para el diseño de la pluma se considerará que los cojinetes estarán en condiciones cuasi-estáticas. Los cojinetes cónicos se pueden seleccionar para resistir carga estática con la siguiente ecuación (NTN Ball and Roller Bearings Catalogue⁹⁷):

$$f_s = C_o \div P_o \tag{34}$$

Donde f_s es el factor de seguridad asociado al sistema, C_o es la capacidad de carga estática que debe entregar el cojinete y P_o es la fuerza estática efectiva que actúa sobre el cojinete.

Como los cojinetes tienen planos de intersección inclinados 45° ⁹⁸ con respecto al plano de la base, y la carga vertical aplicada sobre el cojinete es de 41 125 N, entonces las

⁹⁷ NTN Ball and Roller Bearings Catalogue, *CAT. NO. 2202-IX/E*. NTN, Corp.

magnitudes efectivas para las cargas radial y axial que se aplican sobre los cojinetes son de:

$$\begin{aligned} F_r &= 41\,125 \times \cos 45 \\ F_a &= 41\,125 \times \sin 45 \end{aligned} \tag{35}$$

En resumen las componentes de fuerza transmitidas al cojinete son:

$$\begin{aligned} F_r &= 29\,080 \text{ N} \\ F_a &= 29\,080 \text{ N} \end{aligned}$$

Se puede demostrar además que la fuerza resultante a partir de cada componente es efectivamente la carga vertical aplicada sobre los cojinetes:

$$41\,125 \text{ N} = ((29\,080 \text{ N})^2 + (29\,080 \text{ N})^2)^{1/2} \tag{36}$$

Por otra parte, la fuerza estática efectiva que actúa sobre el cojinete se determina a partir de la siguiente ecuación proporcionada por el manual del fabricante japonés NTN Roller Bearings⁹⁹, para la sección de cojinetes cónicos de rodillos.

$$P_o = 0.6 F_r + 0.5 F_a \tag{37}$$

Para los valores de F_r y F_a que se determinaron, se demuestra que la fuerza estática efectiva sobre el cojinete es de:

$$P_o = 0,6 (29\,080 \text{ N}) + 0,5 (29\,080 \text{ N})$$

$$P_o = 31\,988 \text{ N}$$

⁹⁸ Ibid.

⁹⁹ NTN Ball and Roller Bearings Catalogue, *CAT. NO. 2202-IX/E*. NTN, Corp.

Para el factor de seguridad aplicado en este caso es de dos ($f_s = 2$), se demuestra que la capacidad de carga estática que debe tener el cojinete debe ser igual o superior al siguiente valor (NTN Roller Bearings Catalogue):

(38)

$$C_o = f_s \times P_o$$

$$C_o = 2 \times 31\,988 \text{ N}$$

$$C_o = 63\,976 \text{ N}$$

Según esta información, y partiendo de la información general de catálogo, se determina que el cojinete más apropiado para esta circunstancia es el modelo de fábrica número NTN 4T – 420¹⁰⁰. Este elemento cumple con las condiciones de diámetro interior y capacidad de carga dado que su capacidad de carga estática es de 107 kN.

A continuación se muestra en el Cuadro 4 un resumen con los datos del cojinete seleccionado.

Cuadro 6: Datos Técnicos de Cojinete

Modelo	4T – 420
Capacidad Carga Estática	107 kN
Diámetro interno	40,000 mm
Diámetro externo	88,500 mm
Espesor interno	29,083 mm
Espesor externo	22,225 mm
Espesor promedio	26,988 mm

(Fuente: NTN Bearings Corp.)

¹⁰⁰ NTN Ball and Roller Bearings Catalogue, *CAT. NO. 2202-IX/E*. NTN, Corp.

3.6.4 Velocidad de soldadura

Lo primero en obtener es el valor correspondiente a la densidad de energía por unidad de volumen necesaria para fundir el acero determinado, lo que se calcula con la siguiente ecuación (Groover, 1997):

$$U_m = K \times T_m^2 \quad (39)$$

En donde el valor de K es una constante que equivalente a $3,33 \times 10^{-6}$ para unidades del sistema internacional y T_m es la temperatura de fusión del metal de 1700 K^{101} .

La combinación de estos dos valores dio como resultado:

$$U_m = 9,62 \text{ J/mm}^3$$

Una vez determinado esto se procede a calcular la velocidad de soldadura requerida a partir de la siguiente ecuación (Groover, 1997):

$$v = f_1 \times f_2 \times I \times E \div (U_m \times A_w) \quad (40)$$

En donde el valor de I es la corriente de soldadura equivalente 1250 A , típica para estos sistemas junto con E que es el voltaje de la fuente igual a 44 V^{102} , f_1 es la eficiencia de transferencia en el proceso de soldadura equivalente a $0,95^{103}$, f_2 es la eficiencia de fusión térmica equivalente a $0,7$ y A es el área de cordón de soldadura equivalente a 720 mm^2 .

Toda esta información corresponde a un acero de mediano carbono, especial para aplicaciones de doblado del metal (maleable con alto grado de trabajo) y alta resistencia mecánica.

La potencia necesaria de la máquina de soldadura se calcula a partir de (Groover, 1997):

¹⁰¹ Groover, M.P. (c1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. 1.ed.. México; Prentice Hall Hispanoamericana.

¹⁰² ESAB. *MKR 300 Welding Column and Boom Instruction Manual*.

¹⁰³ American Society for Metals (c.1983). *Metals Handbook: Welding, Brazing and Soldering, Vol.6*: 9.ed.. Metals Park, Ohio.

(41)

$$HR = I \times E$$

Esto corresponde al producto de la corriente por la tensión de soldadura. Este valor se pudo estimar en el siguiente dato:

$$HR = 55,0 \text{ kW}$$

Al calcular la velocidad de soldadura se determina que finalmente:

$$V = 316,7 \text{ mm/min}$$

En la siguiente ilustración se muestra cuáles son las secciones que deben ir soldadas:

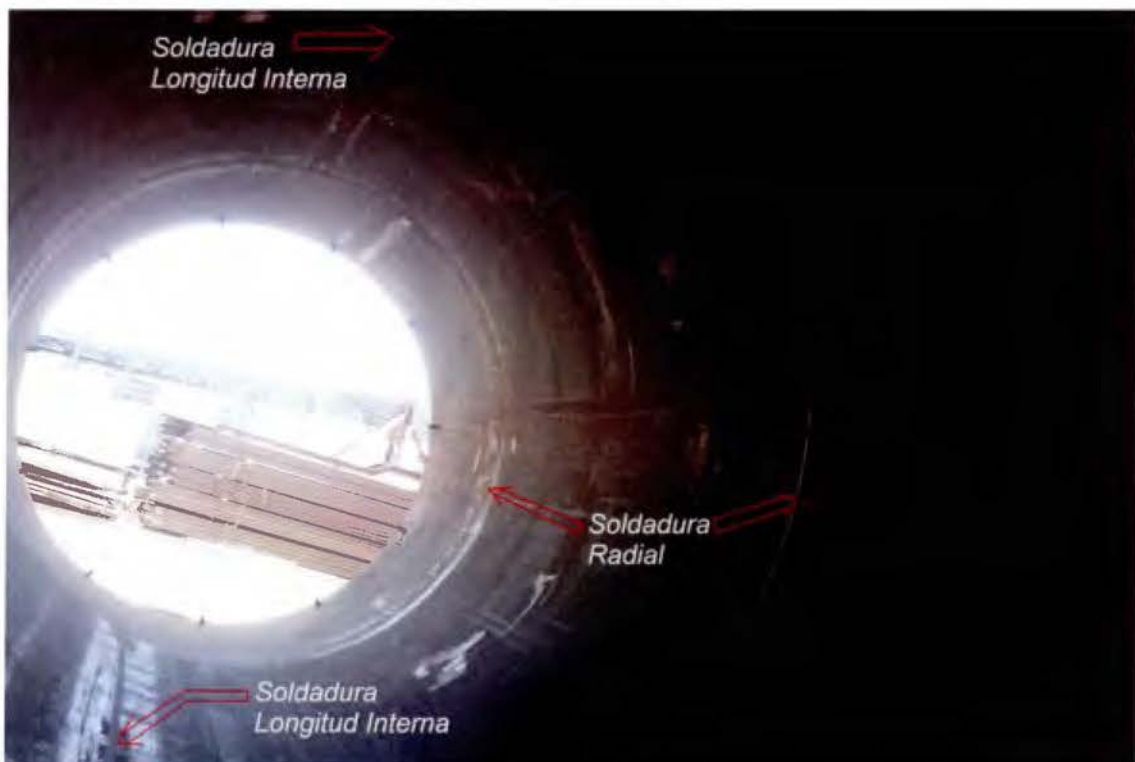


Figura 46: Imagen de tubería soldada en el sitio de trabajo

(Fuente: los autores)

(41)

$$HR = I \times E$$

Esto corresponde al producto de la corriente por la tensión de soldadura. Este valor se pudo estimar en el siguiente dato:

$$HR = 55,0 \text{ kW}$$

Al calcular la velocidad de soldadura se determina que finalmente:

$$V = 316,7 \text{ mm/min}$$

En la siguiente ilustración se muestra cuáles son las secciones que deben ir soldadas:



Figura 46: Imagen de tubería soldada en el sitio de trabajo

(Fuente: los autores)

Si la longitud de cada lámina que se va soldar es de alrededor de 2,3 metros, el tiempo necesario para cubrir por dentro y por fuera tres secciones de lámina soldadas tanto radial como longitudinalmente es como se muestra en la siguiente tabla:

Cuadro 7: Tiempos estimados de duración para soldar secciones de la tubería

Sección de Soldadura	Longitud (m)	Velocidad (m/min)	Tiempo (min)
Longitud Interna	2,3	0,317	7,3
Longitud Externa	2,3	0,317	7,3
Radial Interna	6,9	0,317	21,8
Radial Externa	7,2	0,317	22,8

(Fuente: los autores)

La longitud radial interna se estimó como el perímetro equivalente para una tubería de 2,2 metros de diámetro, mientras que para la longitud radial externa se estimó un diámetro de 2,3 m considerando que cada sección de lámina cuenta con un espesor de 50 mm. El valor de estas longitudes se calculó de la siguiente forma:

(42)

$$Longitud\ radial = \pi \times D$$

Como se necesitan tres longitudes internas, tres longitudes externas, dos radios internos y dos radios externos, el tiempo final es simplemente la sumatoria de los tiempos indicados afectados por los múltiplos anteriores:

(43)

$$Tiempo\ Total = (3 \times 7,3 + 3 \times 7,3 + 2 \times 21,8 + 2 \times 22,8) \text{ min}$$

$$Tiempo\ Total = 133 \text{ min}$$

Estos valores no incluyen los tiempos de parada de la máquina para cambio de posición del brazo y para el giro de los rodillos que rotan la tubería en un ángulo de 180 grados. Si estos periodos se estiman en unos 2 min (120 s) para cambio de posición del brazo mecánico y en 5 min (300 s) para giro de la tubería, el tiempo final es:

(44)

$$\text{Tiempo total} = 133 \text{ min} + 4 \text{ cambios} \times 120 \text{ s/cambio} + 1 \text{ giro} \times 300 \text{ s/giro}$$

$$\text{Tiempo total} = 146 \text{ min}$$

Lo cual indica que en alrededor de dos horas y media la sección de tubería está lista para ser trasladada hacia la tercera y última fase de construcción.

3.6.5 Servomotor de posicionamientos para la viga pluma y equipo de PLC

Para calcular cuál es el tipo de motor que se necesita es necesario recapitular cuáles son las condiciones de entrada de potencia que se necesitan para poder mover el sistema.

Según se determinó en el diseño de engranes, la potencia requerida es de 200 W a una velocidad de entrega de 1 rev/min ($2\pi/60$ rad/s). Con base en esta información se determina cuál es el torque necesario que debe suministrar la máquina. Este valor se calcula a través de la relación (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

$$P = T \times \omega \quad (45)$$

Donde P es la potencia del sistema en Watts, T es el torque salida en Newton por metro y ω es la velocidad angular en rad/s.

De acuerdo con lo anterior y despejando el valor del torque de salida, se demuestra que este es equivalente a:

$$T = 1910 \text{ N}\cdot\text{m}$$

El motor que se seleccione entonces debe entregar este par de torsión a una velocidad angular de 1 rpm.

Debido a la disponibilidad comercial y a los intereses del Taller de Máquinas y Equipos del ICE (MET) se selecciona el modelo Baldor DSM23x-348¹⁰⁴, por los motivos de que este motor ya se ha empleado en otras actividades que requieren gran respuesta mecánica dentro del Taller, funcionando como dispositivo para mover cargas pesadas¹⁰⁵; y por lo tanto es un motor confiable.

Este modelo de motor se selecciona para que cumpla las funciones de posicionamiento tanto vertical como horizontal de la Pluma. El posicionamiento vertical se logrará a través del motor conectado a la cadena y Catarina, mientras que el posicionamiento horizontal se logrará a través de otro modelo semejante conectado al piñón y cremallera. En total son dos modelos de Baldor DSM23x-348.

En los Anexos (Ver Apéndice D) se incluye información detallada del modelo comercial seleccionado (Baldor_Serie DSM23x-348), el cual reúne las condiciones para los movimientos tanto vertical como horizontal de la pluma, porque primero la magnitud de las cargas en ambos sentidos son muy semejantes y segundo porque la velocidad de desplazamiento para ambos sentidos debe ser la misma, conforme al propósito de poder estandarizar el proceso a condiciones constantes que sean fáciles de operar y de recordar por parte del grupo técnico de la empresa, por ejemplo, cuando ellos deban realizar algún ajuste o cuando tengan que calibrar la máquina de acuerdo con los parámetros de funcionamiento establecidos.

En la siguiente figura se muestra una imagen del modelo mencionado:

¹⁰⁴ Baldor Electric Company. <http://www.baldor.com>.

¹⁰⁵ Visita al Taller de Máquinas y Equipos MET, 21-09-2012



Figura 47: Modelo de Motor Eléctrico Baldor DSM

(Fuente: Autores, visita a MET el 21 de septiembre de 2012)

Es un motor y posicionador integrado de alta capacidad de entrega de torque con gran flexibilidad para ser usado en sistemas de control electrónico, en los cuales el diseñador tiene la libertad para decidir cuál es el mejor método de control.

Para la escogencia del PLC se sigue el mismo procedimiento con base en la disponibilidad del equipo presente en el Taller de Máquinas del ICE. Por lo tanto se selecciona la unidad Siemens Simatic S7-1200¹⁰⁶.

Esta unidad cuenta con la experiencia en el uso de dispositivos semejantes por parte de los Ingenieros encargados del funcionamiento del plantel. Son ellos quienes desean que se instalen equipos que ya hayan sido utilizados en la empresa, y no quieren que se les

¹⁰⁶ Siemens. *Simatic S7-1200 Easy Book Manual*

cambie de opción por tratarse de modelos que se encuentran almacenados en bodega esperando para ser usados. Con esto se pretende ahorrar recursos.

Seguidamente se muestra una imagen del modelo PLC Siemens S7-1200, obtenida de una visita realizada al Almacén de Equipos y Activos del Taller de Maquinaria del ICE, el 21 de septiembre de 2012.

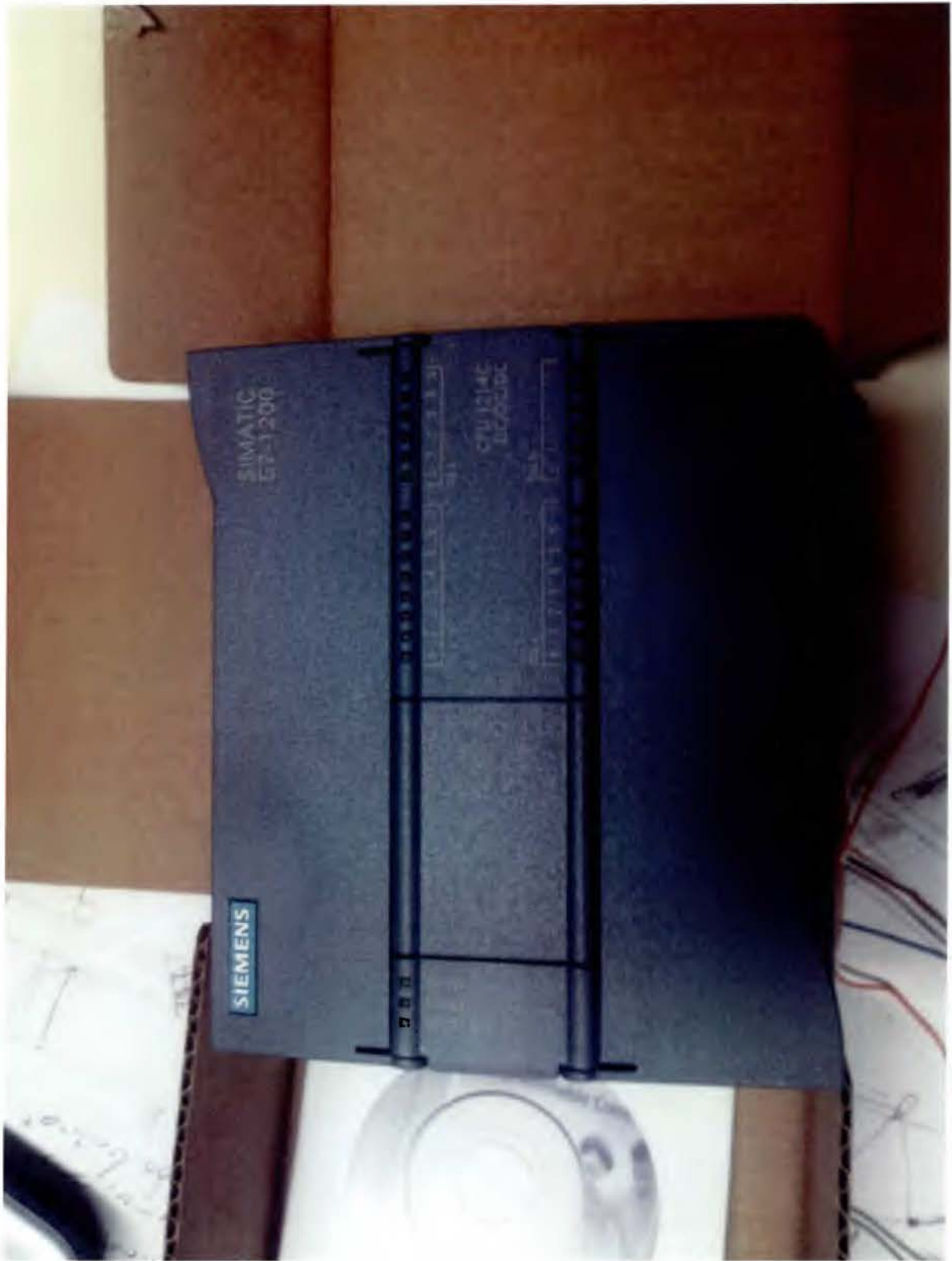


Figura 48: Modelo de PLC Simantic Siemens S7-1200

(Fuente: Autores, visita a MET el 21 de septiembre de 2012)

3.6.6 Servomotor lineal para posicionamiento de la cabeza de soldadura

Una opción razonable, que cumple perfectamente las condiciones de operación en la industria, que es capaz de proveer una solución a un problema de manejo de equipos industriales se resume en la escogencia de un servomotor lineal para el desplazamiento de la cabeza de soldadura. Este tipo de motor se utiliza colocando la herramienta de trabajo sobre el dispositivo móvil ubicado por encima de la placa de imán que tiene el motor.

