

**DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UN PUENTE GRUA, APLICADO A UN
PROCESO SECUENCIAL COMO EL GALVANIZADO**

JAIME ENRIQUE NIÑO TOVAR

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
LÍNEA DE DISEÑO
BUCARAMANGA
2004**

**DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UN PUENTE GRUA, APLICADO A UN
PROCESO SECUENCIAL COMO EL GALVANIZADO**

JAIME ENRIQUE NIÑO TOVAR

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniero Mecatrónico**

Director

OMAR LENGERKE PEREZ

M.S.C Sistemas de Manufactura

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

LÍNEA DE DISEÑO

BUCARAMANGA

2004

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	1
DISEÑO METODOLÓGICO	3
1. ASPECTOS FÍSICO-MECÁNICOS	13
1.1 TRANSPORTE DE CARGA EN LA INDUSTRIA - PUENTES GRUA	13
1.1.1 Clasificación	13
1.1.2 Mecanismos	15
1.1.3 El Monorriel	23
1.1.4 Puentes Grúas Con Vigas Armadas	25
1.1.5 Algunos Aspectos Importantes para Tener en Cuenta	25
1.2 COLUMNAS	31
1.2.1 Empotramiento o Fijación de un Extremo y Longitud Efectiva	32
1.2.2 Razón de Delgadez o Relación de Esbeltez	33
1.2.3 Razón de Transición de Delgadez o Corte de Columna (C_c)	34
1.2.4 Métodos de Cálculo Según el Tipo de Columna	34

1.5 Uniones Desarmables	37
1.5.1 Tornillo	37
1.5.2 Soldadura	37
1.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS PERNOS IMPERIALES	41
1.6.1 Designaciones para Pernos Según SAE	41
1.6.2 Designaciones para Pernos Según ASTM	41
1.7 PLACAS DE BASE PARA COLUMNAS	48
2. PROCESO DE GALVANIZADO	53
2.1 COMPORTAMIENTO DEL ACERO GALVANIZADO	54
2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DEL PROCESO DE GALVANIZADO	55
2.2.1 Limpieza Cáustica	55
2.2.2 Lavado	55
2.2.3 Decapado Ácido	55
2.2.4 Lavado	56
2.2.5 Prefluxado	56
2.2.6 Flux en el Crisol de Galvanizado (Alternativo)	57
2.2.7 Crisol de Galvanización	57
2.2.8 Enfriamiento	58

2.2.9 Pasivación	58
3. MOTORES ELÉCTRICOS Y CONTROL DE MOTORES ASÍNCRONOS	59
3.1 TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS	60
3.1.1 Motores De CD	60
3.1.2 Motores de CA	62
3.2 CONTROL DE MOTORES ASÍNCRONOS	64
3.2.1 Regulación de Velocidad de Motores de Corriente Alterna	64
3.2.2 Distintas Clases de Convertidores	65
3.2.3 El Rectificador	67
3.2.4 El Circuito Intermedio	69
3.2.5 El Inversor	69
3.2.6 Modulación por Ancho de Pulso	71
3.2.7 Estrategias de Control	76
3.2.8 Control Vectorial	80
4.0 AUTOMATIZACIÓN Y ASPECTOS IMPORTANTES DE CONTROL	85
4.1 AUTOMATIZACIÓN USANDO LÓGICA PROGRAMABLE	86
4.2 DEFINICIÓN DE UN AUTÓMATA PROGRAMABLE	87
4.2.1 Estructura Básica de un P.L.C	87

4.2.2 Funcionamiento Básico de un P.L.C	91
4.3 ASPECTOS IMPORTANTES DEL CONTROL	91
4.3.1 Estructura Simplificada del Bucle de Control Cerrado	91
4.3.2 Respuesta de Régimen Permanente	92
4.3.3 Respuesta Dinámica	93
4.3.4 Parámetros de Elementos con Retardo de Orden Superior (PT_n)	95
4.3.5 Tipos de Controladores	95
4.3.6 Estructura del Controlador (PID)	96
4.3.7 Control Digital Automático	97
4.3.8 Componentes del Controlador Digital	98
5. ANÁLISIS Y DISEÑO	106
5.1 VELOCIDADES Y COEFICIENTES ESPECIALES	106
5.2 CÁLCULO ESTRUCTURAL DE LA VIGA	112
5.2.1 Diseño a Flexión por Carga Móvil	112
5.2.2 Cálculo y Selección del Perfil	113
5.2.3 Comprobación de los Cálculos por medio de Simulación	117
5.3 CÁLCULO ESTRUCTURAL DE LAS COLUMNAS	127
5.4 DISEÑO DE LA PLACA BASE	131
5.5 UNIÓN VIGA COLUMNA	132

5.6 ANÁLISIS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN	133
5.6.1 Analogía y Aproximación de la Función de Transferencia de la Planta	136
5.6.2 Analogía y Aproximación de la Función de Transferencia del Sensor	142
5.6.3 Analogía y Aproximación de la Función de Transferencia del Controlador	143
5.6.4 Control Secuencial – Autómata Programable	149
5.7 SENSORES ELECTROMECAÑICOS - FINALES DE CARRERA	151
5.8 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (P.L.C)	154
5.8.1 Descripción General del Proceso Secuencial	154
5.8.2 Descripción del Programa	158
5.8.3 Algoritmo De Control	160
5.9 IMPLEMENTACIÓN DEL VARIADOR	163
5.9.1 Selección de Los Variadores a Usar	165
5.9.2 Conexiones del Sistema en General	169
6. PRESUPUESTO ESTIMADO	175
6.1 COTIZACIÓN DE ALFREDO STECKERL HIERROS Y ACEROS S.A	175
6.1.1 Garantías	175
6.1.2 Condiciones Comerciales	176
6.2 COTIZACIÓN DE PRODUCTOS SIEMENS	176

6.2.1 Variadores	176
6.2.2 Aparatos de Mando y Señalización - Signum Metallic – Signum Led	177
6.2.3 Interruptores de Posición (Finales de Carrera)	177
6.2.4 Automatas Programables – PLC Simatic S7 – 300	177
6.3 PRESUPUESTO COMPLETO	179
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	180
BIBLIOGRAFÍA	184
ANEXOS	187

DEDICATORIA

Deseo dedicarle este trabajo a Dios por haberme dado el don de la vida y la existencia; y a mis padres y mi hermana, por ser mis compañeros y guías durante este camino recorrido, pues es sólo gracias a su esfuerzo y amor que hoy me encuentro donde estoy.

Los quiero con el alma y el corazón y soy lo que soy gracias a ustedes.

Mientras los ríos corran al mar, hagan sombra a los valles los montes y haya estrellas en el cielo, debe durar la memoria del beneficio recibido en la mente del hombre agradecido.

Virgilio

*Dame, Señor,
agudeza para entender,
capacidad para comprender,
método y facultad para interpretar,
gracia y abundancia para hablar.*

*Dame, Señor,
acierto al empezar,
dirección al progresar,
y perfección al acabar.*

Santo Tomás de Aquino.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerle a todos mis profesores por las bases brindadas para haber podido llevar a cabo este proyecto, y en general a toda mi facultad. Quiero agradecer la invaluable orientación brindada por: Ing. Sebastián Roa, Ing. Omar Lenguerke, Dr. Faustino Muñoz, los cuales fueron mis guías a lo largo de este proceso.

De igual forma deseo agradecer la ayuda de dos personas ajenas a mi facultad. Al Dr. Aldo Pardo García, profesor de la Universidad de Pamplona y especialista en el control de motores eléctricos, por su colaboración y toda su invaluable información brindada. Y de manera especial al Ingeniero Civil Alexis Vega, especialista en estructuras metálicas quien me orientó en un momento crucial de mi tesis en donde todo parecía no tener solución.

Gracias por su gran disposición, por su valioso tiempo, y sobre todo por indicarme el camino.

La gratitud es la memoria del corazón.

Proverbio Francés

OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un sistema de transporte automático bidimensional para facilitar y mejorar el transporte de carga de un proceso secuencial como el galvanizado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comprobar la estabilidad del diseño por medio de herramientas computacionales.
- Reducir al máximo la intervención del operario durante el proceso aplicado, con el fin de prevenir tragedias y eliminar errores humanos.
- Convertir un proceso secuencial como el galvanizado, en un proceso más moderno, limpio, seguro y productivo, mediante la inclusión de un sistema de transporte de carga automático.
- Implementar tecnologías de automatización para el control, como los Automatas Programables.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Una de las principales preocupaciones de las empresas en materia de producción, consiste en incrementar los niveles de productividad, aumentando la efectividad y eficiencia de sus procesos. Las empresas en la búsqueda de mantener la competitividad en el mercado y mejorar dichos factores, deben abrir sus perspectivas hacia la integración de sus operaciones mecánicas con sistemas automatizados.

En Bucaramanga, la mayoría de empresas que trabajan en recubrimientos metálicos, utilizan en la actualidad procesos como el cromado, zincado, galvanizado, o pinturas especiales, entre otros para darle un mejor acabado a una gran variedad de productos. Estos procesos actualmente funcionan de una forma muy artesanal y poco productiva. Algunos de ellos utilizan sustancias tóxicas para el operario y por ende perjudiciales para su salud.

Uno de los inconvenientes más grandes en estos procesos es el transporte de piezas involucradas dentro de dicho proceso, debido a la pérdida de tiempo y poca exactitud durante el mismo. Por lo general esta tarea es llevada a cabo por una persona que durante toda su jornada laboral transporta manualmente las piezas o productos a ser sometidos a dicho recubrimiento. Es un proceso que además de ser ineficiente es sumamente nocivo para la salud del operario por su contacto permanente con este tipo de sustancias que le pueden generar en un futuro problemas en su salud.

En éste proyecto, por medio de la automatización y la implementación de un transportador bidimensional de carga moderno, se pretende mejorar la operación del transporte en el proceso de galvanizado, convirtiéndolo en uno mucho más moderno, eficiente y seguro tanto para el operario como para la empresa, además de eliminar posibles errores humanos durante el mismo.

INTRODUCCIÓN

La automatización combina una serie de elementos mecánicos, electrónicos, neumáticos, etc, con el objeto de lograr la regulación adecuada de un proceso. De esta manera, se facilitan las tareas complejas, difíciles o tediosas, se abrevia considerablemente el tiempo requerido para realizarlas y se logra mayor seguridad en las operaciones.

Un proceso secuencial es todo aquel en donde una etapa no se puede realizar antes de que la anterior no haya terminado. Un proceso como el galvanizado, el cromado, zincado o de recubrimientos con pinturas especiales en general es secuencial. Es un proceso en el que el transporte de material es indispensable y la precisión y rapidez del mismo, influye drásticamente en la productividad del proceso, si lo observamos como un todo.

El proceso de galvanizado existente en la actualidad en la mayoría de empresas en Bucaramanga, es bastante ineficiente ya que por lo general es un proceso bastante artesanal, convirtiéndose día a día más obsoleto y poco competitivo. Con la implementación de un sistema de transporte de carga industrial y con la ayuda de la automatización se puede erradicar éste problema convirtiéndolo en un proceso mucho más moderno, rápido y productivo.

A su vez, el proceso de galvanizado utiliza sustancias que producen vapores nocivos y tóxicos para la salud de los operarios. El proceso tal y como se encuentra en la actualidad se convierte en un elemento perjudicial que puede volverse letal para la salud del operario u operarios involucrados dentro del proceso, asegurándole(s) de esta manera una mala calidad de vida en un futuro

inmediato debido a las enfermedades respiratorias degenerativas irreversibles ocasionadas por la inhalación de estos vapores.

La automatización industrial no es un fenómeno reciente. Desde que la actividad artesanal comenzó a ser sustituida por la industrial, las empresas han procurado la obtención del máximo rendimiento del trabajo mediante la acción combinada de herramientas, máquinas y organización. Los beneficios que este tipo de tecnología proporciona son innumerables, desde aumentos en los niveles de producción hasta una mayor eficacia y precisión en la ejecución de las operaciones.

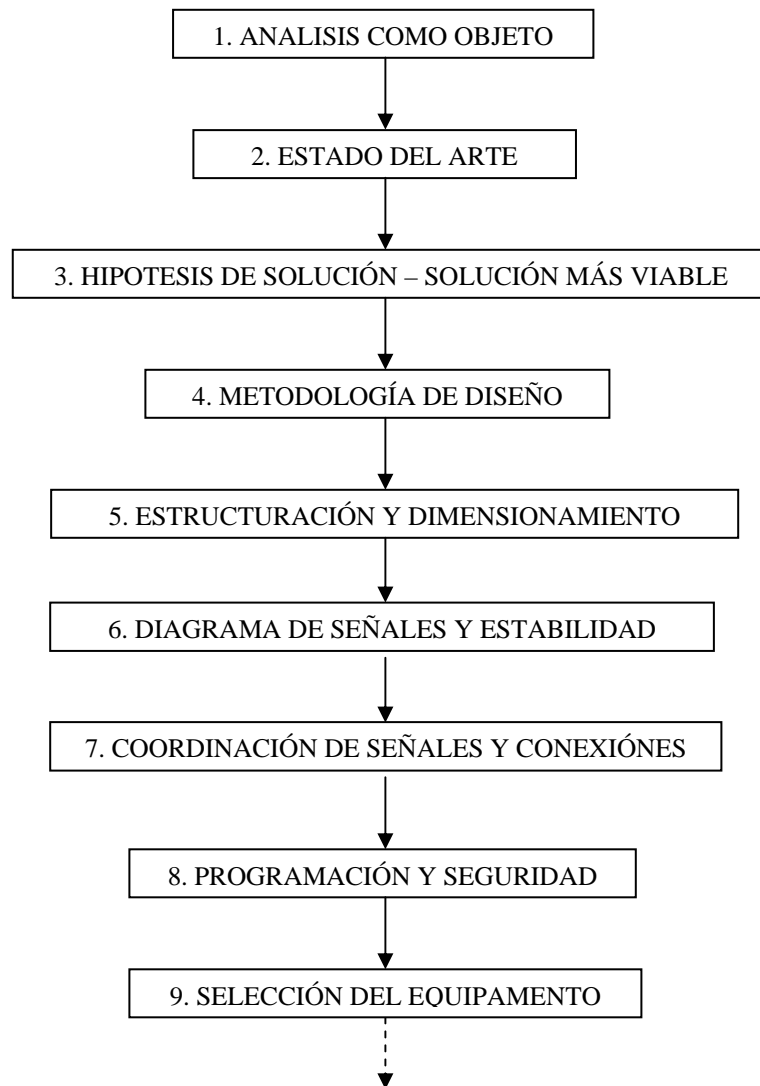
Con este nuevo diseño de transporte de carga automático dentro del proceso de galvanizado y gracias a la automatización, se busca crear un sistema robusto y seguro en el que la presencia del ser humano dentro del mismo sea prácticamente “innecesaria”, apartándolo de tareas tediosas y repetitivas que incluso atenten contra su salud, buscando siempre lo mejor para el trabajador y la empresa, además de dar origen a un sistema con la ausencia relativa de errores humanos, creando así un llamado “proceso limpio”.

La idea de este proyecto nace como una necesidad para darle solución a un problema real, existente.

Cabe resaltar que este proyecto es una idea a nivel personal sin el patrocinio de ninguna empresa o persona, de igual forma el objetivo ideal será el de poder llegar a ofrecer este nuevo diseño de transporte automático bidimensional, a cualquier empresa que tenga problemas con su proceso de tipo secuencial, llámese galvanizado, zincado, cromado, recubrimientos con pinturas especiales, etc.

DISEÑO METODOLÓGICO

La metodología del diseño Mecatrónico del transportador automático bidimensional se establece de acuerdo a las siguientes etapas:





10. INTEGRACION

En primer lugar se debe identificar el problema en concreto, para de esta forma abordarlo correctamente.

Una vez identificado el problema, lo siguiente es analizarlo a fondo para entender su origen, y sus efectos o consecuencias.

Como en el caso de este proyecto, donde es determinante el *problema de transporte dentro del proceso de galvanizado*, que además de limitar la producción, mantiene a los operarios en contacto directo con los gases nocivos producidos durante el mismo.

Tras haber identificado y analizado el objeto del problema, lo siguiente es buscar soluciones posibles al caso de estudio, y finalmente plantear una hipótesis de la solución más viable a dicho problema.

En la industria existe un sistema de transporte mecánico, como es el “puente grúa”, usado comúnmente en espacios reducidos como talleres y con capacidades de carga que van desde una tonelada hasta cincuenta veces o incluso más dicho valor.

La automatización de dicho dispositivo, se convierte en la solución más viable, puesto que además de acabar con el problema de transporte elimina los efectos y consecuencias ocasionados por el mismo. La automatización permite eliminar errores humanos, además de apartar al operario de tareas tediosas, repetitivas y peligrosas para el mismo. La automatización enfocada correctamente brinda seguridad, robustez, y estabilidad al sistema además de confiabilidad.

Lo siguiente es comenzar con el dimensionamiento y la estructuración del dispositivo, transportador automático bidimensional, partiendo de hechos concretos como: el lugar de ubicación (taller), carga a transportar, y esfuerzos y deformaciones a los que podrá estar sometido durante una jornada normal de trabajo.

Las herramientas computacionales son de gran ayuda para el diseñar, brindando certeza y confiabilidad a cada diseño (viga, columnas, uniones, etc).

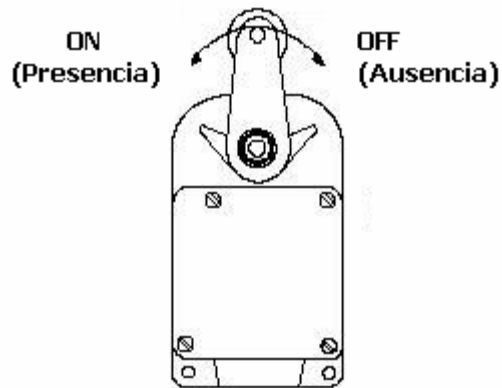
Una vez terminado el dimensionamiento, se continúa con el análisis del tipo de señales a controlar y la estabilidad de todo el sistema en general observándolo como un todo. La pregunta que debe surgir a continuación es: ¿Qué señales se deben manejar y cómo se controlar?

Debido a que el proceso de galvanizado es un proceso secuencial, es indispensable controlar la posición de las piezas a transportar sobre cada una de las etapas del proceso y las velocidades de tanto elevación como de traslación durante el mismo, ejecutadas por los motores de inducción del trole y el elevador.

El control de velocidad de los motores de inducción, se lleva a cabo por lo general en la industria mediante la implementación de variadores de velocidad. Ésta solución además de ser muy usada en la industria, es la solución ideal para el caso del transportador bidimensional, puesto que es una alternativa que brinda estabilidad, robustez y precisión al sistema.

El problema del control de la posición del carrito sobre la viga del puente grúa se lleva a cabo mediante la incorporación de sensores electromecánicos a lo largo de toda la viga principal, los cuales tienen la función de emitir señales de presencia de dicho carrito en lugares específicos a lo largo de toda la viga, Figura 1, indicando así las etapas del proceso secuencial.

Figura 1. Señales percibidas por cada uno de los sensores electromecánicos, de tipo digital.



La coordinación de las señales de entrada producidas por los sensores y las señales de salida, generadas por los variadores para controlar la velocidad de los motores, se llevan acabo mediante el uso de un autómata programable. El autómata programable además de manejar señales digitales, brinda rapidez, robustez, exactitud, flexibilidad, confiabilidad y seguridad al sistema.

La pregunta que surge a continuación es: ¿Qué tipo de conexiones son necesarias para establecer una comunicación entre el controlador lógico programable, los sensores y los actuadores de todo el sistema, para así permitir un flujo coherente y simultáneo de las señales?

Para que exista simultaneidad y rapidez, tanto los actuadores como los sensores deben estar conectados en “paralelo” como se muestra en la Figura 2 o formando una conexión de tipo “bus”, Figura 3, como se conoce en la topología de las redes de comunicación. Debido a la necesidad de la velocidad de repuesta (transmisión de datos), la accesibilidad tanto para el P.L.C como para los variadores, y el manejo imprescindible de variables discretas, la comunicación se lleva acabo por medio del llamado PROFIBUS (medio).

Figura 2. Diagrama de conexiones generales, en “paralelo”.

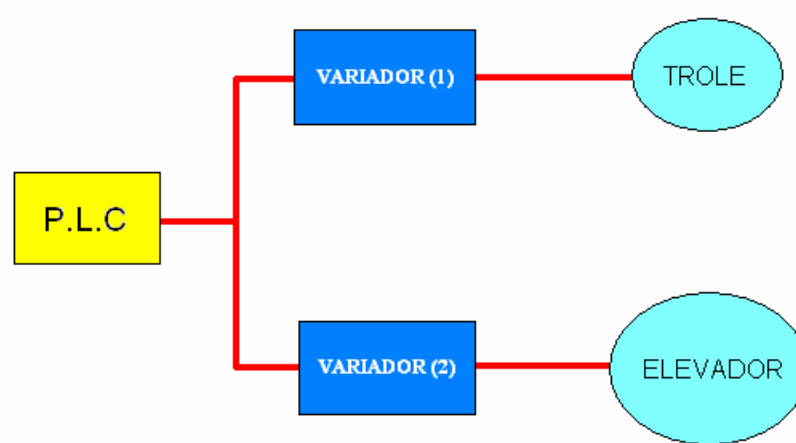
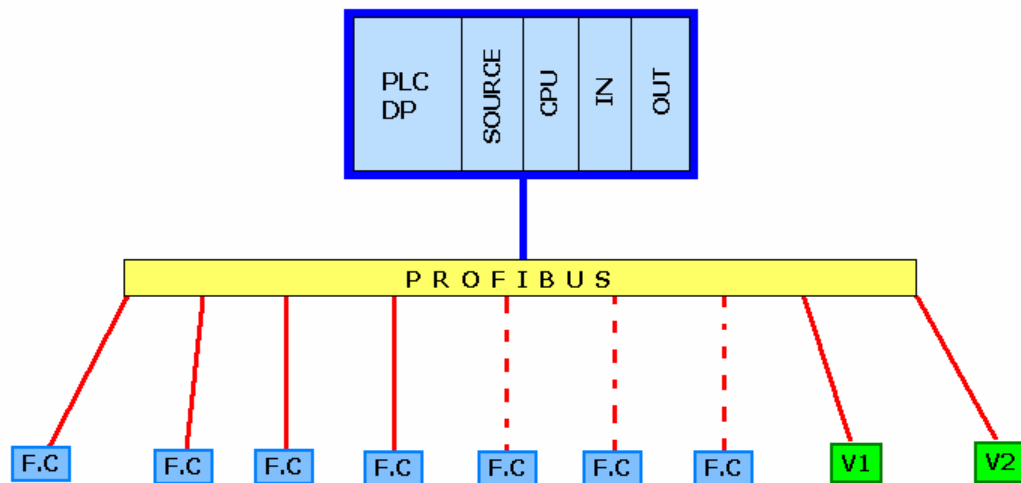


Figura 3. Diagrama de las conexiones para la comunicación de los finales de carrera y los variadores encargados de controlar los motores.



Puesto que las señales son de tipo digital a lo largo de todo el “bus”, todos los dispositivos a usar, tanto el P.L.C, como los sensores y los variadores, deben poder manejar señales de éste tipo, buscando uniformidad y coordinación entre

cada uno de los componentes, como se muestra en la Figura 4. Las señales de entrada son señales de tipo digital que indican presencia o “no” captada por los sensores electromecánicos, y las señales de salida de igual forma controlarán los actuadores con funciones de tipo: SET y RESET, Figura 5.

Figura 4. Flujo de señales a lo largo de todo el sistema, para el control del proceso.

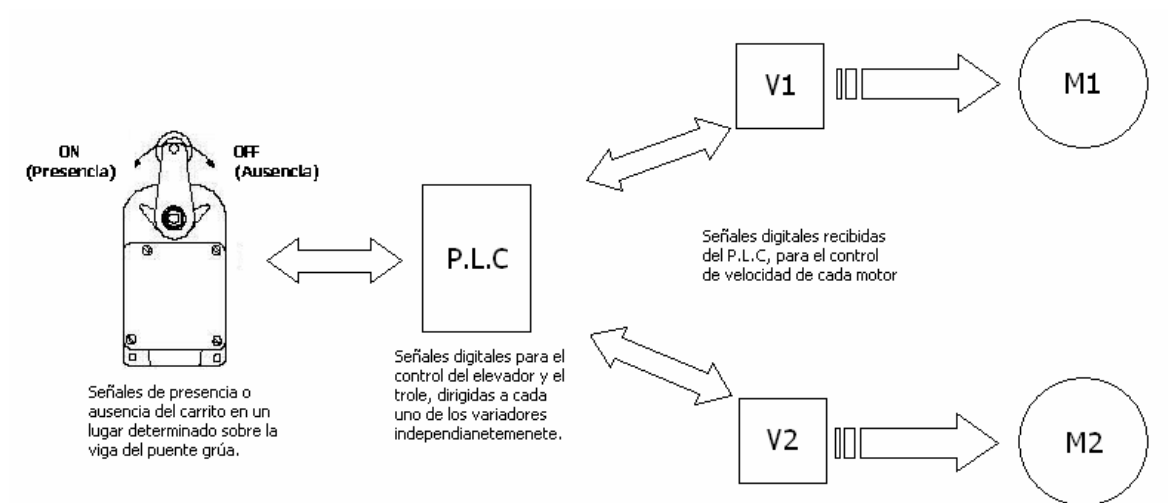
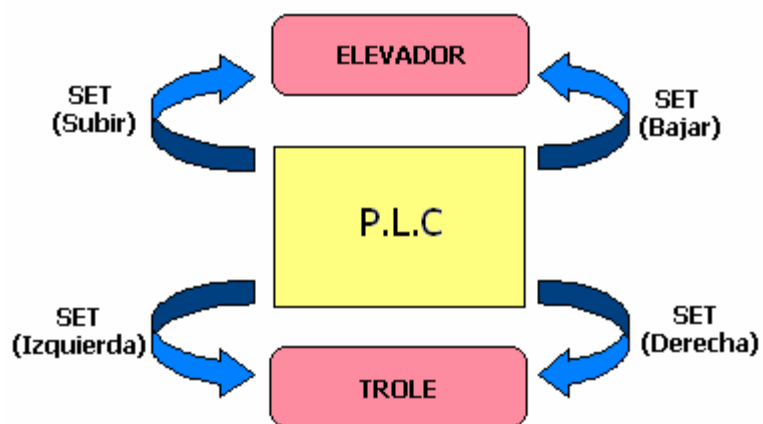
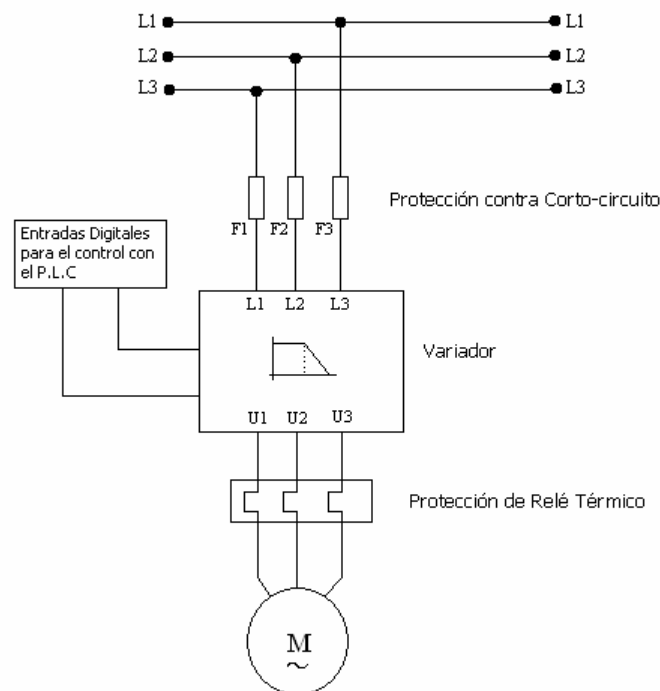


Figura 5. Señales de emitidas por el autómeta para el control de los motores, de tipo digital.



Una vez decidida el tipo de comunicación a llevar a cabo y el tipo de señales a trabajar, lo siguiente es realizar los esquemas eléctricos de los variadores con las líneas trifásicas y los motores, como se puede apreciar en la Figura 6.

Figura 6. Conexión eléctrica de los variadores de velocidad, con la red trifásica y el motor respectivo.



Como una de las últimas etapas dentro de diseño metodológico, después de haber calculado y seleccionado cada una de las piezas y dispositivos involucrados en el transportador automático bidimensional según las características y condiciones específicas del trabajo, queda restando la programación e integración de todo el sistema mecatrónico de una forma lógica, eficiente, y segura.

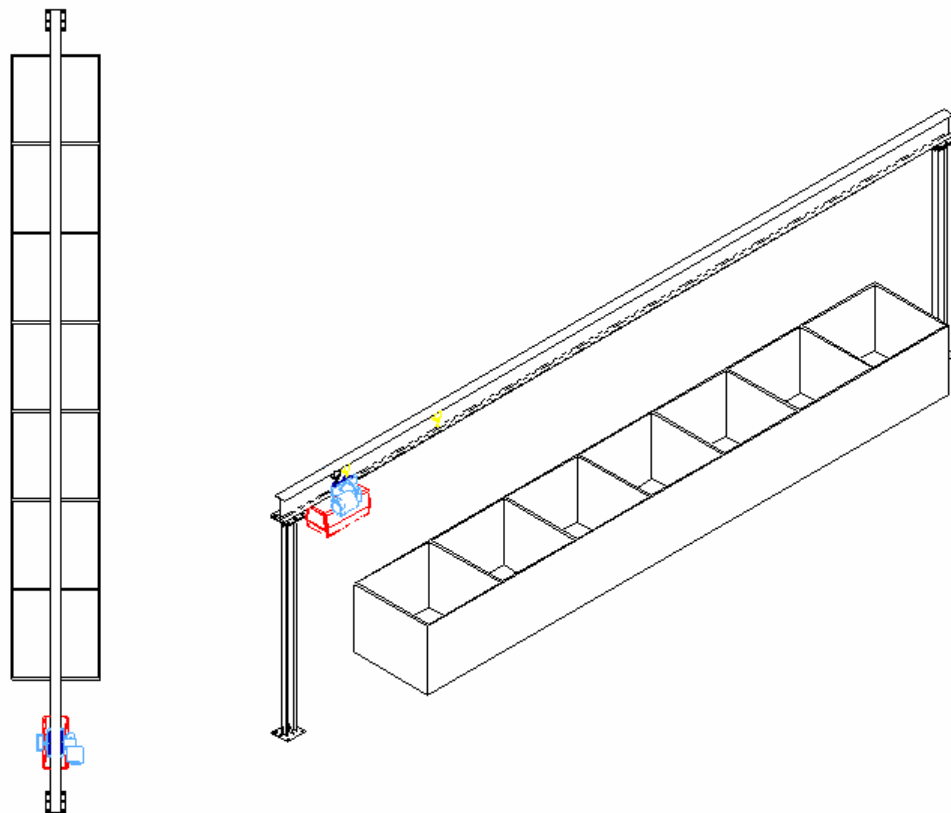
La programación es uno de los pasos más importantes del diseño del transportador bidimensional automático, pues es en ésta etapa donde se genera

toda la lógica del proceso. Es en esta etapa donde se debe introducir toda la seguridad y robustez al sistema, por medio de líneas de código.

La suposición de posibles errores es indispensable para evitar inconvenientes que pueden llegar a ocurrir, para así generar un ambiente seguro y confiable, tanto para el operario como para la empresa como se pensó desde un principio.

Finalmente llega el momento de ensamblar e integrar mecánicamente todas la partes involucradas dentro del transportador automático bidimensional como lo son: tanto la estructura de puente grúa, como trole, y elevador, variadores de velocidad, sensores electromecánicos y el autómata programable; todo dentro de una red de comunicación que permite una transmisión de señales simultánea y coherente entre cada uno de los dispositivos de control.

Figura 7. Ensamble y agrupación de piezas.



Comparación Entre El Proceso Manual Y El Proceso Automatizado.

El proceso de galvanizado utilizado originalmente tiene las siguientes características:

1. Es un proceso muy manual o artesanal.
2. El transporte de piezas a recubrir se hace a mano, por lo general entre una o dos personas.
3. La carga a transportar depende de la capacidad del trabajador, entre 40 a 50 kilogramos, puesto que es él mismo quien se encarga del transporte.
4. La presencia de mínimo uno o dos trabajadores es indispensable, tanto para el transporte, como para controlar los tiempos en cada una de las soluciones del proceso y así garantizar el recubrimiento metálico deseado.
5. El operario está sometido durante toda su jornada laboral a tareas tediosas y repetitivas, además de estar siempre en contacto con los vapores emitidos por muchas de las etapas del proceso que pueden afectar su salud.
6. En ocasiones se presentan errores humanos, que pueden generar problemas desde impurezas en el recubrimiento final, como accidentes sobre los mismos trabajadores como en la empresa.

El mejoramiento de éste tipo de operación, por medio de la inclusión de un transportador automático bidimensional tendrá las siguientes características:

1. Es un proceso mucho más moderno y puede considerarse automático.

2. El transporte se lleva a cabo por medio de un puente grúa automatizado para este tipo de proceso secuencial.
3. La carga a transportar podrá llegar a ser hasta de una tonelada, es decir, aproximadamente **veinte veces** mayor a la del proceso manual.
4. Existirá un supervisor aislado del proceso encargado de correcto desarrollo del mismo.
5. Se podrán realizar el mismo número de piezas que en el proceso manual, pero en menor tiempo, debido a la capacidad de carga del transportador automático.
6. Las tareas tediosas y repetitivas serán realizadas por una máquina no por un humano.
7. Debido a la innecesaria presencia directa del operario durante el proceso, se eliminarán errores humanos y defectos sobre el recubrimiento final de las piezas debido a impurezas, evitando pérdidas para la empresa, además de proteger al operario del contacto continuo con vapores nocivos contra su salud.

1. ASPECTOS FÍSICO-MECÁNICOS

1.1 TRANSPORTE DE CARGA EN LA INDUSTRIA - PUENTES GRUA

Como su nombre lo indica, son estructuras rodantes en forma de puente, apoyadas lateralmente sobre parejas de ruedas ensambladas en vigas denominadas testeras, las cuales están situadas a lado y lado de la viga puente y sirven como apoyos de esta, bien sea sencilla o doble, según lo exija la capacidad de la grúa.

La configuración estructural de la viga principal depende de la magnitud de la carga a trasladar, de la luz o distancia entre ejes de ruedas laterales y de las velocidades operantes para trasladar la carga, bien del carrito que se desplaza transversalmente sobre la viga puente, o de toda la grúa en su traslación longitudinal.

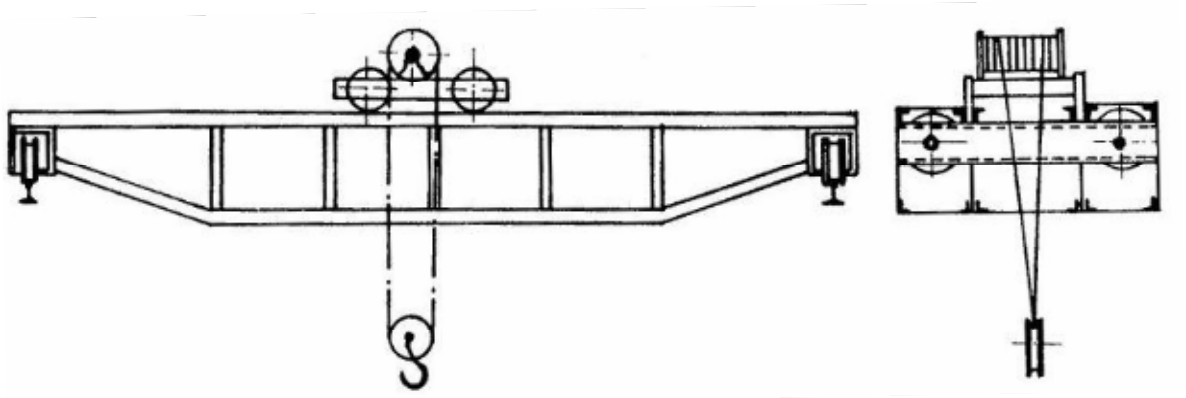
La capacidad de carga va desde unas pocas toneladas, hasta rangos del orden de 30, 50, y más toneladas, con algunas variantes en los diseños, tanto dimensionales como de operación, según los mecanismos sean manuales o eléctricos. Aunque los diseños y velocidades se pueden adoptar según las necesidades, existen recomendaciones dadas en tablas según experiencia de algunos fabricantes o casas especializadas.

1.1.1 Clasificación

Según la forma estructural de la viga puente se denomina así:

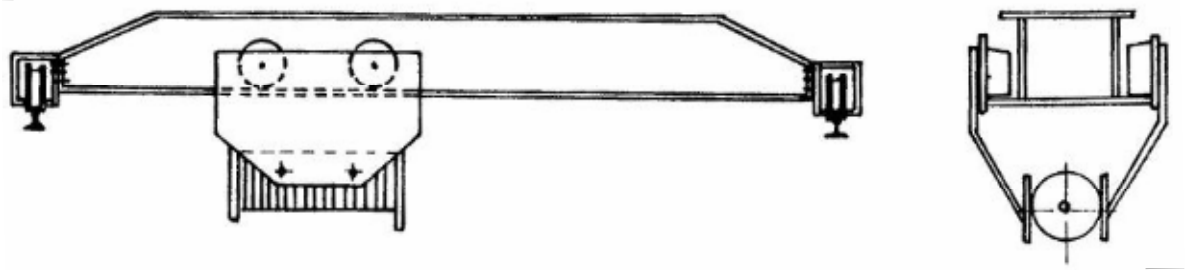
- Monorriel:
 Cuando se compone de una sola viga principal, que bien puede ser un perfil laminado en forma de “I”, o de doble canal “] [“.
- Puente grúa a base de viga principal armada, sencilla o doble:
 Conformado por perfiles y elementos metálicos denominados platabandas, de manera que se ensambla una sección simétrica en elementos, con un alma central sencilla, o doble, formando sección tubular o de cajón.

Figura 8. Puente grúa con viga principal armada, y carro rodando sobre cordón superior



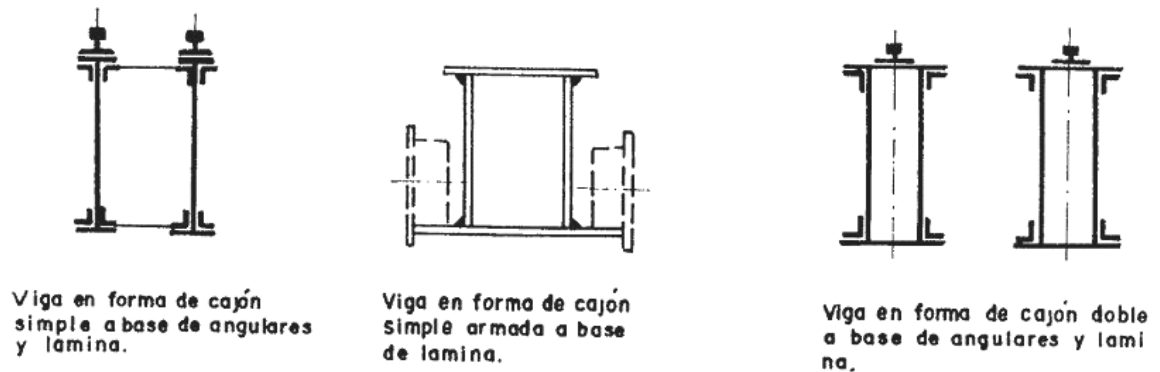
Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. **POSSO, Raúl**

Figura 9. Puente grúa con viga principal armada y carro rodando sobre cordón inferior.



Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. **POSSO, Raúl**

Figura 10. Algunos tipos de vigas usadas en puentes grúa.



Manejo de Transporte de Materiales – Grúas .**POSSO, Raúl**

- Puente Grúa con viga principal celosía con doble viga puente, más otras dos auxiliares, a lado y lado de las principales de la parte exterior y que les sirve de apoyo: Todas ellas son de sección variable en altura, máxima en el centro y mínima en los extremos a causa de la variación del momento flector desde el centro de la luz hasta los apoyos donde es cero, por lo que la viga se diseña en forma trapezoidal.

1.1.2 Mecanismos

En la operación de un puente grúa existen tres mecanismos accionados bien sea manual o eléctricamente, según la necesidad o rapidez de operación que se requiera. Se analizarán los mecanismos según las figuras anteriores.

Mecanismo de Elevación

Puede ser manual o eléctrico. El mecanismo de elevación manual consta de:

- a) Rueda o polea de maniobra movida por cadena sin fin de tipo eslabón redondo, con longitud suficiente para ser accionada desde el piso a la altura del operario.
- b) Transmisión compuesta de reductor o grupo de parejas de engranajes, entre el eje de la polea de maniobra y el tambor que recibe los ramales soportes de la carga. El cálculo de la relación de transmisión es función de los torques resistentes y motor, tal como para cualquier aparejo manual. Su valor es:

$$i = \frac{Q \times R_t}{P_o \times a \times \eta_t} \quad (1.1)$$

Donde:

Q = carga en Kg.

R_t =radio del tambor o polea soporte de la carga

P_o = fuerza del operario, entre 15 y 25 Kg.

a = radio de la polea o rueda de maniobra, entre 30 y 40 cm.

η_t = rendimiento total de la transmisión, entre 0.9 y 0.95 por cada pareja de engranajes

- c) Tambor para cable, donde se enrollan los ramales de la carga.
- d) Elementos soportes de la carga: cable o cadena y el gancho o argolla de enganche.

Si el mecanismo de elevación es eléctrico, se cambia la polea de maniobra por motor, cuya potencia nominal a velocidad de régimen se halla por la fórmula:

$$C.V = \frac{Q(\text{kg}) \times v(\text{m} / \text{seg})}{75 \times \eta_{\text{tot}}} \quad (1.2)$$

$$K.W = \frac{Q(\text{kg}) \times v(\text{m} / \text{min})}{6120 \times \eta_{\text{tot}}} \quad (1.3)$$

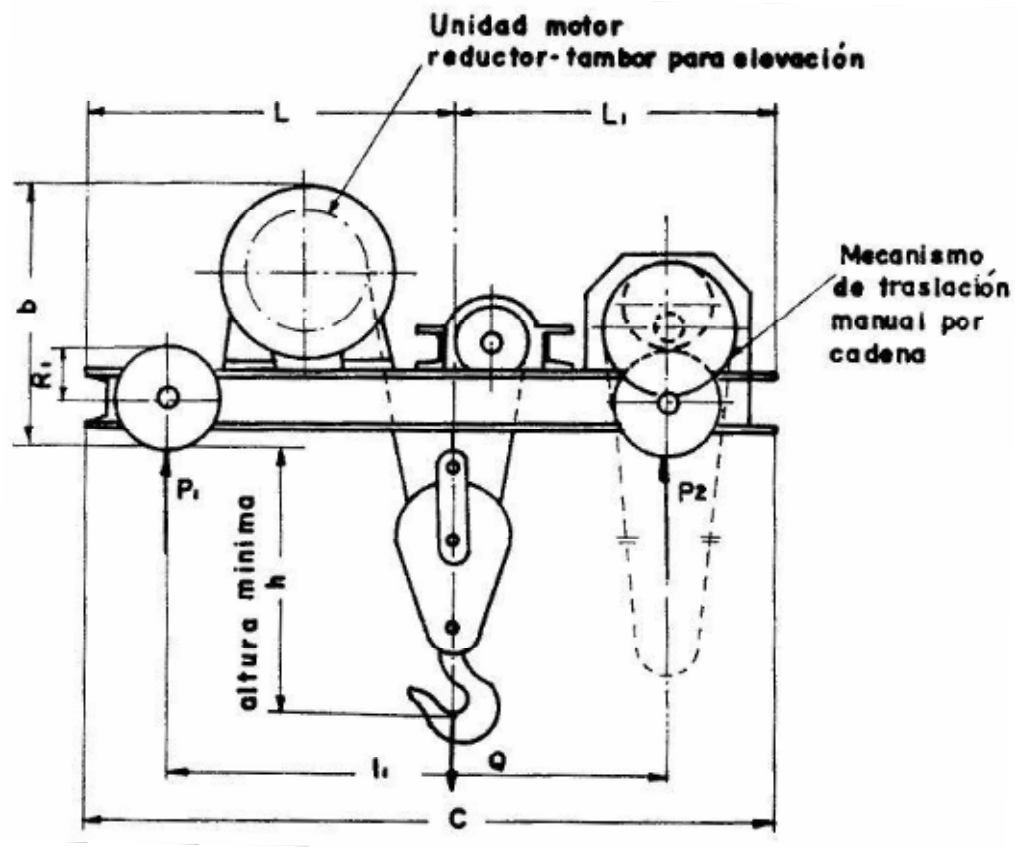
Donde:

η_{tot} = rendimiento total = η_t (transmisión) x η (según el tipo de motor)

La relación de transmisión es:

$$i = \frac{(r.p.m)_{\text{motor}}}{(r.p.m)_{\text{tambor}}} \quad (1.4)$$

Figura 11. Mecanismo de elevación.



Mecanismo de Translación Transversal

También puede ser manual o eléctrico y sirve para accionar el carrito en su desplazamiento sobre la viga puente. Si es manual, se diseña con base a la relación de torques así:

Valor de la relación de transmisión: $i = (\text{Torque de rodadura})/(\text{Torque del motor})$

En otras palabras:

$$i = \frac{F_{rod} \times R_r}{F_{op} \times R_m \times \eta_{tot}} \quad (1.5)$$

$$\frac{F_{rod} = (Q + G_o)(\mu \times r_e) + \mu'}{R_r} \quad (1.6)$$

Donde:

F_{rod} = fuerza de rodadura

R_r =radio de las ruedas

P_o = fuerza del operario

R_m = radio de maniobra

η_{tot} = rendimiento total

Q = peso de la carga

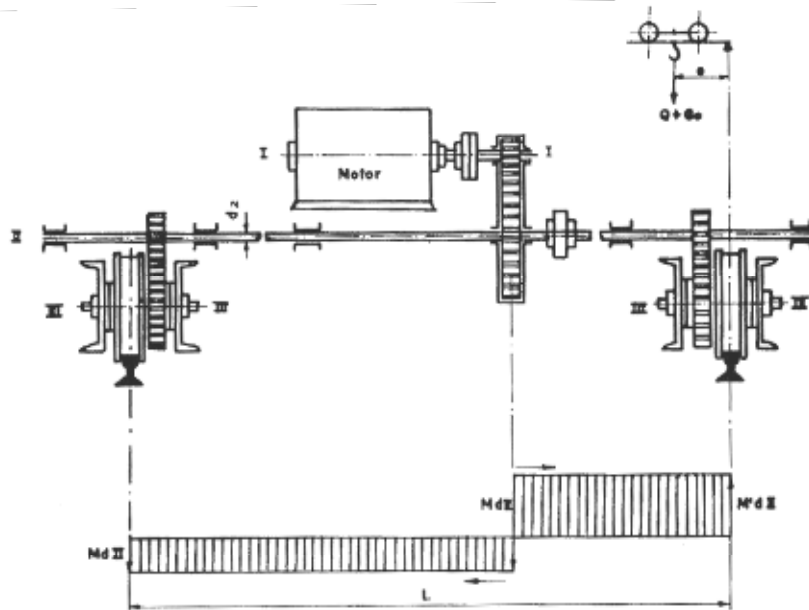
Q_o = peso del carrito con mecanismos anexos

μ = coeficiente de rozamiento en ejes de ruedas

μ' = brazo de rodadura entre material de vía y rueda

r_e = radio de eje de ruedas

Figura 12. Mecanismo de transmisión de un puente grúa.



Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. **POSSO, Raúl**

Para el mecanismo eléctrico se sustituye la polea de maniobra por motor eléctrico, cuya potencia nominal es de valor:

$$C.V = \frac{F_{rod} \times V_{tr}}{75 \times \eta_{tot}} \quad (1.7)$$

Donde:

V_{tr} = velocidad de traslación

Fuerzas en kg y velocidad en m/seg.

La fuerza de rodadura se debe aumentar en un 40% por pérdidas en cubos de ruedas y de pestañas en éstas con la pista. La relación de transmisión vale:

$$i = \frac{(r.p.m)_{motor}}{(r.p.m)_{ruedas}} \quad (1.8)$$

$$(r.p.m)_{ruedas} = \frac{V_{tr}}{2\pi \times R_r} \quad (1.9)$$

Mecanismos de Traslación Longitudinal

Sirven para desplazar toda la grúa a lo largo del área que cubre en el edificio donde actúa, pudiendo ser también de acción manual o eléctrica.

Las fórmulas para la obtención de potencia y relación de transmisión son:

$$K.W = \frac{F_{rod} \times V_{tr}}{6120 \times \eta_{tot}} \quad (1.10)$$

$$C.V = \frac{F_{rod} \times V_{tr}}{75 \times \eta_{tot}} \quad (1.11)$$

$$F_{rod} = \frac{(Q + G_o + G)(\mu \times r_e \times \mu')}{R_r} \quad (1.12)$$

Donde:

G = peso estructural de viga principal, más esteras y mecanismo de traslación total.

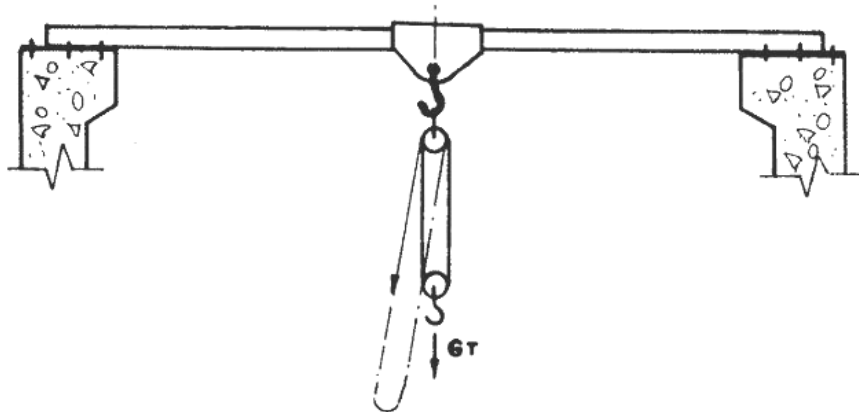
La relación de transmisión del conductor vale:

$$i = \frac{(r.p.m)_{motor}}{(r.p.m)_{ruedas}} \quad (1.13)$$

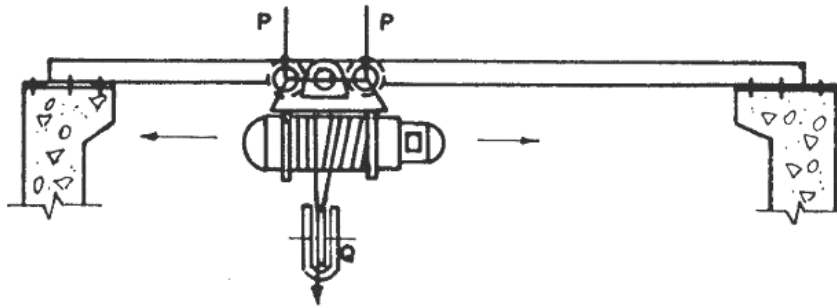
$$(r.p.m)_{ruedas} = \frac{V_{tr}}{2\pi \times R_r} \quad (1.14)$$

Ver [11]

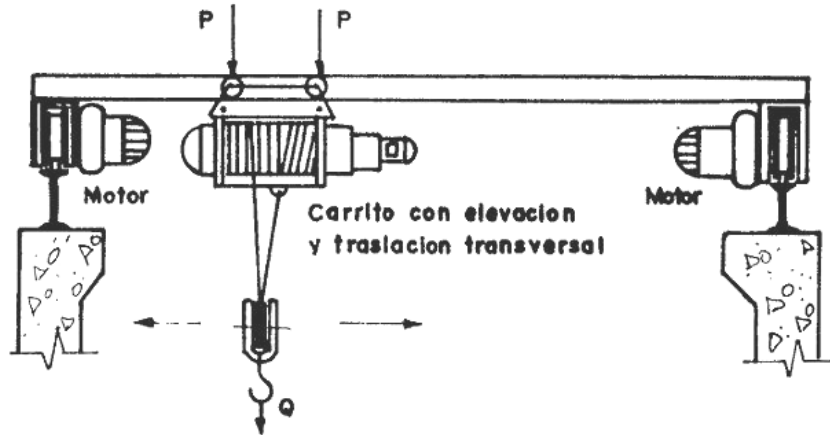
Figura 13. Dispositivos de elevación, traslación transversal y traslación total.



A- Estructura fija sin ningún mecanismo de traslación, solo elevación.



B- Dispositivo con elevación y traslación transversal pero sin mecanismo de traslación de todo el conjunto.



C - Dispositivo con los tres mecanismos : Elevación, traslación transversal y traslación total.

1.1.3 El Monorriel

Como su nombre lo indica, es una viga puente a base de un solo perfil laminado en "I" o armado con doble perfil en "C", sobre cuyas alas inferiores o superiores rueda un carrito portador de la carga. Tanto la traslación del carro como la elevación de la carga puede ser manual u eléctrica.

La viga se apoya en los extremos sobre vigas denominadas testeras o vigas de cabeza, a las cuales se acoplan las parejas de ruedas para la traslación total de todo el conjunto, bien en forma manual o por motor eléctrico.

Tanto la capacidad de carga como las luces entre apoyos no pueden ser excesivas y se relacionan en forma inversa, es decir que a una menor luz hay mayor capacidad de carga.

Los mecanismos de que consta un monorriel son los mismos ya mencionados para cualquier tipo de grúa a saber: elevación de la carga, traslación transversal del carrito con la carga y traslación longitudinal o total del dispositivo en conjunto.

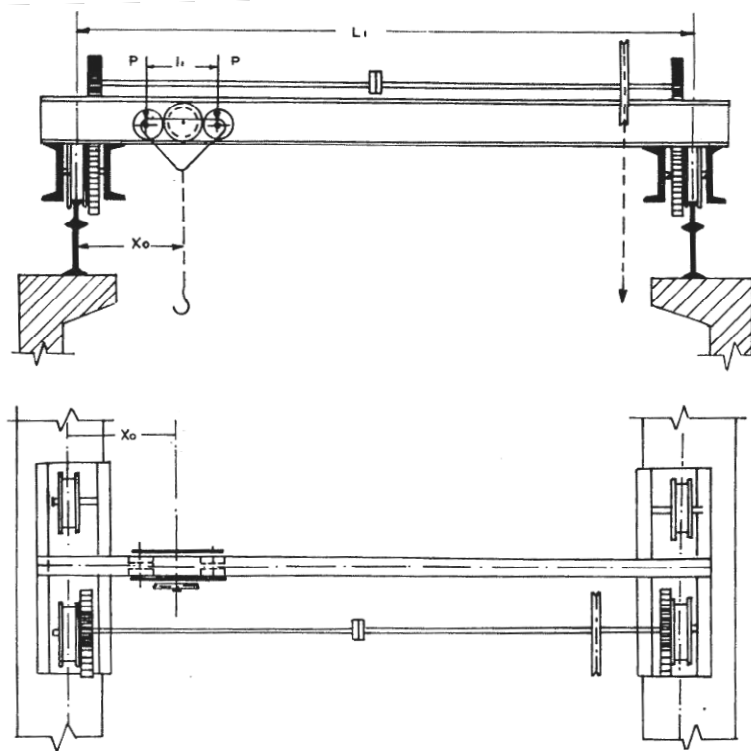
El cálculo de potencias y relaciones de transmisión para los reductores, se efectúan en la forma ya descrita para cada uno de los mecanismos de grúas.

El diseño y ubicación de los elementos para los diferentes mecanismos, presentan algunas variantes según la operación sea manual o con motor.

Respecto del carrito se pueden observar dos diseños típicos, según las ruedas se apoyen por encima sobre las alas superiores, o bien la hagan rodando sobre las alas inferiores. El primer diseño economiza un par de ruedas, ya que sólo utiliza dos de ellas, mientras el segundo exige soportar el carro en cuatro ruedas, enfrentadas por parejas con el alma del perfil de por medio. Este sistema es el más empleado para la elevación con motor, debido al gran volumen ocupado por

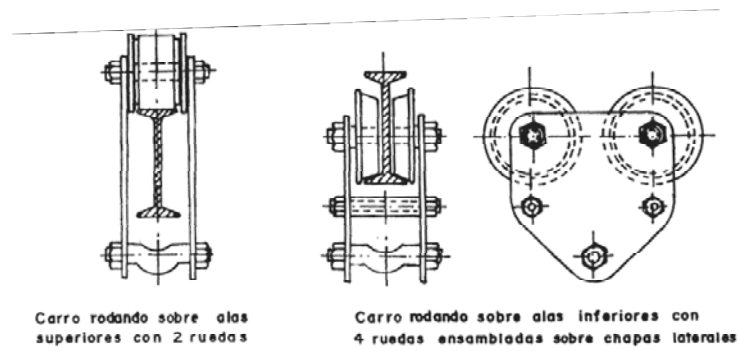
el motor con la unidad moto-reductora, además del mecanismo para la traslación del carro.

Figura 14. Monorriel con todos los mecanismos manuales.



Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. **POSSO, Raúl**

Figura 15. Diferentes diseños para carro de monorriel.

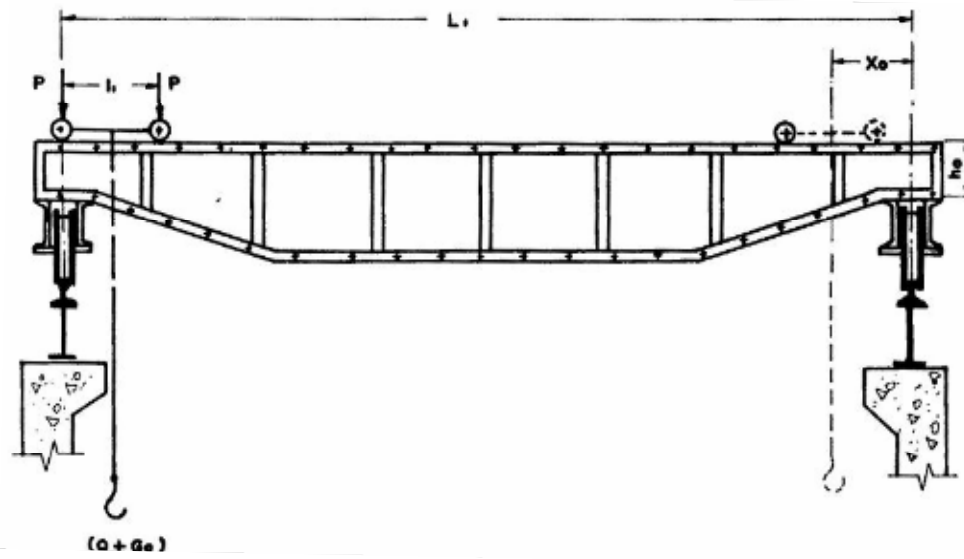


Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. **POSSO, Raúl**

1.1.4 Puentes Grúas Con Vigas Armadas

Cuando el diseño de una sola viga puente en perfil laminado resulta inapropiado en razón al gran tamaño y demasiado peso, es conveniente diseñar una o dos vigas armadas a base de perfiles más pequeños (ángulos por lo general) enlazados con platinas y un alma en el centro, con alturas variables, máxima en la zona central de la luz, y decreciente hacia los extremos en forma trapezoidal, siendo mínima en los apoyos donde el momento flector es cero.