En la industria existen diversos modelos y fabricantes de servomotores lineales, pero un fabricante que provee suficiente información de diseño para seleccionar la herramienta más adecuada corresponde a la compañía *Intelligent Actuator Inc.*

Considerando que la cabeza de soldadura es un equipo cuya masa es aproximadamente igual a 30 kg, se puede asumir que un modelo de la Compañía anteriormente mencionada que presenta la capacidad suficiente para mover la herramienta de trabajo es la que corresponde a los de la Serie LSA – N10¹⁰⁷ y LSA – N15¹⁰⁸.

Algunas características que presenta el modelo se resumen a continuación, pero una información más detallada se presenta en el Apéndice D.

Cuadro 8: Datos principales para cada modelo de servomotor lineal

Característica del modelo	LSA – N10	LSA – N15
Capacidad de carga (kg)	15	30
Distancia de trabajo (mm)	4100	4150
Ancho (mm)	100	150
Aceleración máxima	3 g	3 g
Velocidad máxima (mm/s)	2 500	2 500

(Fuente: www.intelligentactuator.com)

¹⁰⁷ LSA Linear Servo Actuator. *Sevo actuadores lineales de alta velocidad, alta aceleración y alta repetitividad para uso de capacidad media.* Recuperado el 20 de junio, 2012 de <http://www.intelligentactuator.com/lsa-linear-servo-actuator-lsa-n10-15/>

¹⁰⁸ *Ibíd.*

Este actuador se debe colocar en el extremo de la viga para su funcionamiento correcto y se debe instalar con base en los requerimientos del fabricante. En la siguiente imagen se muestra con claridad las características físicas de un servomotor lineal. Sobre la placa gris de plástico se montará la cabeza de soldadura *Lincoln Electric NA5-S*¹⁰⁹, mientras que el servomecanismo es una pequeña caja gris colocada a un costado de la placa donde deberá ir montada la cabeza de soldadura. El servomecanismo se acciona por medio de un imán que electroimán que recorre un devanado metálico justo por debajo de la pista de deslizamiento.



Figura 49: Servomotor lineal LSA

(Fuente: <http://www.intelligentactuator.com>, consultado el 20 de junio de 2012)

¹⁰⁹ Lincoln Electric Co. *Automatic Welding Systems. NA-5 Manual*. Publication E9.30 10/07 St. Clair Ave., Cleveland, Ohio. Recuperado el 18 de enero, 2013 de <http://www.unimaq.com.pe>

3.7 Transmisión vertical de la viga pluma

3.7.1 Selección de la cadena

Para el desplazamiento vertical de la pluma se utiliza una cadena de rodillos, la cual está sujeta a un motor eléctrico trifásico de engrane helicoidal, la sujeción al eje del motor se realiza por medio de catarinas, además se utiliza un sistema de contrapeso.

La selección de la cadena se hace en función de su resistencia a ruptura, con base a catálogos, verificando la resistencia de la cadena trabajando en las condiciones de operación, tomando en cuenta factores de velocidad, servicio entre otros.

Primeramente se realiza el cálculo de la tensión generada debido al peso total por levantar (Shigley & Mischke, 2002).

(46)

$$F_w = \frac{mxg}{1000} = 734 \text{ kg} * \frac{9,81 \text{ m/s}^2}{1000} = 7,20 \text{ kN}$$

Donde:

F_w: Tensión de cadena en kN

g: aceleración de la gravedad de 9,81 m/s²

m: masa en kg

La tensión inicial debe ser corregida al considerar una serie de factores que aumenta el desgaste de la cadena durante la operación

La tensión de diseño para la cadena se obtiene conforme a la siguiente relación (Shigley & Mischke, 2002):

(47)

$$F'_w = F_w K_s K_v K_c K_u$$

Donde:

K_s : Factor de servicio

K_v : Factor de Velocidad

K_c : Factor de dientes de Catarina

K_u : Factor de desbalance de carga

La capacidad de transmisión de la cadena se ve afectada si hay variaciones en la carga. El *factor de servicio* K_s debe ser aplicado con base en la fuente de potencia y tipo de máquina tal como se muestra en la siguiente imagen de tabla. Se debe tomar en cuenta que el factor de servicio nunca es menor de 1.0.

Table 2 : Service factor K_s

Type of Impact	Machines	Source of Power		
		Electric Motor or Turbine	Internal Combustion Engine With hydraulic drive	Internal Combustion Engine Without hydraulic drive
Smooth	Belt Conveyors with small load fluctuation, chain conveyors, centrifugal blowers, ordinary textile machines, ordinary machines with small load fluctuation.	1.0	1.0	1.2
Some impact	Centrifugal compressors, marine engines, conveyors with some load fluctuation, automatic furnaces, dryers, pulverizers, general machine tools, compressors, general work machines, general paper mills.	1.3	1.2	1.4
Large impact	Press, construction or mining machines, vibration machines, oil well rigs rubber mixers, rolls, roll gangs, general machines with reverse or large impact loads.	1.5	1.4	1.7

Figura 50: Factor de servicio K_s para cadenas

(Fuente: Shigley & Mischke, 2002)

El *factor de velocidad* puede leerse del siguiente gráfico, en función de la velocidad de desplazamiento máxima y el número de dientes de la catarina.

Speed factor K_v and sprocket teeth factor K_c

Table 3 : Speed factor, K_v and sprocket teeth factor K_c

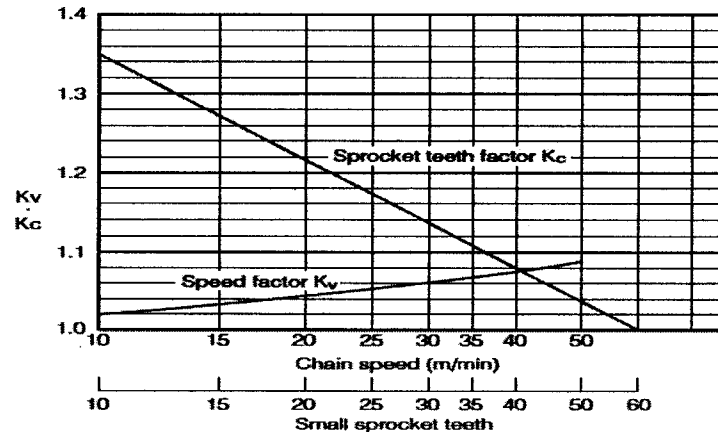


Figura 51: Factores de velocidad y número de dientes

(Fuente: Shigley & Mischke, 2002)

El *factor de carga de desequilibrio K_u* se aplica cuando debe realizar tracción de traslado y elevación con dos cadenas o cuatro cadenas en donde, la tensión de la cadena no es uniforme.

Después de haber considerado los anteriores factores para la selección de la cadena se puede obtener la carga resultante de diseño sustituyendo los valores que se escogieron al final:

(48)

$$F'_w = 7,20 \times 1,3 \times 1 \times 1,2 = 11,23 \text{ kN}$$

Esta última tensión debe verificarse con la tensión de ruptura de cadenas comerciales, al consultar un catálogo de cadenas IWIS¹¹⁰ para una cadena ANSI¹¹¹ 80, la geométrica de la Catarina se encuentra en función del tipo de cadena.

¹¹⁰ Intelligent Well Interface Standard: IWIS

¹¹¹ American National Standards Institute: ANSI

A continuación se muestra una imagen con una simbología utilizada en la descripción de la geometría de la cadena. Esta imagen se presenta para ilustrar una cadena con sus componentes. Si bien es cierto las dimensiones de una cadena son importantes, todavía es más importante saber identificar cuál es una cadena ANSI 80¹¹². Por consiguiente, es necesario tomar en cuenta las indicaciones de la figura y compararlas con los datos de la tabla posterior para así poder identificar con mayor facilidad este tipo de cadena en el mercado.

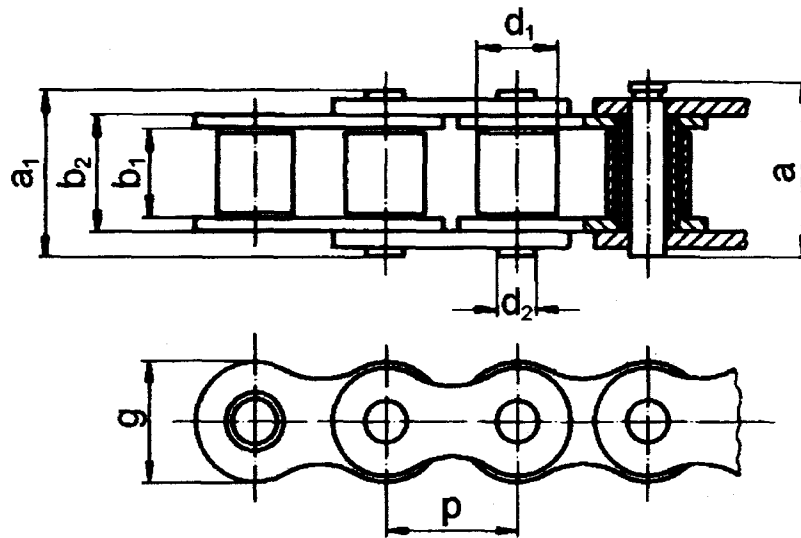


Figura 52: Simbología de la geometría de la cadena de rodillos

(Fuente: Shigley & Mischke, 2002)

Donde:

p: Paso

a: Longitud de Pasador

a_1 : Eslabón externo

b_1 : Eslabón interno

d_1 : Rodador

d_2 : Pasador

¹¹² Ibid.

Cuadro 9: Datos para la cadena de rodillos ANSI 80

Dimensión o Capacidad	Valor
Paso, P (mm)	25,40
Diámetro del rodillo, d1 (mm)	15,88
Diámetro del pasador, d2 (mm)	7,92
Longitud del pasador, a (mm)	35,00
Eslabón externo, a1 (mm)	32,70
Distancia entre placas internas, b1 (mm)	15,75
Espesor de placa, T (mm)	3,25
Carga límite de rotura, Q (kN), mínimo	56,7
Carga de rotura promedio, Qo (kN)	69,4

(Fuente: www.rodacenter.cl)

Para una cadena ANSI¹¹³ 80 IWIS¹¹⁴ presenta una fuerza de carga de ruptura nominal de 56,70 kN por lo que se puede seleccionar ya que la tensión de diseño es de 11,23 kN

3.7.2 Diseño de la Catarina

La transmisión debe transportar la pluma con una velocidad máxima de 0,7 m/min tanto en sentido ascendente como descendente. El cálculo de las características del mecanismo se realiza de la siguiente manera:

Se requiere determinar el tamaño de la catarina, el diámetro de la misma se encuentra en función del número de dientes y del paso de avance. Se utiliza la siguiente fórmula para determinarlo (Shigle & Mischke, 2002):

$$D = \frac{P}{\sin \frac{180^\circ}{N}} \quad (49)$$

¹¹³ American National Standards Institute: ANSI

¹¹⁴ Intelligent Well Interface Standard: IWIS

Donde:

N: número de dientes de la catarina.

p: paso de la cadena en in

La velocidad de la cadena se encuentra en función del tipo de cadena y se determina de la siguiente manera (Shigley & Mischke, 2002):

(50)

$$v = \frac{Npn}{12}$$

Donde:

N: Número de dientes de la catarina

p: paso de la cadena en in

n: Velocidad angular en rev/min

Dado que se conoce la velocidad de desplazamiento y el paso lo define el fabricante en el catálogo, se soluciona el sistema de ecuaciones obteniendo:

Diámetro: 124,96 mm

Paso: 25,4 mm

N: 14 Dientes

En la siguiente imagen se muestra un perfil de la catarina y sus dimensiones para mostrar a forma de ilustración las características adicionales que debe tener la mencionada parte que va unida a la cadena.

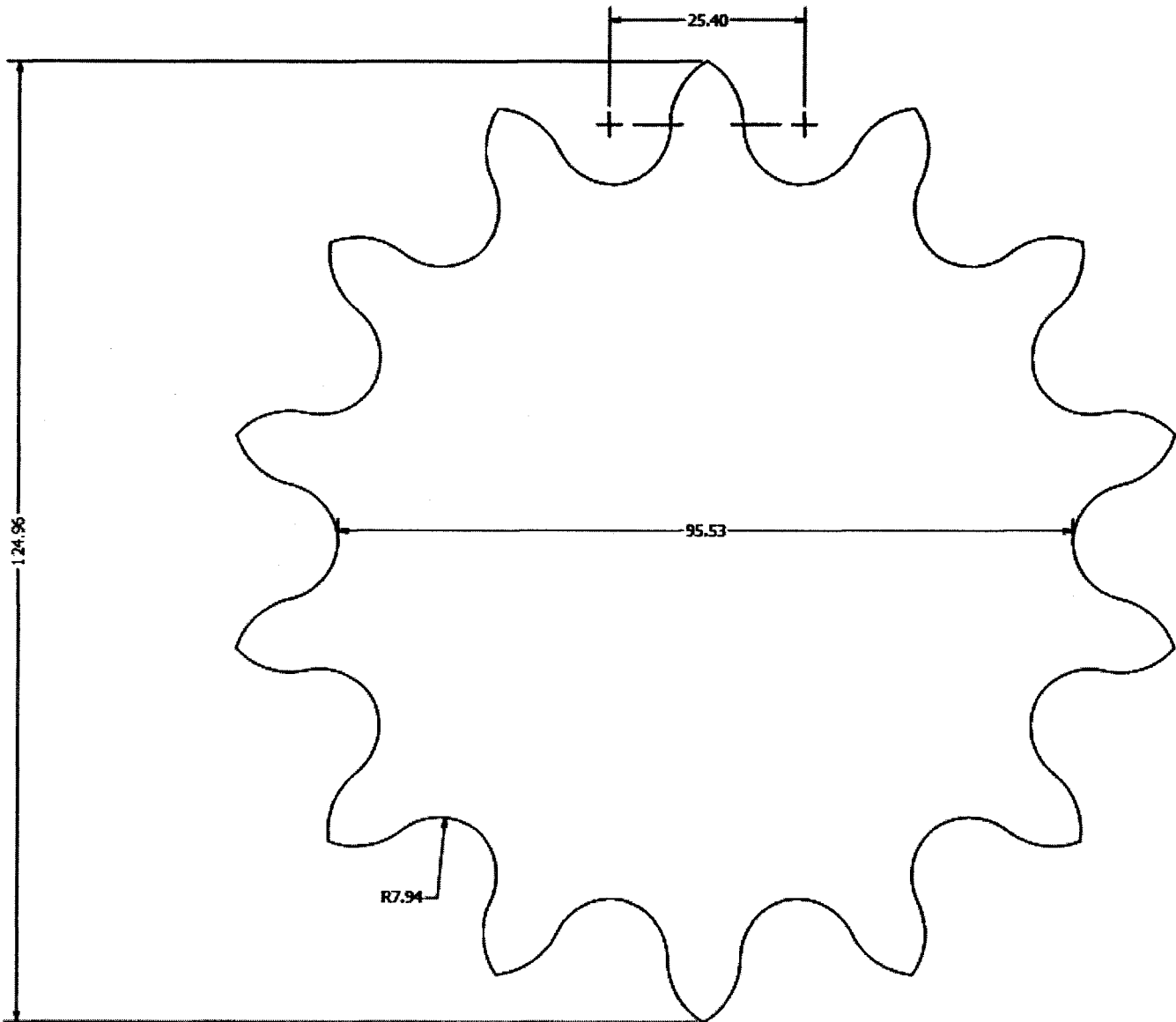


Figura 53: Geometría y dimensiones de la catarina

(Fuente: los autores)

3.8 Diseño de la columna

3.8.1 Establecimiento de los parámetros de diseño para la viga columna

Para poder estudiar las características de diseño de la columna fue necesario realizar un diagrama como el que se muestra a continuación en la figura 54. Su utilización fue indispensable para establecer los principales criterios para el análisis de cargas de compresión debidas a fuerzas axiales y momentos debidos al peso de la viga pluma y accesorios pertenecientes al equipo de soldadura.

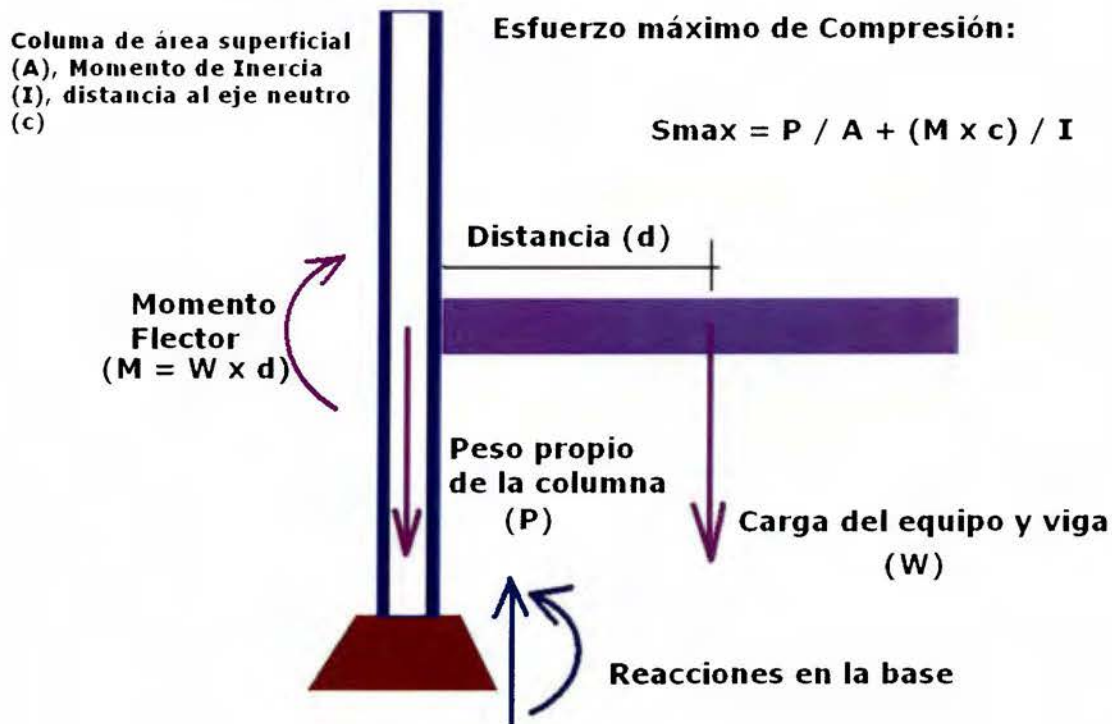


Figura 54: Fuerzas y momentos sobre la viga columna

(Fuente: los autores)

Se seleccionó para cumplir el propósito de viga columna un tubo de acero estructural A - 36 de 400 mm de diámetro exterior y 350 mm de diámetro interior, con un espesor de pared de 25 mm. La altura de la columna es de 6,0 m.

Con base en el perfil del tubo seleccionado se estudia cuál es el efecto de la carga del peso aplicado sobre el eje central del tubo de manera que pueda ser resistente a la deflexión crítica que daría como resultado un efecto de pandeo.

Las principales propiedades de la viga que se necesitan son sus momentos de inercia principales, el área de su sección transversal y el módulo de elasticidad del material que la compone (acero estructural ASTM A - 36).

Las propiedades calculadas para la viga se resumen en el siguiente cuadro.

Cuadro 10: Propiedades de la viga columna

Propiedad física	Magnitud
Área de sección transversal (m ²)	0,0295
Momento de inercia I _{xx} (m ⁴)	5,20 x 10 ⁻⁴
Momento de inercia I _{yy} (m ⁴)	5,20 x 10 ⁻⁴
Distancia del eje neutro (m)	0,20
Módulo de elasticidad (GPa)	200

(Fuente: los autores, Beer, Johnston & DeWolf, 2001)

3.8.2 Ecuaciones de diseño

Básicamente la ecuación que rige la estabilidad de estructuras tales como columnas corresponde a la Fórmula de Euler (Beer, Johnston & DeWolf, 2001). Esta ley predice que la carga crítica que provocará un pandeo inminente de la columna se encuentra en función directamente proporcional al módulo de elasticidad por el momento de inercia en el eje donde ocurre el giro de la columna, e inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de la columna medida entre sus extremos. La misma se muestra como sigue:

$$P_{cr} = (\pi^2 \times E \times I) \div L^2 \quad (51)$$

Donde P_{cr} es la carga crítica para que no exista pandeo de la columna, E es el módulo de elasticidad para el material de la viga columna, I es el momento de inercia respecto al eje donde se presenta el giro y L es la longitud de la columna.

No obstante, la fórmula anterior no toma en cuenta las condiciones de extremo para determinadas columnas. Por eso existe una extensión de la Fórmula de Euler que incluye esas condiciones especiales de extremo. Esta expresión se denota como (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

$$P_{cr} = (\pi^2 \times E \times I) \div L_e^2 \quad (52)$$

En esta nueva condición el valor de L_e corresponde a la longitud efectiva de la columna considerando las condiciones de extremo¹¹⁵. Para una columna con un extremo libre y otro empotrado, el valor de la longitud efectiva corresponde al doble de la altura de la columna medida desde el extremo apoyado (Beer, Johnston & DeWolf, 2001, p.617).

Una vez que se conocen estos datos se procede a calcular la carga crítica para cada eje del plano ("xx" y "yy") y por último se determinan los esfuerzos críticos de pandeo que se calculan como:

$$\sigma_{cr} = P_{cr} \div A \quad (53)$$

En dónde A es el área de sección transversal y σ_{cr} es el esfuerzo crítico de pandeo.

3.8.3 Resultados del análisis de pandeo

Se muestra un resumen de los resultados obtenidos (ver datos completos en Apéndice E).

Cuadro 11: Cargas críticas y esfuerzos críticos de pandeo

Altura de la columna (m)	P_{cr} (x) (kN)	σ_{cr} (x) (MPa)	P_{cr} (y) (kN)	σ_{cr} (y) (MPa)
5,60	8.183,0	277,84	8.183,0	277,84
5,70	7.898,4	268,18	7.898,4	268,18
5,80	7.628,4	259,01	7.628,4	259,01
5,90	7.372,0	250,30	7.372,0	250,30
6,00	7.128,3	242,03	7.128,3	242,03

(Fuente: los autores)

¹¹⁵ Beer, F.P.; Johnston, E.R.Jr.; DeWolf J.T. (c2001). *Mecánica de Materiales*. 3.ed..México.; McGraw-Hill

3.8.4 Esfuerzos máximos de compresión en la viga columna

Para que el anterior estudio tenga validez se debe incorporar información adicional en donde se pruebe que los esfuerzos producidos por la compresión de la viga columna, no exceden los valores calculados para los esfuerzos críticos de pandeo.

Una de las formas de obtener esta información es incorporando la siguiente ecuación que determina el esfuerzo normal producido por el momento flector aplicado a una viga (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

$$\sigma = (M \times c) \div I \quad (54)$$

En donde M es el momento flector producido por el peso de la pluma y los accesorios aplicado en un sector determinado, c es la distancia del punto de interés al eje neutro, e I es el momento de inercia alrededor del eje.

Por otro lado, se necesita determinar el esfuerzo normal producido por el peso de la columna, la pluma y los accesorios; así como también la extensión de la Ecuación (54) hacia los ejes "xx" y "yy". Es por esto que la ecuación de análisis es la siguiente, en la que se determina el máximo esfuerzo de compresión en un punto crítico (Beer, Johnston & DeWolf, 2001):

$$\sigma_{max,comp} = P \div A + M \times c \div I_{xx} + (M \times c) \div I_{yy} \quad (55)$$

Dónde P es el peso de la columna, la pluma y los accesorios; A es el área de sección transversal, M es el momento flector producido por el peso de la pluma y los accesorios aplicado en un sector, c es la distancia del punto crítico al eje neutro de la viga, I_{xx} e I_{yy} corresponden a los momentos de inercia alrededor de los ejes "xx" y "yy".

Considerando que la viga mide 6,0 m, el área de sección transversal mide 0,0295 m², y la densidad del Acero A - 36 es de 7860 kg/m³ (Beer, Johnston & DeWolf, 2001); se determina que el peso estimado de la columna es de 1390 kg aproximadamente.

Luego se consideró que la viga pluma W 14 x 26 tiene una masa lineal de 38,6 kg/m (26 lb/ft)¹¹⁶. Además como su longitud es de 6,0 m, la masa de la pluma es de 230 kg.

Por otra parte la masa de la cabeza de soldadura, correspondiente a la unidad Lincoln NA5-S, se estima en 12 kg¹¹⁷, la caja de control para soldadura, denominada como Lincoln NA-5N, tiene una masa estimada según fabricante de 30 kg¹¹⁸, el servomotor lineal tiene una masa de 113 kg¹¹⁹, cada conjunto de servomotor para el desplazamiento de la viga pluma y su sistema de transmisión, incluyendo bases de monturas y accesorios, tiene una masa total de 17,5 kg¹²⁰, y la base para la viga pluma tiene una masa de aproximadamente 100 kg. No se incluye el peso de los demás accesorios montados sobre la viga, pero se pueden aproximar como la suma del peso del rodete de electrodos de soldadura y otros equipos adicionales. Sin lo último la masa total del sistema es de 1910 kilogramos. Si se consideran las masas de los demás elementos que se no se incluyeron, se puede asumir que el conjunto tiene una masa total de 2000 kg.

Por otra parte la masa combinada del sistema cabeza de soldadura – servomotor lineal tiene una masa de 125 kg, y en la máxima extensión del brazo se encuentra que la distancia de palanca hacia la base de la pluma es de 5 m; por lo tanto se genera un momento en la base de magnitud 625 N*m.

Además si se toma en cuenta la masa de la viga pluma que es de 230 kg y se considera como una carga concentrada que actúa en su centro de gravedad que corresponde a la mitad de la longitud del brazo extendido, menos la distancia de aproximadamente un metro que hay hacia el otro extremo de la base; por lo tanto en la posición de máxima extensión la distancia a la base de la pluma es de 2 m; y por consiguiente se genera un momento adicional en la base de magnitud 460 N*m.

A esto se le debe restar el momento que producen al otro lado tanto un contrapeso de 90 kg generado por los 40 kg a 60 kg del rodete de electrodos y otros 30 kg adicionales, así como la masa del control de soldadura Lincoln NA-N (30 kg). En ese caso la masa total

¹¹⁶ Structural Steel W Flange Section Properties - Engineers Edge LLC. <http://www.engineersedge.com>

¹¹⁷ The Lincoln Electric Company *NA 5 Manual*

¹¹⁸ The Lincoln Electric Company *NA 5 Manual*

¹¹⁹ Linear Servo Actuators (LSA). <http://www.intelligentactuator.com>

¹²⁰ Baldor Electric Company. <http://www.baldor.com>

del conjunto es de 120 kg, y se encuentran en el otro extremo de la base, generando un momento de (-) 120 N*m.

Finalmente el momento total generado corresponde a la suma de todos los momentos calculados, y por consiguiente equivale a 965 N*m.

Se debe considerar además que para una sección circular su momento de inercia en el eje "xx" es igual al eje "yy", ocasionando que la ecuación (55) se simplifique más. Con estos datos y los que se incorporaron respecto a las propiedades de la viga columna se calcula que el máximo esfuerzo de compresión que es de:

$$\sigma_{\max} = ((2000 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2)) / 0,0295 \text{ m}^2 + 2 \times (965 \text{ N*m} \times 0,20 \text{ m}) / (5,20 \times 10^{-4} \text{ m}^4)$$

$$\sigma_{\max} = 1,40 \text{ MPa}$$

Este resultado confirma que no existe ningún problema con la deflexión de la columna del manipulador. Incluso en el caso de que la columna mida 6 m de altura, se tendrá una capacidad de resistencia a la deflexión vertical de hasta 242 MPa, lo cual equivale a cerca de 172,85 veces el esfuerzo producido por el peso y momentos flectores de todo el sistema manipulador de soldadura.

3.9 Estimación inicial de costos de fabricación

3.9.1 Precios por tipo de material, tarifas por servicios y costo de accesorios

Los materiales de construcción, así como también el costo unitario de los accesorios que incluye la máquina, y las tarifas por servicios de manufactura se deben considerar a la hora de establecer un presupuesto base que indique cuánto debe ser inicialmente el valor estimado de la máquina manipuladora de soldadura.

Todos los costos analizados se basaron en un método de inspección de acuerdo a las cifras económicas actuales que preceden de la realidad económica de un país como lo es Estados Unidos de Norteamérica. De ahí se obtuvieron una serie de índices de precios de materiales industriales, servicios laborales y costos de equipos de manufactura, así como también de elementos fabricados que cumplen un propósito para el cual deberá ser diseñado según los requerimientos del cliente.

Las bases consultadas con referencia a este tema incluyen a organizaciones como la Secretaría de Censos (US Census Bureau)¹²¹, La Secretaría de Estadísticas Laborales (Bureau of Labor Statistics)¹²², la Reserva Federal (Federal Reserve)¹²³ y el Diario de Investigación Económica conocido también por sus siglas en Inglés REPEC (Research Papers in Economics)¹²⁴ todas ellas pertenecientes a Estados Unidos.

El método que se usó para estimar el costo base parte primero del establecimiento de los precios iniciales para cada uno de los aspectos estudiados, y luego de acuerdo con la cantidad de materia prima que se necesita comprar para comenzar a construir la máquina. Se agregó el costo de las unidades de equipos (computadoras, fuentes de poder, cables conectores, PLC, equipos de soldadura por arco sumergido, motores eléctricos, cojinetes, muñoneras, entre otros) que se soliciten y el número de horas operario estimados para completar el trabajo de construcción. Con todo esto se aproxima un presupuesto de construcción que se considerará como el costo base del proyecto.

¹²¹ US Census Bureau of Statistics. <http://www.census.gov>

¹²² Bureau of Labor Statistics. <http://www.bls.gov>

¹²³ Federal Reserve of the US. <http://www.federalreserve.gov>

¹²⁴ Research Papers in Economics. <http://ideas.repec.org>

A continuación se muestran una serie de tablas en donde se indican los valores de precios, tarifas y costos que se estimaron de los índices que indican estas organizaciones desde los años 2011 al 2012 según lo consultado a la industria.

Cuadro 12: Determinación de precios, tarifas y costos

Componente	Descripción de Venta	Precio al comprador
Costo del Acero	Cantidad	\$1,50
Soldador Profesional	Tarifa por Hora	\$10,00
Materiales de Soldadura	Paquete	\$2,00
Técnico en Manufactura	Tarifa por Hora	\$7,00
Herramientas de Corte	Cantidad	\$3,00
Cojinete	Unidad	\$250,00
Muñonera	Unidad	\$100,00
Motor Eléctrico de 300 Watts	Equipo	\$600,00
PLC (Controlador Lógico)	Equipo	\$800,00
Computadora Estacionaria	Equipo	\$600,00
Cadenas y Catarinas	Conjunto	\$700,00
Piñón y Cremallera	Conjunto	\$1.500,00
Servomotor Lineal	Equipo	\$1.200,00
Caja para soporte de la Pluma	Producto manufactura	\$1.800,00
Base de la Columna	Producto manufactura	\$5.000,00

(Fuente: los autores)

El costo del acero se estableció para una referencia en kilogramos, ya que en norteamérica el material se vende por tonelada, o bien por unidad de vigas de acuerdo al tipo de viga, perfil y tamaño (longitud).

El paquete de materiales de soldadura se encuentra en presentaciones de cajas para uso comercial, pero varía de un fabricante a otro y no es por lo tanto un aspecto determinante en la forma cómo se distribuyan, sino que lo realmente importante es el costo promedio del electrodo de soldadura.

El precio indicado para las herramientas de corte se refiere a la cantidad por elementos de herramienta de corte, o bien por presentaciones por peso de paquete. Las herramientas se especifican para el promedio de costo de materiales que necesitará el trabajador para cortar el acero, para pulirlo y para remover restos de material desechado.

En la siguiente tabla se muestra la segunda parte de los precios determinados para todos los tipos de costo establecidos.

Cuadro 13: Determinación de precios, tarifas y costos para otros accesorios

Componente	Descripción	Precio
Perno Acero Medio Carbono SAE GRADO 8 + Tuerca Hex.	Conjunto	\$15,00
Contrapeso para la Columna	Producto	\$650,00
Equipo de Soldadura Arco Sumergido (SAW)	Equipo	\$4.500,00
Software de Trabajo para PC y PLC	Unidad	\$3.000,00
Controlador/Potenciómetro Equipo Soldador	Equipo	\$800,00
Cable eléctrico AWG 8 (15 pies) para Fuente de Poder	Unidad	\$100,00
Conectores a tierra (Bornes)	Unidad	\$15,00
Fuente de Poder AC/DC 220V	Equipo	\$5.000,00
Contrapeso para la Viga Pluma	Producto	\$350,00
Luces Piloto y Cable de Control (30 pies)	Equipo	\$475,00
Caja Supresora Picos de Voltaje p/PC	Equipo	\$500,00
Relays y Sistema de Alimentación para Soldadura	Equipo	\$3.700,00
Rieles para Cojinete en la Viga Columna	Producto	\$2.600,00
Amortiguador/Freno para la Viga Pluma	Producto	\$2.300,00
Control de Desplazamiento de Viga Pluma	Equipo	\$2.200,00

(Fuente: los autores)

Para esta tabla se debe considerar un diámetro de los pernos de 38,0 mm (1,5 in nominales), debido a que este es el diámetro interno del cojinete seleccionado.

3.9.2 Estimación de horas de trabajo para el desarrollo del proyecto

Se establecen de la siguiente forma las horas de trabajo que deberán tener en un principio los constructores del proyecto, asumiendo un plazo máximo de dos semanas para su conclusión.

Cuadro 14: Estimación de horas de trabajo

	Trabajadores	Horas x Trabajador	Días
Soldador Profesional	1	10	12
Técnicos en Manufactura	2	10	18

(Fuente: los autores)

El número de horas por trabajador corresponde a una jornada completa laboral de 10 horas por día, y dentro de las horas de trabajo se incluyen las horas de almuerzo. No se incluyen aspectos como jornada neta laboral, sino que se asume que ese es el plazo real para la ejecución del proyecto diario.

Respecto al número de días se debe considerar la cantidad de jornadas completas que se necesitará para ejecutar el proceso por etapa de construcción del proyecto.

Mientras tanto, el número de trabajadores que se necesitan por fase de construcción se relaciona con la cantidad de personal requerido. Para el caso de la parte técnica de manufactura se considera que deben haber dos profesionales a su cargo: un profesional tutelar y un profesional asistente. Para el trabajo de soldadura se requiere sólo una persona encargada, ya que deberá lograr un acabado y propiedades consistentes, con el fin de que existan uniformidad en el trabajo que se está aplicando. Sin embargo, de haber más de un soldador calificado con capacidad suficiente para poder realizar el trabajo, se podrá entonces asignar la tarea a dos o más personas con experiencia, pero lo ideal sería que el trabajo lo hiciera sólo un soldador para que el mismo pueda encontrar sus propios errores sin necesidad de que el trabajo tenga que ser inspeccionado en más de una ocasión por otro profesional. También se prefiere que si se trabaja con dos o más operarios ellos tengan la posibilidad de analizar el avance del trabajo de soldadura con el fin de asegurarse de que la calidad sea la correcta.

3.9.3 Costos totales estimados para el proyecto

La siguiente tabla presenta el resumen de los costos iniciales estimados para la totalidad del proyecto, incluyendo las fases de material, equipos y manufactura.

Cuadro 15: Costos totales estimados del manipulador de soldadura

COSTO DEL MANIPULADOR DE SOLDADURA	Monto	Cantidad
Acero Estructural	\$1.500,00	1000
Soldador Profesional	\$1.200,00	
Materiales de Soldadura	\$20,00	10
Técnicos en Manufactura	\$2.520,00	
Herramientas de Corte	\$45,00	15
Cojinetes	\$4.000,00	16
Muñoneras	\$1.200,00	12
Motor Eléctrico	\$1.200,00	2
PLC	\$800,00	1
Computadora	\$600,00	1
Cadenas y Catarinas	\$700,00	1
Piñón y Cremallera	\$1.500,00	1
Servomotor Lineal	\$1.200,00	1
Caja para soporte de la Pluma	\$1.800,00	1
Base de la Columna	\$5.000,00	1
Perno Acero Medio Carbono SAE GRADO 8 + Tuerca Hex.	\$525,00	35
Contrapeso para la Columna	\$650,00	1
Equipo de Soldadura Arco Sumergido (SAW)	\$4.500,00	1
Software de Trabajo para PC y PLC	\$3.000,00	1
Controlador/Potenciómetro Equipo Soldador	\$800,00	1
Cable eléctrico AWG 8 (15 pies) para Fuente de Poder	\$100,00	1
Conectores a tierra (Bornes)	\$15,00	1
Fuente de Poder AC/DC 220V	\$5.000,00	1
Contrapeso para la Viga Pluma	\$350,00	1
Luces Piloto y Cable de Control (30 pies)	\$475,00	1
Caja Supresora Picos de Voltaje p/PC	\$500,00	1

Relays y Sistema de Alimentación para Soldadura	\$3.700,00	1
Rieles para Cojinete en la Viga Columna	\$2.600,00	1
Amortiguador/Freno para la Viga Pluma	\$2.300,00	1
Control de Desplazamiento de Viga Pluma	\$2.200,00	1
SUBTOTAL	\$50.000,00	
Pintura y Acabado (10%)	\$5.000,00	10%
Imprevistos (10%)	\$5.000,00	10%
GRAN TOTAL	\$60.000,00	

(Fuente: los autores)

Los costos por acabado (10%) e imprevistos (10%) se estimaron en porcentajes del costo final del proyecto, que por el momento no están previstos explícitamente porque dependen de decisiones a cargo de los gestores del MET.