Figura 16. Puente grúa con viga- puente armada de alma llena.



Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. **POSSO, Raúl**

1.1.5 Algunos Aspectos Importantes para Tener en Cuenta

Resistencia a la Traslación

Si “ μ ” es el coeficiente de rozamiento por giro en los ejes, “ f ” es el brazo de rozamiento por rodadura, tendremos que la resistencia a la traslación será:

$$W_r = \frac{(Q + G_o + G)}{R} \times (\mu \times r_e + f) \quad (1.15)$$

Donde:

G_o = peso del carrito con mecanismos anexos

G = peso de la nave principal

Q = peso de la carga a levantar

r_e = radio de eje de ruedas

R = radio útil de las ruedas, donde hacen contacto con la vía

W_r = resistencia a la traslación

Figura 17. Esquema general de un puente grúa, con dimensiones etiquetadas para el uso de la siguiente tabla.

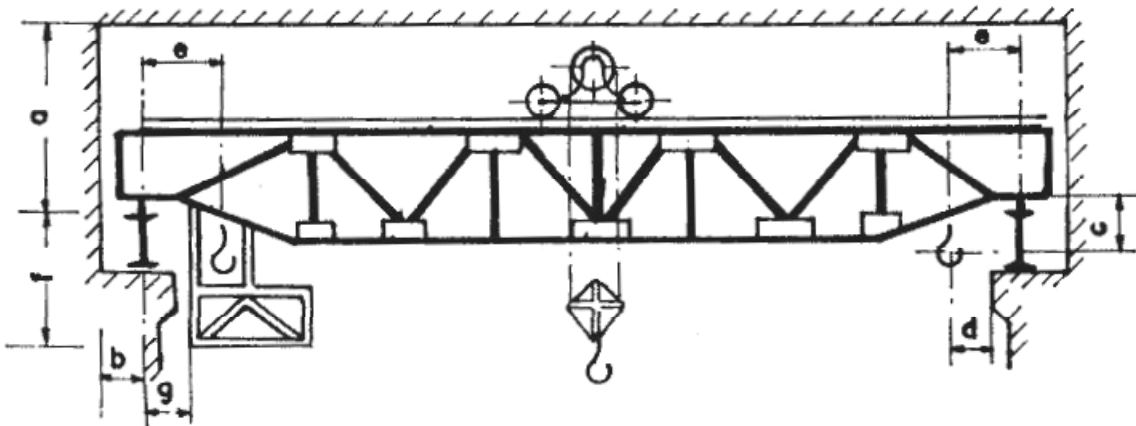
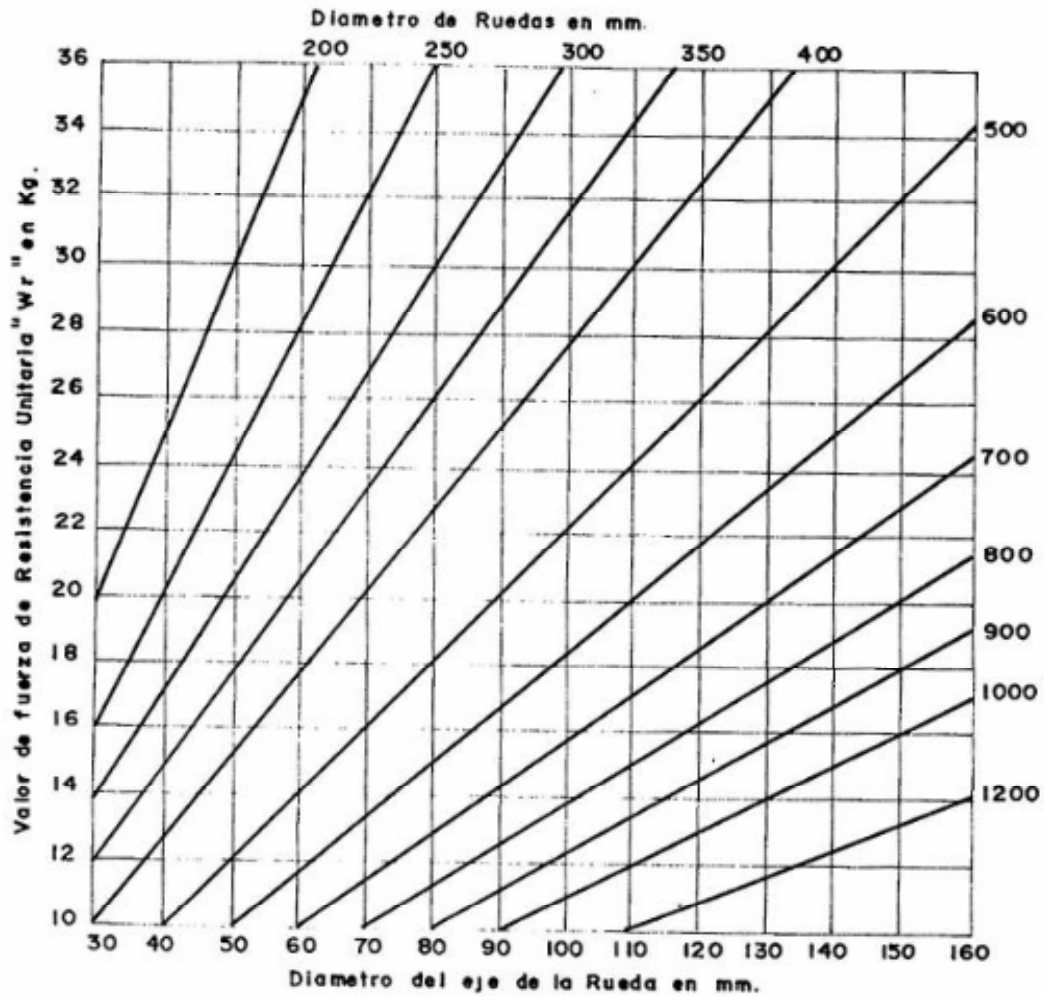


Tabla 1. Gráfico para el cálculo aproximado de la resistencia a la traslación con coeficientes $\mu = 0.01$ y $f = 0.05$. Resistencia unitaria a la traslación por tonelada de peso total, es decir donde $W_r = (1000/R) * (\mu r + f)$ Kg/ton.



Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. **POSSO, Raúl**

Hay que tener en cuenta además, el rozamiento de las pestañas de las ruedas contra la vía, por esta razón se debe aumentar el valor del W_r calculado, ente un 30% y 50%. Para un cálculo aproximado, se admite que la resistencia por rozamiento de la traslación es de 25 a 35 kilogramo por tonelada de peso a

trasladar. Habrá por lo tanto dos resistencias por rozamiento de traslación, para cada uno de los juegos de ruedas a cada lado del puente.

Velocidad de Traslación

Según estudios basados en la experiencia de largos años, se encuentra normalizada de acuerdo a la carga a levantar y a la luz entre apoyos. En la siguiente tabla, se reúne una amplia suma de datos referentes a dimensiones de acuerdo a la carga "Q", rango de velocidades de 60 a 125 m/min, para luces entre apoyos de 10 a 30 metros y valores de carga de 5, 7.5, 10, 15 hasta 75 toneladas. Adicionalmente en la misma tabla se encuentran datos referentes a: peso del carrito y rúa completa, presión sobre un rueda P_{max} , separación entre ruedas (para un par a cada lado), ancho del carril (para un par de rudas a cada lado), velocidad del sistema de traslación y su potencia, lo mismo que para el sistema de elevación y de traslación longitudinal.

Potencia de Traslación

Designado por W_r la resistencia a la traslación en Kg, por V_t la velocidad de traslación en m/min y por " η " el rendimiento total del mecanismo, tendremos el valor de la potencia nominal a velocidad de régimen, como sigue:

Ver [11]

$$K.W = \frac{(W_r) \times V_t}{6120 \times \eta_{tot}} \quad (1.16)$$

Tabla 2. Velocidades, potencias y dimensiones principales (según figura 9) en puentes grúas, según capacidad y luz entre apoyos.

Carga Q kg	Luz L ₁ m	Velocidades y Potencia del Motor		Presión Máxima sobre ruedas y distancia entre ejes en vigas testeras Kg	Dimensiones en mm										Peso en Kg		
		Elevación m/mín	Traslación transversal CV		Traslación total m/mín	Traslación CV	a	b	c	d	e	f	g	Carro		Grúa Completa	
3000	8 20	6,2	32	1,1	100	6,8	3400	220	150	180	440	750	300	200	500	2100	7700
5000	8 20	4	30	1,7	85	8	4500	220	160	190	485	800	850	200	500	2400	8000
7500	8 20	4	32	2,3	80	8	6300	220	1675	210	485	850	300	200	500	3000	8700
10000	8 20	3,75	25	2,3	80	12,5	8700	300	1700	225	500	850	900	200	500	3700	10200
15000	8 20	3,3	21	2,5	80	17	10900	220	1950	240	530	950	950	200	500	4600	11800
20000	8 20	2,4	17	2,5	70	17	14000	250	3050	250	600	950	1000	200	500	5600	14600
25000	8 20	2	13	4,4	65	17	17000	300	2150	260	650	950	1000	200	600	6600	15500
30000	8 20	2,2	17	5,8	55	17	20750	200	2200	280	650	950	1000	200	600	7500	19000
40000	8 20	1,6	13	6,5	60	24	27000	240	2500	290	750	1300	1300	200	600	8500	22000
50000	8 20	1,7	13	10	50	24	33500	240	2750	340	850	1300	1300	200	600	10000	29000
					35		37500	300									43000

Tabla 3. Dimensiones y datos sobre velocidades y pesos para puentes grúas eléctricos.

Carga Ton.	Luz m	a m.m	b m.m	c m.m	d m.m	e m.m	Separación ruedas de una terras m.m		Presión ruedas (con)²	Ancho de carril m.m	Velocidades y Potencias de Motores		Peso ton. Del ca- rro la grúa
							Elevación	Traslación carrito			Traslación total	CV.	
5	10	1600	200	400	850	750	2400	5	45	5	125	12	12
	14	1600	200	400	850	750	2600	6,5	45	7,5	125	12	12
	26	1700	300	300	800	800	3800	8,5	55	12	80	10	2,8
	30	1700	300	300	800	800	4000	9	55	12	70	10	23,5
7,5	10	1700	200	400	900	800	2600	7,5	45	7,5	100	11,2	11,2
	14	1700	200	400	900	800	2600	8,1	55	7,5	90	13,4	13,4
	26	1300	300	300	900	800	3600	10,3	55	19	70	10	3
	30	1300	300	300	900	800	4000	11,3	55	19	60	10	22,5
10	10	1800	230	400	950	1000	2800	9	55	9	110	13	13
	14	1800	230	400	950	1000	2800	9,7	55	28	100	15	15
	26	1900	300	300	1000	1100	3600	12,2	65	44	75	14	4
	30	1900	300	300	1000	1100	4000	13,4	65	44	65	14	28,6
15	10	2100	350	400	1000	1100	3200	12,2	55	8,8	110	16,2	16,2
	14	2100	350	400	1000	1100	3200	13,1	55	8,8	100	19,1	19,1
	26	2200	400	300	1050	1100	3600	16,2	65	44	80	20,5	20,5
	30	2200	400	300	1050	1100	4000	17,4	65	44	75	20,5	20,5
20	10	2150	275	500	1050	1100	3400	15,5	65	6,6	105	18,5	18,5
	14	2150	275	500	1050	1100	3400	16	65	6,6	95	21,5	21,5
	26	2250	400	400	1150	1150	3600	19,7	75	44	70	20	5,5
	30	2250	400	400	1150	1150	4000	20,9	75	44	65	20	37,5
30	10	2300	300	700	1200	1150	4000	20,6	75	4,4	100	42,8	42,8
	14	2300	300	700	1200	1150	4000	22	75	4,4	90	26	26
	26	2400	400	600	1300	1200	4000	26,1	75	44	80	29,6	29,6
	30	2400	400	600	1300	1200	4000	27,6	75	44	75	44	44
50	10	2600	350	300	1400	1500	4200	31,8	90	3,3	90	36,9	36,9
	14	2600	350	300	1400	1500	4200	33,7	90	3,3	85	41,1	41,1
	26	2700	400	700	1500	1600	4200	39,4	100	56	70	60	60
	30	2700	400	700	1500	1600	4200	41,3	100	56	65	68	68
75	10	3000	400	1000	1500	1600	4600	45	100	2,6	80	48,3	48,3
	14	3000	400	1000	1500	1600	4600	48,4	120	2,6	75	54,4	54,4
	26	3100	400	900	1600	1600	4600	52,7	120	66	65	25	81,6
	30	3100	400	900	1600	1600	4600	59,7	120	66	60	25	93

1.2 COLUMNAS

Una columna es una pieza estructural que soporta una carga axial por compresión y tiende a fallar como resultado de inestabilidad elástica, o pandeo, más que por trituración del material. La inestabilidad elástica es aquella condición de falla en la que la forma de la columna no es lo suficientemente rígida para mantenerla recta bajo la acción de la carga.

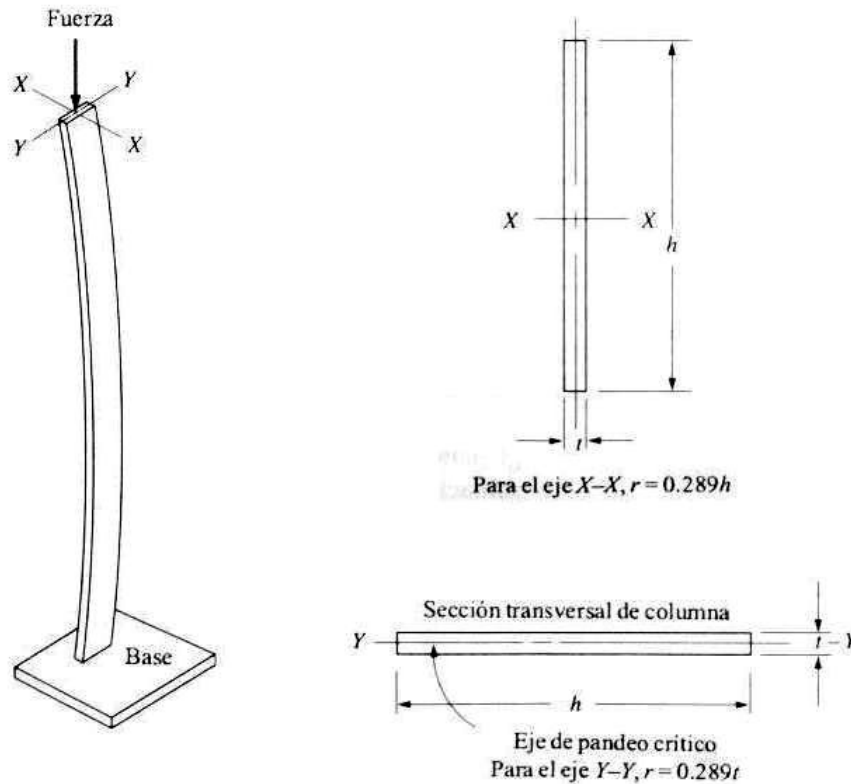
En el punto que se presenta el pandeo, se genera en forma súbita una flexión drástica del eje de la columna. En consecuencia, si la carga no se reduce, la columna se colapsará. Es evidente que este tipo de falla catastrófica debe evitarse en estructuras y elementos de maquinaria.

La tendencia de las columnas a pandearse depende de la forma y dimensiones de su sección transversal, junto con su longitud y la manera en que se una a piezas o soportes adyacentes. Las propiedades de la sección de la sección transversal importantes son:

1. El área de la sección, A
2. El momento de inercia de la sección, I , respecto al eje del cual el valor es mínimo.
3. El valor mínimo del radio de giro de la sección.

El radio de giro se calcula a partir de:
$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (1.17)$$

Figura 18. Pandeo de una columna delgada, rectangular. Aspecto general y radios de giro para el eje X-X y Y-Y.



Resistencia de Materiales Aplicada. **MOTT, Robert**

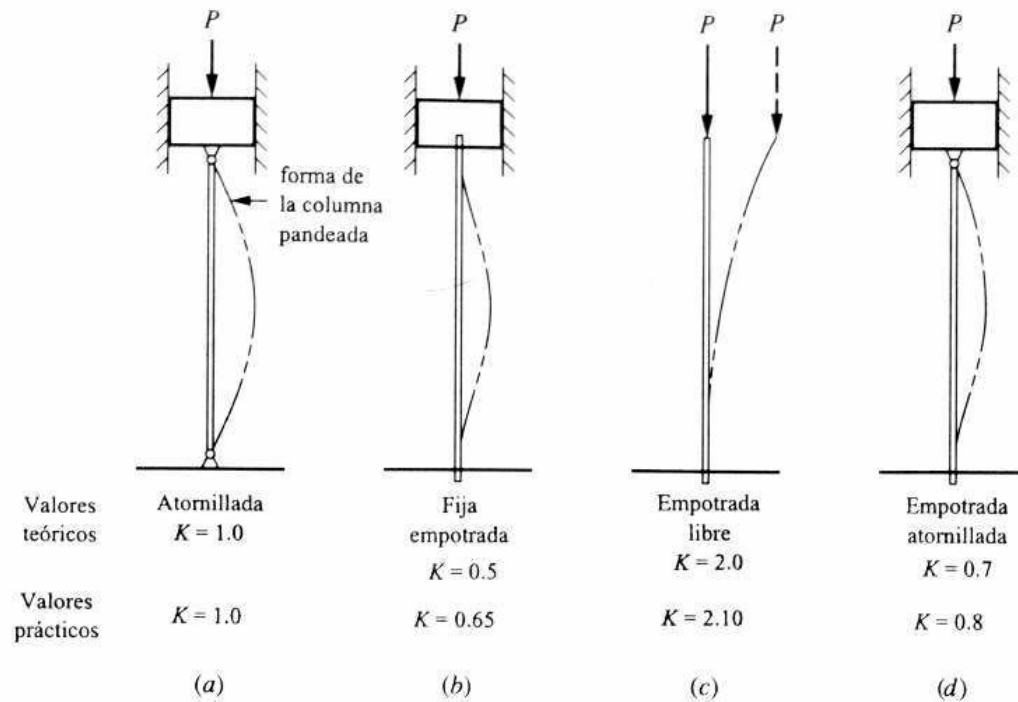
1.2.1 Empotramiento o Fijación de un Extremo y Longitud Efectiva

EL empotramiento se refiere a la manera en que se apoyan o sostienen los extremos de la columna. La variable más importante es la calidad de sujeción o fijación que se presenta en los extremos de la columna en contra de la tendencia a girar. Las formas de sujeción en los extremos son: *atornillada*, *fija* o *libre*.

Una columna con *extremo atornillado* se guía de manera que el extremo no pueda balancearse de un lado a otro, pero no ofrezca resistencia al giro del extremo. La

aproximación más precisa del extremo atornillado sería una articulación esférica o de rótula libre de fricción. Una articulación de perno cilíndrico ofrece poca resistencia a lo largo de un eje, pero puede sujetar el eje perpendicular al eje del perno.

Figura 19. Valores de K que describen el tipo de columna para hallar la longitud efectiva, $L_e = KL$, para diferentes conexiones en los extremos.



Resistencia de Materiales Aplicada. **MOTT, Robert**

1.2.2 Razón de Delgadez o Relación de Esbeltez

LA razón de delgadez es la relación de la longitud efectiva de la columna con su radio de giro mínimo. Se utiliza para la selección del método de cálculo.

$$R.D = \frac{L_e}{r_{\min}} = \frac{K \cdot L}{r_{\min}} \quad (1.18)$$

1.2.3 Razón de Transición de Delgadez o Corte de Columna (C_c)

Se utiliza para compararse con el la razón de delgadez, y decidir si la columna es larga o corta y de esta forma escoger el método de diseño, el cual se mostrará a continuación planteado en un algoritmo sencillo. Si $R.D > C_c$, se dice que la columna es larga; y si $R.D < C_c$, se dice que la columna es corta.

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 \cdot E}{s_y}} \quad (1.19)$$

Donde,

E = módulo de elasticidad del acero y s_y la resistencia a la cedencia del material.

1.2.4 Métodos de Cálculo Según el Tipo de Columna

Columna Larga: Fórmula de Euler

$$P_{cr} = \frac{\pi EA}{\left(\frac{KL}{r}\right)^2} \quad (1.20)$$

Donde, A es el área de la sección, y P_{cr} la carga crítica a la cual la columna empieza a pandearse.

Columna Corta: Formula De J. B Johnson

$$P_{cr} = A \cdot S_y \left[1 - \frac{S_y \left(\frac{KL}{r} \right)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad (1.21)$$

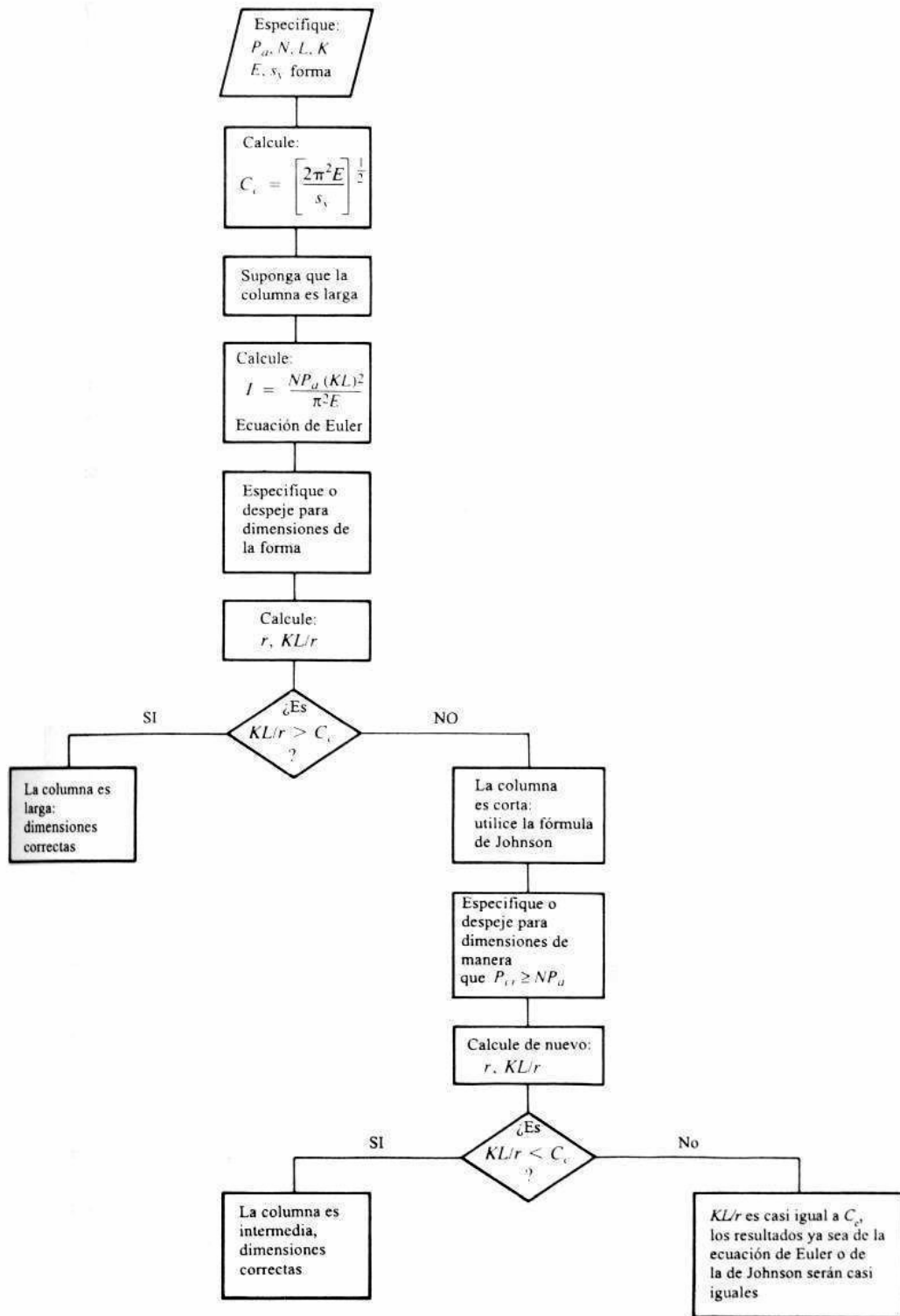
Donde

A = área de la sección, y P_{cr} la carga crítica a la cual la columna empieza a pandearse.

A continuación se presentará el algoritmo para el diseño de columnas. Está descrito de con una secuencia lógica. Es muy preciso y fácil de entender.

Ver [13]

Figura 20. Algoritmo de para el diseño de columnas.



1.5 Uniones Desarmables

Las uniones desarmables son aquellas que reúnen varias piezas de manera solidaria y forman con ellas una misma pieza; pero que permiten, en todo momento, la separación de las piezas unidas, mediante una maniobra fácil que no deteriora los elementos.

Este sistema es el más frecuentemente empleado, y uno de los medios de unión desarmable más utilizada es el empleo de tornillos y tuercas.

En las uniones desarmables o desmontables los elementos más empleados son los que poseen roscas como los tornillos y tuercas.

1.5.1 Tornillo

En la acepción más amplia, el tornillo es un cilindro parcial o totalmente roscado frecuentemente provisto de cabeza. La parte cilíndrica se llama vástago o caña y mediante la rosca se une a la tuerca.

Los tornillos tienen forma muy variada con el fin de satisfacer múltiples necesidades.

1.5.2 Soldadura

La soldadura es otro sistema de unir piezas de manera fija e íntima, de tal modo que no se pueden desarmar o desmontar sus elementos constitutivos. Soldar es unir piezas metálicas de la misma o semejante composición hasta formar una sola pieza.

La soldadura se puede realizar con aportación o adición de un material que suele ser de la misma naturaleza que las piezas a soldar o también sin aportación de material.

La “American Welding Society” se encarga de dictar normas y estándares, en todo lo que tiene que ver con soldadura en el mundo.

Ver [25]

Figura 21. Soldadura de filete – partes.

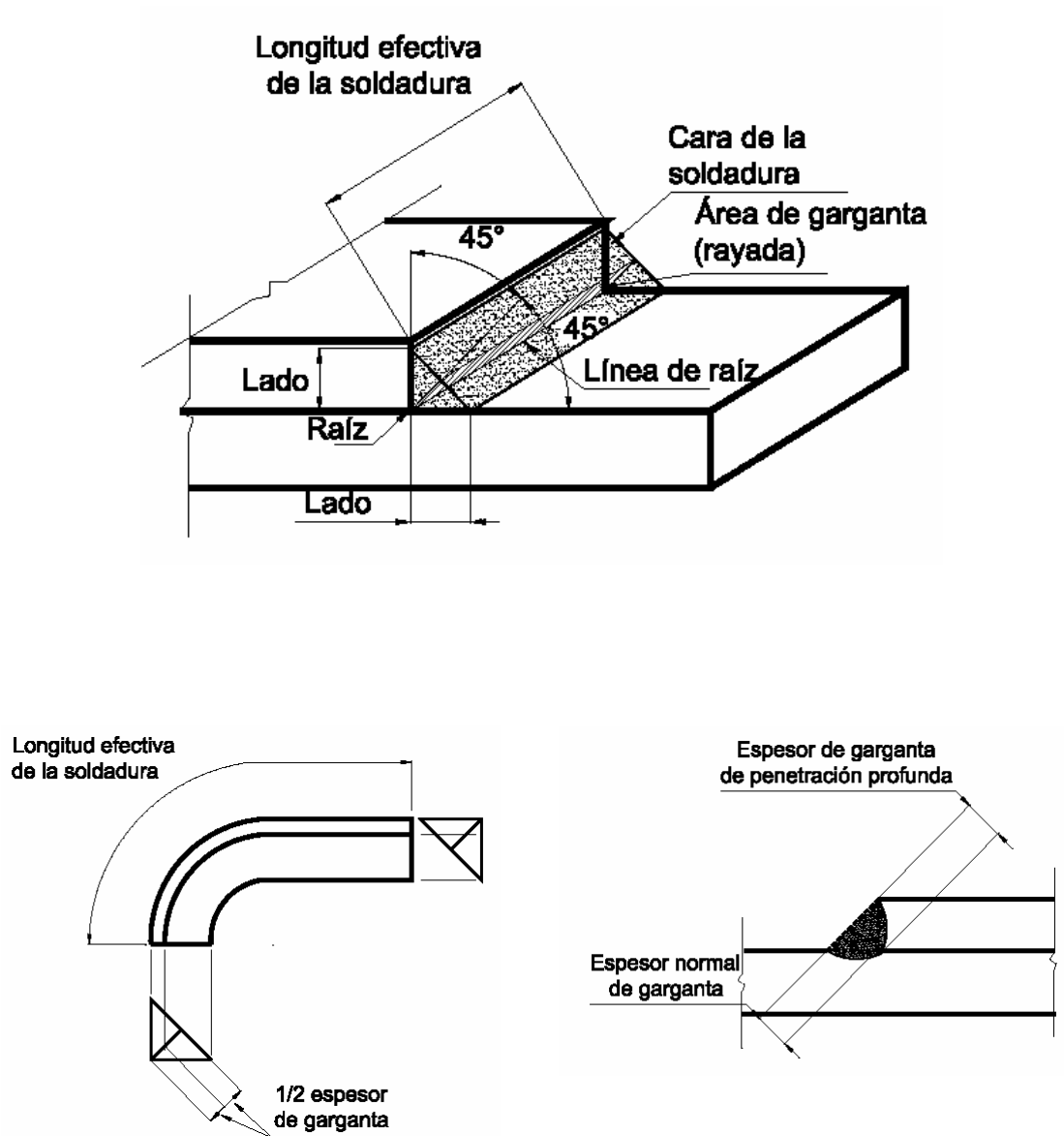


Figura 22. Nomenclatura de la soldadura según la AWS.

Clasificación de los electrodos según la AWS

Clasificación para proceso SMAW

E-6010
Electrodo
Resistencia a la tensión mínima 60,000 lb/pulg ²
Todas posiciones
Tipo de corriente y recubrimiento C.D.P.I. (porta electrodo al positivo)

Clasificación para electrodo de baja aleación

E-9018-B3
Electrodo
Resistencia a la tensión mínima 90,000 lb/pulg ²
Todas posiciones
Tipo de corriente C.A. C.D. P.I.
Composición estándar del depósito (ver tabla)

Tipos de recubrimiento y corriente

Posición	
1	Toda posición
2	Plano y filete horizontal
4	Toda posición mas vertical descendente

Digito	Tipo de recubrimiento	Corriente para soldar
0	Sodio celulosa	CDPI
1	Potasio celulosa	CA o CDPI
2	Sodio titanio	CA o CDPD
3	Potasio titanio	CA o CDPI
4	Titanio polvo fierro	CA o CDPI
5	Sodio bajo hidrógeno	CDPI
6	Potasio bajo hidrógeno	CA CDPI
7	Oxido de fierro polvo Fe	CA o CDPD
8	Bajo hidrógeno polvo Fe	CA o CDPI

CA= Corriente alterna

CDPI= Corriente directa polaridad invertida (+)

CDPD= Corriente directa polaridad directa (-)

Composición química del depósito de soldadura

Sufijo	C Carbono	Mn Manganeso	Si Silicio	Ni Níquel	Cr Cromo	Mo Molibdeno	Va Vanadio
A1	0.12	1.0	0.80	---	---	0.40-0.65	---
B1	0.12	0.90	0.60-0.80	---	0.40-0.65	0.40-0.65	---
B2L	0.05	0.90	0.8-1.0	---	1.00-0.50	0.40-0.65	---
B2	0.12	0.90	0.60-0.90	---	1.00-1.50	0.40-0.65	---
B3L	0.05	0.90	0.8-1.0	---	2.00-2.50	0.90-1.20	---
B3	0.12	0.90	0.60-0.80	---	2.00-2.50	0.90-0.65	---
B4L	0.05	0.90	1.00	---	1.75-2.25	0.40-0.65	---
B5	0.07-0.05	0.40-0.70	0.30-0.60	---	0.50-0.60	1.00-1.25	0.05
C1	0.12	1.20	0.6-0.8	1.00-2.75	---	---	---
C2	0.12	1.20	0.6-0.8	3.00-3.75	---	---	---
C3	0.12	0.40-1.25	0.80	0.80-1.10	0.15	0.35	0.05
D1	0.12	1.25-1.75	0.6-0.8	---	---	0.25-0.45	---
D2	0.15	1.65-2.00	0.6-0.8	---	---	0.25-0.45	---
G	---	1.00 min	0.80 min	0.50 min	0.30 min	0.20 min	0.10 min
M*	0.10	0.6-2.25	0.6-0.8	1.4-2.5	0.15-1.5	0.25-0.55	0.05

*Norma militar

http://www.infra.com.mx/productos/electrodos/clasificacion_electro.htm

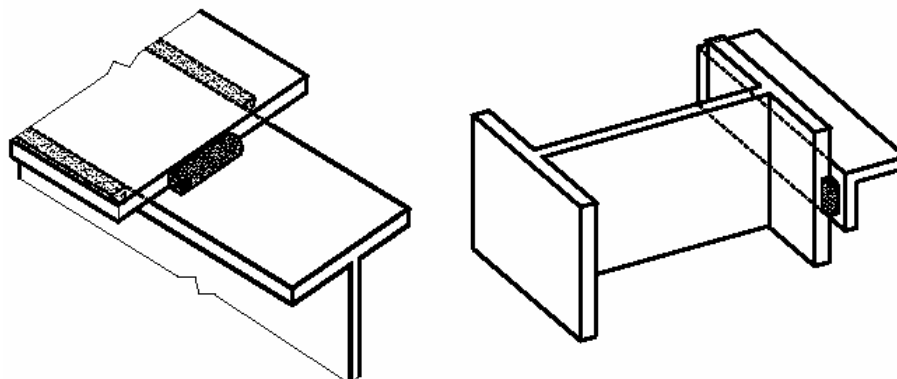
Figura 23. Tipo de electrodo de soldadura elegida.

Electrodos para aceros al carbono
Para aceros de baja aleación

Nombre comercial	AW 90	
Clasificación AWS	E 9016 B3	
Características	Arco suave y estable poco chisporroteo, mediana penetración, escoria de fácil desprendimiento, aleado con Cromo-Molibdenu. Calidad radiográfica. Utilizar C.D, P.I. o C.A.	
Usos y aplicaciones	Mantenimiento de fluxes, espejos y cuerpos de calderas. Construcción de implementos agrícolas y tuberías de alta presión. En la industria eléctrica, petrolera, petroquímica y agroindustrial.	
Presentación	Bote de plástico con bolsa de 5 kg.	
	Diámetro	
	Pulgadas	Milímetros
	1/8"	3.2
	5/32"	4
		Longitud
		14"

http://www.infra.com.mx/productos/electrodos/ clasificacion_electro.htm

Figura 24. Uniones con soldadura de filete.



http://www.infra.com.mx/productos/electrodos/ clasificacion_electro.htm

1.6 CARACTERÍSTICAS DE LOS PERNOS IMPERIALES

Dentro de las características importantes de los pernos se tiene la resistencia que está determinada por su diámetro y por el material del cual está hecho. Las dimensiones de los pernos están descritas más abajo.


La resistencia y tipo de acero del perno están marcados en alto relieve en la cabeza de los pernos.


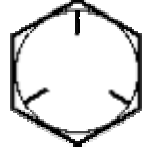



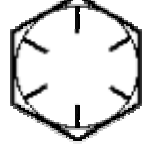

Dimensiones del perno según información de:

- ANSI B18.2.1 (Hexagonal y Heavy Hex)
- ASTM A325 y A490 (Pernos estructurales)
- AISC Manual of Steel Construction (Todos)

1.6.1 Designaciones para Pernos Según SAE





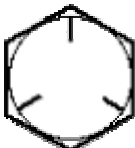

Tabla 4. Propiedades de pernos según SAE.


Grado SAE No.	Diámetros de mín. máx.		Resistencia a la tracción psi	Material	Marca
1	1/4	1.1/2	60,000	Acero de poco carbono	
	1.5/8	4	55,000	Acero de poco carbono	
2	1/4	1.1/2	74,000		
	7/8		60,000		

3	1/4 9/16	1/2 5/8	110,000 100,000	Acero con contenido mediano de carbono y trabajado en frío	
5	1/4 1.1/8	1 1.1/2	120,000 105,000	Acero con contenido mediano de carbono, bonificado y revenido	
5.1		3/8	85,000	Acero con contenido mediano de carbono, bonificado y revenido; montado con washer	
5.2	1/4	1	120,000	Acero martensítico con contenido mediano de carbono, bonificado y revenido	
7	1/4	1.1/2	133,000	Acero aleado con contenido mediano de carbono, bonificado y revenido	
8	1/4	1.1/2	150,000	Acero aleado con contenido mediano de carbono, bonificado y revenido	
8.2	1/4	1	150,000	Acero martensítico con pequeño contenido de carbono, bonificado y revenido	

1.6.2 Designaciones para Pernos Según ASTM

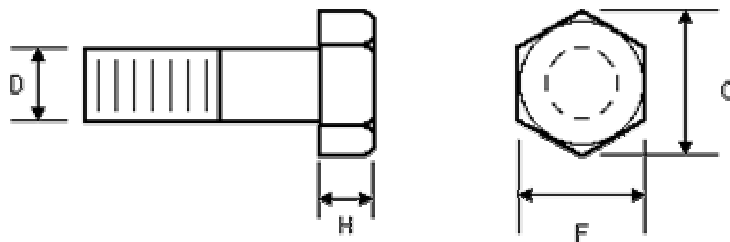
Tabla 5. Propiedades de pernos según ASTM.

Grado SAE No.	Diámetros de mín. máx.		Resistencia a la tracción psi	Material	Marca
A307	1/4 1.5/8	1.1/2 4	60,000 55,000	Acero de poco carbono	
A325 Tipo 1	1/2 1.1/8	1 1.1/2	120,000 105,000	Acero con contenido mediano de carbono, bonificado y revenido	
A325 Tipo 2	1/2 1.1/8	1 1.1/2	120,000 105,000	Acero martensítico con pequeño contenido de carbono, bonificado y revenido	
A325 Tipo 3	1/2 1.1/8	1 1.1/2	120,000 105,000	Acero resistente al tiempo, bonificado y revenido	
A449	1/4 1.1/8 1.3/4	1 1.1/2 3	120,000 105,000 90,000	Acero con contenido mediano de carbono, bonificado y revenido	
A490 Tipo 1	1/4	1.1/2	150,000	Acero aleado, bonificado y revenido	

A490 Tipo 3	1/4	1.1/2	150,000	Acero resistente al tiempo, bonificado y revenido	
----------------	-----	-------	---------	--	---

<http://www.vendo.com.pe/Accesorios/Caracteristicas%20de%20los%20pernos%20imperiales.htm>

Tabla 6. Pernos de cabezas hexagonales.

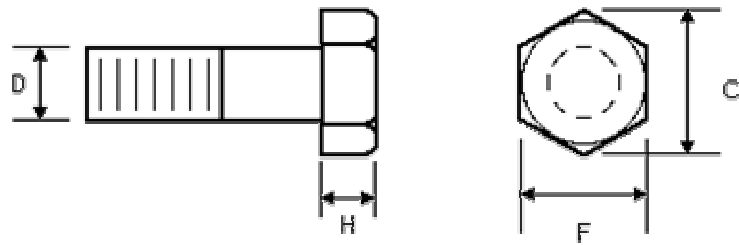


D	F	C	H
1/4	7/16	1/2	3/16
3/8	9/16	5/8	1/4
1/2	3/4	7/8	3/8
5/8	15/16	1-1/16	7/16
3/4	1.1/8	1.5/16	1/2
7/8	1.5/16	1.1/2	9/16
1	1.1/2	1.3/4	11/16
1.1/8	1.11/16	1.15/16	3/4
1.1/4	1.7/8	2.3/16	7/8
1.3/8	2.1/16	2.3/8	15/16

1.1/2	2.1/4	2.5/8	1
1.3/4	2.5/8	3	1.3/16
2	3	3.7/16	1.3/8
2.1/4	3.3/8	3.7/8	1.1/2
2.1/2	3.3/4	4.5/16	1.11/16
2.3/4	4.1/8	4.3/4	1.13/16
3	4.1/2	5.3/16	2
3.1/4	4.7/8	5.5/8	2./16
3.1/2	5.1/4	6.1/16	2.5/16
3.3/4	5.5/8	6.1/2	2.1/2
4	6	6.15/16	2.11/16
Todas las dimensiones en pulgadas			

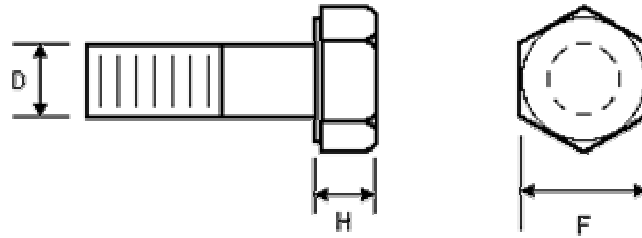
<http://www.vendo.com.pe/Accesorios/Caracteristicas%20de%20los%20pernos%20imperiales.htm>

Tabla 7. Pernos de cabezas hexagonales, serie pesada (Heavy Hex)



D	F	C	H
1/2	7/8	1	3/8
5/8	1.1/16	1.1/4	7/16
3/4	1.1/4	1.7/16	1/2
7/8	1.7/16	1.11/16	9/16
1	1.5/8	1.7/8	11/16
1.1/8	1.13/16	2.1/16	3/4
1.1/4	2	2.5/16	7/8
1.3/8	2.3/16	2.1/2	15/16
1.1/2	2.3/8	2.3/4	1
1.3/4	2.3/4	3.3/16	1.3/16
2	3.1/8	3.5/8	1.3/8
2.1/4	3.1/2	4.1/16	1.1/2
2.1/2	3.7/8	4.1/2	1.11/16
2.3/4	4.1/4	4.15/16	1.13/16
3	4.5/8	5.5/16	2
3.1/4	5		
3.1/2	5.3/8		
3.3/4	5.3/4		
4	6.1/8		
Todas las dimensiones en pulgadas			

Tabla 8. Pernos estructurales.



D	F	H
1/2	7/8	5/16
5/8	1.1/16	25/64
3/4	1.1/4	15/32
7/8	1.7/16	35/64
1	1.5/8	39/64
1.1/8	1.13/16	11/16
1.1/4	2	25/32
1.3/8	2.3/16	27/32
1.1/2	2.3/8	15/16
Todas las dimensiones en pulgadas		

<http://www.vendo.com.pe/Accesorios/Caracteristicas%20de%20los%20pernos%20imperiales.htm>

1.7 PLACAS DE BASE PARA COLUMNAS

Las columnas más bajas de una estructura casi siempre se apoyan sobre una cimentación de hormigón. Para impedir el aplastamiento de este, se insertan placas de base entre el acero y el hormigón para distribuir la carga. Para cargas muy pesadas, puede requerirse un emparrillado que por lo general está embebido en el hormigón. Éste consta de una o más capas de vigas de acero con separadores de tubo entre ellas y varillas de tirante a través del tubo para impedir la separación.

El área (en pulg²) de la placa de base requerida puede calcularse a partir de:

$$A = \frac{P}{F_p} \quad (1.22)$$

Donde

P = carga, en klb

F_p = presión de aplastamiento admisible sobre el apoyo, en klb/ pulg²

La presión admisible depende de la resistencia del hormigón en la cimentación y de los tamaños relativos de la placa de base y el área de apoyo del hormigón. Si la placa de base ocupa toda el área del apoyo, $F_p = 0.35 \cdot f'_c$, en donde “f_c” es la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días. Si la placa de base cubre menos del área total, $F_p = 0.35 f'_c \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \leq 0.7 f'_c$ en donde A₁ es el área de la placa de base (B x N), y “A₂” es el área total del apoyo de hormigón.

La excentricidad de la carga o la presencia de momento de flexión en la base de la columna aumenta la presión sobre algunas partes de la placa de base y la disminuye en otras partes. Para calcular estos efectos, la placa de base puede

suponerse completamente rígida de modo que la variación de la presión sobre el hormigón resulte lineal.

El espesor de la placa puede determinarse tratando las proyecciones “m” y “n” de la placa de base más allá de la columna como vigas en voladizo. El análisis por líneas de cedencia muestra que la dimensión “n” de una viga en voladizo equivalente puede definirse como, $n' = \sqrt{d \cdot b_f}$, y el espesor requerido de la placa de base “ t_p ” puede calcularse a partir de:

$$t_p = 2 \cdot l \sqrt{\frac{f_p}{F_y}} \quad (1.23)$$

Donde

l = máx. (m, n, n'), en pulg

$F_p = P/(B \times N) \leq F_p$, en klb/pulg²

F_y = resistencia a la cedencia de la placa de base, en klb/pulg²

P = carga axial de la columna, en klb

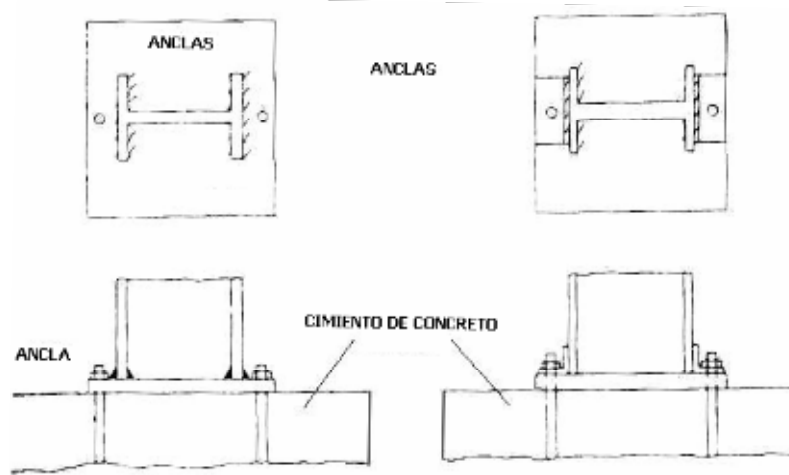
Para columnas sometidas únicamente a carga directa, las soldaduras de la columna a la placa de base, como se observa en la siguiente figura, se requieren principalmente para resistir los esfuerzos del montaje.

Las placas de base se fijan a la cimentación de hormigón con pernos de anclaje con gancho empotrados en el hormigón. Los pernos de anclaje casi siempre usados tienen 3/4 pulg de diámetro, aproximadamente 1 pie y 6 pulg de largo más un gancho de 3 pulg.

En vez de soldaduras, pueden usarse pernos de anclaje para fijar la columna y la placa de base a la cimentación de hormigón. Con pernos de anclaje hasta de casi 1 1/4 pulg de diámetro, los ángulos de broche pesados pueden fijarse con

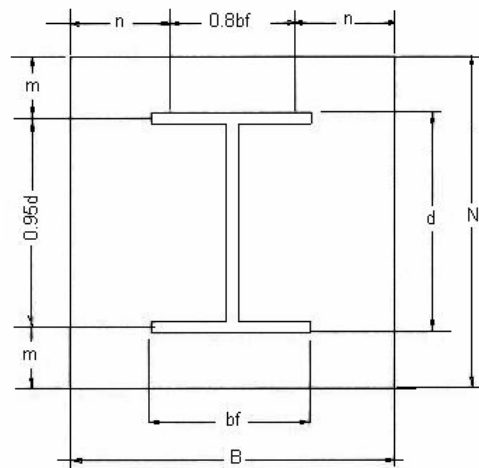
conectores a las columnas para transferir las fuerzas de volcamiento o levantamiento de la columna a los pernos de anclaje. Para grandes fuerzas de levantamiento, pueden necesitarse rigidizadores con los pernos de anclaje como se muestra a continuación. La carga se transfiere de la columna a los pernos a través de las soldaduras entre el rigidizador y la placa. Ver [12]

Figura 25. Formas de anclaje, por soldadura o remaches.



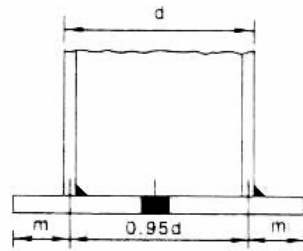
Manual de Diseño de Estructuras de Acero. BROCKENBROUGH, Roger

Figura 26. Nomenclatura de la boca base. Vista superior.

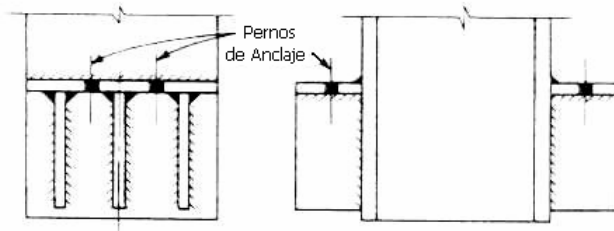


Manual de Diseño de Estructuras de Acero. BROCKENBROUGH, Roger

Figura 27. Ejemplos de placas base de columnas.



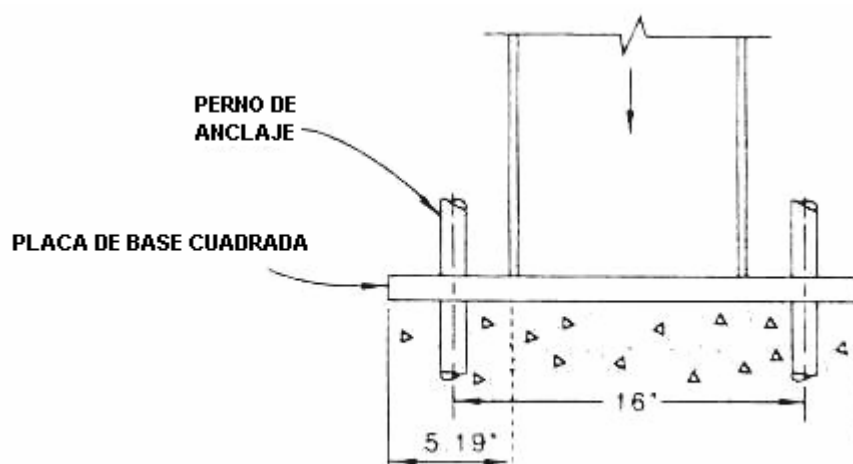
Columna soldada a una placa de base.



Base de columna con rigidizadores para pernos de anclaje.

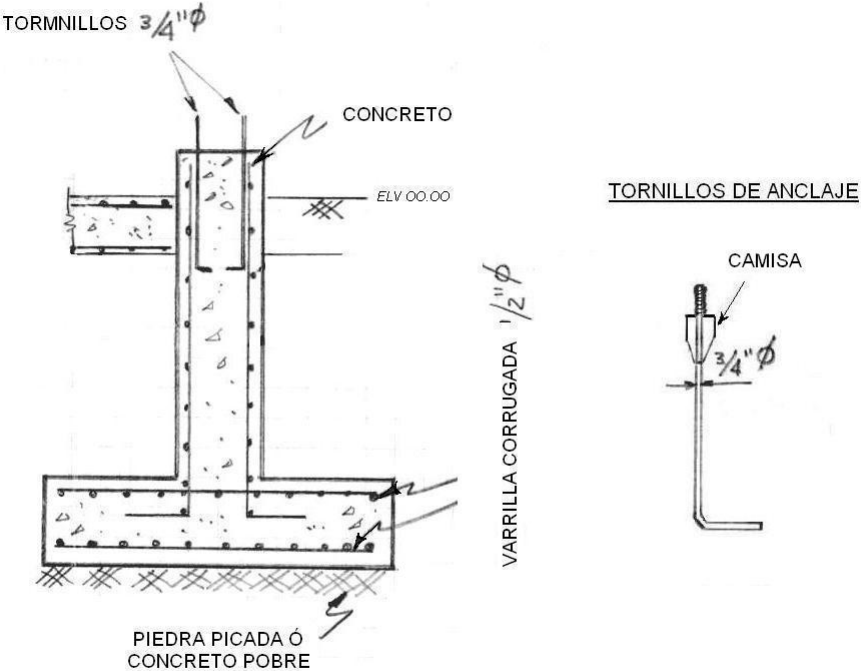
Diseño de Estructuras de Acero Método LRFD. MCCORMAC, Jack

Figura 28. Muestra la placa base con los pernos de anclaje de la columna con el cemento



Diseño de Estructuras de Acero Método LRFD. MCCORMAC, Jack

Figura 29. Diagrama de un tipo de cimiento.



2. PROCESO DE GALVANIZADO

La galvanización es el proceso mediante el cual se recubre una pieza metálica con un baño de o capa de zinc, con el objetivo de protegerla contra la corrosión.

El galvanizado en caliente se utiliza desde hace más de 100 años para proteger el acero de la corrosión. El recubrimiento protector se produce al sumergir productos de acero en un baño de zinc fundido. La película de zinc que se forma sobre el acero lo protege de dos maneras, protección de barrera y protección galvánico (catódica). Es este último tipo de protección la que permite que productos de acero puedan permanecer sin corrosión durante décadas. Esto se explica porque en presencia de humedad el zinc actúa como ánodo y el acero como cátodo, de manera que el zinc se corroe en una acción de sacrificio y evita que el acero se oxide.

La protección de barrera, como son las pinturas, tienen la desventaja que si la capa de pintura se rompe de alguna forma, se oxidará el acero en esa área y la pintura permitirá que la oxidación avance por debajo de la ruptura.

En el caso del galvanizado esto no ocurre, ya que si la capa de galvanizado se daña, raya o presenta discontinuidades, el zinc adyacente al acero formará una sal insoluble de zinc sobre el acero expuesto. Esto resana la ruptura y continúa protegiendo la superficie contra cualquier corrosión.

Aunque el galvanizado se utiliza extensivamente en la fabricación de una gran variedad de productos que requieren protección contra la corrosión, sus usos principales están en el acero estructural utilizado en obras públicas y viales, torres de transmisión y comunicaciones y estructuras en áreas: Químicas, construcción,

tratamiento de aguas, transporte, recreación, marina, agrícola, minera, etc.

El galvanizado presenta una serie de ventajas que no es posible encontrar en otros tipos de recubrimientos como son:

- Bajo costo versus vida útil
- Bajo nivel de corrosión
- Recubrimiento adherido metalúrgicamente al acero
- Fácil de inspeccionar
- Gran resistencia a daños mecánicos

2.1 COMPORTAMIENTO DEL ACERO GALVANIZADO

La vida protectora de un galvanizado está determinada primordialmente por el espesor del recubrimiento y la severidad de las condiciones de exposición.

Estas condiciones incluyen ambientes atmosféricos clasificados como altamente industriales, moderadamente industriales (urbanos), suburbanos, rurales y marinos.

Tabla 9. Determinación de la vida útil del galvanizado.

	ESPESOR DE ZINC EN MICRONES											
	10	20	33	43	53	66	76	86	96	106	119	129
TIPO DE ATMÓSFERA	AÑOS DE PROTECCIÓN HASTA 5% DE OXIDACIÓN DE LA SUPERFICIE											
RURAL	7	12	19	25	31	38	43	50	57	62	68	74
MARINO TROPICAL	5	10	15	20	24	29	33	39	43	48	53	58
MARINO TEMPLADO	4	9	13	17	21	26	30	35	39	43	48	51
SUBURBANO	3	6	10	14	18	21	24	29	32	36	40	42
MODERADAMENTE INDUSTRIAL	2	4	8	11	14	18	21	24	28	31	34	38
INDUSTRIAL PESADO	1	2	4	7	9	11	13	15	15	19	21	22

2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DEL PROCESO DE GALVANIZADO

2.2.1 Limpieza Cáustica

Son soluciones de compuestos desengrasantes alcalinos. Su finalidad es remover de la superficie del acero residuos de aceite, grasa y ciertos tipos de barnices, lacas y pinturas.

Aunque existen soluciones desengrasantes del tipo ácido, las alcalinas son ampliamente preferidas por ser de menor costo y más eficientes.

2.2.2 Lavado

Enjuague en agua limpia para evitar el arrastre de líquido de la limpieza cáustica al decapado.

2.2.3 Decapado Ácido

Son soluciones en base a Ácido Clorhídrico o Sulfúrico, que tienen la finalidad de remover los óxidos de la superficie del acero. Los decapados en base Ácido Clorhídrico son los más usados, ya que operan a temperatura ambiente y tienen un menor impacto de contaminación en las etapas posteriores.

Es imprescindible la adición de un aditivo que contenga inhibidor para que el ácido no disuelva el acero, solamente los óxidos, que evite la emanación de neblina ácida e idealmente ayude en limpieza adicional del metal.

2.2.4 Lavado

Enjuague en agua limpia para evitar el arrastre de ácido y hierro en solución, los cuales contaminan el prefluxado y el zinc fundido del crisol de galvanización. Existen aditivos que ayudan a disminuir el arrastre de estos contaminantes.

2.2.5 Prefluxado

Es una solución acuosa de Cloruro de Zinc y Amonio, que disuelve los óxidos leves que se hayan vuelto a formar sobre la superficie del acero luego de su paso por el decapado y el lavado. La película de fundente que se deposita protege la superficie para que no vuelva a oxidarse y asegura un recubrimiento uniforme de zinc en el crisol de galvanizado. Las piezas deben secarse y precalentarse antes de sumergirlas en el crisol de galvanizado.

Existen varios tipos de compuestos de Cloruro de Zinc y Amonio para el prefluxado. Mientras más óptima es la limpieza, decapado y lavado del acero, permitirá el uso de fluxes que admiten mayor tiempo de secado, mayores temperaturas de precalentado y una mínima emisión de humos al ingresar las piezas al zinc fundido en el crisol.

La presencia de contaminantes en el preflux influye directamente en la calidad del galvanizado, las pérdidas de zinc y la generación de subproductos tales como cenizas y humos.