A fin de cuentas se resume que el costo inicial estimado para el manipulador de soldadura es de US\$ 50 000,00 para el presupuesto sencillo sin cotizar acabado superficial ni gastos imprevistos; mientras que el costo total incluyendo acabado e imprevistos es de US\$ 60 000,00. En caso de que se requiera acabado pero que no sea necesaria una inversión adicional que no estuviera prevista el costo total del manipulador será de US\$ 55 000,00. En todo caso se estima que el valor total del sistema manipulador de soldadura ronda entre los valores límite establecidos de US\$ 50 000,00 a US\$ 60 000,00.

Por último se efectuó una división del presupuesto por rubros económicos, catalogándolos de la siguiente forma: materiales, mano de obra, instalación, equipo y accesorios. Los resultados se muestran en el siguiente gráfico.

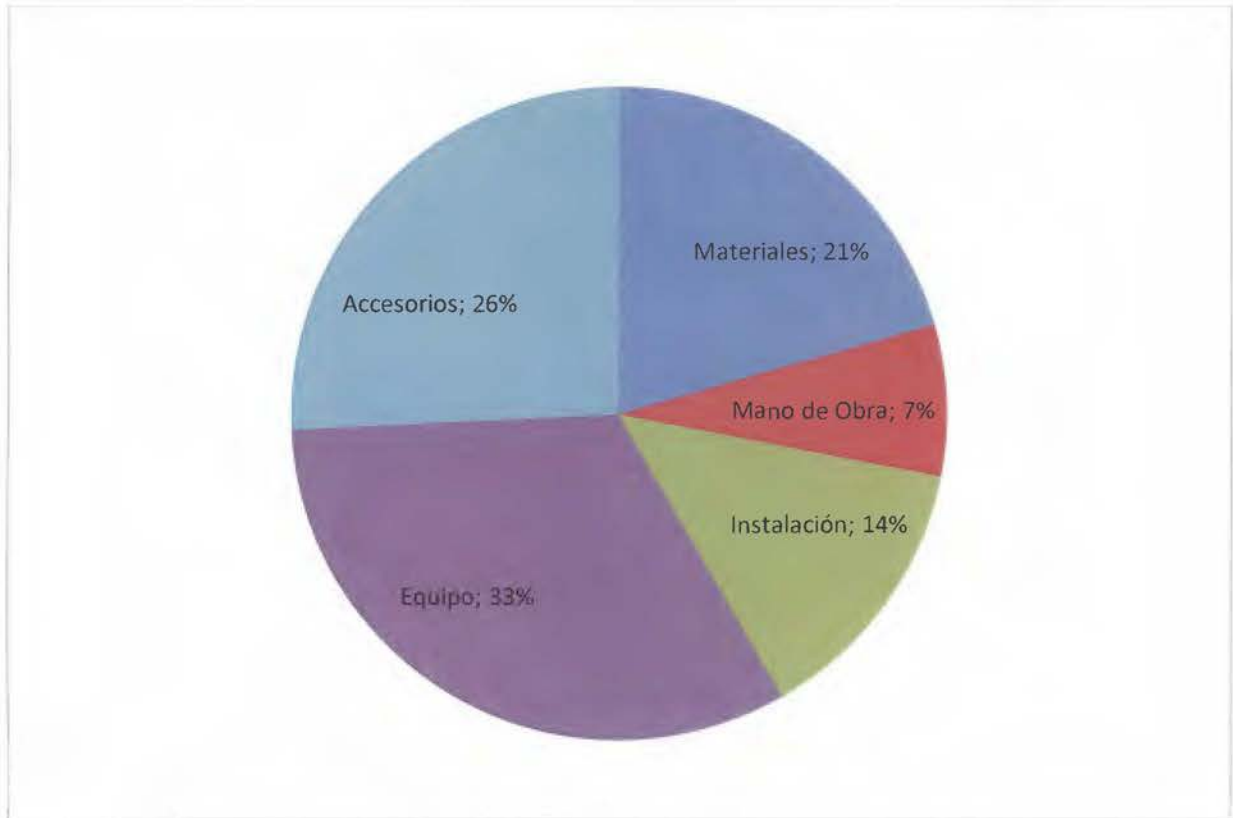


Figura 55: Distribución porcentual de costos para el presupuesto inicial
(Fuente: los autores)

El costo de mano de obra para este proyecto se estimó en un 7%, incluye principalmente el salario del personal técnico que construye la máquina. Sin embargo este valor podría aumentar dependiendo de las condiciones reales de trabajo que se planifiquen en el MET y con el número de trabajadores asignados, lo cual significa que el porcentaje anterior representa sólo una estimación mínima de cuánto podrá costar el proyecto por la mano de obra.

Lo que no se puede cuestionar son los altos costos de compra de equipo y accesorios industriales de alta tecnología – los cuales se caracterizan por los sistemas eléctricos, mecánicos, computarizados y de soldadura – que componen el manipulador de brazo automático para soldar, ya que cerca del 60% del proyecto está conformado por estos dos segmentos. Además se puede visualizar que el costo de adquisición de materiales de construcción para elaborar la estructura completa es también bastante significativo (20%) y el costo de instalación de los sistemas (equipo y accesorios) es cercano a un 15%.

CAPÍTULO 4
CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

El trabajo cumplió con el objetivo general del proyecto dado que el diseño propuesto del manipulador es una solución expedita, completa y específica a las necesidades inmediatas de la producción de tuberías para el departamento de soldadura. El proceso de diseño se documentó minuciosamente y se ha cuidado de incluir referencia a las más actuales fuentes de información bibliográfica y comercial pertinente al sistema propuesto.

- Se elaboraron diagramas de construcción del manipulador y contienen las dimensiones e información para elaborar un plan completo para manufactura de la máquina. Son un excelente insumo por cuanto están acompañados con el presente informe que justifica parte por parte el propósito de sus elementos, lo que es muy útil al momento de construirla. Adicionalmente, estos diagramas serán indispensables en el futuro cuando deban hacerse modificaciones o mantenimiento a la unidad manipuladora de soldadura.

El diseño de un manipulador de soldadura se convierte al fin en un proyecto que involucra la consecución de varias fuentes de conocimiento y que el aprovechamiento del mismo depende de la comprensión de todos y cada uno de los detalles descritos en el trabajo.

- Se elabora un trabajo que a la fecha no se tiene a disposición una publicación o tesis de grado universitario de la Universidad de Costa Rica en que se haga referencia explícita o directa a equipos manipuladores automatizados de soldadura por arco sumergido de precisión como es el caso del presente trabajo. Adicionalmente, dado su grado de detalle, es de alto valor para próximas investigaciones de diseño mecánico relacionadas con el tópico específico.
- El principal aporte del trabajo consiste en el desarrollo de una propuesta viable que cubra las principales características requeridas para una óptima operación del equipo que permita mejorar calidad e incrementar el volumen de producción. Además, el presente documento será una referencia para los profesionales que inicien labores en el MET, puesto que es una síntesis integral de las características de estos equipos de soldadura del proceso de diseño asociado. Parte del propósito es estimular a que el mismo personal incorpore variantes de

diseño para mejorar su desempeño e incorporar tecnologías nuevas o de mejores prestaciones en términos operativos o de costos.

- Se logra diseñar un equipo en que no se dependerá de un proveedor exclusivo internacional, se acoplará mejor a una cultura local de constructores y operarios, y que su costo inicial y de operación es mucho menor. Esto por cuanto no existirá dependencia directa con una única compañía transnacional para adquirir un completo nuevo equipo manipulador de soldadura por arco sumergido de precisión, salvo en el caso en que se deban incorporar elementos ajenos dentro de la construcción que no sean posibles adquirirlos en el MET, pero que se encuentran disponibles a la venta por parte de alguna empresa extranjera; esto propiamente hace referencia a los equipos de soldadura, computadoras, motores, controladores lógicos programables y fuentes de poder, entre otros.
- La realidad económica del país y en especial la de instituciones estatales obliga a considerar este tipo de diseños para ser austeros con sus recursos, siempre que sus prestaciones, costo y garantía de operación cumplan con las expectativas de trabajo.
- El tiempo transcurrido durante la cotización de nuevas unidades manipuladoras de soldadura a empresas extranjeras, la entrega, el embarque y transporte, junto con los plazos normados para estos y otros pasos con los que se debe cumplir en la institución se convertirán en parte de procedimientos de cotización con carácter opcional, sin recurrir a la medida financiera de primera mano o con prioridad inicial. Una unidad que se produzca en el propio taller del MET, servirá también para que los trabajadores adquieran experiencia en el manejo y construcción de estos equipos, lo que amplía sus habilidades básicas de manufactura y mejora la capacidad técnica de la institución tanto en maquinaria como en la producción de tubería.

Por otro lado, el impacto social que esto tendrá se reflejará en los trabajadores del MET, que son la principal población beneficiada, porque se pretende que accedan a plazas a tiempo completo para proveer atención permanente a la construcción, operación y mantenimiento de los equipos de soldadura. Por eso uno de los objetivos básicos del ICE,

a través de esta decisión de conformar su propio equipo de industria, es el de generar un empleo adicional para sus técnicos y grupos de trabajo, quienes tendrán que estar al cargo de estas y otras actividades en su jornada laboral.

- Se concluye también que con el equipo operando una vez que haya sido instalado en su lugar de trabajo, se obtendrá un ahorro considerable en los tiempos de producción de las tuberías.
- Si se agiliza el proceso de construcción de las tuberías, es natural que lleguen con mayor presteza a su destino en una instalación hidroeléctrica, pero se debe aclarar que la habilidad para procesar los segmentos de tubería soldada durante las posteriores etapas de preparación y acabado superficial dependerán finalmente de la capacidad que disponga el MET para transportar esas tuberías una vez que se hayan terminado de soldar.

El futuro del proyecto, depende ahora cómo se desarrolle su construcción y operación en el taller para el que se concibió. La voluntad política del ICE para apoyar esta clase de iniciativas marcarán el rumbo que pueda tener este manipulador de soldadura que probará su conveniencia conforme haya resultados de producción y los encargados de su puesta en marcha acojan la meta de desarrollar su propia tecnología para el beneficio del país.

4.2 Recomendaciones

En caso de que se incorporen nuevos elementos al ensamble propuesto, se recomienda que en el proceso de selección de componentes se inicie por los elementos críticos y siempre que sea pertinente utilizar modelos matemáticos precisos que se ajusten a las condiciones de operación para garantizar su rendimiento y evitar costos innecesarios por sobredimensionado.

En relación a lo anterior, es de mucha utilidad generar documentación histórica de costos con el fin de efectuar proyecciones de cuánto podrán costar otras unidades en caso de que hay demanda suficiente para ello.

En el diseño de elementos estructurales es importante determinar con precisión la magnitud de los esfuerzos locales en zonas críticas del sistema y encontrar los parámetros con mayor impacto en la resistencia de los materiales contra las fuerzas aplicadas. Esto permite establecer un valor óptimo para dichos parámetros, funcionando como referencia al seleccionar elementos disponibles en el mercado, y poder así contar con un sistema de selección más flexible.

Cuando se calcule la resistencia de elementos estructurales de geometría compleja, es preferible detallar el análisis de las principales cargas a hacer una recolección exhaustiva de cargas que puedan resultar difíciles de estimar. Las mejoras, de ser necesarias, pueden hacerse una vez que se construya un prototipo para evaluar su comportamiento, e incorporar las mejoras que puedan ser necesarias en una siguiente generación del elemento en cuestión.

Por otra parte, se recomienda al departamento de soldadura del MET, que adecúe su flujo de procesos a los nuevos tiempos de procesamiento, incluyendo el montaje y desmontaje de las tuberías soldadas a los cables de transportación de las grúas. La idea es que mientras una sección de tubería sea soldada, la sección saliente se transporte a la fase de acabado y preparación superficial para que no haya tiempos de espera en la estación de soldadura.

Como se trata de un prototipo, se recomienda al MET que en la primera etapa de puesta en marcha y operación del equipo tenga en inventario una selección de repuestos críticos especialmente susceptibles a falla. De particular interés son los motores eléctricos, el

servomotor lineal, controlador lógico programable (PLC), las fuentes de poder para los motores de pasos, el equipo de soldadura por arco sumergido, rodamientos, muñoneras, cables de electricidad y accesorios críticos del PLC, como tarjetas de memoria y los módulos de comunicación y adquisición de datos.

La actualidad del diseño debe aprovecharse cuanto antes para evitar que se convierta en una máquina de futuro obsoleto, en especial porque se evitan los costos en valor monetario y tiempo de un rediseño. Dado el alto costo del proyecto y su potencial impacto positivo en la producción de tubería de presión, el equipo deberá mantenerse actual a través de la incorporación paulatina de mejoras y actualizaciones asociadas a mantener o mejorar la calidad de los trabajos que lleva a cabo.

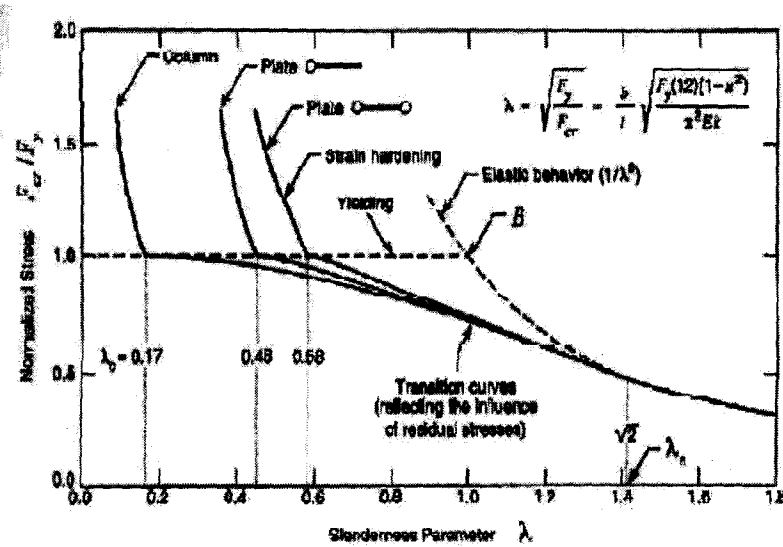
En suma, se recomienda con mucho entusiasmo que el diseño propuesto se use para que el MET construya un prototipo funcional en el transcurso de los meses próximos a la presentación formal de este trabajo.

ANEXOS

APÉNDICE A

**Coeficientes de Doblamiento de Placas en
Compresión para diferentes condiciones de frontera**

Figure 7 Coefficients for plate buckling in compression for various boundary conditions

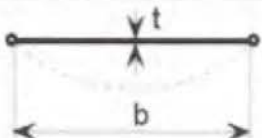
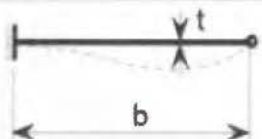
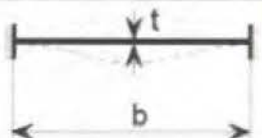
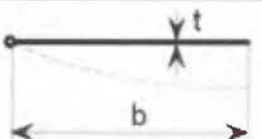
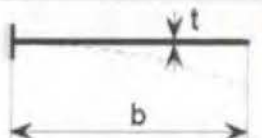


Ref: Englekirk, R.E. Steel Structures: Controlling Behaviour Through Design. Wiley: USA, 1994.

Figure 3.4.4 Normalized critical stress for plate elements as a function of slenderness parameter, λ . (Reproduced from *Steel Structures: Design and Behavior*, 2nd Edition, by Charles G. Salmon and John E. Johnson, copyright © 1980 by Charles G. Salmon and John E. Johnson. Reprinted by permission of Harper Collins Publishers, Inc.)

APÉNDICE B

**Factores de Frontera y Factor Lambda para la
ecuación de Pandeo Local**

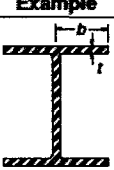
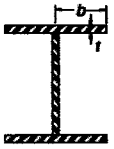
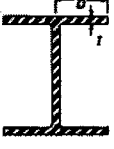
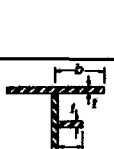
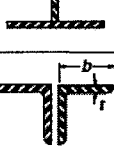
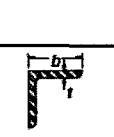
Case	Description of support at the unloaded edges		k
1	Both edges simply supported		4,00
2	One edge simply supported, the other fixed		5,42
3	Both edges fixed supported		6,97
4	One edge simply supported, the other free		0,425
5	One edge fixed, the other free		1,277

Ref: European Steel Design Education Programme – ESDEP Lectures (1993)

APÉNDICE C

**Valores críticos de espesor para elementos sometidos
a compresión**

TABLE B4.1
Limiting Width-Thickness Ratios for
Compression Elements

Case	Description of Element	Width Thickness Ratio	Limiting Width-Thickness Ratios		Example
			λ_p (compact)	λ_r (noncompact)	
Unstiffened Elements	1 Flexure in flanges of rolled I-shaped sections and channels	b/t	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$1.0\sqrt{E/F_y}$	
	2 Flexure in flanges of doubly and singly symmetric I-shaped built-up sections	b/t	$0.38\sqrt{E/F_y}$	$0.95\sqrt{k_c E/F_y}$ ^{[a],[b]}	
	3 Uniform compression in flanges of rolled I-shaped sections, plates projecting from rolled I-shaped sections; outstanding legs of pairs of angles in continuous contact and flanges of channels	b/t	NA	$0.56\sqrt{E/F_y}$	
	4 Uniform compression in flanges of built-up I-shaped sections and plates or angle legs projecting from built-up I-shaped sections	b/t	NA	$0.64\sqrt{k_c E/F_y}$ ^[a]	
	5 Uniform compression in legs of single angles, legs of double angles with separators, and all other unstiffened elements	b/t	NA	$0.45\sqrt{E/F_y}$	
	6 Flexure in legs of single angles	b/t	$0.54\sqrt{E/F_y}$	$0.91\sqrt{E/F_y}$	

Specification for Structural Steel Buildings, March 9, 2005
 AMERICAN INSTITUTE OF STEEL CONSTRUCTION, INC.

APÉNDICE D

Requerimientos de Instalación de PLC y Servomotores

Requerimientos de instalación para motor DSM

Especificaciones de condición local

Los motores DSM están diseñados para condiciones de aplicación en áreas cubiertas bajo techo, con limitaciones de instalación fijas permanentemente y espacio localizado. Este tipo de motores deben estar completamente sujetos desde sus orificios ubicados en el plato de montura.

Respecto a la operación del equipo, la temperatura en el disipador de calor no debe exceder 85°C (grados Celsius) de acuerdo con especificaciones del fabricante. Por otra parte la temperatura del motor tampoco debe superar los 100°C (grados Celsius) de acuerdo con las mismas especificaciones.

Especificaciones de velocidad y torque

Las siguientes Tablas muestran las dimensiones, la masa y el valor nominal de torque para el modelo DSM23x-348. También se especifica la información de inercia del rotor.

Cuadro 1b: Dimensiones Estándares Motor DSM

Modelo DSM	Dimensiones (mm)		Masa (kg)
	Longitud Estándar	Longitud Máx.	
DSM23x-348	98.0	116.1	1.09

(Fuente: Baldor Electric Company)

Cuadro 2b: Especificaciones de Torque e Inercia del Motor DSM

Modelo	Torque Máximo (N*cm)	Inercia del Rotor (kg*cm ²)
DSM23x-348	169	0.46

(Fuente: Baldor Electric Company)

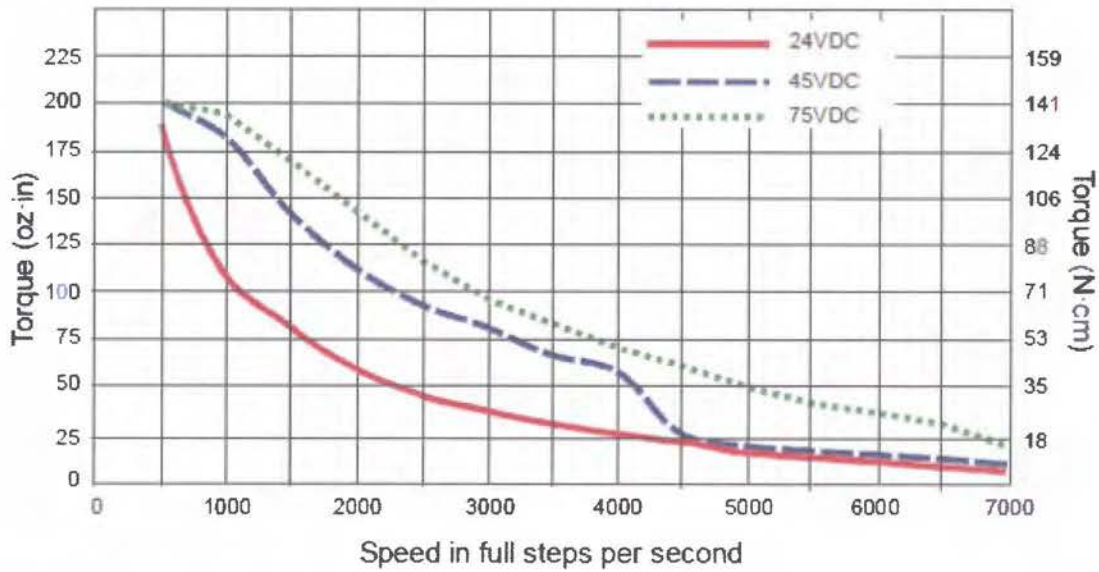


Figura 1b: Curva de rendimiento para el modelo DSM23x-348
(Fuente: Baldor Electric Company)

Especificaciones del sistema de control

Se necesita de una computadora (PC) que cumpla con los siguientes requisitos de sistema:

Cuadro 3b: Especificaciones de Equipo de Cómputo para Control del Motor DSM

	Especificación Mínima	Recomendado
Procesador	Intel Pentium 133MHz	Intel Pentium II 400 MHz o superior
RAM	32MB	128MB
Espacio en Disco Duro	40MB	60MB
CD-ROM	Equipo de CD-ROM instalado	
Puerto Paralelo	Standard 25 pin – Puerto Paralelo Tipo D	
Monitor	800 x 600, 256 colores	1024 x 768, color 16bit
Mouse	Instalado en la computadora	
Sistema Operativo	Windows 95, NT	Windows 98, ME, NT, 2000 SP1, XP

(Fuente: Baldor Electric Company)

Adicionalmente se necesita de un cable de puerto paralelo para conectar a la computadora. Se recomienda en particular el tipo CBL054-501.

La computadora debe contener el programa conocido como Baldor SPI Interface. Esta es una simple aplicación para configurar el motor DSM.

Para configurar los parámetros del software se cuenta con una lista de valores que representan el ámbito de funcionamiento del programa. En particular existen cuatro parámetros de configuración para el DSM. Los parámetros que se configuren deben ser salvados en la memoria del sistema una vez que se hayan escogido. La siguiente Tabla muestra la suma de todos los parámetros y su función, ámbitos, unidades y valores predeterminados:

Cuadro 4b: Parámetros Medidos en el Control del Motor DSM

Parámetro	Nombre	Ámbito	Unidades	Predeterminado
MHC	Motor hold current	0-100	%	5
MRC	Motor run current	1-100	%	25
MSEL	Microstep resolution	2, 4, 5, 8, 10, 16, 25, 32, 50, 64, 125, 128, 250, 256	micropasos por paso	256
DIR_OVRID	Motor direction override	0 o 1		CW

(Fuente: Baldor Electric Company)

1. Motor Hold Current (MHC) (Corriente de Operación del Motor)

La corriente de operación del motor (MHC) es un parámetro que establece la corriente de operación del motor como un porcentaje de la corriente máxima de entrada al posicionador DSM. Cuando este parámetro se ajuste a 0 (cero) el posicionador se desconectará cuando esté activo (en funcionamiento), esto dicho en otras palabras quiere decir que el motor se apagará.

2. Motor Run Current (MRC) (Corriente de Arranque del Motor)

La corriente de arranque del motor (MRC) es un parámetro que establece la corriente de arranque del motor como un porcentaje de la corriente máxima de entrada al posicionador DSM.

3. Microstep Resolution Select (MSEL) (Selector de Resolución de Micropasos)

Este parámetro especifica la resolución de micropasos del DSM. Esto se refiere al número de pasos por cada revolución del motor. La siguiente tabla indica los valores posibles para el MSEL.

Cuadro 5b: Especificación de Micropasos por Revolución para Motor DSM

MSEL (Valores binarios)	Micropasos por revolución	MSEL (Valores decimales)	Micropasos por revolución
2	400	5	1000
4	800	10	2000
8	1600	25	5000
16	3200	50	10000
32	6400	125	25000
64	12800	250	50000
128	25600		
256	51200		

(Fuente: Baldor Electric Company)

4. Direction Override (DIR_OVRID) (Conmutador de Dirección)

El parámetro Conmutador de Dirección (DIR_OVRID) se encarga de hacer girar el motor en la dirección relativa de acuerdo a la señal de entrada de dirección, logrando establecer la dirección del motor de acuerdo a los requerimientos de operación del sistema.

Especificaciones de conexión básica

El software debe establecer comunicación inmediatamente con el DSM. En caso de fallar este paso, la palabra "Desconectado" aparecerá en rojo. Lo primero que se debe hacer es asegurarse de que el cable del motor esté conectado y además reciba energía de la fuente de poder. Seguidamente se debe seleccionar el Puerto desde el Menú del Programa. Se debe seleccionar desde la lista de opciones el puerto paralelo más apropiado (específicamente se recomienda el puerto paralelo LPT1).

La siguiente Tabla muestra los calibres de cable que se deben utilizar para un adecuado funcionamiento del motor. Estos cables normalizados por la AWG (American Wire Gauge) están determinados por la corriente requerida y por la longitud del cable. Para cables lógicos se debe utilizar el calibre AWG22.

Cuadro 6b: Cables normalizados por la AWG que deben usarse en la Conexión

Corriente de Suministro	Longitud de cable (metros)	Mínimo Calibre	
		AWG	mm ²
1 Amperio pico	3	20	0.5
	8	20	0.5
	15	18	1.0
	23	18	1.0
	30	16	1.3
2 Amperios pico	3	20	0.5
	8	18	1.0
	15	16	1.3
	23	14	2.0
	30	14	2.0
3 Amperios pico	3	18	1.0
	8	16	1.3
	15	14	2.0
	23	12	3.3
	30	12	3.3
4 Amperios pico	3	18	1.0
	8	16	1.3
	15	14	2.0
	23	12	3.3
	30	12	3.3

(Fuente: Baldor Electric Company)

Especificaciones del PLC

El modelo escogido es Simantic PLC S7-1200 de Siemens. Más específicamente el módulo CPU 1211C. La misma unidad está en plenitud de condiciones de capacidad para cumplir satisfactoriamente los requerimientos de la máquina manipuladora de soldadura.

Características físicas

- 1) Dimensiones: 90mm x 100mm x 75mm
- 2) Memoria de Trabajo: 25 Kilobytes
- 3) Memoria de Carga: 1 Megabyte
- 4) Memoria de Retención: 2 Kilobytes
- 5) Entradas y Salidas Digitales: 6 entradas, 4 salidas
- 6) Tableros de Señal: 1
- 7) Módulos de comunicación: 3
- 8) Contadores de alta velocidad: 3
- 9) Tarjeta de Memoria: Sí (opcional)
- 10) Velocidad de ejecución: 1 microsegundo por cada instrucción

Facilidad de comunicación entre dispositivos

Existe un puerto integrado del CPU conocido como Profinet que es capaz de soportar conexiones de Ethernet y sistemas de comunicación TCP/IP, los cuales pueden funcionar correctamente a través de software especial y dispositivos HMI. También se pueden conectar a otras CPU o dispositivos no relacionados con la marca Siemens a través de sistemas especiales de información en mecanismos de protocolo de comunicación TCP.



Figura 2b: Comunicación Computadora – CPU Siemens
(Fuente: Siemens AG)

Conexión a red local a través de Ethernet

El CPU y el dispositivo de operación HMI se pueden conectar a través de una configuración local que se puede crear directamente desde el sitio de trabajo, usando para ello la red Ethernet.

La red de conexión que se logra crear funciona para dos dispositivos.

Áreas de memoria, direccionamiento y tipos de dato

El Sistema CPU provee las siguientes áreas de memoria para uso del programa, datos y configuración:

1. Memoria de Carga

Esta memoria se utiliza para el uso del programa, manejo de datos y configuración del sistema. Sirve para almacenar los proyectos que serán utilizados por el CPU. Esta también puede ser utilizada en una tarjeta de memoria. La tarjeta de memoria provee una gran cantidad de espacio adicional que no se encuentra originalmente en el CPU.

2. Memoria de Trabajo

Esta se define como una memoria de ejecución de procesos por parte del programa que lo utiliza. El CPU traslada varios elementos de la memoria de carga a la memoria de trabajo. La memoria de trabajo puede perder la información si la energía se pierde, no obstante puede recuperar algo de la información perdida a través de la memoria de retención.

3. Memoria de Retención

Esta memoria está limitada para una cierta cantidad de valores de la memoria de trabajo. La misma se utiliza para almacenar ciertos valores seleccionados de algunas localidades del sistema cuando la energía se pierda. Una vez que esto sucede el CPU cuenta con una determinada cantidad de tiempo para almacenar los valores que quepan desde una localidad específica. Cuando el sistema se energiza de nuevo la memoria recuperada se envía de nuevo a la memoria de trabajo.

La tarjeta de memoria provee una opción alternativa para el almacenamiento del programa o bien para transferirlo. Cuando se instale la tarjeta de memoria, el CPU corre el programa directamente desde la tarjeta y no desde la memoria del CPU.



Figura 3b: Tarjeta de Memoria
(Fuente: Siemens AG)

Algunos de los tipos de dato que este sistema puede soportar son los siguientes:

Cuadro 7b: Tipos de Dato

Tipo de Dato	Tamaño (bits)	Ámbito
Bool	1	0 o 1
Byte	8	16#00 a 16#FF
Word	16	16#0000 a 16#FFFF
DWord	32	16#00000000 a 16#FFFFFFFF
Char	8	16#00 a 16#FF
Sint	8	-128 a 127
Int	16	-32768 a 32767
USInt	8	0 a 255
UInt	16	0 a 65535
String	Variable	0 a 254 bytes

(Fuente: Siemens AG)

Especificaciones del servomotor lineal (LSA)

Los siguientes datos corresponden a información técnica específica sobre características, condiciones y forma de diseño del Servomotor Lineal:

Ámbito de trabajo y capacidad máxima

1. Long Stroke

The LSA series now offers long stroke in a compact package.

- **LSA-N10 - Max Stroke - 4,100mm**
 - **LSA-N15 - Max Stroke - 4,150mm**
-

2. High Payload Capacity

The newly developed linear servo motor with a flat core achieves a maximum payload capacity of 30kg.

- **LSA-N10 - Max Payload - 15kg**
 - **LSA-N15 - Max Payload - 30kg**
-

3. High-Speed Operation at Accelerations up to 3G and Operating Speeds of up to 2,500mm/s with a Positioning Repeatability of $\pm 5\mu$

The linear servo motor does not have the inherent speed limitations of a ball screw and is able to achieve speeds of up to 3G and acceleration of 2,500mm/sec at a positioning repeatability of ± 5 microns (± 0.005 mm)

Figura 4b: Información básica de Servomotores Lineales (www.intelligentactuator.com)

Operaciones básicas del modelo

Model (Type)	Actuator Width (mm)	Slider		Stroke (mm)	Rated Thrust (N)	Max Payload (kg)	Max Speed (mm/s)
N10SS	100	Standard	Single	100~4100	54	15	2500
N10SM			Multi	100~3900			
N15SS	150	Standard	Single	150~4150	86	20	
N15SM			Multi	150~3950			
N15HS		High Thrust	Single	100~4100	125	30	
N15HM	Multi		150~3850				

Figura 5b: Ámbitos de funcionamiento (www.intelligentactuator.com)

Especificaciones comunes

Drive Method	Linear Servo Motor
Positioning Repeatability	±0.005mm
Dynamic Allowable Moment (Note 3)	Ma:76.4N·m Mb:46.3N·m Mc:25.7N·m
Overhand Load Length	340mm max in Ma direction, 340mm max in Mb/Mc directions
Base	Material: Aluminum
Applicable Controller	T2:SCON, SSEL, XSEL-P/Q
Cable Length (Note 4)	N: None S:3m M:5m X□□: Specified Length
Surrounding Air Temp	0~40°C, 85%RH (Non-condensing)

Figura 6b: Datos comunes (www.intelligentactuator.com)

Especificación de controladores aplicables

Applicable Controller	Max # of Controlled Axes	Operating Method	Power Supply Voltage
XSEL-P/Q	6 axis	Program	Single/three-phase 200 VAC
SSEL	3 axis	Program/Positioner	Single phase 200 VAC
SCON (Note 5)	1 axis	Pulse Train/Positioner	Single phase 200 VAC

Figura 7b: Controladores Aplicables (www.intelligentactuator.com)

Opciones de conexión directa

Name	Model	Remarks
Cable installation direction	CT2~4	Installation directions 2 to 4
User cable track, S Type	US1~US4	Installation directions 1 to 4
User cable track, M Type	UM1~UM4	Installation directions 1 to 4

Figura 8b: Métodos de Conexión (www.intelligentactuator.com)

Dimensiones del modelo básico

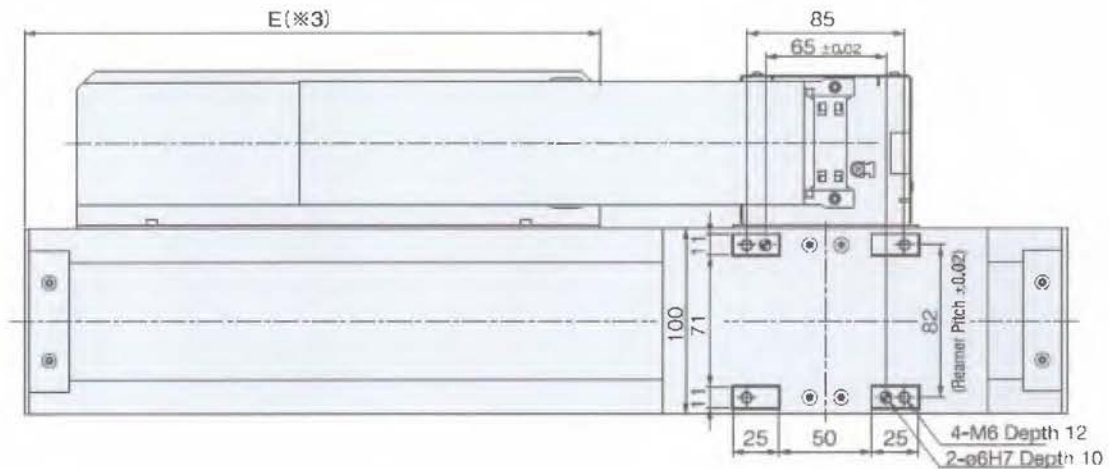
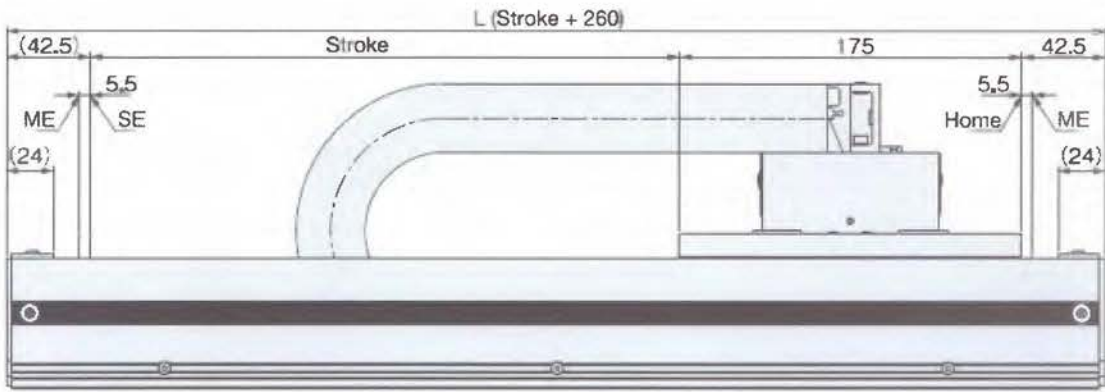


Figura 9b: Plano de Modelo A (www.intelligentactuator.com)



SE: Stroke End
ME: Mechanical End

Figura 10b: Plano de Modelo B (www.intelligentactuator.com)