El hierro en forma de sales solubles, arrastrado desde el decapado a su lavado posterior es el contaminante más crítico. Su efecto es la formación de escoria en la masa fundida de zinc, la cual aumenta el espesor de la capa de zinc y crea capas intermetálicas desiguales.

El hierro soluble debe mantenerse por debajo de un 0,5%. Es factible mantener una baja concentración de hierro en el preflux ajustando el PH alrededor de 5 y filtrando la solución.

Con un adecuado control, las soluciones de prefluxado pueden durar años. En las plantas donde no existe horno de secado o precalentamiento es conveniente operar el prefluxado a 55-75°C, esto ayudará a un secado más rápido.

2.2.6 Flux en el Crisol de Galvanizado (Alternativo)

El uso de flux sobre el crisol de galvanizado evita las salpicaduras de zinc y la emisión de humo al sumergir las piezas en el crisol como también se genera una menor cantidad de cenizas y disminuye el consumo de energía para mantener la temperatura.

Para un fluxado eficiente, sólo es recomendable utilizar compuestos de cloruro de zinc y amonio que no se quemen con la alta temperatura del zinc fundido.

2.2.7 Crisol de Galvanización

Las piezas deben sumergirse lo más rápido posible y retiradas lentamente del crisol.

El tiempo de inmersión dependerá del espesor del acero, la temperatura de precalentado y el espesor deseado. La reacción de formación de la capa de zinc es rápida, los primeros 1 a 2 minutos y luego decae. Mientras más gruesa la capa, más quebradiza es. En los primeros 30 segundos se forman las 3 capas

intermetálicas.

Una composición típica de la masa de metal fundido es:

98,76% Zinc

1,2% Plomo

0,002% Aluminio

Es conveniente que las piezas no se sumerjan a más de 30 cm del fondo, ya que en el fondo se acumula escoria. La temperatura óptima es 454°C. No se deben superar los 480°C ya que el hierro del crisol reacciona con el zinc formando escoria y falla prematura del crisol.

2.2.8 Enfriamiento

Este influye en el aspecto del galvanizado, por lo que es importante controlar la velocidad de enfriamiento por medio de un enfriamiento rápido con agua o un enfriamiento con aire.

2.2.9 Pasivación

Para evitar las manchas de corrosión blanca sobre el galvanizado, es recomendable realizar un proceso de pasivación de la superficie. Las más comunes son mediante una solución de cromatos o una solución de silicatos. Ambas soluciones pueden estar contenidas en el estanque de enfriamiento. Los pasivadores en base a silicatos no presentan los problemas ambientales que generan los que contiene cromo y tienen mayor resistencia a la lluvia ácida. Ver [22].

3. MOTORES ELÉCTRICOS Y CONTROL DE MOTORES ASÍNCRONOS

Los motores eléctricos proporcionan la potencia motriz para controlar una parte considerable y en constante crecimiento de nuestra moderna economía industrial. La gama de tamaños y tipos de motores es enorme y el número y diversidad de aplicaciones se continúa extendiendo. La computadora en la que se escribió este libro, por ejemplo, tiene varios motores eléctricos en su interior, en el ventilador de enfriamiento y en las unidades de disco. Existe incluso un pequeño motor que se utiliza para expulsar el disco removible de su unidad.

A nuestro alrededor existen dispositivos eléctricos que accionan las cosas. Casi todo aquello que en nuestra vida cotidiana zumba, hace chirridos o crujidos se debe a que un motor eléctrico provoca el movimiento.

En el extremo más pequeño de la escala de potencia se encuentran los motores que controlan las manecillas en los relojes de pulso, un trabajo que anteriormente lo hacía un mecanismo mecánico de resorte. En el extremo superior de la escala de potencia están los motores, nominalmente clasificados en la gama de cientos de megawatts (MW), que bombean el agua de manera ascendente para almacenamiento de energía. Algunos motores más pequeños, en el intervalo de 12 a 15 MW, hacen el trabajo de propulsores de buques crucero, un trabajo que anteriormente se hacía mediante máquinas de vapor o motores diesel muy grandes y de baja velocidad.

La flexibilidad de los generadores y motores eléctricos y la posibilidad de transmitir la energía eléctrica de lugar a lugar hace atractivo el uso de los motores eléctricos en muchos mecanismos de impulsión. Incluso en situaciones en las que el motor primario está a bordo de un vehículo, como en las locomotoras eléctricas de diesel

o los barcos de pasajeros, la transmisión eléctrica ha desplazado a la mayoría de las transmisiones, hidráulicas o mecánicas. También, debido a que la energía eléctrica puede ser liberada en contactos deslizables, las plantas de energía estacionaria pueden suministrar energía motriz para vehículos de riel. El impulsor final es, por supuesto, un motor eléctrico.

3.1 TIPOS DE MOTORES ELÉCTRICOS

Es importante recordar desde el principio que los motores eléctricos funcionan a través de la interacción del flujo magnético y la corriente eléctrica, o flujo de carga. Ellos liberan *fuerza*, porque una carga que se mueve en un campo magnético produce una fuerza que resulta ser ortogonal al movimiento de la carga y al campo magnético. Las máquinas eléctricas también producen un voltaje si el conductor en el que la corriente puede fluir se mueve a través del campo magnético. Describir la interacción en un motor eléctrico requiere de ambos fenómenos, puesto que la conversión de energía tipificada por el *par* por la *velocidad de rotación* también debe ser caracterizada mediante la *corriente* por el *voltaje de respaldo*.

En general, los motores eléctricos se clasifican en dos categorías: de ca y de cd. Dentro de estas categorías existen subdivisiones. Recientemente, con el desarrollo de componentes electrónicos de potencia económicos y confiables, las clasificaciones se han vuelto menos rigurosas y han aparecido otros tipos de motores.

3.1.1 Motores De CD

Los motores de cd, como su nombre lo indica, funcionan con corriente y voltaje terminal que es "directo" o sustancialmente constante. En tanto que es posible

producir una máquina "de cd verdadera" en una forma por lo general conocida como "acíclica", con geometría homopolar, tales máquinas tienen voltaje terminal muy bajo y, en consecuencia, corriente terminal alta relativa a sus capacidades nominales de potencia. De este modo, toda aplicación de motores de cd han empleado un interruptor mecánico o conmutador para cambiar la corriente terminal, que es constante o de cd, a corriente alterna en el inducido de la máquina.

Los motores de cd se han usado por lo regular en dos amplios tipos de aplicaciones. Una de estas categorías es aquella en la que la fuente de poder es en sí misma de cd. Esto es la causa de por qué los motores en los automóviles son en su totalidad de cd, desde los motores que controlan los ventiladores para enfriar el motor y la ventilación del habitáculo de pasajeros hasta el motor de arranque de la máquina.

Una segunda razón para utilizar motores de cd es que sus características de par-velocidad han sido, históricamente, más fáciles de adaptar que las correspondientes categorías de motores de ca. Por esta razón la mayoría de los motores de servo y de tracción han sido máquinas de cd. Por ejemplo, los motores que accionaban vehículos de riel eran, hasta hace poco, exclusivamente máquinas de cd. El conmutador mecánico y las escobillas asociadas son problemáticas por varias razones, y a consecuencia de esto, el advenimiento de los semiconductores de alta potencia más económicos han llevado a las máquinas de ca a situaciones que antes eran dominadas por las máquinas de cd. Por ejemplo, los motores de inducción se están utilizando cada vez más en tracción de ferrocarril. La clase de máquina conocida como de "cd sin escobillas" es en realidad una máquina síncrona acoplada con un conjunto de interruptores de semiconductor controlados por la posición del rotor. Tales máquinas tienen características similares a las máquinas de conmutador.

3.1.2 Motores de CA

Los motores eléctricos diseñados para funcionar con fuentes de corriente alterna (ca) se clasifican ampliamente en dos clases: de inducción y síncronos. Existen muchas variaciones de máquinas síncronas. Los motores de ca trabajan al establecer un patrón de campo magnético que gira con respecto al estator y posteriormente emplea fuerzas electromagnéticas para arrastrar al rotor en el patrón del campo magnético rotatorio. Las máquinas síncronas por lo regular tienen un campo magnético que es estacionario con respecto al rotor y el cual gira por consiguiente a la misma velocidad que el campo magnético del estator. En los motores de inducción, el campo magnético es, como su nombre lo indica, inducido por el movimiento del rotor a través del campo magnético del estator.

Probablemente los *motores de inducción* sean los más numerosos en la economía actual. Las máquinas de inducción son simples, robustas y por lo general son baratas de producir. Dominan en aplicaciones a varios niveles de potencia desde las fracciones de caballo de fuerza (unos cuantos cientos de watts) hasta cientos de caballos de fuerza (quizás medio megawatt) donde las velocidades rotacionales requeridas no tienen que variar. Los *motores síncronos* no tienen un uso tan amplio como las máquinas de inducción, porque sus rotores son más complejos y requieren de excitadores. No obstante, estos motores tienen grandes aplicaciones industriales en situaciones donde sus capacidades para proporcionar factor de potencia adelantada ayuda a soportar o estabilizar el voltaje y para mejorar el factor de potencia total.

Síncronos y de Inducción

Los motores de corriente alterna caen otra vez dentro de dos categorías distintas, síncronos o de inducción. Los motores síncronos funcionan a una velocidad fija,

sin importar la carga que lleven. Sus velocidades de operación están dadas por la relación:

$$\text{Velocidad en r/min} = 120 \times f/P \quad (2.1)$$

Donde, (f) es la frecuencia del sistema en Hz y P es el número de polos para el que el estator está devanado. La velocidad dada por la relación anterior se denomina velocidad de sincronía, y de aquí el nombre de motor síncrono. El motor de inducción, por otra parte, funciona de manera muy cercana pero menor a la velocidad de sincronía.

La diferencia entre la velocidad de sincronía y la velocidad real se denomina velocidad de deslizamiento. La velocidad de deslizamiento de cualquier motor de inducción es una función de su diseño y del rendimiento deseado. Además, para un motor dado, la velocidad de deslizamiento y la velocidad de marcha varían con la carga. La velocidad de marcha decrece a medida que se incrementa la carga en el motor.

Motores Monofásicos y Trifásicos

Todos los motores de ca también pueden clasificarse como motores monofásicos o multifásicos, dependiendo de si están destinados a funcionar mediante alimentación monofásica o multifásica. Puesto que los sistemas de distribución son universalmente del tipo trifásico, los motores multifásicos son casi siempre del tipo trifásico. Los motores monofásicos están limitados por la potencia que pueden producir, y están disponibles en tamaños hasta de sólo unos cuantos caballos de fuerza, y sólo en la variedad de motor de inducción. Por lo general se dispone de motores síncronos sólo en configuraciones trifásicas.

Otras Variaciones

Se tienen disponibles muchas variaciones de los motores básicos de inducción y síncronos. Estas incluyen, pero no se limitan al motor *síncrono de inducción*, que es en esencia un motor de inducción con rotor devanado alimentado con potencia de cd para su devanado del rotor para hacerlo funcionar a velocidad síncrona; el motor de *imán permanente* en el cual la excitación del campo es suministrada por imanes permanentes; el motor de *reluctancia* en el que la superficie del rotor de un motor de inducción de jaula de ardilla se moldea para formar estructuras de polo saliente ocasionando que el motor funcione hasta la velocidad de un motor de inducción y llegue al sincronismo mediante acción reluctante y opere a velocidad síncrona; y el *motor de colector de ca o motor universal*, que posee las ventajas de la amplia gama de velocidad y superior par de arranque del motor de cd, por mencionar unas cuantas. Ver [1]

3.2 CONTROL DE MOTORES ASÍNCRONOS

3.2.1 Regulación de Velocidad de Motores de Corriente Alterna

En la práctica el desarrollo de la construcción de maquinaria muestra que en muchos casos cuando es necesario obtener una regulación suave y profunda de la velocidad, se aplican accionamientos eléctricos de corriente continua. No obstante, en caso de utilizar motores de corriente continua conviene convertir la corriente alterna en continua, esta transformación siempre va vinculada con pérdidas de energía y en gastos de capitales en la construcción de una instalación debidamente robusta y estable. Por eso en una serie de instalaciones regulables se aplican motores de corriente alterna que son más baratos, sencillos y económicos. Ver [16]

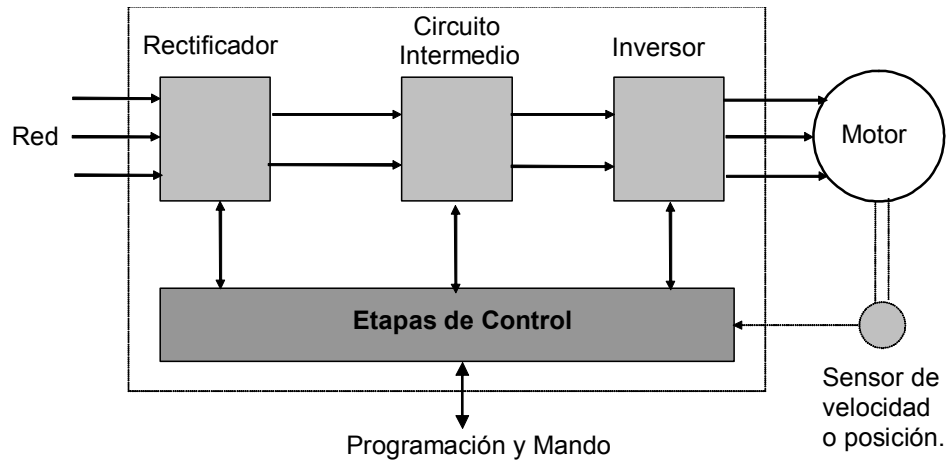
Cuando se desea controlar la velocidad o el par mecánico de forma ágil y precisa, no hay nada mejor que un motor eléctrico alimentado por un regulador electrónico. Hace unos diez años el motor de continua era el líder de las aplicaciones a velocidad variable, porque hasta entonces los convertidores de frecuencia todavía eran bastante caros, complejos y pocos fiables. Pero la situación ha cambiado por los avances en la fabricación de semiconductores de potencia y circuitos de control más potentes que permiten incluir estrategias más eficaces.

3.2.2 Distintas Clases de Convertidores

Los convertidores de frecuencia son dispositivos que se alimentan de la red de suministro eléctrico y generan corriente alterna de cualquier frecuencia, normalmente para accionar motores de inducción a velocidad variable, actualmente casi todos son electrónicos, pero también se fabrican algunos convertidores electromecánicos. Estos últimos son más caros, más grandes y necesitan más cuidados, pero a cambio suministran una CA más sinusoidal, suelen utilizarse a frecuencia fija, para alimentar motores especiales y aparatos que han sido diseñados para alimentarse con frecuencias de 60 o 400 Hz.

Los convertidores electrónicos pueden ser directos e indirectos. Los primeros, también llamados cicloconvertidores, producen una tensión alterna uniendo fragmentos de senoide procedentes de las distintas fases del suministro. Tienen la ventaja de que pueden utilizar los tiristores de mayor potencia, relativamente lentos trabajando en conmutación natural. Pero sólo consiguen frecuencias muy inferiores a la de la red, además, se trata de dispositivos muy complicados que pueden necesitar 18, 36 o más tiristores para conectar las entradas a las salidas de todas las formas posibles. Por lo tanto, sólo se utilizan con potencias muy elevadas y motores lentos. Los convertidores más habituales (los únicos a los que se hará referencia a partir de ahora) son los indirectos.

Figura 30. Diagrama del Convertidor Indirecto



Accionamientos de CA a Frecuencia Variable. PARDO, Aldo

Los convertidores indirectos se dividen en:

- Convertidores de fuente de voltaje (Voltage Source Inverter o VSI).
- Convertidores de fuente de corriente (Current Source Inverter o CSI).

Los convertidores de voltaje se dividen según la modulación utilizada en el inversor:

- Modulación por el valor de amplitud del pulso (Pulse Amplitude Modulation o PAM).
- Modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation o PWM).

La energía eléctrica procedente de la red en forma de corriente alterna monofásica o trifásica, normalmente de 60 Hz, llega a un rectificador que suministra corriente continua a una etapa intermedia más o menos compleja, le sigue un inversor que genera la corriente alterna trifásica de salida y alimenta el motor. Para controlar todos estos elementos se necesitan varios circuitos analógicos y digitales con sus

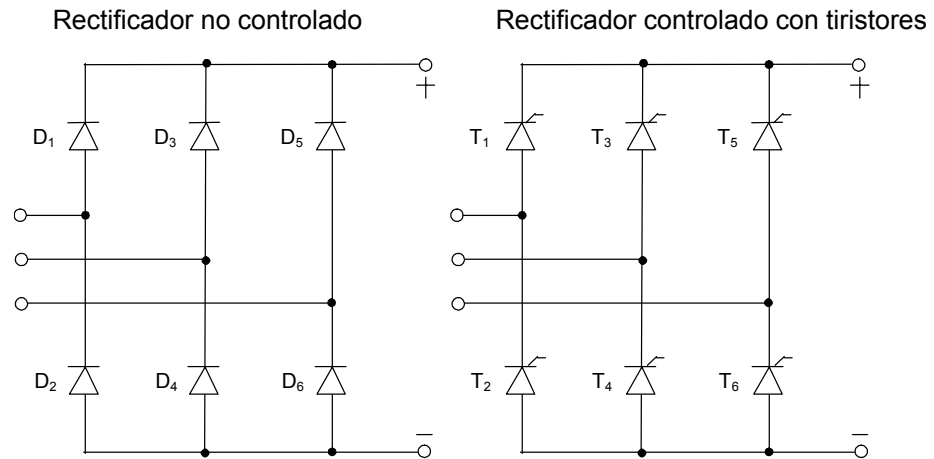
correspondientes fuentes de alimentación y también algún sistema de programación, que permita introducir los parámetros de funcionamiento e indicar la consigna de velocidad o el par mecánico que se desea.

3.2.3 El Rectificador

El rectificador más típico es el clásico puente de diodos. Como la alimentación normalmente es trifásica suelen utilizarse seis diodos. A este rectificador le sigue uno o varios condensadores de gran capacidad que se cargan durante los máximos de tensión, por lo que la intensidad de los conductores de cada fase está formada por pares de picos alternados, aunque se puede mejorar añadiendo algunas reactancias. El circuito completo incluye otros filtros con condensadores y bobinas para reducir las perturbaciones que se propagan hacia la red o las que se reciben de las mismas, descargadores de sobretensiones, fusibles y otros elementos de protección.

Al dar tensión al equipo, el pico de intensidad inicial que carga los condensadores puede alcanzar un valor muy elevado, capaz de destruir los diodos y fusibles. Este transitorio se reduce con resistencias y reactancias en serie con la entrada o la salida del rectificador. Las resistencias suelen acompañarse de un relé o un contacto que las cortocircuita a los pocos instantes, evitando así que consuman energía permanentemente. A veces se utilizan elementos estáticos, por ejemplo un tiristor, resistencias de coeficiente de temperatura negativo, etc.

Figura 31.



Accionamientos de CA a Frecuencia Variable. PARDO, Aldo

Con potencias muy grandes es frecuente el empleo de dos rectificadores con salidas unidas y las entradas alimentadas por un transformador provisto de secundarios en estrella y en delta para producir un sistema de tensiones hexafásico. Con esta variante se obtiene una tensión más continua, se reducen los armónicos en la red de CA y pueden utilizarse semiconductores de menor tensión. En un rectificador que sólo utiliza diodos el sentido de la tensión y la intensidad es fija, por lo tanto, el signo de la potencia no puede cambiar y no es posible el frenado con recuperación de energía. Con potencias grandes esto se consigue utilizando el rectificador clásico totalmente controlado, a tiristores, seguido de un filtro inductivo. De este modo, aunque el sentido de la intensidad sea fijo, la tensión podrá invertirse si lo admite el inversor que está conectado a continuación. Otra de las ventajas es que se puede controlar la corriente de salida actuando sobre el instante de disparo de los tiristores, pero a costo de consumir reactivo. Existe otro rectificador controlado, basado en un inversor a transistores que se hace funcionar al revés que el inversor de salida. Utilizando modulación por ancho de pulsos, una técnica que será descrita más adelante, se consume una intensidad casi sinusoidal y en fase con la tensión. De este modo, es posible frenar con recuperación y evitar los problemas con los armónicos y la reactiva.

3.2.4 El Circuito Intermedio

Los convertidores pueden ser con circuito intermedio de tensión o con circuito intermedio de corriente. La diferencia está en cuál de las dos magnitudes se mantiene constante, aparte del inevitable rizado, cuando no varía la tensión o la intensidad de salida. En la práctica, el circuito intermedio de tensión se reconoce porque el inversor está conectado a los bornes de uno o varios condensadores y el de corriente porque se alimenta a través de una bobina. También puede decirse que, en general, el circuito intermedio de tensión corresponde al rectificador con diodos o transistores y el de corriente al rectificador con tiristores.

Cuando se parte de un rectificador no controlado, el circuito intermedio está formado por condensadores electrolíticos en paralelo o en serie y paralelo, según la potencia y la tensión de trabajo. Una de las misiones de estos condensadores es absorber los picos de energía que devuelve el inversor, especialmente durante la conmutación. Si la carga tira del motor o si la velocidad se reduce bruscamente es probable que el inversor devuelva demasiada energía y la tensión se eleve peligrosamente, esto se evita con un detector de sobretensión que actúa sobre el convertidor e impide que siga devolviendo energía. Para obtener un frenado más enérgico se debe utilizar un rectificador controlado o, en su defecto, se puede consumir la energía de una resistencia de gran tamaño. También se puede actuar sobre el inversor de modo que alimente el motor con corriente continua. Algunas instalaciones utilizan varios inversores y motores que comparten el circuito intermedio, de este modo cuando se frena un motor la energía es aprovechada por todos los demás.

3.2.5 El Inversor

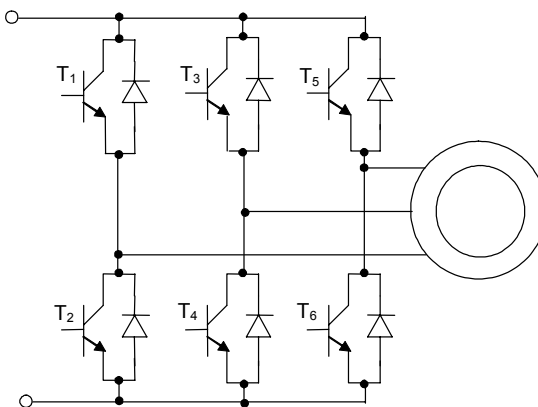
Para esta aplicación se utiliza un inversor en puente trifásico. En general está formado por seis interruptores electrónicos y otros componentes. Las tres líneas

que alimentan el motor se conectan secuencialmente al extremo positivo o negativo del circuito intermedio.

Como se trabaja en conmutación, la corriente así obtenida debe ser una onda más o menos rectangular y los motores suelen construirse para ser alimentados con una CA sinusoidal, pero ya volveremos sobre este tema más adelante.

Se puede conectar en cada instante un interruptor de la parte superior (el 1, el 3 o el 5), y otro de la inferior (el 2, el 4 o el 6), de manera que siempre queda un borne del motor sin conectar. En este caso cada interruptor solo conduce durante 1/3 del tiempo total, pero así se facilita la conmutación si se utilizan tiristores.

Figura 32. Inversor a transistores.



Accionamientos de CA a Frecuencia Variable. PARDO, Aldo

El circuito autoconmutado es el ejemplo más típico. Alimentado por corriente, cuando se dispara uno de los tiristores situados en la parte superior se bloquea automáticamente cualquier tiristor que estuviera conduciendo en el mismo lado y lo mismo sucede con los de la parte inferior. Si el motor es sincrónico el circuito aún puede ser más simple, porque en este caso se puede prescindir de los condensadores y los diodos. La intensidad en cada fase del motor es una onda aproximadamente rectangular, como consecuencia el par es pulsante. Esto se nota mucho más al trabajar con frecuencias bajas, porque la inercia no consigue

ocultar el defecto, aparte de que el bloqueo de los tiristores puede presentar otras dificultades a bajas velocidades. La forma de onda de la tensión viene impuesta por el motor y acostumbra a ser bastante sinusoidal.

Otra forma de accionar los interruptores es conectar las tres salidas al positivo o al negativo, alternativamente, con un desfase de 120° . En estas condiciones la tensión de cada borne del motor respecto a un punto del circuito intermedio es una onda cuadrada, pero si se analiza lo que sucede entre fase y el neutro (que se define por el promedio de la tensión en las tres salidas) se comprueba que sigue una ley de variación rectangular algo más parecida a una senoide. También se observará que sólo existen seis posibles combinaciones de las tensiones de salida, lo que suele representarse como seis vectores situadas a 60° y contrasta con los infinitos valores que puede alcanzar una tensión sinusoidal.

Existe otra posibilidad que se combina con la anterior: Esta es conectar las tres salidas al positivo o al negativo simultáneamente para que la tensión entre ellas sea cero. Esto permite variar la intensidad de la salida de forma continua, aunque la tensión de entrada sea constante. El truco consiste en anular la tensión a una frecuencia relativamente alta (llamada portadora) y variar el valor medio por la relación entre los tiempos de conducción. Como la intensidad no puede cambiar de forma instantánea, gracias a la reactancia de dispersión del motor y otras bobinas que pueden añadirse en serie sigue una ley de variación más suave que se adapta a dicho valor medio. En general esta técnica se denomina modulación por ancho de pulso.

3.2.6 Modulación por Ancho de Pulso

Los componentes de potencia de un convertidor de frecuencia por ancho de pulso se muestran en el esquema de la figura 30.

Se observará que la tensión es constante a la entrada del inversor esto significa que tanto la tensión como la frecuencia deben ser variados en el inversor porque el motor así lo requiere.

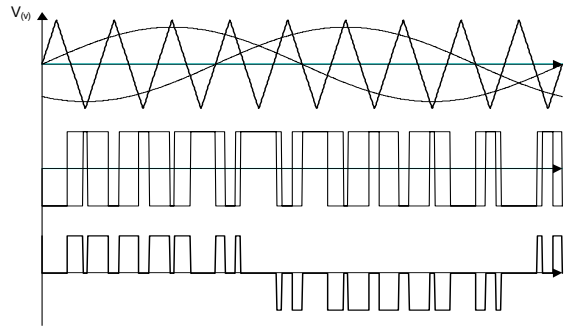
El circuito de control y regulación controla los tiristores o transistores del inversor y la tensión de la fase pasa a ser como se muestra en la figura, la tensión se controla aplicando una tensión máxima al motor durante períodos mas o menos largos.

La frecuencia se controla con pulsos positivos durante medio período e impulsos negativos durante el siguiente medio período. El circuito de control establece los tiempos de activación y desactivación de los tiristores en los puntos de intersección entre la tensión sinusoidal (onda moduladora) y la tensión triangular (onda portadora).

La frecuencia de la tensión sinusoidal debe ser igual a la frecuencia que se desea obtener de convertidor de frecuencia y, por tanto, se controla por medio de la señal de entrada del circuito de control. La relación entre la amplitud de la tensión sinusoidal y la amplitud de la tensión triangular determina la anchura de los impulsos de tensión que se aplican al motor y por ende el valor de voltaje.

Las formas de ondas no sinusoidales se analizan aplicando el desarrollo en series de Fourier. Cuando la onda es periódica, se puede componer en la suma de una componente continua, una componente fundamental sinusoidal de la misma frecuencia y una serie de armónicos, también sinusoidales, cuya frecuencia es el doble, el triple, etc., de la que tiene la onda de partida. Si todo esto se refiere a un motor de corriente alterna, es posible que algunos armónicos contribuyan a que el rotor gire en el sentido correcto, otros crean un campo en sentido contrario y la mayoría simplemente lo calientan.

Figura 33. Modulación sinusoidal de varios impulsos ($n = 9$).



Accionamientos de CA a Frecuencia Variable. PARDO, Aldo

Si existe simetría de semionda (si los semiciclos positivos y negativos son iguales) desaparece la componente continua y todos los armónicos pares. Si en las tres salidas se generan las mismas formas de onda, desfasadas a 120° , desaparecen todos los armónicos múltiplos de 3. Para la forma de onda de la figura el primer armónico de importancia es el 5 (de secuencia inversa) seguido del 7, 11, etc.

Debido a la reactancia del motor, los armónicos de frecuencia muy elevada tienen poca influencia en la intensidad y basta eliminar las frecuencias más bajas. Esto se consigue aplicando modulación sinusoidal por ancho de pulso: se actúa sobre los tiempos de conducción siguiendo una ley sinusoidal.

Además de la frecuencia básica, el motor estará sometido a frecuencias armónicas indeseables, y su amplitud dependerá de la relación de frecuencia entre la tensión triangular y la tensión sinusoidal (n). Las tensiones desiguales más próximas a la tensión triangular serán las de mayor amplitud. Si se elige una relación de $n=6$ entre la frecuencia triangular y la frecuencia sinusoidal, la quinta y séptima armónica tendrán una amplitud especialmente elevada. Si $n=15$, las decimoterceras, decimoquintas, y decimoséptimas armónicas van a ser particularmente importantes.

Puesto que la reactancia de los devanados del motor aumenta cuando la frecuencia sube, en razón de la autoinducción de los devanados, las frecuencias armónicas elevadas son menos importantes que las armónicas bajas. Además, puesto que todas las frecuencias armónicas que puedan ser divididas por tres

están equilibradas por el motor trifásico, la relación entre la frecuencia triangular y la frecuencia sinusoidal debe ser elevada y divisible por tres.