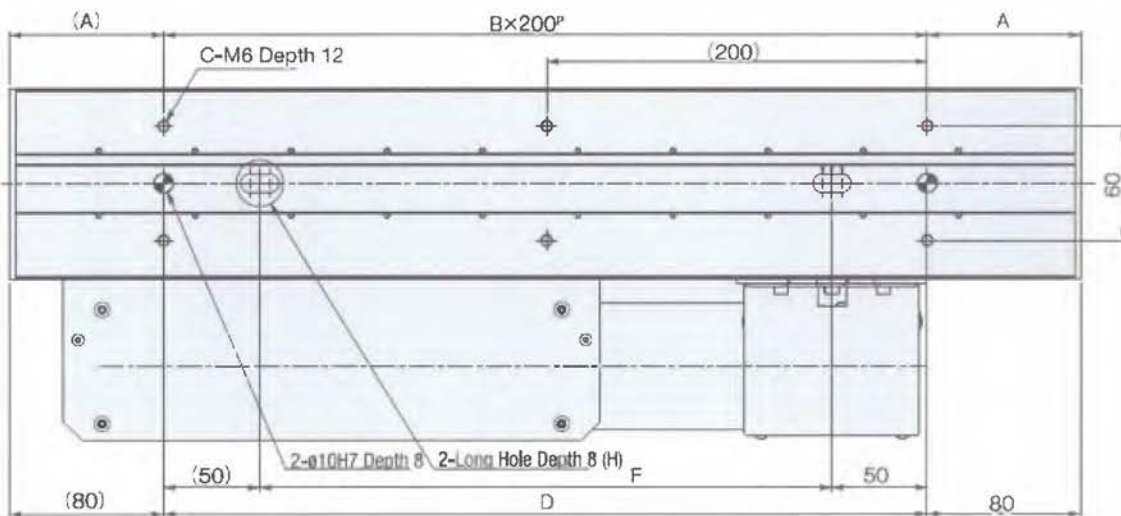


Figura 11b: Plano de Modelo C (www.intelligentactuator.com)

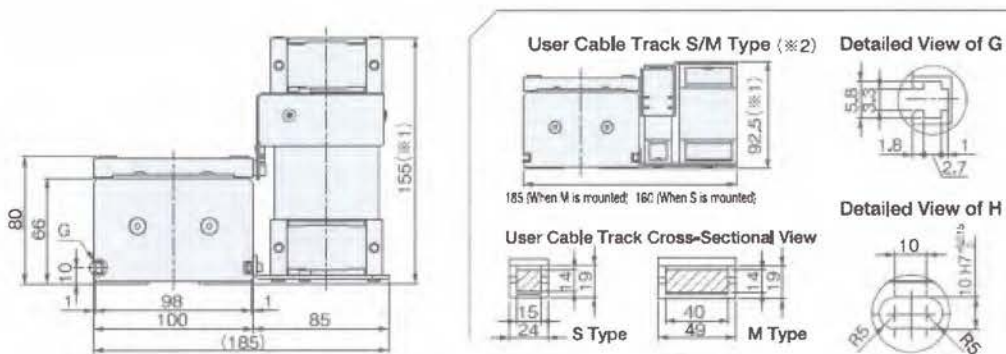


Figura 12b: Plano de Modelo D (www.intelligentactuator.com)

APÉNDICE E

**Esfuerzos normales de compresión obtenidos por el
método de análisis de pandeo sobre la columna
principal**

Cuadro 8b: Esfuerzos y cargas críticas sobre la columna principal

Altura de la columna (m)	$P_{cr}(x)$ (kN)	$\sigma_{cr}(x)$ (MPa)	$P_{cr}(y)$ (kN)	$\sigma_{cr}(y)$ (MPa)
4,05	15.645,1	531,20	15.645,1	531,20
4,10	15.265,9	518,32	15.265,9	518,32
4,15	14.900,2	505,91	14.900,2	505,91
4,20	14.547,6	493,93	14.547,6	493,93
4,25	14.207,3	482,38	14.207,3	482,38
4,30	13.878,8	471,23	13.878,8	471,23
4,35	13.561,6	460,46	13.561,6	460,46
4,40	13.255,1	450,05	13.255,1	450,05
4,45	12.958,9	440,00	12.958,9	440,00
4,50	12.672,6	430,27	12.672,6	430,27
4,55	12.395,6	420,87	12.395,6	420,87
4,60	12.127,6	411,77	12.127,6	411,77
4,65	11.868,2	402,96	11.868,2	402,96
4,70	11.617,0	394,43	11.617,0	394,43
4,75	11.373,7	386,17	11.373,7	386,17
4,80	11.138,0	378,17	11.138,0	378,17
4,85	10.909,5	370,41	10.909,5	370,41
4,90	10.688,0	362,89	10.688,0	362,89
4,95	10.473,2	355,60	10.473,2	355,60
5,00	10.264,8	348,52	10.264,8	348,52
5,05	10.062,5	341,65	10.062,5	341,65
5,10	9.866,2	334,99	9.866,2	334,99
5,15	9.675,5	328,51	9.675,5	328,51
5,20	9.490,4	322,23	9.490,4	322,23

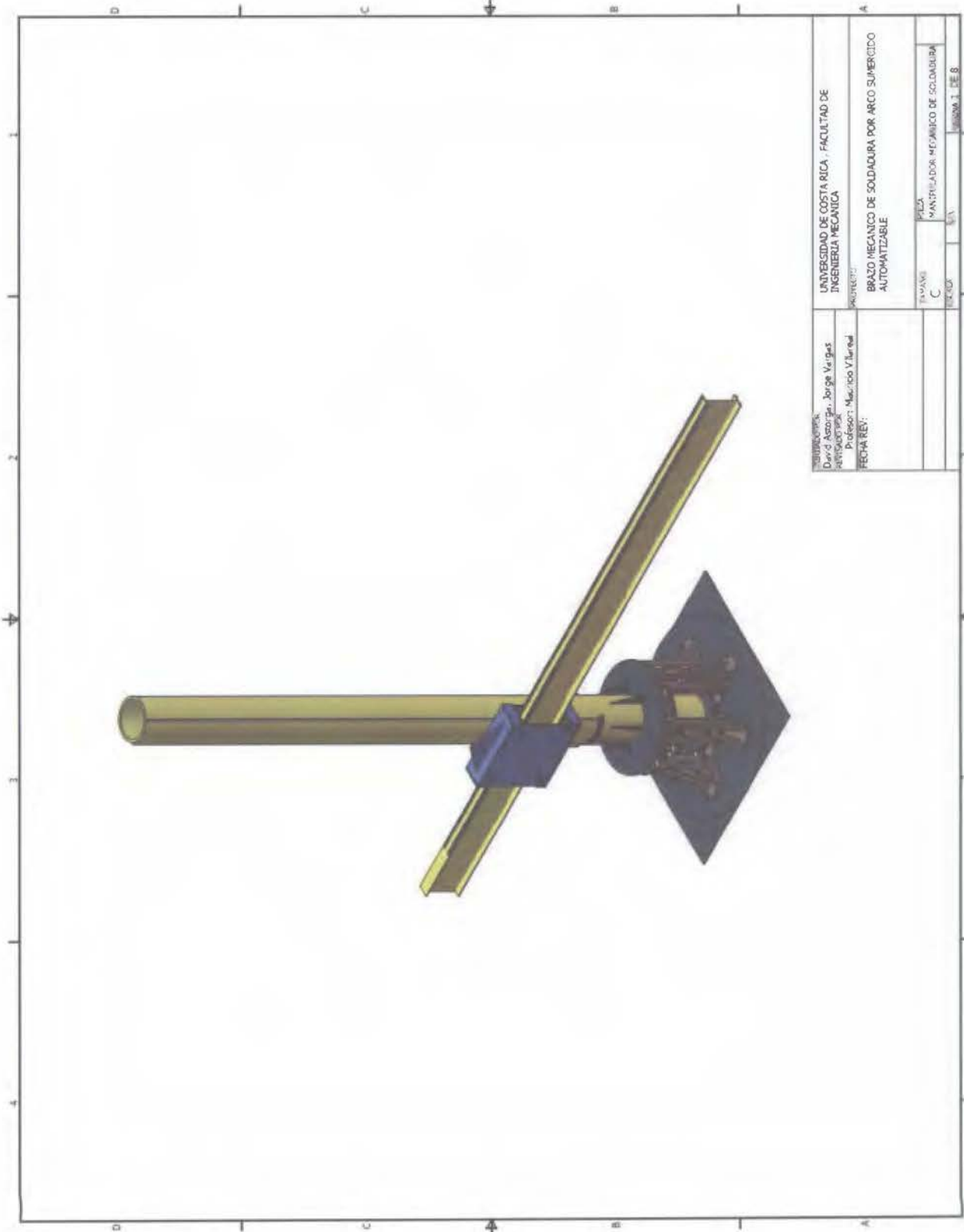
(Fuente: los autores)

Cuadro 8b: Continuación

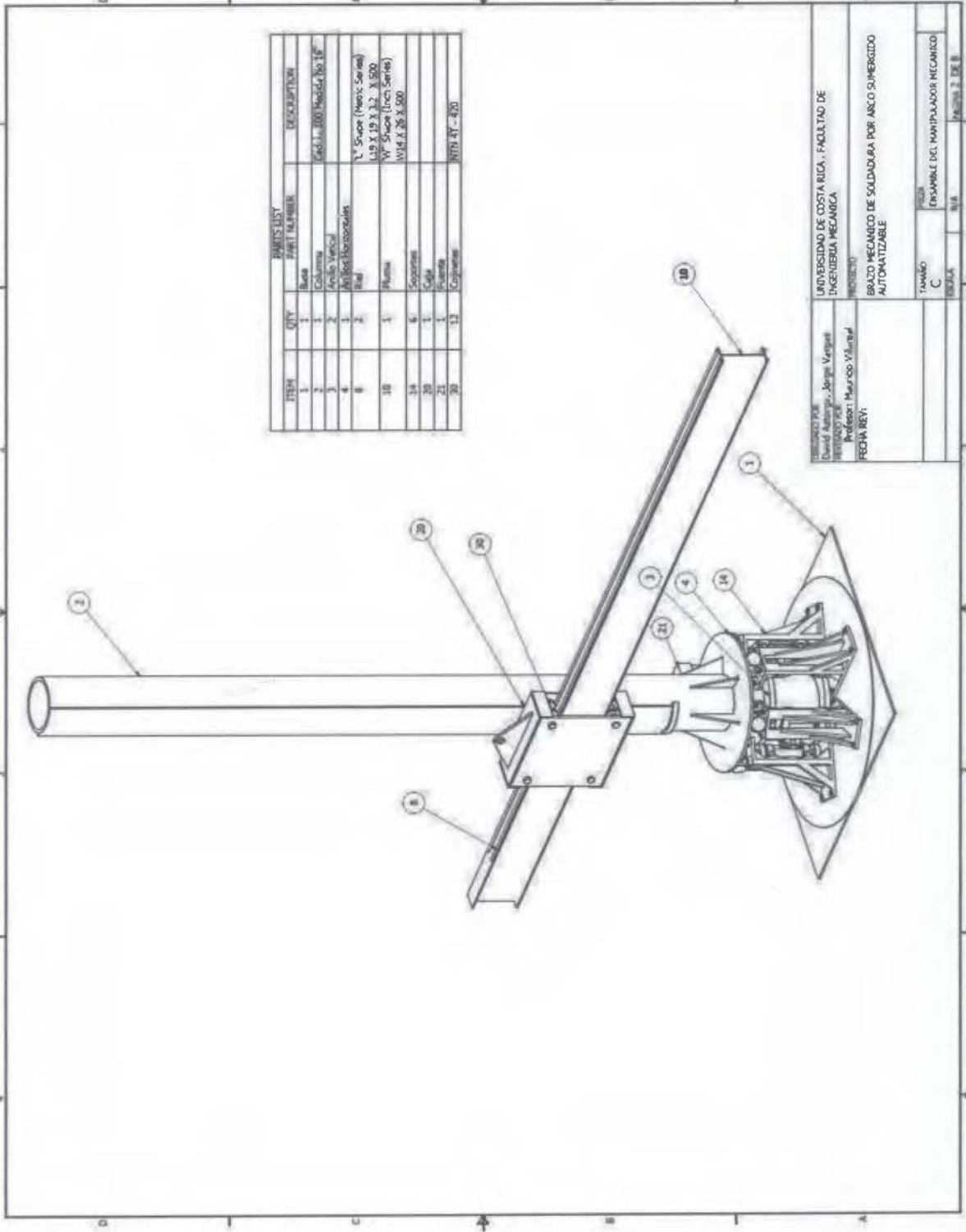
5,25	9.310,5	316,12	9.310,5	316,12
5,30	9.135,6	310,18	9.135,6	310,18
5,35	8.965,7	304,41	8.965,7	304,41
5,40	8.800,4	298,80	8.800,4	298,80
5,45	8.639,7	293,34	8.639,7	293,34
5,50	8.483,3	288,03	8.483,3	288,03
5,55	8.331,1	282,87	8.331,1	282,87
5,60	8.183,0	277,84	8.183,0	277,84
5,65	8.038,8	272,94	8.038,8	272,94
5,70	7.898,4	268,18	7.898,4	268,18
5,75	7.761,6	263,53	7.761,6	263,53
5,80	7.628,4	259,01	7.628,4	259,01
5,85	7.498,6	254,60	7.498,6	254,60
5,90	7.372,0	250,30	7.372,0	250,30
5,95	7.248,6	246,11	7.248,6	246,11
6,00	7.128,3	242,03	7.128,3	242,03
6,05	7.011,0	238,04	7.011,0	238,04
6,10	6.896,5	234,16	6.896,5	234,16
6,15	6.784,8	230,37	6.784,8	230,37
6,20	6.675,8	226,67	6.675,8	226,67
6,25	6.569,5	223,05	6.569,5	223,05
6,30	6.465,6	219,53	6.465,6	219,53
6,35	6.364,2	216,08	6.364,2	216,08
6,40	6.265,1	212,72	6.265,1	212,72
6,45	6.168,4	209,43	6.168,4	209,43
6,50	6.073,8	206,23	6.073,8	206,23
6,55	5.981,5	203,09	5.981,5	203,09
6,60	5.891,2	200,02	5.891,2	200,02
6,65	5.802,9	197,03	5.802,9	197,03
6,70	5.716,6	194,10	5.716,6	194,10

(Fuente: los autores)

PLANOS DEL PROYECTO

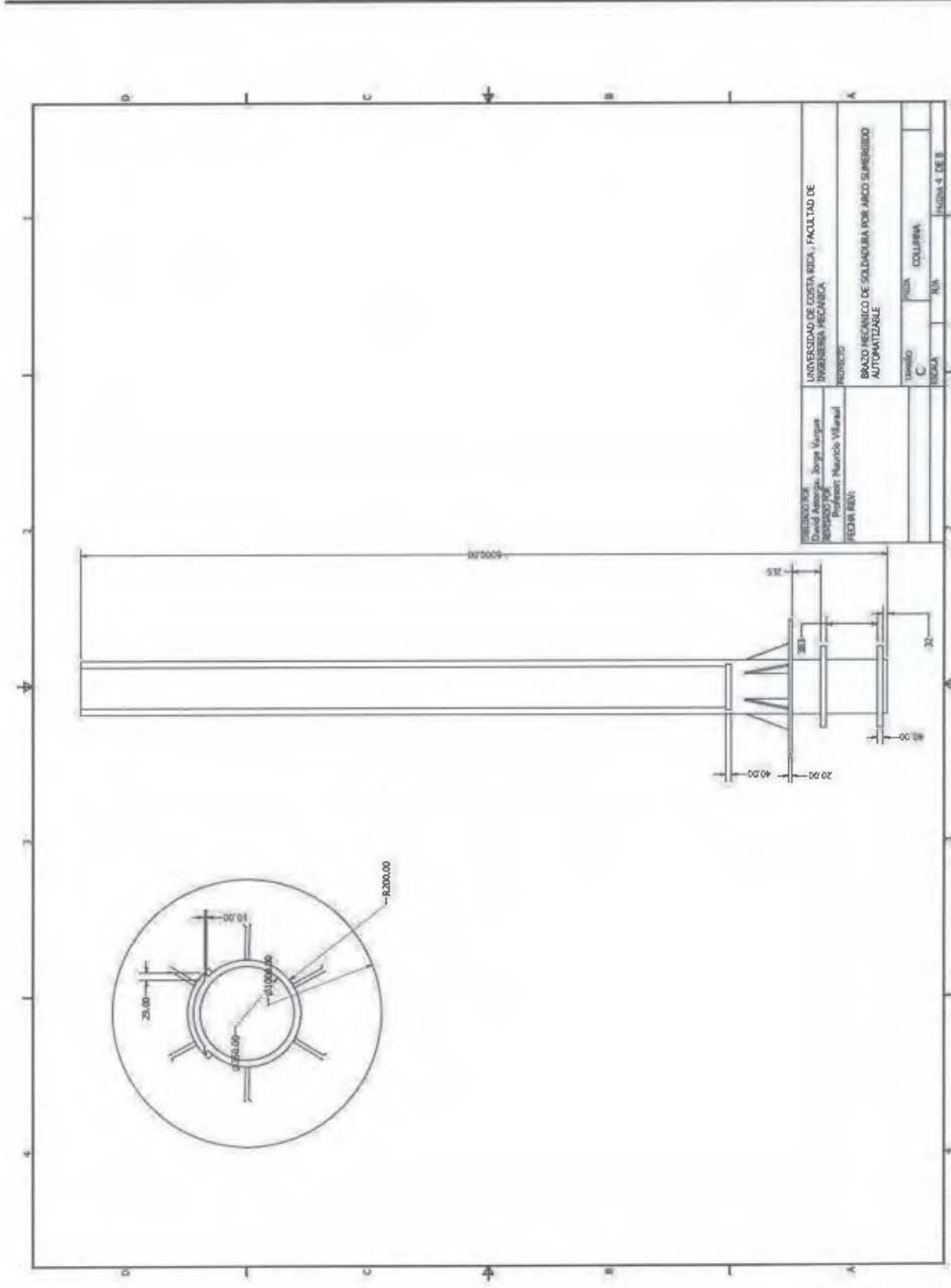


UNIVERSIDAD DE COSTA RICA - FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	AUTORE: DAVID AZORGA JORGE VERGAS	
BRASO MECANICO DE SOLDADURA POR ARCO SUPERCICLO AUTOMATIZABLE	PROFESOR: MARCO VILLALBA	
FECHA REV:	TRABAJO: C	PIEZA: MANTENIDOR MECANICO DE SOLDADURA
	ENCARGO:	UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
		UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