Sin embargo, existen varios motivos para limitar la relación n : Existe un límite con respecto a la velocidad a la cual los tiristores o transistores pueden ser activados o desactivados. Además, cada desactivación forzada de un tiristor cuesta energía. Por lo tanto una relación elevada de n (frecuentes desenergizaciones) corresponde a una reducción del rendimiento del convertidor de frecuencia. Si los tiristores del inversor se sustituyen por transistores es posible reducir las pérdidas por desenergización.

Una relación de n elevada corresponde a numerosos “agujeros” en la tensión, la cual, por tanto, no puede tomar el valor máximo; sin embargo, este valor es necesario cuando se desea obtener el momento máximo a frecuencia nominal del motor. Pero a frecuencias bajas del motor, es normal tener una elevada relación de n y obtener, una tensión que corresponde a la frecuencia. Con un motor de 380 v, 50 Hz, la tensión a 50 Hz, necesita ser solamente $(380 \cdot 5) / 38$ y puesto que la frecuencia básica es baja no se produce el problema que se describe en el inciso a, debido a una elevada relación de n .

Todo esto explica por qué la relación de n disminuye cuando la frecuencia del motor sube. Puesto que los cambios se producen por etapas sucesivas y pueden ser oídos normalmente bajo la forma de “cambios de velocidad” por que la tensión que se utiliza para aplicarla al motor produce un cierto ruido en el motor. Para obtener la tensión máxima a frecuencias superiores a la frecuencia nominal del motor, se utiliza una relación de n capaz de dar una tensión dotada del mismo aspecto que se obtienen con los convertidores de frecuencia PAM.

La elevada relación de n a frecuencias bajas corresponde a un número de frecuencia armónicas y, por tanto, a un funcionamiento suave del motor, incluso a frecuencias muy bajas.

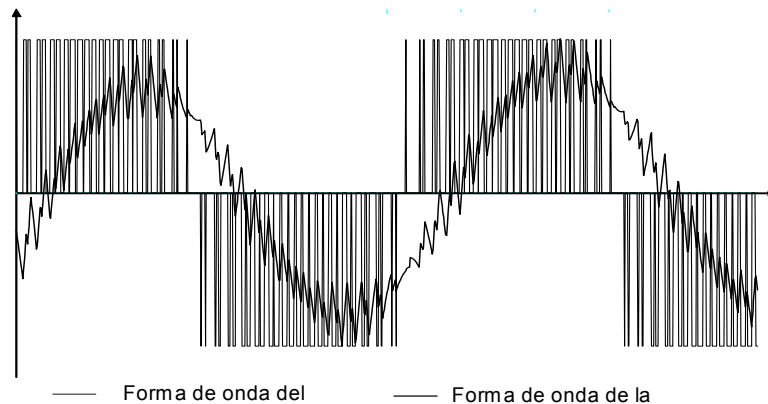
Normalmente una portadora del orden kHz puede ser suficiente. Pero hay que tener en cuenta los posibles problemas causados por las vibraciones que puede producir el motor, las bobinas y los propios conductores. Uno de estos problemas es el ruido, ya que el oído humano es muy sensible a sonidos en torno a 2 ó 3 kHz. Las frecuencias de 16 kHz o superiores son prácticamente inaudibles, pero es posible que produzcan demasiadas pérdidas de conmutación. En algunos inversores la frecuencia de la portadora es fija, en otros varía continuamente o se modifica en función de la modulación y en algunos el usuario puede seleccionarla de acuerdo con sus necesidades y las posibles resonancias mecánicas.

En nuestro caso n es un parámetro variable, el cual depende de la frecuencia, para bajas frecuencias el valor de n es grande, pero a medida que la frecuencia aumenta esta disminuye. El valor de n para frecuencia de 0-5 Hz es de 140 disminuyendo en 12 unidades cada 5 Hz para mantener simetría de un cuarto de onda obteniendo una onda con menos armónicos. A frecuencia nominal el valor de n es igual a 20, siendo el valor de frecuencia de la portadora de 1.5 kHz.

A pesar del número reducido de frecuencias armónicas bajas, se producen pérdidas suplementarias en el motor y esto se ilustra más claramente por la recomendación de los fabricantes de los convertidores PWM de procurar que los motores que están funcionando de manera continua no estén sometidos a una carga superior al 85-95% del momento nominal.

A continuación se muestra en la figura 31, el resultado de una simulación de un motor asincrónico de Jaula de Ardilla el cual es alimentado con un convertidor de voltaje con la modulación PWM sinusoidal anteriormente mostrada, aquí se observa las ondas de corriente y voltaje para una relación de $n = 30$.

Figura 34. Formas de onda de voltaje y corriente de un motor alimentado con PWM.



Accionamientos de CA a Frecuencia Variable. PARDO, Aldo

3.2.7 Estrategias de Control

Con el control a lazo abierto del motor de inducción a frecuencia variable, se puede obtener un accionamiento a velocidad variable satisfactorio cuando el motor trabaja a valores estables del par, sin muchos requerimientos sobre la velocidad. Cuando los requerimientos del accionamiento necesitan de una respuesta dinámica rápida, de alta exactitud en la velocidad o de control del par, el control a lazo abierto no brinda esta posibilidad. Es por eso que se hace necesario operar el motor en lazo cerrado, cuando la operación en régimen dinámico del accionamiento representa un papel fundamental en los indicadores del sistema en el que él es parte.

El par depende igualmente del flujo del entrehierro y de la velocidad del motor, hecho este que complica el diseño del sistema de control en los motores de inducción, no siendo así en su contra parte, el motor de CD, donde el conmutador permite un control independiente del flujo y el par, a costa del cual restringe la potencia y velocidad del motor, aumenta la inercia, la longitud axial y necesita mantenimiento periódico. Con los motores de alterna, alimentados con

convertidores de frecuencia, el conmutador es eliminado, a un considerable costo y complejidad, sin embargo.

Varias técnicas de control de la velocidad del motor de inducción han sido propuestas. Estos esquemas de forma general se pueden clasificar en dos categorías:

❖ **Control Escalar:**

- Control Voltaje – Frecuencia (V/F).
- Control de la corriente del estator y de la frecuencia del deslizamiento (o simplemente Control del Deslizamiento).

❖ **Control Vectorial:**

- Control por Campo Orientado (FOC)
 - *Método Indirecto.*
 - *Método Directo.*
- Control Directo del Par y Control Vectorial del Flujo del Estator. (DTC)

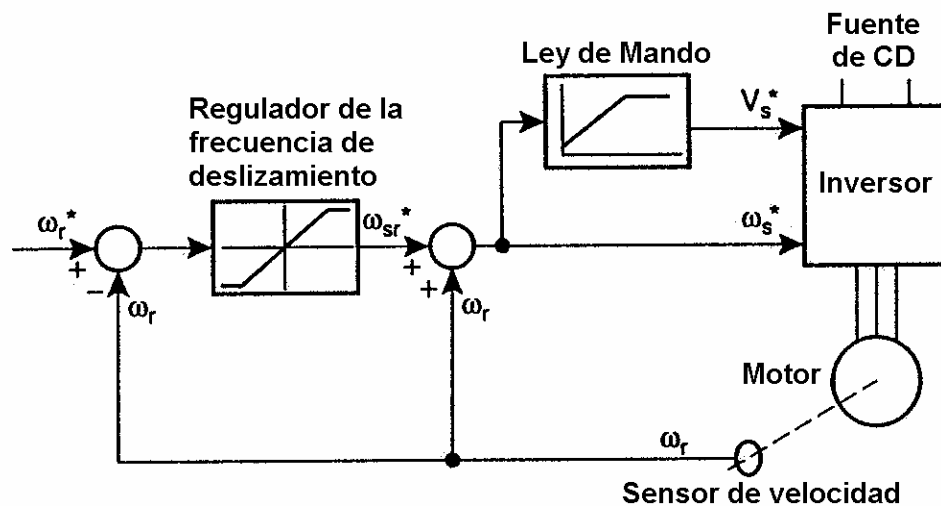
Control V/ F

Para generar la mayor posible relación de par por ampere en la corriente del estator, y de aquí la mejor utilización posible de la capacidad de corriente disponible del accionamiento, el flujo debe permanecer constante y cercano a su valor nominal aun cuando las condiciones de operación varíen. Para lograr trabajar a flujo constante se puede ajustar para cada condición de operación dos parámetros controlables, que son la amplitud y frecuencia del voltaje de alimentación.

Un simple esquema de control V/F se muestra en la figura 32. En este tipo de control la relación entre la magnitud del voltaje y la frecuencia se conoce como ley de mando. Los primeros convertidores que utilizaron esta técnica sólo permitían un margen muy limitado de velocidades porque al mantener constante la relación V/F no se ha tenido en cuenta que los devanados también tienen resistencia óhmica, que no varía con la frecuencia. El resultado es que a bajas frecuencias disminuye el par. Una posible solución es aumentar un poco más la tensión a frecuencias bajas, o aumentarla en proporción al consumo y la resistencia de los devanados.

En los ventiladores y las bombas centrífugas apenas se necesita par a bajas velocidades y lo que suele hacerse es reducir más la tensión para consumir menos energía. Muchos inversores permiten seleccionar la relación entre la tensión y la frecuencia según sea la carga mecánica.

Figura 35: Control de velocidad V/F con regulación de la frecuencia del deslizamiento



Las técnicas de control V/F están basadas en los modelos estáticos del motor de inducción para la operación a flujo constante.

Control del Deslizamiento

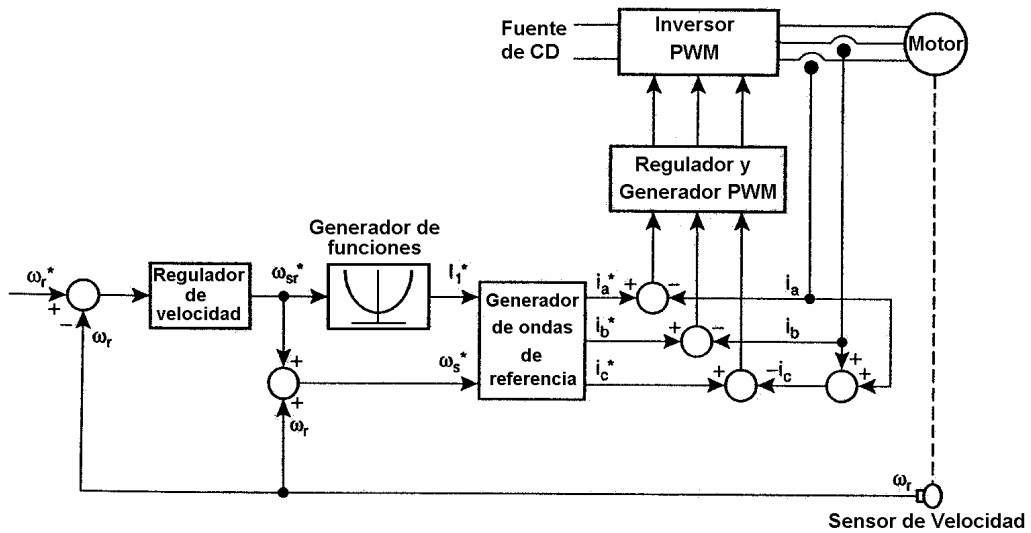
Un típico sistema de control de un motor de inducción alimentado por un inversor regulado por corriente se muestra en la figura 7. En esta técnica de regulación las referencias trifásicas de corriente, son comparadas con los valores instantáneos de las corrientes del motor. El error es la entrada a los Reguladores de Corriente y Generación de PWM.

La amplitud de las referencias de corrientes se obtienen del bloque Generador de Funciones y la frecuencia se obtiene de la adición de la señal de frecuencia del rotor, que se obtiene mediante la medición de la velocidad con un encoder, y la señal de la frecuencia del deslizamiento. La frecuencia del deslizamiento se obtiene de salida del regulador de velocidad o de una tabla con los valores optimizados del deslizamiento, en el caso de accionamientos con control del par.

Los Reguladores de Corriente y Generación de PWM pueden ser reguladores histeresicos o reguladores proporcionales integrales (PI) con comparación con rampa (método suboscilatorio), aunque también se pueden utilizar otras técnicas de regulación. Este lazo intermedio de corriente, que usualmente debe de tener un ancho de banda grande, hace que el inversor se comporte como fuente de corriente, siendo la técnica de modulación PWM utilizada en los convertidores por voltaje.

En este caso se dice que el inversor está trabajando en modo de control de corriente (Current Control Mode o simplemente CCM), también se conoce con el nombre de inversor PWM regulado por corriente (Current Regulated Pulse Width Modulation o simplemente CRPWM).

Figura 36. Inversor CRPWM con control de la frecuencia del deslizamiento



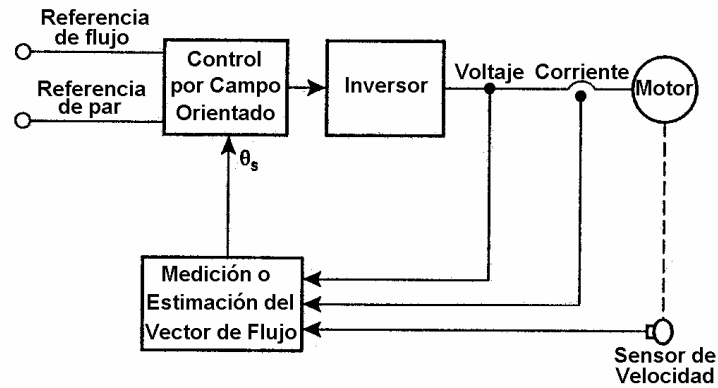
Accionamientos de CA a Frecuencia Variable. PARDO, Aldo

3.2.8 Control Vectorial

Control por Campo Orientado

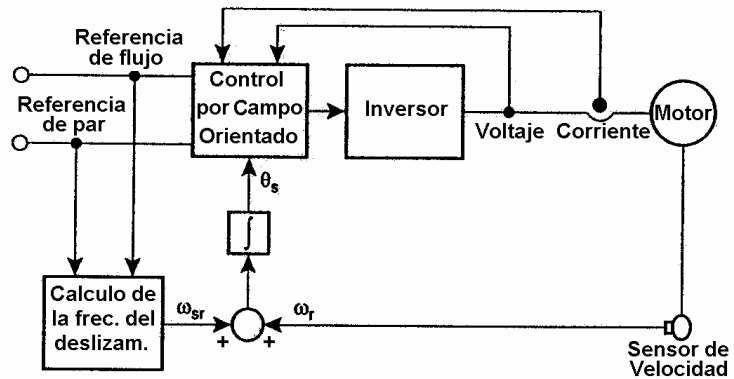
Las técnicas de control vectorial han hecho posible la aplicación de motores de inducción para aplicaciones de alta prestaciones donde solamente se podían lograr, hasta entonces, con motores de corriente directa. Los esquemas de control vectorial permiten controlar el motor de inducción de la misma manera que el motor de corriente directa de excitación independiente. Como en el motor de CD, se logra un control independiente del flujo y el par (por lo que el control vectorial se conoce también como control desacoplado). El control de este último se logra regulando la componente de la corriente que tiene que ver con el par (i_{qs}) y el del flujo, controlando (i_{ds}). Los esquemas básicos los métodos indirecto y directo de control vectorial se muestran en la figura 8.

Figura 37. Control Vectorial por Campo Orientado, Método Directo



Accionamientos de CA a Frecuencia Variable. PARDO, Aldo

Figura 38. Control Vectorial por Campo Orientado, Método Indirecto



Accionamientos de CA a Frecuencia Variable. PARDO, Aldo

El método directo es mostrado en la figura 34. La generación del vector de corriente depende de las señales de flujo del estator o del entrehierro. El flujo del entrehierro puede ser medido directamente (sensores de efecto Hall) o estimando mediante los valores de voltaje y corrientes del estator. Las componentes del flujo del estator pueden ser directamente calculadas a través de sus magnitudes. En este método la velocidad del rotor no es un requerimiento para obtener la

información del ángulo espacial del campo o flujo del rotor (este ángulo también se conoce como ángulo de desacople).

En el método indirecto que se muestra en la figura 35 es más simple de implementar debido a que se prescinde de medir o estimar el vector de flujo. El vector de la corriente se calcula con la medición de la velocidad del rotor y el valor de las referencias de flujo y par (con las cuales se determina la frecuencia del deslizamiento).

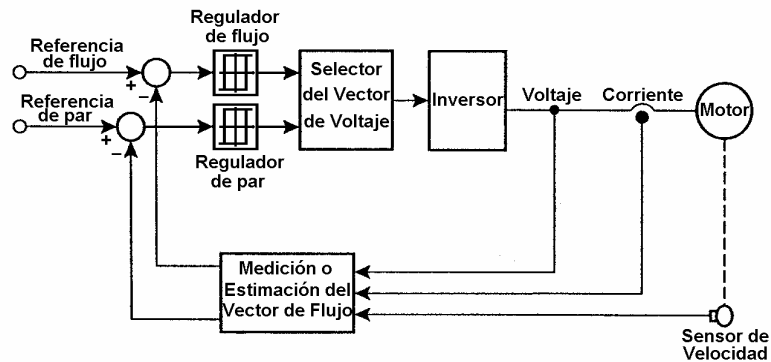
Anteriormente se mencionó el Control Vectorial por Campo Orientado, que este nombre genérico se le da al caso de cuando la orientación del flujo es el flujo del rotor. De hecho el sistema de Control Vectorial puede estar orientado al flujo del estator o también al el flujo del entrehierro.

Control Directo del Par

La principal diferencia con los otros métodos de control anteriores es que el DTC no existe un modulador PWM separado, sino que la posición de los interruptores del convertidor de potencia es determinada directamente por el estado electromagnético del motor. Para ello es necesario disponer de un modelo muy exacto del motor junto con una elevadísima capacidad de cálculo.

La siguiente figura muestra un esquema básico de control directo del par el cual permite una respuesta dinámica mucho más rápida, que inclusive puede llegar a duplicar las prestaciones de los esquemas de control vectorial anteriores.

Figura 39. Control Directo del Par y Control Vectorial del Flujo del Estator.



Accionamientos de CA a Frecuencia Variable. PARDO, Aldo

El bloque de histéresis del par y del flujo compara los valores reales de estas variables con sus valores actuales y elabora la posición óptima de los interruptores del convertidor de potencia para seleccionar el vector de voltaje más indicado. El objetivo es obligar al vector de flujo del estator variar en la forma que se establece los valores de referencia del par y flujo del estator. Para determinar la secuencia de conmutación del inversor, el DTC utiliza las últimas tecnologías de los microprocesadores, los procesadores digitales de señales (DSP), juntos con circuitos de propósito específicos (ASIC). Todas las señales de control se transmiten por fibra óptica para conseguir elevadas velocidades de transmisión.

Control sin Sensores

Los esquemas de control requieren de sensor de velocidad para su operación en lazo cerrado. El sensor de velocidad posee varios inconvenientes desde el punto de vista de costo, confiabilidad e inmunidad al ruido. Actualmente han sido propuestos varios métodos para la estimación de la velocidad, utilizando voltaje, corrientes y frecuencia del estator. Este tema se conoce como Control de Velocidad sin Sensores (Speed Sensorless Control) en el cual se está investigando.

Estas técnicas se pueden clasificar de manera general en:

- 1) *Control de velocidad en lazo abierto con compensación del deslizamiento.*
- 2) *Control a lazo cerrado con estimación de la velocidad.*

En el primer caso la velocidad sincrónica del motor se regula, mientras que la frecuencia del deslizamiento se utiliza solamente para compensar los cambios de la carga. Y en el segundo caso, la velocidad del motor se estima y se utiliza como señal de retroalimentación a lazo cerrado. Los convertidores de frecuencia han surgido como una excelente alternativa para controlar la velocidad al motor asincrónico de jaula de ardilla. Cuestión que hoy en día es casi imprescindible en muchos casos. Permitiendo que los procesos se adapten fácilmente a cualquier variación de la demanda o el suministro, lo que contribuye a reducir costos y a mejorar la calidad del producto y, además, el suavizar los cambios de velocidad reduce la fatiga de los mecanismos evitando un buen número de problemas. En otros casos puede interesar optimizar el par y alcanzar la máxima aceleración que tolera el motor.

Esta es la razón del éxito que han tenido, desde su aparición en el mercado, unos equipos como los convertidores de frecuencia. Ya que son capaces de actuar simultáneamente sobre la frecuencia y sobre la tensión o la intensidad de su alimentación. Dotando a los motores de corriente alterna con la posibilidad de variación de velocidad sin saltos y con pocas pérdidas. Los avances en la fabricación de semiconductores de potencia y el desarrollo de controles más potentes, unido a la experiencia cada vez mayor de fabricantes y usuarios, ha hecho que las aplicaciones de los convertidores de frecuencia hayan pasado muy rápidamente de ser una excepción a convertirse en un equipo omnipresente en muchas aplicaciones industriales. Ver [17]

4.0 AUTOMATIZACIÓN Y ASPECTOS IMPORTANTES DE CONTROL

La automatización es un sistema donde se transfieren tareas de producción, realizadas habitualmente por operadores humanos a un conjunto de elementos tecnológicos.

Un sistema automatizado consta de dos partes principales:

La *Parte Operativa* es la parte que actúa directamente sobre la máquina. Son los elementos que hacen que la máquina se mueva y realice la operación deseada. Los elementos que forman la parte operativa son los accionadores de las máquinas como motores, cilindros, compresores y los captadores como fotodiodos, finales de carrera, etc.

La *Parte de Mando* suele ser un autómata programable (tecnología programada), aunque hasta hace bien poco se utilizaban relés electromagnéticos, tarjetas electrónicas o módulos lógicos neumáticos (tecnología cableada). En un sistema de fabricación automatizado el autómata programable está en el centro del sistema. Este debe ser capaz de comunicarse con todos los constituyentes de sistema automatizado.

Objetivos de la Automatización

- Mejorar la productividad de la empresa, reduciendo los costos de la producción y mejorando la calidad de la misma.
- Mejorar las condiciones de trabajo del personal, suprimiendo los trabajos penosos e incrementando la seguridad.

- Realizar las operaciones imposibles de controlar intelectual o manualmente, debido a su demanda de precisión y rapidez.
- Mejorar la disponibilidad de los productos, pudiendo proveer las cantidades necesarias en el momento preciso.
- Simplificar el mantenimiento de forma que el operario no requiera grandes conocimientos para la manipulación del proceso productivo.

Ver [23]

4.1 AUTOMATIZACIÓN USANDO LÓGICA PROGRAMABLE

La lógica programable permite utilizar unidades electrónicas para el tratamiento de datos. El funcionamiento de este tipo de equipos no está definido por un esquema, como en el caso de la lógica cableada, sino por un programa cargado en la memoria de la unidad de tratamiento.

Los autómatas programables son los componentes básicos de los equipos electrónicos de automatismo. Hicieron su aparición en los Estados Unidos en 1969 como respuesta a la demanda de los fabricantes de automóviles. Deseaban automatizar sus fábricas con un material capaz de adaptarse a los cambios de fabricación, más sencillo y económico que los sistemas cableados que se empleaban masivamente hasta entonces.

En la actualidad, existen numerosos modelos de autómatas programables: desde los nanoautómatas, que se adaptan a las máquinas e instalaciones simples con un número reducido de puertos de entrada/salida, hasta los autómatas multifunción, capaces de gestionar varios millares de puertos de entrada/salida y dedicados al pilotaje de procesos complejos.

4.2 DEFINICIÓN DE UN AUTÓMATA PROGRAMABLE

Un autómata programable es una máquina electrónica especializada en el pilotaje y el control en tiempo real de procesos industriales y terciarios. Ejecuta una serie de instrucciones introducidas en su memoria en forma de programa y, por tanto, se asemeja a las máquinas de tratamiento de la información. No obstante, existen tres características fundamentales que lo diferencian claramente de las herramientas informáticas como los ordenadores que se utilizan en las empresas y el sector terciario:

- Pueden conectarse directamente a los captadores y preaccionadores mediante sus puertos de entrada/salida para equipos industriales.
- Su diseño permite que funcionen en ambientes industriales duros (temperatura, vibraciones, microcortes de la tensión de alimentación, parásitos, etc.)
- Por último, la programación se basa en lenguajes específicamente desarrollados para el tratamiento de funciones de automatismo, de modo que ni su instalación ni su uso requieren conocimientos de informática.

4.2.1 Estructura Básica de un P.L.C

La estructura básica de un autómata programable se fundamenta en tres elementos funcionales principales: procesador, memoria y entradas/salidas “Todo o Nada” o de tipo análogo. El enlace eléctrico de estos elementos se realiza por medio de un bus. Un bloque de alimentación proporciona las tensiones necesarias para el funcionamiento del conjunto.

Procesador

El cometido principal del procesador, o unidad central (UC), consiste en tratar las instrucciones que constituyen el programa de funcionamiento de la aplicación. Además de esta tarea, la UC desempeña las siguientes funciones:

- Gestión de entradas/salidas
- Control y diagnóstico del autómata mediante una serie de pruebas que se ejecutan en el momento del encendido o cíclicamente, durante el funcionamiento del sistema
- Diálogo con el terminal de programación, tanto durante las fases de escritura y depuración del programa como durante su explotación, para realizar tareas de verificación y ajuste de datos.

Uno o varios microprocesadores ejecutan las funciones mediante un microsoftware previamente programado en una memoria de control o de sistema. Esta memoria muerta define la funcionalidad del autómata y no es accesible para el usuario.

Memoria De Usuario

Permite almacenar las instrucciones que conforman el programa de funcionamiento del automatismo y los datos, que pueden ser de los siguientes tipos:

- Información susceptible de variar durante la ejecución de la aplicación. Por ejemplo, resultados de cálculos realizados por el procesador que se guardan para su uso posterior. Estos datos se denominan variables internas o palabras internas,

– Información que no varía durante la ejecución pero que el usuario puede modificar: textos que se muestran, valores de preselección, etc. Se denominan palabras constantes.

– Memorias de estado de las entradas/salidas, actualizadas por el procesador en cada turno de escrutación del programa. El elemento básico de la memoria es el bit (abreviatura del inglés binary digit: dígito binario), que admite dos estados lógicos: 0 y 1. Los bits se agrupan en palabras (16 bits) o en bytes (8 bits) que se identifican mediante una dirección. Para cada una de las partes (programa y datos), el volumen de la memoria se expresa en K palabras (1 K palabra = 210 palabras = 1024 palabras) o en K bytes.

Los autómatas programables utilizan dos tipos de memoria:

– *Memoria viva*, o memoria RAM (Random Access Memory: memoria de acceso aleatorio). El contenido de este tipo de memoria puede leerse y modificarse en cualquier momento, pero se pierde en caso de falta de tensión (memoria volátil). Por tanto, necesita una batería de seguridad. La memoria viva se utiliza para escribir y poner a punto los programas y para almacenar los datos.

– *Memoria muerta*, cuyo contenido se conserva (no volátil) en caso de falta de tensión y que sólo puede leerse. Su escritura requiere el borrado total previo por medio de un procedimiento especial externo al autómata, por rayos ultravioletas (memorias EPROM y REEPROM) o eléctrico (memorias EEPROM). Se utilizan para almacenar los programas previamente depurados. La memoria de programa se ubica en uno o varios cartuchos que se insertan en el módulo procesador o en un módulo de ampliación de memoria. La memoria de datos, y en ocasiones la memoria de programa, se integra en el procesador (memoria “on board”).

Entradas/Salidas Ton

Las entradas/salidas TON garantizan la integración directa del autómata en el entorno industrial. Sirven como enlace entre el procesador y el proceso. Todas cumplen una doble función básica:

– Función de interfaz para recibir y tratar señales procedentes del exterior (captadores, pulsadores, etc.) y para emitir señales hacia el exterior (control de preaccionadores, pilotos de señalización, etc.). El diseño de estos interfaces, con aislamiento galvánico o desacoplamiento optoelectrónico, asegura la protección del autómata contra señales parásitas.

Bus

El bus consiste en un conjunto de conductores que enlazan entre sí los distintos elementos del autómata. En el caso de los autómatas modulares, se emplea un circuito impreso situado en el fondo del rack que consta de conectores a los que se enchufan los distintos módulos: procesador, ampliación de memoria, interfaces y acopladores.

Alimentación

Genera las tensiones internas que se distribuyen a los módulos del autómata a partir de una red de 110 o 220 V en corriente alterna o de una fuente de 24 o 48 V en corriente continua. Dispone de dispositivos de detección de caídas o cortes de la tensión de la red y de vigilancia de las tensiones internas. En caso de fallo, dichos dispositivos pueden ejecutar un procedimiento prioritario de seguridad.

4.2.2 Funcionamiento Básico de un P.L.C

Todos los PLC's del mercado se basan en el principio de lectura cíclica de programa. A diferencia de los ordenadores, donde un programa está orientado a objetos y no tiene por que ejecutarse completamente, los PLC si que efectúan el recorrido completo del programa almacenado salvo, se encuentren instrucciones de interrupción o salto que modifiquen este comportamiento inicial.

Definición De Canal

Un canal en un conjunto de 16 bits que puede ser procesado de forma conjunta (por ejemplo para realizar operaciones matemáticas) o en forma individual como operaciones de bit (entradas, salidas, SET, RESET, KEEP, DIF... etc.)

Canales De Entrada

Los canales de entrada introducen información binaria al PLC procedente de la máquina o la aplicación. Dependiendo de la CPU y la configuración de tarjetas de E/S tenemos más o menos canales. Ver [26]

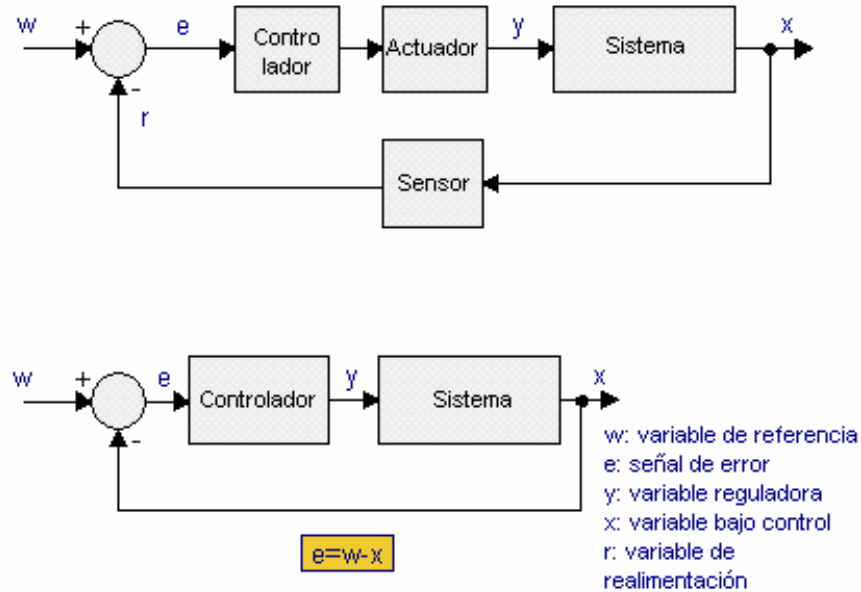
4.3 ASPECTOS IMPORTANTES DEL CONTROL

4.3.1 Estructura Simplificada del Bucle de Control Cerrado

En la mayoría de los casos el actuador y el elemento de medición son despreciados, esto significa que sus funciones son atribuidas al controlador o al sistema controlado. Entonces obtenemos una estructura más sencilla (abajo) que

la estructura original. En la versión simplificada la señal de error e se determina directamente entre la variable de referencia w (valor de consigna) y la variable bajo control x (valor efectivo).

Figura 40. Estructura simplificada del bucle de control cerrado.

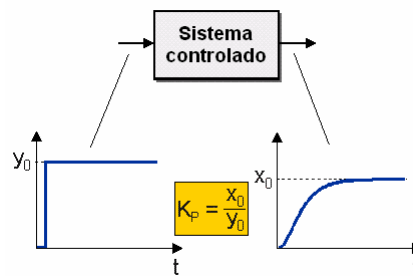


COM3LAB

4.3.2 Respuesta de Régimen Permanente

Se obtiene una distinción entre la respuesta dinámica (respuesta en función del tiempo) y la respuesta estática (respuesta en régimen permanente) de los sistemas. Esta última se caracteriza por el valor final del régimen permanente x_0 de la variable de salida. A la relación entre la amplitud de la salida y de la entrada, x_0/y_0 , se le llama coeficiente de acción proporcional K_p del sistema controlado.

Figura 41. Resultado de un sistema controlado.

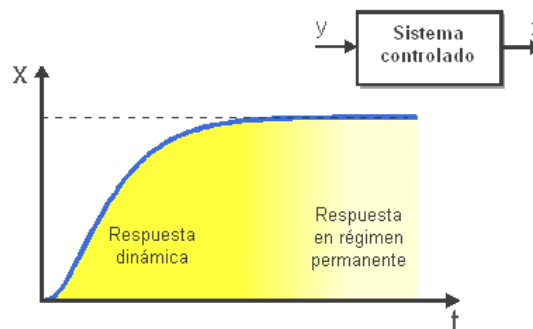


COM3LAB

4.3.3 Respuesta Dinámica

La respuesta dinámica del sistema controlado se caracteriza por la respuesta en régimen transitorio entre el valor inicial y final de la variable de salida luego de un cambio en la señal de entrada. Los sistemas técnicos no pueden normalmente responder inmediatamente a los cambios de entrada, sino que lo hacen con cierto retardo. En consecuencia, estos sistemas se denominan sistemas controlados de retardo.

Figura 42. Régimen permanente y transitorio

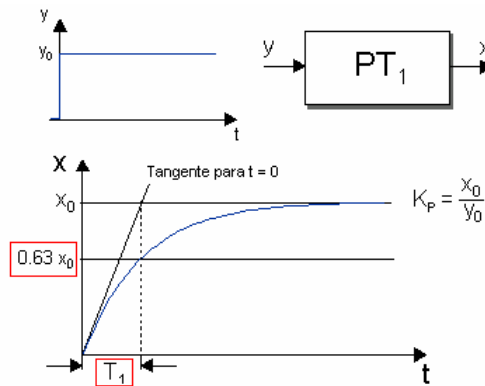


COM3LAB

La constante de tiempo T_1 del elemento del elemento esta dada por la inclinación inicial de la respuesta transitoria; es una medida de la velocidad del sistema

controlado. Una vez transcurrido el periodo T_1 , la respuesta transitoria ha alcanzado el 63% de su valor de régimen permanente. Así es como se puede leer fácilmente la constante de tiempo gráficamente a partir de la respuesta transitoria.

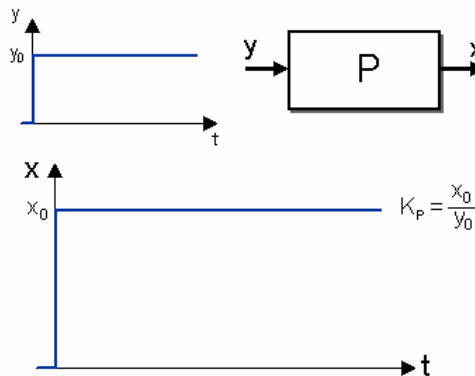
Figura 43. Obtención de la constante de tiempo de forma gráfica.



COM3LAB

Los retardos de tiempo entorpecen a todos los sistemas reales. No obstante, a veces el retardo de tiempo es tan pequeño que puede ser despreciado. Estas clases de sistemas o plantas demuestran respuestas de acción proporcional puras sin retardo de tiempo y son denominados en consecuencia “sistemas P”. La respuesta transitoria de un sistema P es nuevamente una función escalón.

Figura 44. Respuesta transitoria de un sistema P

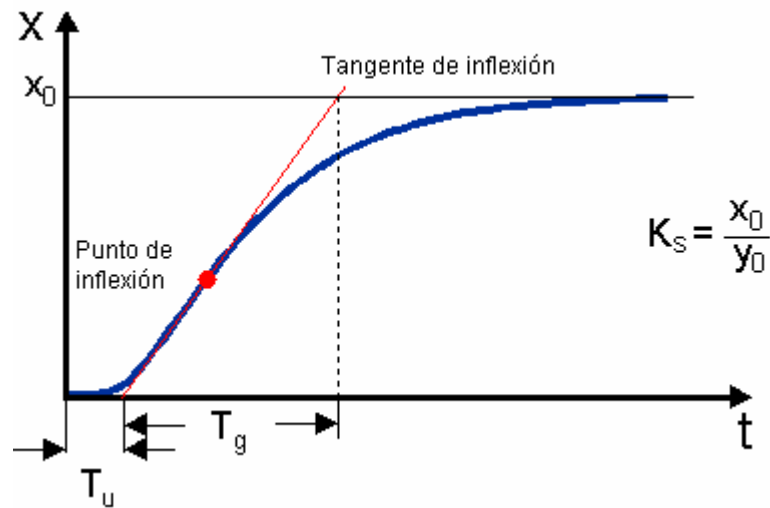


COM3LAB

4.3.4 Parámetros de Elementos con Retardo de Orden Superior (PT_n)

Dado que normalmente no se puede usar la respuesta transitoria para determinar el orden n de retardo del sistema ni tampoco se puede determinar con exactitud las constantes de tiempo de un elemento PT_n, debe emplear parámetros de sustitución fáciles de determinar para caracterizar el elemento. Estos son el tiempo de retardo (T_u); y el tiempo de compensación (T_g), que pueden leerse directamente aplicando la tangente de inflexión a la curva de la respuesta transitoria.

Figura 45. Tiempo de compensación y de retardo en un sistema PT1.



COM3LAB

4.3.5 Tipos de Controladores

El controlador contiene la verdadera “inteligencia” del bucle de control. El controlador está diseñado para reducir adecuadamente una variable reguladora y a partir de la señal de error (e), en base a cierta estrategia de control. Esta variable reguladora asegura que la variable bajo control sea ajustada a la variable

de referencia de la manera más veloz y precisa posible. Esto se aplica para cambios en la variable de referencia así como a las perturbaciones.

4.3.6 Estructura del Controlador (PID)

El controlador PID es el controlador más popularmente usado. Incluye la configuración paralela de elementos (P) proporcionales, (I) integrales y (D) derivativos, por medio de la cual a todos los componentes se les pueden dar parámetros mutuamente independientes. Esto le permite al controlador PID adaptarse óptimamente a todo tipo de sistema controlado. Conectado o desconectando componentes individuales del controlador, pueden configurarse subtipos de controlador como controladores P, PI o PD.

Figura 46. Elementos internos de un controlador PID.

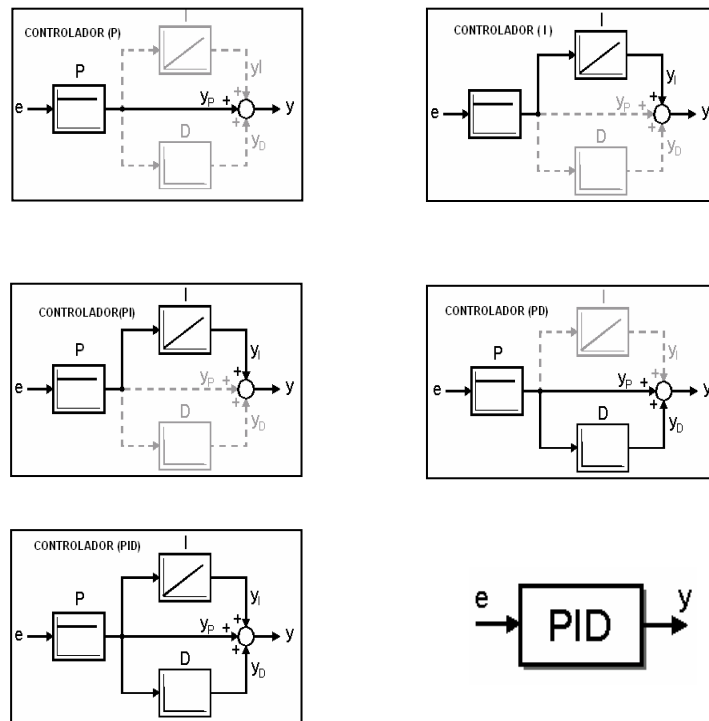
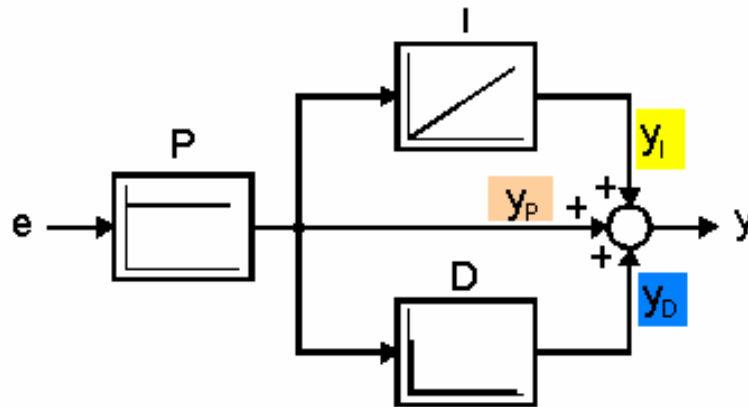


Figura 47. Componentes del controlador PID.



$$y(t) = K_P(e(t) + \frac{1}{T_n} \int e(t) dt + T_v \frac{d e(t)}{d t})$$
$$= K_P e(t) + K_I \int e(t) dt + K_D \frac{d e(t)}{d t}$$

COM3LAB

4.3.7 Control Digital Automático

Además de los controladores analógicos electrónicos, los controladores digitales, es decir, controladores manejados mediante un software, están ganando importancia. Estos controladores tienen su algoritmo de control almacenado como un programa en un procesador digital. Esto puede ser una PC, un microprocesador sencillo o un sistema de instrumentación y control de procesos complejos. El control automático con controladores digitales se denomina control digital directo (DDC).

Figura 48. Ejemplo de un controlador digital real (PLC)

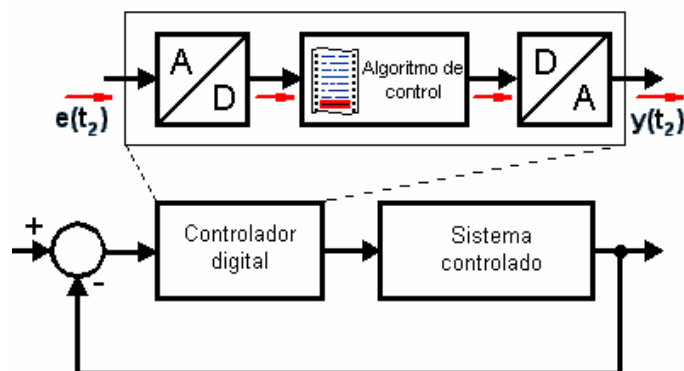


COM3LAB

4.3.8 Componentes del Controlador Digital

LA señal de error $e(t)$ analógica y continua en el tiempo se muestra inicialmente con un intervalo de tiempo constante y se digitaliza en el convertidor A/D dentro del controlador digital, antes de que el algoritmo de control basado en software calcule una variable reguladora de esto. Esto a su vez es convertido en un convertidor D/A y luego transmitido al sistema controlado.

Figura 49. Esquema general de un controlador digital.

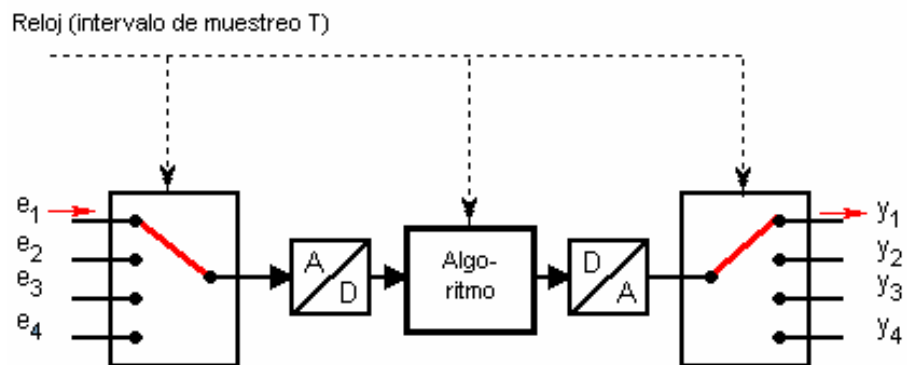


COM3LAB

Ventajas del DDC

La ventaja fundamental de los controladores digitales es su flexibilidad. Su estrategia de control puede modificarse o cambiarse por completo con sólo cambiar unas pocas líneas de la programación, sin tener que alterar en lo más mínimo el hardware. Incluso pueden idearse complejas estrategias de control como la lógica poco definida o controladores adaptables. Además las computadoras potentes posibilitan a un único controlador operar simultáneamente varios procesos.

Figura 50. Controlador digital con la habilidad de manejar varias señales a la vez.



COM3LAB

Algoritmo PID Digital

Ya que el algoritmo de control requiere cierto tiempo de procesamiento, los controladores digitales funcionan en unidades de tiempo discreto, es decir, sólo calculan la variable reguladora actual en cierto intervalo de tiempo, el *tiempo de muestreo T*. La variable reguladora se mantiene constante entre estos intervalos de muestreo para que se produzca como una variable de salida una función en escalera con ancho de escalón T . Si se sustituye la integración como en el caso del controlador PID continuo con una suma de ondas cuadradas y a la

diferenciación por un coeficiente diferencial, se obtiene un algoritmo PID digital, discreto en el tiempo.

Tabla 10. Aspectos del controlador PID.

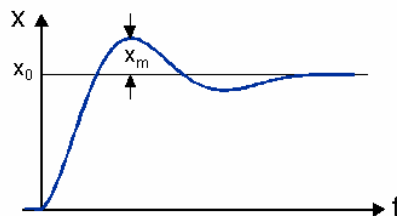
	Controlador PID	Controlador PID digital
Componente P:	$y_p(t) = K_p e(t)$	$y_p(t_k) = K_p e(t_k)$
Componente I:	$y_I(t) = K_I \int e(t) dt$	$y_I(t_k) = K_I \sum_{i=0}^k e(t_i)$
Componente D:	$y_D(t) = K_D \frac{d e(t)}{d t}$	$y_D(t_k) = K_D \frac{e(t_k) - e(t_{k-1})}{T}$ $t_k = k T, k=0, 1, 2, \dots$

COM3LAB

Sobrecorrección

Si la variable controlada (x) excede el valor final en régimen permanente (x_0) antes de alcanzarlo, el bucle de control demuestra la llamada sobrecorrección (x_m) es un parámetro del bucle de control y se define como la máxima desviación del valor de consigna de la variable bajo control. Esto se especifica corrientemente como un porcentaje del valor final en régimen permanente (por Ej. $x_m = 10\%$) Toda amplitud de sobrecorrección excesiva es considerada generalmente indeseable.

Figura 51. Diagrama que explica el fenómeno de la sobrecorrección.

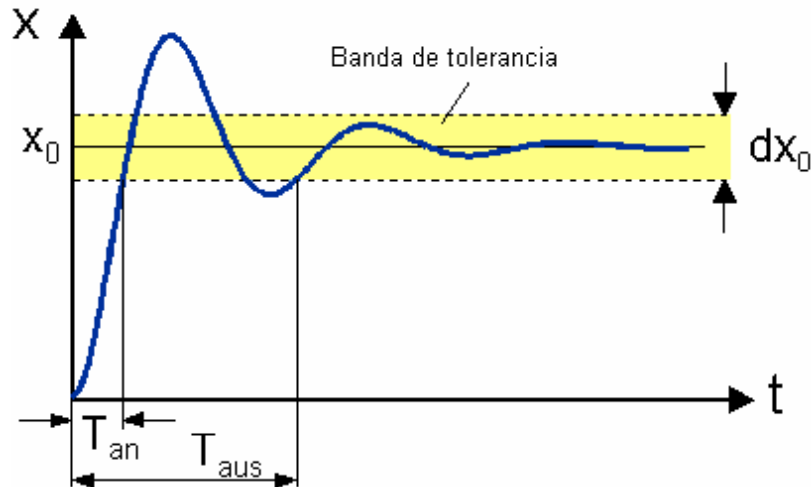


COM3LAB

Tiempo de Subida y de Establecimiento

El tiempo de subida (T_{an}) y el tiempo de establecimiento (T_{aus}) son una medida para la velocidad de los procesos de corrección y se relacionan con la banda de tolerancia (dx_0) en torno al valor final en régimen permanente de la variable bajo control (x). (T_{an}) describe el tiempo que transcurre hasta el primer ingreso de $x(t)$ en la banda de tolerancia, (T_{aus}) designa el tiempo transcurrido hasta el punto en el tiempo en el que $x(t)$ ya no abandona la banda de tolerancia.

Figura 52. Banda de tolerancia de un sistema.

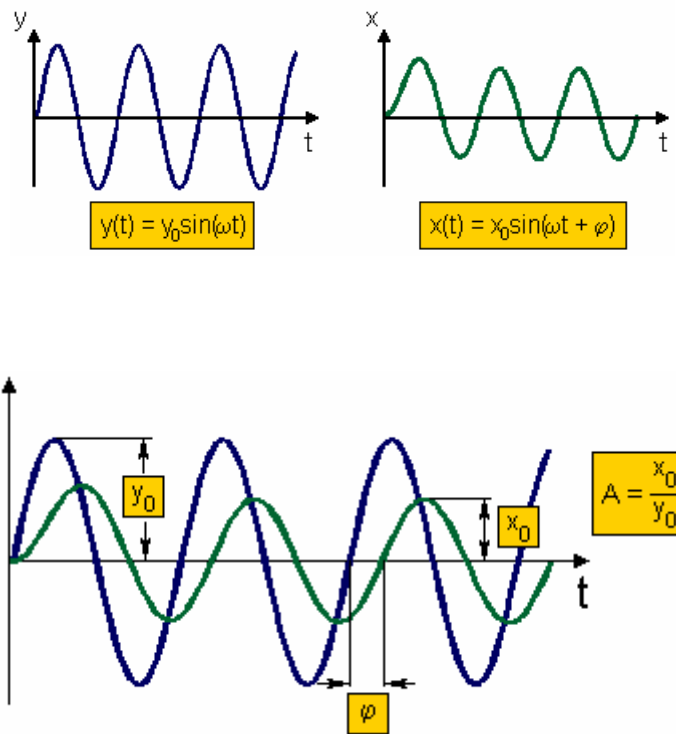


COM3LAB

Respuesta de Frecuencia

En lugar de caracterizar un sistema lineal en el dominio temporal, también puede llevarse a cabo el análisis en el dominio frecuencial. Si aplica al sistema una variable de entrada sinusoidal con frecuencia pulsatoria ($\omega = 2\pi f$), aparecerá en la salida una señal sinusoidal con la misma frecuencia tras una respuesta en régimen transitorio, pero con una amplitud diferente y un corrimiento de fase.

Figura 53. Relación entre la amplitud de de salida y la de entrada.



COM3LAB

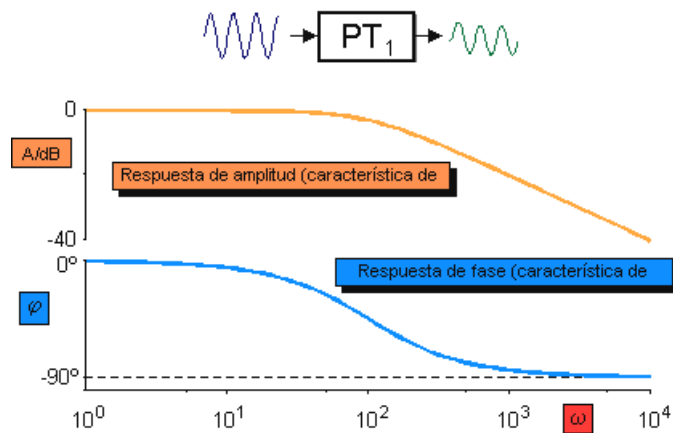
La relación entre la amplitud de salida y de entrada, (x_o/y_o) , se denomina (A); se expresa generalmente en unidades de decibeles (dB). Es válida la siguiente ecuación para la conversión.

$$\left. \frac{x_o}{y_o} \right|_{dB} = 20 \log \left(\frac{x_o}{y_o} \right)$$

El ángulo de fase φ entre la señal de entrada y de salida se llama “corrimiento de fase”. Si la variable de salida se queda atrás de la variable de entrada el corrimiento de fase es negativo. Ambas variables dependen de la frecuencia pulsatoria ω .

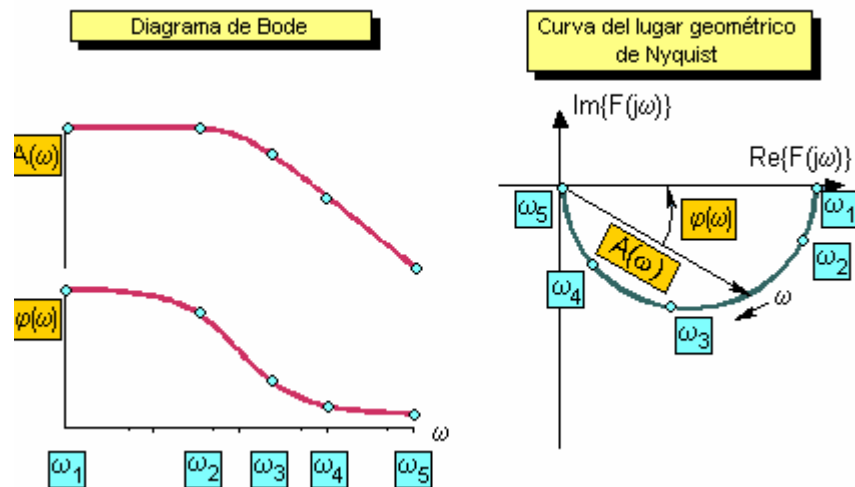
La ganancia de amplitud disminuye a medida que aumenta la frecuencia mientras que el corrimiento de fase aumenta en magnitud. En un elemento PT_1 , las bajas frecuencias pueden pasar por el sistema prácticamente sin cambios mientras que las frecuencias superiores se atenúan.

Figura 54. Diagrama de Bode de un elemento PT_1



COM3LAB

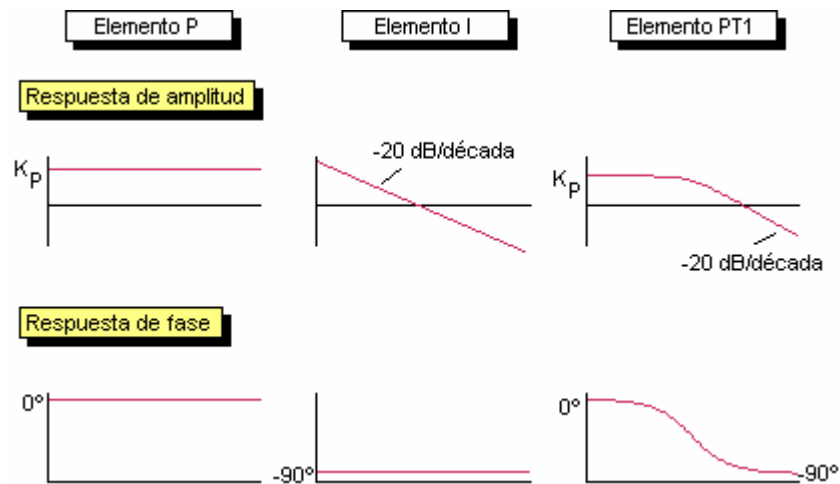
Figura 55. Diagrama de Bode y lugar geométrico de Nyquist de un sistema de primer orden.



COM3LAB

En vez de describir característica de fase y de magnitud por separado como en el diagrama de bode, se pueden representar en conjunto en el plano complejo $F(j\omega)$ usando como parámetro de un diagrama simple la frecuencia pulsatoria ω . Este modo de representación se denomina “curva de lugar geométrico de Nyquist” del sistema. También permite sacar importantes conclusiones acerca de la estabilidad del bucle de control cerrado.

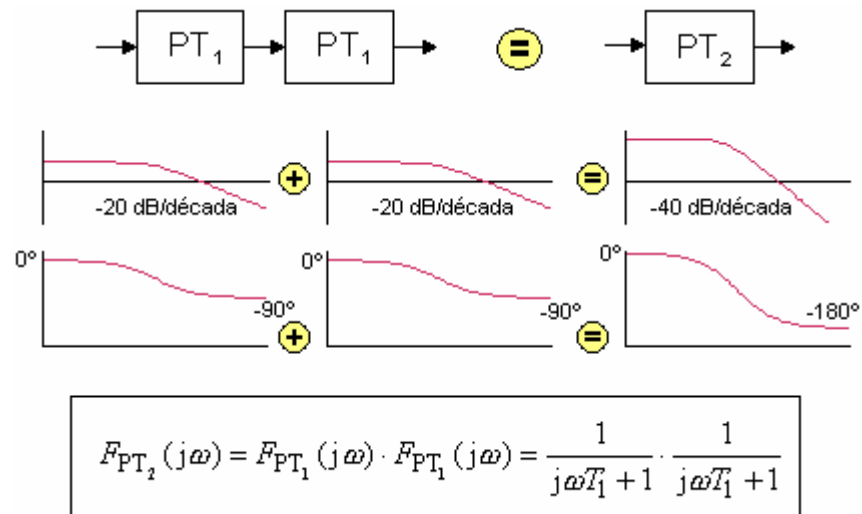
Figura 56. Respuesta a la frecuencia a elementos básicos sencillos.



COM3LAB

Los elementos P, es decir sistemas almacenadores de energía (sistemas de orden cero) demuestran una ganancia de amplitud constante de acuerdo a su coeficiente de acción proporcional K_p y una fase de 0° . Los elementos con retardo de primer orden (elementos I y PT1) poseen una característica de fase que tiende a 90° .

Figura 57. Respuesta de frecuencia a un elemento de segundo orden



COM3LAB

Los elementos con retardo de orden superior son conexiones en serie de elementos individuales básicos. Su compleja respuesta de frecuencia resulta del producto de las respuestas individuales de frecuencia. Las características de fase y de amplitud surgen aquí en representación logarítmica con sólo añadir las características de los elementos básicos. La respuesta de amplitud de un elemento PT_n desciende así para grandes frecuencias a $n \cdot 20 \text{ dB/década}$ y la fase tiende a $n \cdot 90^\circ$.