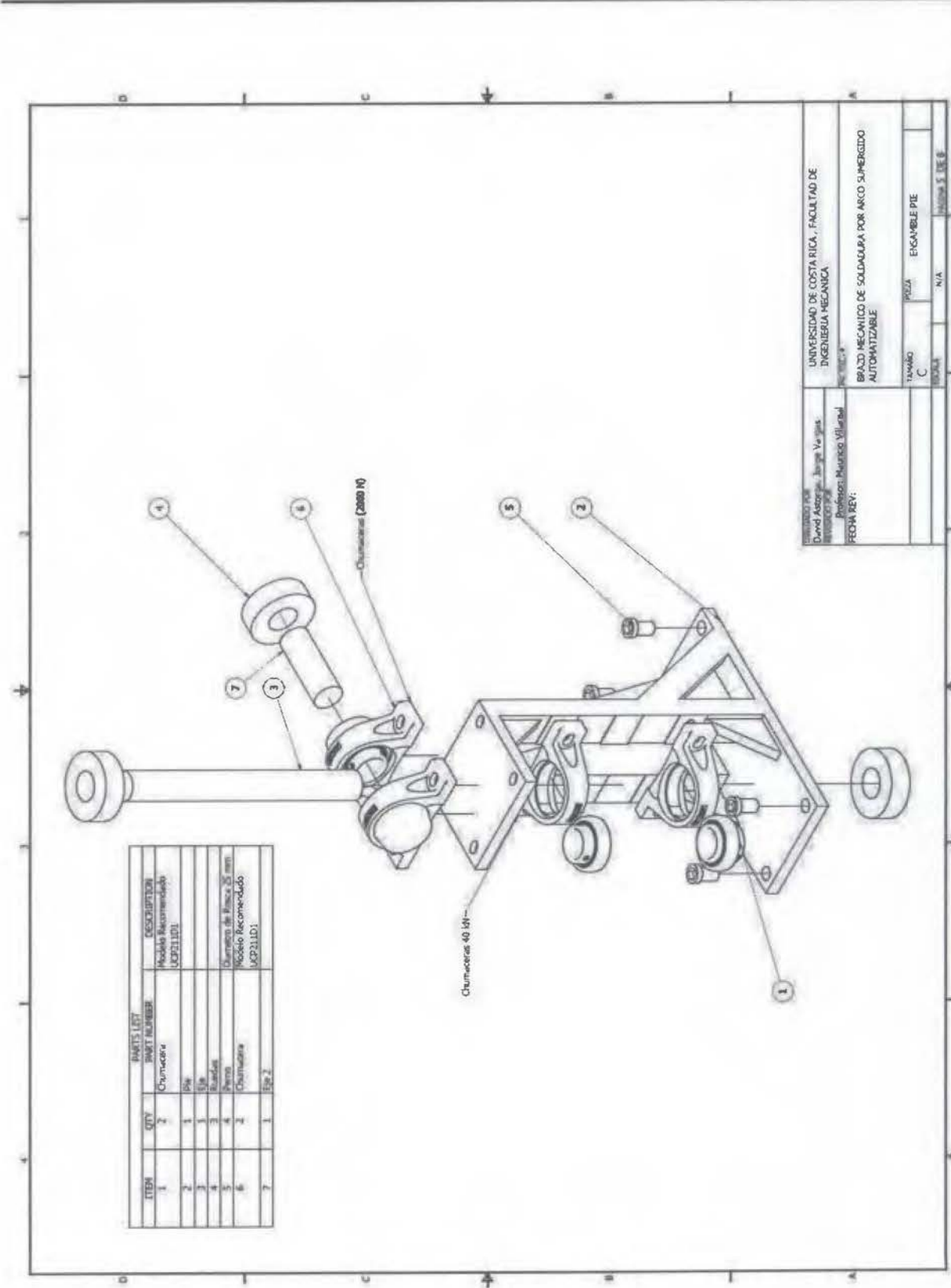


ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Beam	
2	1	Shaft	
3	1	Collar	
4	1	Pin	
5	1	Pin	
6	2	Pin	
7	1	Pin	
8	1	Bracket	
9	1	Bracket	
10	1	Motor	
11	1	Motor	
12	1	Motor	
13	1	Motor	
14	1	Motor	
15	1	Motor	
16	1	Motor	
17	1	Motor	
18	1	Motor	
19	1	Motor	
20	1	Motor	

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, FACULTAD DE
 INGENIERIA MECANICA
 BRUNO MECANICO DE SOLDADURA POR ARCO SUBMERSO
 AUTOMATIZABLE
 TALLER
 C
 ENSAMBLE DEL MANTENEDOR MECANICO
 Pagina 2 DE 8



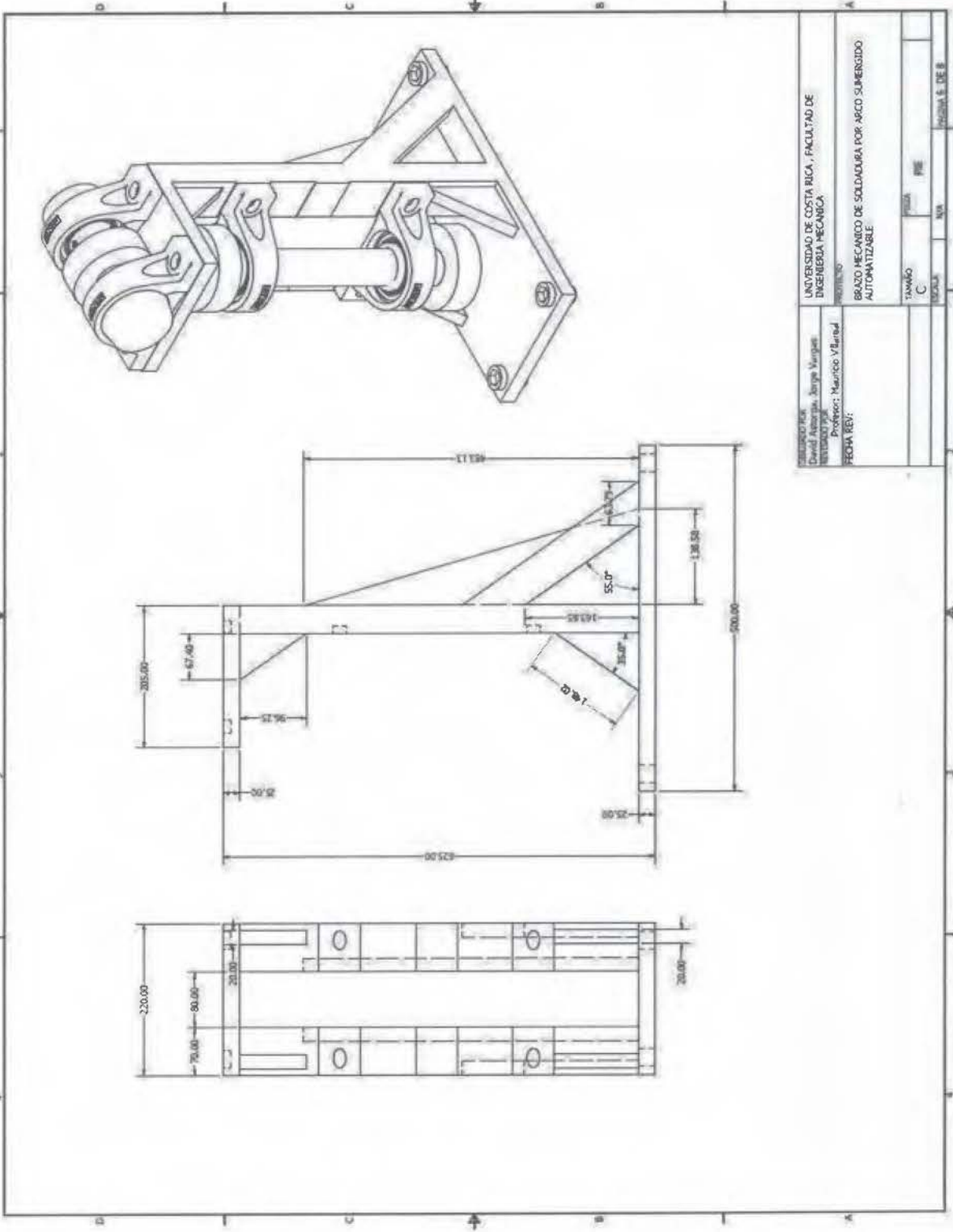
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA - FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
PROFESOR: David Amador, Jorge Vargas	
ASISTENTE: Professor Mauricio Villarreal	
FECHA: 08/01/2011	
TITULO: BRAZO MECANICO DE SOLDADURA POR ARCO SUBMERGIDO AUTOMATIZABLE	
ESCALA: 1:1	HOJA: 4 DE 8



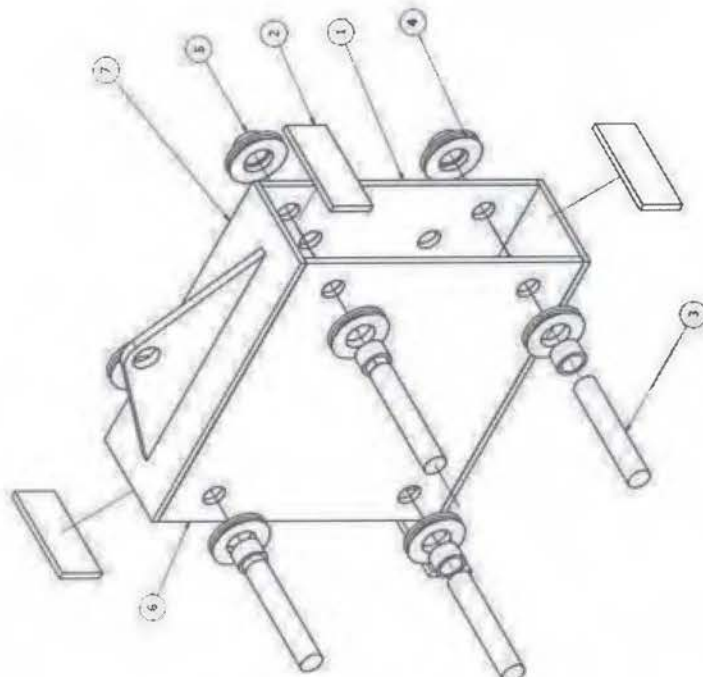
PARTS LIST		
ITEM	QTY	DESCRIPTION
1	2	Chumecera Modelo Recomendado JOP211D1
2	1	Shaft
3	1	Shaft
4	3	Bushings
5	4	Washers
6	2	Chumeceras Modelo Recomendado JOP211D1
7	1	Fig. 2

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
 Profesor: Mauricio Villarreal
 FECHA REV:

TRABAJO	FOJA	ENGOMBLE PIE
C		
FECHA	N/A	FECHA S. T. E. B.

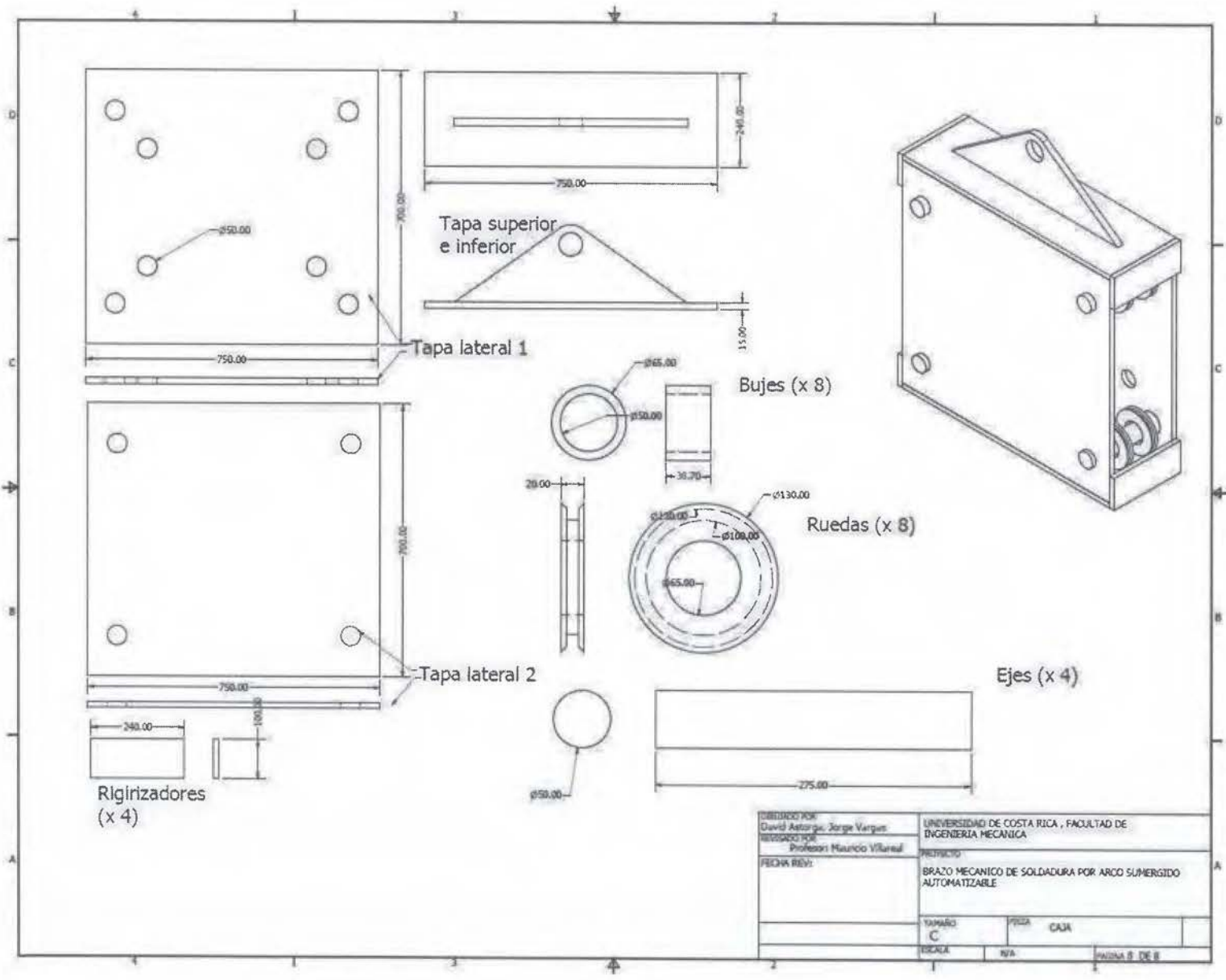


UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
PROFESOR: Mauricio V. Barahona	PROFESOR: Mauricio V. Barahona
FECHA: 01/05/2017	FECHA: 01/05/2017
TITULO: BRAZO MECANICO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO AUTOMATIZABLE	TITULO: BRAZO MECANICO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO AUTOMATIZABLE
GRUPO: C	GRUPO: C
SEMESTRE: VII	SEMESTRE: VII
MODULO: PNE	MODULO: PNE
PROFESOR: DR. B.	PROFESOR: DR. B.



BOM LIST		
ITEM	QTY	PART NUMBER DESCRIPTION
1	1	Topo lateral
2	4	Uso
3	4	Uso
4	8	Ruedas
5	8	Uso
6	3	Uso lateral
7	1	Uso Superior
8	1	Uso Inferior

INSTITUCION: UNIVERSIDAD DE COSTA RICA - FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA PROFESOR: Profesor Mauricio Villarreal FECHA REV:		UNIVERSIDAD DE COSTA RICA - FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA BRANZO MECANICO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO AUTOMATIZABLE ESCRIBIENDO:	
NOMBRE: C TITULO:	NOMBRE:	NOMBRE:	NOMBRE:
FECHA:	FECHA:	FECHA:	FECHA:



DISEÑADO POR: David Astorga, Jorge Vargas		UNIVERSIDAD DE COSTA RICA, FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
REVISADO POR: Profesor Mauricio Villareal		PROYECTO:	
FECHA REV:		BRAZO MECANICO DE SOLDADURA POR ARCO SUMERGIDO AUTOMATIZABLE	
TAMAÑO	FECHA	CAJA	
C			
ESCALA	N/A	PAGINA 8 DE 8	

GLOSARIO

Acero

Producto industrial obtenido de la extracción del mineral de hierro, y que se compone mayoritariamente por hierro y un determinado porcentaje de carbono, además de pequeños porcentajes de otros elementos de aleación que mejoran las propiedades mecánicas del metal, tales como vanadio, molibdeno, titanio, cromo y níquel.

Acero Estructural

Forma especial del acero convencional con cierta composición química y que se utiliza para formar elementos de gran resistencia que se utilizan en estructuras.

Aqua

Compuesto líquido natural formado por moléculas de hidrógeno y oxígeno, que sirve como fluido de trabajo para producir potencia eléctrica en las centrales que operan a base de proyectos hidroeléctricos.

Arco Eléctrico

Es un flujo de corriente entre dos electrodos a través de una columna de gas ionizado, que produce el calor necesario para la fusión de dos metales, y que facilita el transporte de metal fundido desde el electrodo con material de aporte hasta el metal base.

Arco Sumergido

Es un mecanismo de protección del pozo de metal fundido a través de la inmersión del arco eléctrico, dentro de gases, vapor o escoria, para evitar que el metal fundido reaccione químicamente con el oxígeno y el nitrógeno del aire ambiental.

Área

Extensión de una superficie.

Base Giratoria

Mecanismo que le da apoyo al piso a la Columna del Manipulador de Soldadura y que le permite poder girar sobre 360 grados.

Cabeza de Soldadura

Sistema físico utilizado para producir el cordón de soldadura, en donde se concentran los electrodos de soldadura, el fundente, los gases ionizados y el arco eléctrico; y que se mueve por medio de un carrete impulsado manual o mecánicamente.

Cadena

Elemento mecánico constituido por una serie de eslabones metálicos a lo largo de una distancia determinada.

Caja Base de la Pluma

Elemento de la estructura central del Manipulador que une la Columna con la Viga Pluma, y que sirve como sistema para movilizar a la Pluma en dirección recta vertical y en dirección recta horizontal.

Carcaza

Elemento de hierro o de otro material tal como el aluminio que sirve para darle protección a una máquina, en particular motores eléctricos.

Casa de Máquinas

Edificio en donde se almacenan y se ponen a funcionar las turbinas para producir la energía eléctrica a partir de un determinado fluido de trabajo, que puede ser un gas de hidrocarburo, vapor de agua a alta temperatura o agua líquida.

Catarina

Elemento mecánico que consiste de una rueda dentada que se impulsa por un sistema de potencia mecánica, hecha a base de un material metálico, que sirve para mover los eslabones de una cadena por medio del contacto de los eslabones con los dientes de la Catarina, mientras esta última gira alrededor de su propio eje.

Central de Control

Medio físico electrónico que sirve para controlar simultáneamente varios sistemas que operan un proceso, con el fin de poder realizarlo mejor agilizando el trabajo y sincronizando los sistemas, por medio de controladores especiales que permitan una operación correcta sin experimentar retrasos de tiempo, desequilibrios en los procesos y desajustes.

Cojinete

Elemento de máquina con un determinado diámetro interno, en donde se apoya un eje en movimiento. Este sistema puede ser de apoyo simple a través de una muñonera o bien puede tener un sistema de rodamiento que se compone internamente de un mecanismo de bolas, rodillos o pista de contacto deslizante.

Contrapeso

Masa que equilibra un sistema, y que se utiliza en ciertas estructuras móviles tales como grúas y otros equipos pesados, para evitar que un desplazamiento de los mismos ocasione un desbalance peligroso.

Controlador

Dispositivo electrónico que funciona para manipular un sistema por medio de una interfaz de contacto, ya sea una pantalla táctil, un teclado numérico, un conjunto de botones, entre otros; y que muestra datos al operario por medio de un indicador que mide parámetros tales como temperatura, humedad, potencia, velocidad, corriente, voltaje, etc.; los cuales le sirven al mismo para regular correctamente el funcionamiento del sistema.

Controlador de Soldadura

Controlador usado para regular un determinado proceso de soldadura.

Controlador de Velocidad

Controlador utilizado en la regulación de la velocidad de un medio físico mecánico que se mueve con cierto desplazamiento.

Computadora

Sistema electrónico centrado en una estación física, de fácil manipulación e interacción compuesto de varias unidades de funcionamiento, que sirve para procesar datos que se guardan como información provista por un usuario y que es capaz de enviar información para ordenar un programa.

Controlador Lógico Programable

Sistema de circuitos eléctricos computarizados compuesto de canales informáticos que se programan a través de una estación central o computadora, para que pueda dar ordenamiento lógico a través de cada canal que controla una etapa de un proceso industrial, y para que en conjunto todos los canales simultáneamente puedan operar las etapas del proceso completo, como un equipo robótico, sin la ayuda de un ser humano. Dentro del controlador lógico programable (PLC) se procesa toda la información que es programada y archivada en una memoria central que funciona como base de datos, para que pueda ejecutar el proceso industrial de manera repetitiva y sin detenerse.

Cremallera

Engrane de tipo recto que se coloca a lo largo de una superficie plana.

Columna

Elemento vertical de estructura, con determinadas propiedades y forma de sección transversal, compuesto de material resistente, que da soporte a la estructura.

Corriente Eléctrica

Flujo de electrones que se transmiten a través de un conductor eléctrico.

Dólar

Moneda de los Estados Unidos de Norteamérica. Un dólar tiene una equivalencia aproximada a 500 Colones Costarricenses.

Electricidad

Forma de energía que se produce natural o artificialmente a través de medios conductores, los cuales transportan los electrones por medio de un flujo conocido como corriente eléctrica, y que a través de otros procesos es capaz de transformarse posteriormente en alguna otra forma de energía para el aprovechamiento humano, tal como energía mecánica, energía calorífica, energía química, entre otros.

Electrodos de Soldadura

Elementos que absorben energía y que se derriten para formar el material de aporte con el que se sellará la unión soldada.

Electroimán

Dispositivo formado por un núcleo de hierro y un arrollado de cable conductor de la electricidad, principalmente hecho a base de cobre, que tiene el propósito de darle aprovechamiento a la electricidad, tanto para producirla en generadores como para consumirla en motores.

Embalse

Espacio con determinada extensión de área y nivel de profundidad que almacena una determinada cantidad de agua.

Esfuerzo

Relación de fuerza producida por unidad de superficie.

Ethernet

Medio que une a varias estaciones de trabajo dentro de una red local.

Fuente de Poder

Sistema capaz de transmitir una potencia eléctrica que es aprovechada por un motor o equipo.

Fuerza

Acción física que produce una reacción o un desplazamiento sobre otro medio físico.

Fundente

Material granulado que se utiliza en la soldadura con arco sumergido para proteger el pozo de metal de fundido por medio de los gases que se forman de él y la escoria sólida.

Grúa

Brazo mecánico con determinada longitud y peso, que se emplea para transportar estructuras de un lugar a otro por medio de una maquinaria móvil de base rodante, haciendo uso de un sistema de agarre para sujetar la estructura.

Herramienta

Instrumento de trabajo que se emplea con un determinado propósito para generar un resultado.

ICE

Instituto Costarricense de Electricidad. Organización Estatal que vela primero por los intereses energéticos del país, al realizar obras y proyectos destinados a la producción de electricidad y mantenimiento de las centrales eléctricas.

Manipulador de Soldadura

Sistema electromecánico automático, o sin automatizar, formado por diversos elementos de máquina, que sirve para operar con mucho detalle un proceso complejo de soldadura, el cual no es posible efectuarlo eficazmente por un soldador debido a una circunstancia determinada.

Manufactura

Actividad industrial productiva que emplea un conjunto de profesionales a cargo de muchas y diferentes herramientas utilizadas en equipo para fabricar un producto.

MET

Centro especializado del ICE en donde se localizan los talleres electromecánicos, para producir equipamientos y estructuras de utilidad necesaria en los proyectos del ICE y para dar mantenimiento a la maquinaria interna.

Muñonera

Especie de cojinete simple, sin mecanismo interno, que sirve para apoyar un eje en movimiento.

Perno

Elemento de máquina para sujeción permanente o temporal, que se compone de una barra metálica con una cabeza de determinada forma geométrica, generalmente hexagonal, en uno de los extremos del perno, y con una tuerca colocada en su extremo opuesto; con el propósito general de producir una unión apemada de otro elemento mecánico a una superficie o estructura.

Piñón

Elemento de máquina que consiste en un engrane pequeño que se conecta a un motor, y que se utiliza para transmitir un torque inicial.

Pluma

Elemento de máquina que sirve de brazo mecánico para dar soporte a una carga útil o a una herramienta de trabajo.

Potencia

Es la cantidad de trabajo que se ejerce por unidad de tiempo.

Presión

Nivel de esfuerzo producido por un medio físico, que se contiene dentro de un volumen o que se ejerce sobre una superficie, accionando con fuerza a otros elementos adyacentes que componen al propio medio físico, o que componen los medios que le rodean en la frontera o interfaz con el medio físico que ejerce la presión.

Pozo de Metal fundido

Se forma por el calor producido dentro del arco eléctrico creado por los electrodos, en el cual la temperatura producida es suficiente para fundir el electrodo y el metal base en una zona específica de contacto, formando un pozo con material de relleno.

Proyecto Hidroeléctrico

Construcción realizada por parte de una Compañía Eléctrica, en donde se puede producir electricidad a través de un complejo sistema de captación de aguas por medio de tuberías de alta presión, que transmiten el fluido desde un embalse hasta una Casa de Máquinas ubicada a varios centenares de metros del embalse, y en donde se ponen a funcionar varias turbinas que generan electricidad a partir del aprovechamiento de un impulso hidráulico.

Riel

Varilla metálica que sirve de carril para que pueda correr sobre ella un elemento mecánico.

Rodete de Electrodo

Rueda giratoria que contiene a lo largo de su circunferencia un arrollamiento de alambre de electrodos de soldadura, los cuales se consumen según el ritmo de trabajo de la máquina soldadora y el giro del rodete.

Servomotor

Sistema de mecanismo auxiliar operado a distancia, que puede amplificar una fuerza de poca intensidad para dar funcionamiento a una máquina o cualquier dispositivo.

Servomecanismo

Mecanismo programado que funciona automáticamente y que puede corregir los errores por sí mismo.

Software

Programa de computadora diseñado para cumplir un propósito por parte de quien lo utiliza.

Soldador

Persona profesional con capacitación técnica para la realización de diversos procesos de soldadura metálica.

Soldadura Metálica

Es un proceso que une físicamente dos o más componentes metálicos, con el fin de darle funcionalidad a la pieza resultante, para que la misma pueda ser usada como un solo sistema, como parte de un mecanismo o de una estructura, y para que cumpla un propósito determinado ya sea individualmente o dentro de un conjunto mecánico mayor.

Soldadura por Arco Eléctrico

Es un proceso de soldadura metálica que se lleva a cabo electroquímicamente a través de la fundición de material de aporte, que se forma por el calor producido dentro de un arco eléctrico generado por dos electrodos de carga eléctrica opuesta.

Torque

Es un impulso mecánico de brazo de palanca que se transmite a lo largo de un eje, y es generado a partir de una fuerza que actúa a lo largo de un medio que gira sobre su propio eje. Entre mayor sea la fuerza aplicada al medio, mayor será el torque resultante.

Trabajo

Es la cantidad de fuerza requerida para desplazar un objeto a lo largo de una determinada distancia.

Tubería

Es una estructura de sección circular, con un orificio interno de sección circular, con un determinado espesor y hecha con materiales de ingeniería, que sirve para trasegar un fluido a una determinada distancia.

Tubería de Alta Presión

Es una tubería por la cual se transmite agua a muy alta presión desde un Embalse hasta una Casa de Máquinas.

Tuerca

Elemento de máquina que sirve para meter presión a una unión apemada, a través del torque producido por una herramienta accionada manualmente o por un mecanismo.

Viga

Elemento estructural hecha a base de acero reforzado, con determinadas propiedades mecánicas y especial forma geométrica de sección transversal, que se utiliza en estructuras más grandes para dar forma a edificaciones o máquinas de gran tamaño.

Voltaje

Diferencia de potencial eléctrico que se manifiesta energéticamente entre dos extremos determinados de un cable o placa conductora, o bien de un sistema hecho de fábrica para almacenar energía.

BIBLIOGRAFÍA

American Society for Metals (c1983). Metals Handbook: Welding, Brazing and Soldering, Vol.6; 9. ed.. Metals Park, Ohio.

American Welding Society. Safety in Welding, cutting and Allied Processes. ANSI Z49.1:2012

Arredondo, Jorge. Sistema de Manipulación de Soldadura (Entrevista). Empresa IIMA, junio, 2012.

Automation Drive. Servo Motors. Recuperado el 19 de junio, 2012 de <http://www.automation-drive.com/servo-motors>

Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP). Listado de precios vigentes de la energía eléctrica para el suministro de electricidad y alumbrado público, abril 2012. Recuperado el 11 de junio, 2012 de http://www.aresp.go.cr/docs/LISTA_DE_PRECIOS_2012_6.xls

Baldor Electric Company. Baldor Motion Products: DSM Series, Integrated Stepper Motor / Driver Installation Manual MN1940, 01/05. Recuperado el 22 septiembre, 2012 de <http://www.baldor.com/downloads/manuals/downloads/1940-105.pdf>

Beer, F.P.; Johnston, E.R.Jr.; (c1997). Mecánica vectorial para ingenieros, Estática. 6. ed.. México : McGraw-Hill.

Beer, F.P.; Johnston, E.R.; Clausen, W.E. (c2005). Mecánica vectorial para ingenieros, Dinámica. 7. ed.. México : McGraw-Hill.

Beer, F.P.; Johnston, E.R.Jr.; DeWolf J.T. (c.2001). Mecánica de Materiales. 3.ed..México.; McGraw-Hill.

Bureau of Labor Statistics. Standard Occupational Classification (SOC) System. Recuperado el 12 de febrero, 2013 de <http://www.bls.gov/SOC/>

Bureau of Labor Statistics. *Producer Price Index (PPI)*. Recuperado el 12 de febrero, 2013 de <http://www.bls.gov/ppi/>

Cary, H.B. (c1979), *Modern Welding Technology*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall.

Cedric Bode Engineering Ltd. *Equipos industriales automáticos de soldadura por arco sumergido tipo brazo-pluma y columna*. Recuperado el 16 de junio, 2012 de <http://www.cedricbodeengineering.com/column-and-booms.html>

Engineers Edge LLC. *Structural Steel W Flange Section Properties: Moment of Inertia, Steel Beam Size, Cross Section Area*. Recuperado el 19 de enero, 2013 de http://www.engineersedge.com/standard_material/Steel_ibeam_properties_2.htm

ESAB Welding Equipment AB. *MKR 300 Welding Column and Boom Instruction Manual*. ESAB Industries. Laxa, Sweden.

Federal Reserve. *Industrial Production and Capacity Utilization*. Recuperado el 15 de febrero, 2013 de <http://www.federalreserve.gov/releases/g17/current/>

González, Gonzalo. *Transmisión de Potencia por Cadenas de Rodillos. Explotación, Selección y Diseño*. (c2001).

Groover, M.P. (c1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. 1. ed.. México : Prentice Hall Hispanoamericana.

Grupo IIMA. Instalaciones Industriales M.A y Asociados, S.A. *Proyectos Electromecánicos, Industrial e Infraestructura*. Recuperado el 27 de junio, 2012 de <http://www.iimacr.com/phocadownload/userupload/folletoiima.pdf>

Honor, H.A., J.B. Lippincott Company (c1920). *Spot and Arc Welding*. Philadelphia : World Public Library Association.

Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). *Historia del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE)*. Recuperado el 19 de abril, 2012 de <http://www.grupoice.com>

Lincoln Electric Co. *Arc Welding Safety - Guide for safe arc welding*. Recuperado el 17 de junio, 2012 de http://www.lincolnelectric.com/assets/en_US/Products/literature/e205.pdf

Lincoln Electric Co. *Automatic Welding Systems. NA-5 Manual*. Publication E9.30 10/07 St. Clair Ave., Cleveland, Ohio. Recuperado el 18 de enero, 2013 de http://www.unimaq.com.pe/IMG/producto/file/LincolnElectric_Alimentadores_automaticos_semi_NA5.pdf

Lincoln Electric Co. *Equipos industriales automatizados y robotizados de uso reciente en la manufactura*. Recuperado el 10 de junio, 2012 de <http://www.lincolnelectric.com/en-us/equipment/robotic-automation/products-and-systems/Pages/hard-automation.aspx>

Lincoln Electric Europe. *Aplicaciones industriales de la soldadura por arco eléctrico sumergido automatizada en las áreas de Tuberías, Industria Pesada, Astilleros e Industria del Transporte Automotriz Moderno de Europa*. Recuperado el 10 de junio, 2012 de <http://www.lincolnkde.com/knowledge/industry>

LSA Linear Servo Actuator. *Servo actuadores lineales de alta velocidad, alta aceleración y alta repetitividad para uso de capacidad media*. Recuperado el 20 de junio, 2012 de <http://www.intelligentactuator.com/lsa-linear-servo-actuator-lsa-n10-15/>

Mitsubishi Electric Automation Inc. *MR-JN Rotary Servomotors and Amplifiers*. Recuperado el 19 de junio, 2012 de http://www.meau.com/eprise/main/PSG/Servo/MR-JN_Overview.html

NTN Corporation. *NTN Ball and Roller Bearings Catalogue. CAT. NO. 2202-IX / E*. Recuperado el 17 de abril, 2012 de <http://www.ntn.co.jp/english/products/pdf/>

NTN Corporation. *NTN Bearing Units Catalogue. CAT. NO. 2400-X / E*. Recuperado el 17 de abril, 2012 de <http://www.ntn.co.jp/english/products/pdf/>

Omron, Europe. *Motores Servo Rotacionales Sigma*. Recuperado el 19 de junio, 2012 de http://industrial.omron.eu/en/products/catalogue/motion_and_drives/servo_systems/rotary_servo_motors/sigma_ii/sgmph/default.html

Report on an International Conference (c1986). *Health Hazards and Biological Effects of Welding Fumes and Gases*. Copenhagen, Denmark : World Public Library Association.

Research Papers in Economics (REPEC). *Materials Prices and Productivity*. Recuperado el 15 de febrero, 2013 de <http://ideas.repec.org/p/cen/wpaper/12-11.html>

Rodacenter, Chile. *SKF PTP Catalogo Español: tipos de cadenas, cadenas de rodillos*. Recuperado el 26 de julio, 2013 de <http://www.rodacenter.cl/pdf/cadenas.pdf>.

Sclater, N.; Chironis, N.P. (c2007). *Mechanisms and mechanical devices sourcebook*. 4. ed.. New York : McGraw-Hill.

Siemens AG. *SIMATIC S7-1200 Easy Book Manual*. A5E02486774-01, 11/2009. Nürnberg, Germany. Recuperado el 22 de septiembre, 2012 de http://automatika.etf.bg.ac.rs/files/predmeti/os4uip/Laboratorija/1_Vezba/s71200_easy_book_en-US_en-US.pdf

Spinea, Slovakia. *Servomotores Rotativos DriveSpin*. Recuperado el 19 de junio, 2012 de <http://spinea2011.en.ec21.com/DriveSpin--5335543.html>

Spinea, Slovakia. *Servomotores Rotativos RotoSpin*. Recuperado el 19 de junio, 2012 de <http://spinea2011.en.ec21.com/RotoSpin--5335560.html>

Spinea Slovakia. *Sistemas reductores especiales TwinSpin*. Recuperado el 20 de junio, 2012 de <http://spinea2011.en.ec21.com/TwinSpin--5335541.html>

Shigley, J.E. ; Mischke, Ch.R. (c2002). *Diseño en ingeniería mecánica*. 6. ed. . México, D.F. : McGraw-Hill.

TG drives, Czech Republic. *Servomotores Rotativos DriveSpin*. Recuperado el 19 de junio de 2012 de <http://www.tgdrives.cz/en/reducers-and-linear-units/drivespin/>

The Lincoln Electric Co (c1921). *Electric Arc Welding*. 6. ed.. Cleveland, Ohio : World Public Library Association.

Ugural A.C., Fenster S.K (c2003). *Advanced Strength and Applied Elasticity*. 4. ed.. Upper Saddle River, New Jersey : Prentice Hall.

Universidad de Castilla-La Mancha. *Engranajes*. Recuperado el 19 de junio, 2012 de <http://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/elementos/Tema08.pdf>

Universidad de Castilla-La Mancha. *Uniones por Soldadura*. Recuperado el 18 de junio, 2012 de http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/ElementosConstruccion02.PDF

Universidad Nacional de Rosario (UNR). Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura. Departamento de Sistemas e Informática. *Introducción a los Controladores Lógicos Programables (PLC)*. Recuperado el 19 de junio, 2012 de http://www.dsi.fceia.unr.edu.ar/downloads/digital/1/Apunte_PLC.pdf

U.S. Census Bureau. Department of Commerce, Economics and Statistics Administration. *1997 Economic Census: Manufacturing, Industry Series: Welding and Soldering Equipment Manufacturing*. 1997

U.S. Census Bureau. Department of Commerce, Economics and Statistics Administration. *2002 Economic Census: Manufacturing, Industry Series: Welding and Soldering Equipment Manufacturing*. 2002

U.S. Census Bureau. *Construction and Housing*. Recuperado el 13 de febrero, 2013 de <http://www.census.gov/prod/99pubs/99statab/sec25.pdf>

U.S. Census Bureau. *North American Industry Classification System (NAICS)*. Recuperado el 14 de febrero, 2013 de <http://www.census.gov/eos/www/naics/>

U.S. Census Bureau. *Prices: Consumer Price Indexes, Cost of Living Index (Precios: Índice de Precios al Consumo, Costo de Vida)*. Recuperado el 14 de febrero, 2013 de http://www.census.gov/compendia/statab/cats/prices/consumer_price_indexes_cost_of_living_index.html

U.S. Census Bureau. *Statistical Abstract of the United States: 2012*. Recuperado el 13 de febrero, 2013 de <http://www.census.gov/prod/2011pubs/12statab/construct.pdf>

Visita realizada a Plantel del MET (Máquinas, Equipos y Talleres) con fines de investigación: toma de datos y fotografías y detalles para el proyecto. Martes 27 de marzo de 2012.

Visita realizada a Plantel del MET (Máquinas, Equipos y Talleres) con fines de investigación: toma de datos y fotografías y detalles para el proyecto. Viernes 21 de septiembre de 2012.

Wikipedia Enciclopedia. *Programmable logic controller*. Recuperado el 19 de junio de 2012 de http://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_logic_controller

OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN Y TRABAJO

American Gear Manufacturers Association (AGMA). <http://www.agma.org>

American National Standards Institute (ANSI) <http://www.ansi.org>

Intelligent Well Interface Standard (IWIS) <http://www.iwis-jip.com>

SolidWorks, Co. 3D CAD Design Software SolidWorks (2008). <http://www.solidworks.com>