Ver [8]

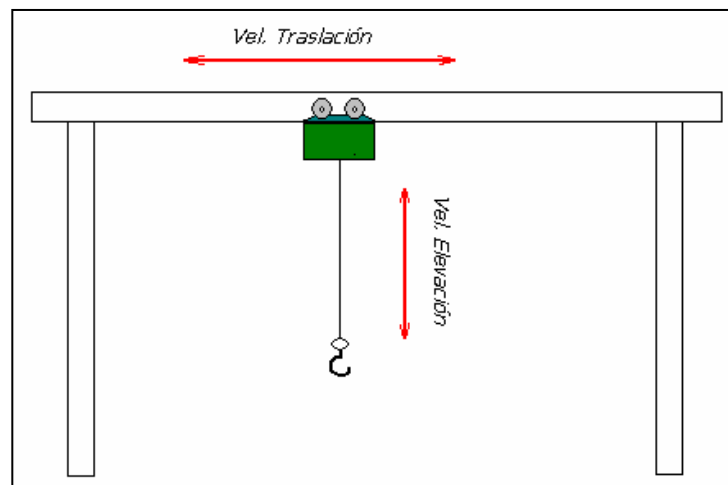
5. ANÁLISIS Y DISEÑO

En este capítulo, se plantea paso a paso el diseño y la selección de cada una de las respectivas piezas y/o dispositivos que harán parte del transportador bidimensional automático, que se aplicará al proceso secuencial, según la necesidad del caso.

Teniendo en cuenta, que se desea levantar una carga máxima de una tonelada y tener un recorrido longitudinal de nueve metros, lo primero que se debe calcular son las capacidades de los motores a usar, para el transporte. Primero, se debe calcular las velocidades tanto de elevación como de traslación.

5.1 CÁLCULO DE VELOCIDADES Y COEFICIENTES ESPECIALES

Figura 58. Velocidades de traslación y elevación de un puente grúa



Para el cálculo de las velocidades, primero se debe “ubicar” el puente grúa dentro de un grupo, según sus características de trabajo. En la tabla 11 se puede apreciar según la clasificación, que el puente grúa pertenece al **grupo I**, puesto

que es considerado como un puente grúa de taller con una fuerza portante relativamente pequeña (tabla 11).

Tabla 11. Clasificación por grupos según el tipo de grúa.

Tipo de máquina	Grupo	Observaciones	
Polipastos, gatos y dispositivos manuales	I	las maquinas de pequeña fuerza portante son susceptibles de ser sobrecargadas	
Puentes-grúa de central para locomotoras de taller y de parque (pequeña fuerza)	I-II II		
Puentes-grúa de taller y de parque (gran fuerza)	II-III		
Puentes-grúa de montaje de fundición para máquinas de remachar	II I-III II-III		
Grúas de astillero	II-III		
Grúas de astillero	II		
Puentes-grúa pesados de gran fuerza	II		
<u>Grúas giratorias, flotantes:</u>	I-II		
a .de gancho	II		
b. de cuchara prensora o de electro portador	II-IV		IV para servicio pesado de cuchara con pluma corta y poleas de cabeza sin resorte
<u>Vigas de pórtico, de monocarriles, etc.</u>			
a. gancho	II		III para servicio duro de cuchara prensora ,pluma corta y poleas de la pluma sin resortes sobre el carro
b. de cuchara prensora	II-III		
Grúas-puente volcadoras de vagones	III		
Grúas para Obras Públicas	I-II		
Grúas ligeras de montaje para cilindros de laminador	I-III	I si la grúa esta hecha para la pieza más pesada	
Cargadoras	III-IV		
Puentes en ménsula para el transporte de la-minados	II-IV		
Puentes de colada	II-IV	IV si se usa exclusivamente como quebrador de fundiciones, un grupo inferior si el puente ha sido calculado para fuerzas superiores en trabajo normal	
Puentes para lingoteras y lingotes	III		
Puentes para hornos Pitts	III-IV		
Puentes « stripper »	IV		
Puentes para romper piezas de fundición	II-IV		

Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. POSSO, Raúl

Tabla 12. Elección del coeficiente “ ψ ” o factor de compensación, según el tipo de grúa.

CLASIFICACIÓN	ψ
GRUPO I	1.2
GRUPO III	1.4
GRUPO III	1.6
GRUPO IV	1.8

Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. POSSO, Raúl

Después de saber en que grupo se clasifica el puente grúa, es necesario hallar su factor de compensación, necesario para cálculos posteriores. Según la tabla 12, el puente grúa tipo monorriel que se encuentra clasificado en el grupo I tiene un factor de compensación de **1.2**.

Tabla 13. Selección de las velocidades de accionamiento del puente grúa.

— VELOCIDADES DE ACCIONAMIENTO PARA Puentes-GRÚA CON SERVICIO DE GANCHO PARA CARGA según DIN 15022 ²															
		Grupo del aparato o del movimiento													
		I Servicio ligero			II Servicio normal			III y IV Servicio forzado							
Número máximo de ciclos por hora		hasta 18			hasta 30			hasta 60 (y más)							
Fuerza portante tons.		Velocidades de trabajo m/min.													
Traslación del carro		16	20	25	32	20	25	32	40	25	32	40	50	63	
Traslación de la grúa		25	32	40	50	63	50	63	80	100	63	80	100	125	160
Elevación	2	6,3	8	10	12,5	16	20	25	32	40					
	3,2	5	6,3	8	12,5	16	20	25	32	40					
	5	5	6,3	8	12,5	16	20	25	32	40					
	8	4	5	6,3	10	12,5	16	20	25	32					
	10	4	5	6,3	10	12,5	16	20	25	32					
	12,5	4	5	6,3	10	12,5	16	20	25	32					
	16	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25					
	20	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20					
	32	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16					
	50	1,6	2	2,5	3,15	4	5	6,3	8	10					
	80	1,6	2	2,5	1,6	2	2,5	4	5	6,3					
100	1,6	2	2,5	1,6	2	2,5	3,15	4	5						
125	1,25	1,6	2	1,25	1,6	2	2,5	3,15	4						
160	1,25	1,6	2	1,25	1,6	2	2	2,5	3,15						
200	1	1,25	1,6	1	1,25	1,6	1,6	2	2,5						
250	0,8	1	1,25	0,8	1	1,25	1,6	2	2,5						
Elevación lenta		0,3 0,5			0,8		1		1,25						

Son preferibles las magnitudes impresas con caracteres gruesos. Las velocidades de la elevación auxiliar y de la principal dependen de la fuerza portante.

Tabla 14. Selección del trole según el catálogo de Coffing Hoists.

S P E C I F I C A T I O N S								MT Electric Trolleys	
Capacity		Model Number	Motor HP	Flange Width (In.)	Beam Ht. (In.)	Min. Rad. Curve (In.)	Net Wt. (Lb.)		
(Lb.)	(Ton)								
500	1/4	MT-05035	1/4	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
500	1/4	MT-05075	1/4	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
1000	1/2	MT-10035	1/4	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
1000	1/2	MT-10075	1/4	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
2000	1	MT-20035	1/4	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
2000	1	MT-20075	1/4	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
3000	1 1/2	MT-30035	1/4	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
3000	1 1/2	MT-30075	1/4	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
4000	2	MT-40035	1/4	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
4000	2	MT-40075	1/2	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
6000	3	MT-60035	1/4	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
6000	3	MT-60075	1/2	3.332 - 6	6 - 18	48	115		
8000	4	MT-80035	(2) 1/4	4 - 6	8 - 18	***	220		
8000	4	MT-80075	(2) 1/2	4 - 6	8 - 18	***	220		
10000	5	MT-100035	(2) 1/4	4 - 6	8 - 18	***	220		
10000	5	MT-100075	(2) 1/2	4 - 6	8 - 18	***	220		

Catálogo de Productos de Coffing Hoists.

Tabla 15. Selección del elevador según el Catálogo de Coffing Hoists

S P E C I F I C A T I O N S													EC Hook & Lug Suspension Models	
Capacity		Model Number	Frame* Size	No. of Chains	Motor HP	Lift Speed (FPM)		Headroom (In.)	Housing Dimensions (In.)			Net Wt.** (Lb.)		
(Lb.)	(Ton)					Single	Two		H	W	L			
500	1/4	EC-0516	S	1	1/4	16	5.3	167/8	8	115/8	233/8	100		
500	1/4	EC-0532	S	1	1/2	32	10.7	167/8	8	115/8	233/8	108		
500	1/4	EC-0564	S	1	1	64	21.3	167/8	8	115/8	233/8	116		
1000	1/2	EC-1009	S	1	1/4	9	3	167/8	8	115/8	233/8	104		
1000	1/2	EC-1016	S	1	1/2	16	5.3	167/8	8	115/8	233/8	106		
1000	1/2	EC-1032	S	1	1	32	10.7	167/8	8	115/8	233/8	118		
2000	1	EC-2004	S	2	1/4	4	1.3	181/4	8	115/8	233/8	116		
2000	1	EC-2008	S	2	1/2	8	2.7	181/4	8	115/8	233/8	116		
2000	1	EC-2012	S	1	3/4	12	4	167/8	8	115/8	233/8	114		
2000	1	EC-2016	S	1	1	16	5.3	167/8	8	115/8	233/8	118		
2000	1	EC-2032	L	1	2	32	10.7	23	107/8	1413/16	313/16	295		
4000	2	EC-4006	S	2	3/4	6	2	1815/16	8	115/8	233/8	127		
4000	2	EC-4008	S	2	1	8	2.7	1815/16	8	115/8	233/8	133		
4000	2	EC-4016	L	1	2	16	5.3	23	107/8	1413/16	313/16	295		
4000	2	EC-4024	L	1	3	24	8	23	107/8	1413/16	313/16	302		
6000	3	EC-6005	S	3	1	5	1.7	231/4	8	12	263/8	200		
6000	3	EC-6010	L	2	2	10	3.3	273/8	107/8	1413/16	313/16	340		
6000	3	EC-6016	L	2	3	16	5.3	273/8	107/8	1413/16	313/16	347		
8000	4	EC-8008	L	2	2	8	2.7	273/8	107/8	1413/16	313/16	345		
8000	4	EC-8012	L	2	3	12	4	273/8	107/8	1413/16	313/16	352		
10000	5	EC-10005	L	3	2	5	1.7	277/8	107/8	1413/16	313/16	393		
10000	5	EC-10008	L	3	3	8	2.7	277/8	107/8	1413/16	313/16	393		

Catálogo de Productos de Coffing Hoists.

Comparando la tabla 13, y el catalogo de troles (tabla 14) y elevadores (tabla 15) de “Coffing Hoists” (una marca reconocida de puentes grúa a nivel internacional), para un trabajo normal de 18 ciclos por hora. La velocidad de elevación promedio será de **9.75m/min(0.163m/s)** aproximadamente y la velocidad de traslación de **22.86m/min(0.381m/s)** aproximadamente o 75 FPM que es la velocidad de traslación estándar más cercana recomendada para este tipo polipasto de “Coffing Hoists”.

Tabla 16. Coeficientes de impacto según la velocidad de traslación.

VELOCIDAD (m/seg.)	ψ
0 – 0.5	1.05
0.5 - 1.0	1.15
1.0 - 2.0	1.25

Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. POSSO, Raúl

Debido a que la velocidad de traslación es de **22.86m/min o 0.381m/s**, según la tabla 16, el coeficiente de impacto es de **1.05**.

La velocidad de elevación según el trabajo requerido y según el catálogo de “Coffing Hoists” será de **9.75m/min o 0.163m/s**. Para el cálculo del coeficiente de carga dinámica (K_d), por inercia en el frenado o arranque de las cargas, se asume un tiempo de reacción de un segundo. Teniendo en cuenta la velocidad de elevación tenemos:

$$a = \frac{V}{t} = \frac{0.163m/s}{1s} = 0.163m/s^2 \quad (5.1)$$

$$K_d = 1 + \frac{a}{g} = 1 + \frac{0.163}{9.81} = 1.0166 \approx 1.02 \quad (5.2)$$

En resumen, hasta el momento tenemos la siguiente información:

Tipo Punte Grúa: Grupo I

Carga Máxima: 1 Tonelada

Peso total del manipulador: 410Kg.

Velocidad de elevación promedio: 9.75m/min

Velocidad de traslación promedio: 22.86m/min

Factor de Compensación: 1.2

Coefficiente de impacto: 1.05

Coefficiente de Carga Dinámica: 1.02

Según estos resultados, se pueden tomar ciertas determinaciones para comenzar a elegir los elementos necesarios para la “construcción” del puente grúa, tales como el trole y el elevador. Debido a que estas partes fueron elegidas de catálogos de “Coffing Hoists”, especialistas en puentes grúas, sobra decir que los motores respectivos de dichos dispositivos fueron diseñados única y exclusivamente para este tipo de labores de transporte. Ver [5]

En la figura de la derecha se puede apreciar finalmente el ensamble real del tipo de trole y polipasto o elevador seleccionados (Coffing Hoists).

Trole (traslación): modelo MT-20035

Elevador: modelo EC-2004



5.2 CÁLCULO ESTRUCTURAL DE LA VIGA

5.2.1 Diseño a Flexión por Carga Móvil

El diseño de la viga o nave principal del puente grúa se hace asumiendo que las cargas son distribuidas de forma homogénea en cada una de las ruedas del trole al contacto con la viga.

Teniendo por catálogo, la distancia entre ruedas del trole (l_1): 13.335 cm (ver anexos-planos), y buscando un recorrido o dimensión de viga de 9m. Lo primero que se necesita calcular es el momento flector máximo, ya que nuestro diseño es a flexión, y para ello se debe calcular primero la presión bajo cada una de las ruedas del trole, de la siguiente forma:

$$2P = \frac{Q + G_o}{2} = \frac{1Ton + 0.41Ton}{2} = 0.705Ton \quad (5.3)$$

$$P = \frac{Q + G_o}{4} = 0.3525 \approx 0.353Ton$$

$$M_1 = \frac{P \left(L_1 - \frac{l_1}{2} \right)}{2L_1} = 156.505Ton - cm \quad (5.4)$$

Donde:

P = presión bajo cada una de las ruedas del trole

Q = peso o carga viva a levantar

G_o = peso del carrito o trole con mecanismo de elevación y cadena

M_1 = momento flector máximo

L_1 = longitud de la viga

A continuación, se aplican los respectivos coeficientes de carga calculados anteriormente según el trabajo deseado, los cuales dependen de las velocidades de elevación y traslación, obteniendo así un cálculo mucho más preciso.

$$P = \frac{(Q_{\max} \cdot K_d \cdot \psi) + (G_o \cdot \varphi)}{N} \quad (5.5)$$

$$P = \frac{(1Ton)(1.02)(1.2) + (0.41Ton)(1.05)}{4} = 0.413 \approx 0.41Ton$$

$$M_1 = \frac{P \left(L_1 - \frac{l_1}{2} \right)^2}{2L_1} = \frac{0.41(900 - 13.335/2)^2}{1,800} = 181.776Ton - cm = 181,776Kg - cm$$

Finalmente habiendo obtenido los valores de momento flector máximo por carga viva y la presión bajo cada una de las ruedas del polipasto, se puede proceder al cálculo y selección del perfil de la viga a usar.

5.2.2 Cálculo y Selección del Perfil

Teniendo en cuenta una fatiga por flexión admisible según el tipo de acero estructural, con valores de 1400 Kg/cm² para aceros nacionales, se puede proceder a hallar el momento de inercia deseado del perfil.

Cálculo del momento de inercia (J_{erf}):

Donde la deflexión o flecha (f) es:

$$f = \frac{L_1}{750} = \frac{900}{750} = 1.2 \quad (5.6)$$

$$J_{\text{ef}} = \frac{P}{48 \cdot f \cdot E} (L_1 - l_1) \cdot [3L^2 - (L_1 - l_1)^2] \quad (5.7)$$

$$J_{\text{ef}} = \left[\frac{410}{48 \cdot (1.2) \cdot (2.1 \times 10^6)} \right] \cdot (900 - 13.335) \cdot [3(900)^2 - (900 - 13.335)^2] =$$

$$J_{\text{ef}} = 4,940.345 \text{ cm}^4$$

Obtenido el momento de inercia del perfil deseado (J_{ef}); por medio del uso de un catálogo de perfiles en acero, se escoge la viga según la figura o perfil necesario para el trabajo y buscando que el tamaño de dicho perfil tenga un momento de inercia inmediatamente mayor al encontrado.

Se encuentra una viga de perfil en "I", con un momento de inercia "Ix" igual a 5161.00 cm^4 de referencia – S10X25.4, hasta el momento satisface las necesidades.

Momento flector máximo por carga móvil (M_1): 181,776kg-cm.

Momento flector máximo por peso propio (M_2): (Ecuación 5.8)

$$M_2 = \frac{g \cdot (L_1^2)}{8} = \frac{(37.8) \cdot (9)^2}{8} \cdot 100 = 38,272.5 \text{ Kg} - \text{cm} \quad (5.8)$$

Donde:

g = peso de la viga por cada metro de la misma

Se calcula el módulo de sección (Z_{xx} o W_x) de la nueva viga, que debe tener cierta relación con el catálogo si los cálculos fueron debidamente realizados y obtenemos que es menor al módulo de sección de la viga por catálogo: 404.80 cm^3 lo cual nos garantiza la efectividad de nuestros cálculos hasta el momento. (Ecuación 5.9).

$$Z_{xx} = W_x = \left(\frac{J_{erf}}{\left(\frac{H}{2}\right)} \right) = \frac{4940.345}{\left(\frac{25.4}{2}\right)} = 389.00 \text{ cm}^3 \quad (5.9)$$

Finalmente, conocidos los momentos flectores por cargas móviles y por peso propio, se comprueba la resistencia de la viga puente hallando el esfuerzo de trabajo:

$$\sigma_{trab} = \frac{\varphi(M_2) + \psi(M_1)}{W_x} \quad (5.10)$$

$$\sigma_{trab} = \frac{[(1.05) \cdot (38,272.5) + (1.2) \cdot (181,776)]}{404.80} = 638.14 \text{ kg} / \text{cm}^2$$

El esfuerzo admisible, es el esfuerzo a la fatiga correspondiente al acero utilizado el cual está dado por:

$$\sigma_{adm} = 1,400 \text{ Kg} / \text{cm}^2$$

$$\sigma_{trab} \leq \sigma_{adm}$$

Finalmente según la Ecuación 5.11, se tiene un factor de seguridad de:

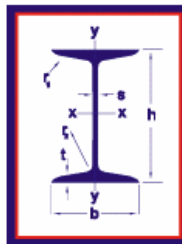
$$F.S = \frac{1,400}{638.14} = 2.2 \quad (5.11)$$

A continuación, se muestra el tipo y el tamaño del perfil seleccionado, según el catálogo de la compañía nacional de aceros. Debido al tipo de trole y a su funcionamiento, se escogió un perfil Americano Estándar, con inclinación en sus "alas". En caso de escoger otro tipo de trole, con un funcionamiento diferente y ruedas distintas, simplemente se debe cambiar la forma del perfil. Fácilmente se puede utilizar un perfil "W", "H", u otro de similares características.

Tabla 17. Dimensiones y propiedades de la viga seleccionada.

Norma Técnica ASTM A36 / A36M - 96

PERFILES I ESTANDAR AMERICANO - S											
DESIGNACIONES	DIMENSIONES Y PROPIEDADES PARA EL DISEÑO										
	DIMENSIONES					AREA	PESO	MOMENTO DE INERCIA		MODULO DE SECCION	
	ALTURA		ALA		d			Ix	Iy	Wx	Wy
	h	s	b	t		cm ²	Kg./M				
mm											
S 3 X 5.7	76.00	4.32	59.18	6.60	41.00	10.80	8.50	105.00	18.94	27.50	6.40
S 3 X 7.5	76.00	8.86	63.73	6.60	41.00	14.30	11.20	122.00	24.40	32.00	7.70
S 4 X 5.6	100.00	4.50	50.00	6.80	64.00	10.60	8.32	171.00	12.20	34.20	4.88
S 4 X 7.7	102.00	4.90	67.64	7.44	64.00	14.60	11.50	253.00	31.80	49.80	9.40
S 4 X 9.5	102.00	8.28	71.02	7.44	64.00	18.00	14.10	283.00	37.60	55.60	10.60
S 5 X 7.5	120.00	5.10	58.00	7.70	86.00	14.20	11.20	329.00	25.16	54.70	7.41
S 5 X 10.0	127.00	5.44	76.30	8.28	86.00	19.00	14.90	512.00	50.78	80.60	13.30
S 5 X 14.75	127.00	12.55	83.41	8.28	86.00	28.00	22.00	633.00	69.51	99.80	16.60
S 6 X 12.0	160.00	6.30	74.00	9.50	108.00	22.80	17.90	938.00	64.45	117.00	14.80
S 6 X 12.5	152.00	5.89	84.63	9.12	108.00	23.70	18.60	920.00	75.75	120.80	17.90
S 6 X 17.25	152.00	11.81	90.55	9.12	108.00	32.70	25.70	1095.00	96.15	143.70	21.30
S 7 X 15.3	178.00	6.40	93.01	9.96	130.00	29.00	22.80	1528.00	110.00	172.10	23.60
S 7 X 20.0	178.00	11.43	98.04	9.96	130.00	37.90	29.80	1765.00	132.00	198.30	26.90
S 8 X 17.4	200.00	7.50	90.00	11.30	152.00	33.50	26.30	2148.00	137.90	214.00	26.00
S 8 X 18.4	203.00	6.88	101.63	10.82	152.00	34.90	27.40	2397.00	155.00	236.00	30.50
S 8 X 23.0	203.00	11.20	105.94	10.82	152.00	43.70	34.20	2701.00	179.00	265.50	33.90
S 9 X 21.8	229.00	7.40	110.00	11.60	178.00	40.70	32.44	3535.00	214.80	309.30	39.10
S 10 X 25.4	254.00	7.90	118.39	12.47	197.00	48.10	37.80	5161.00	283.00	404.80	47.70
S 10 X 35.0	254.00	15.09	125.58	12.47	197.00	66.50	52.10	6119.00	348.00	481.80	55.40
S 12 X 31.8	305.00	8.89	127.00	13.82	244.00	60.30	47.30	9074.00	390.00	596.50	61.30
S 12 X 35.0	305.00	10.87	128.98	13.82	244.00	66.50	52.10	9532.00	411.00	626.00	63.70
S 12 X 40.8	305.00	11.73	133.40	16.74	232.00	77.40	60.70	11321.00	566.00	744.00	84.60
S 12 X 50.0	305.00	17.45	139.11	16.74	232.00	94.80	74.40	12695.00	653.00	832.50	94.10
S 15 X 42.9	381.00	10.44	139.73	15.80	311.00	81.30	63.80	18606.00	599.00	976.70	85.70
S 15 X 50.0	381.00	13.97	143.26	15.80	311.00	94.80	74.40	20229.00	653.00	1062.00	91.30
S 18 X 54.7	457.00	11.71	152.43	17.55	381.00	104.00	81.40	33465.00	866.00	1465.00	113.70
S 18 X 70.0	457.00	18.06	158.78	17.55	381.00	133.00	104.20	38543.00	1003.00	1688.00	127.00
S 20 X 66.0	508.00	12.83	158.88	20.19	425.00	125.00	98.20	49532.00	1153.00	1950.00	145.00
S 20 X 75.0	508.00	16.13	162.18	20.19	425.00	142.00	112.00	53278.00	1240.00	2098.00	152.70
S 20 X 86.0	514.00	16.76	179.32	23.37	425.00	163.00	128.00	65765.00	1948.00	2540.00	218.00
S 20 X 96.0	514.00	20.32	182.88	23.37	425.00	182.00	143.00	69511.00	2089.00	2704.00	228.00
S 24 X 80.0	607.00	12.70	177.80	22.10	521.00	152.00	119.00	87409.00	1756.00	2868.00	198.00
S 24 X 90.0	607.00	15.88	180.98	22.10	521.00	171.00	134.00	93652.00	1869.00	3064.00	206.00
S 24 X 100.0	607.00	18.92	184.02	22.10	521.00	189.00	149.00	99479.00	1985.00	3261.00	216.00
S 24 X 106.0	622.00	15.75	200.00	27.69	521.00	201.00	158.00	122372.00	3209.00	3933.00	321.00
S 24 X 121.0	622.00	20.32	204.47	27.69	521.00	230.00	180.00	131529.00	3467.00	4228.00	339.00

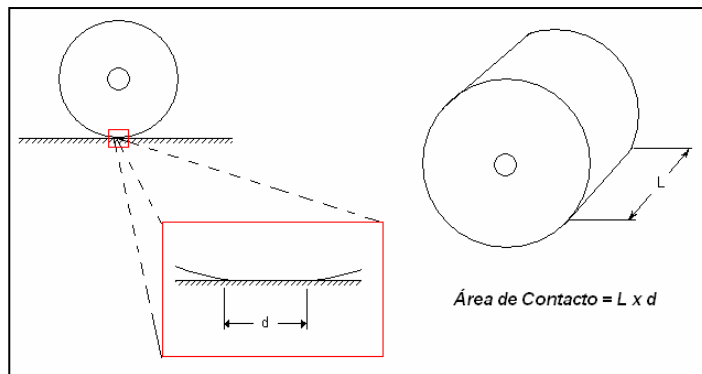


5.2.3 Comprobación de los Cálculos por Medio de Simulación

La viga del puente grúa es prácticamente el elemento más crítico y delicado de todo el sistema. La viga es el cuerpo y a la vez la “columna vertebral”, del transportador automático. Debido a lo delicado de esta pieza, se ha decidido realizar una simulación en un software de elementos finitos para comprobar la veracidad de los cálculos anteriores y observar el comportamiento de la viga seleccionada. Se necesita encontrar la deformación máxima que sufrirá la viga y los esfuerzos bajo las condiciones de trabajo a los que estará sometida la misma.

Primero que todo, se debe repartir la carga sobre la viga en cuatro, puesto que el único dispositivo que tiene contacto real con la viga es el trole o carrito, el cual tiene cuatro ruedas. El área de trabajo será el área de contacto entre las ruedas del trole y la viga; dicha área será el resultado de la deformación previa de las ruedas debida a la carga a la que están sometidas. Debido a que las ruedas del trole son metálicas, la deformación de las ruedas producidas por el contacto con la viga es pequeña. El peor de los casos, sería un área de contacto aproximadamente igual a una línea, por esta razón para efectos de la simulación se usará un área de trabajo que asemeje al caso más crítico, donde “L” sea el largo de las ruedas y “d” igual a un milímetro, obteniendo así aproximadamente una línea, entre las ruedas y la viga.

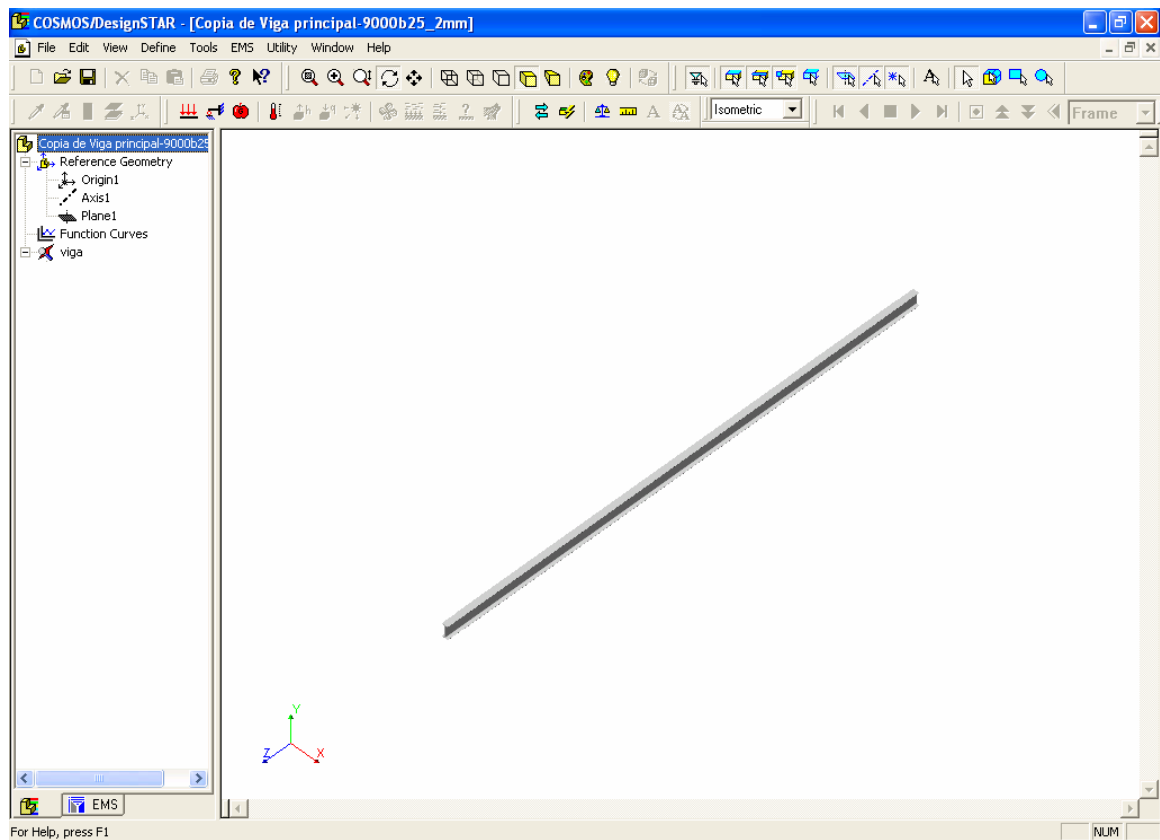
Figura 59. Área de contacto entre la viga y cada una de las ruedas.



A continuación, se mostrará la secuencia de pasos realizados en Cosmos, el software de elementos finitos utilizados para el estudio de esfuerzos y deformación sobre la viga, para finalmente lograr la simulación deseada sobre la viga.

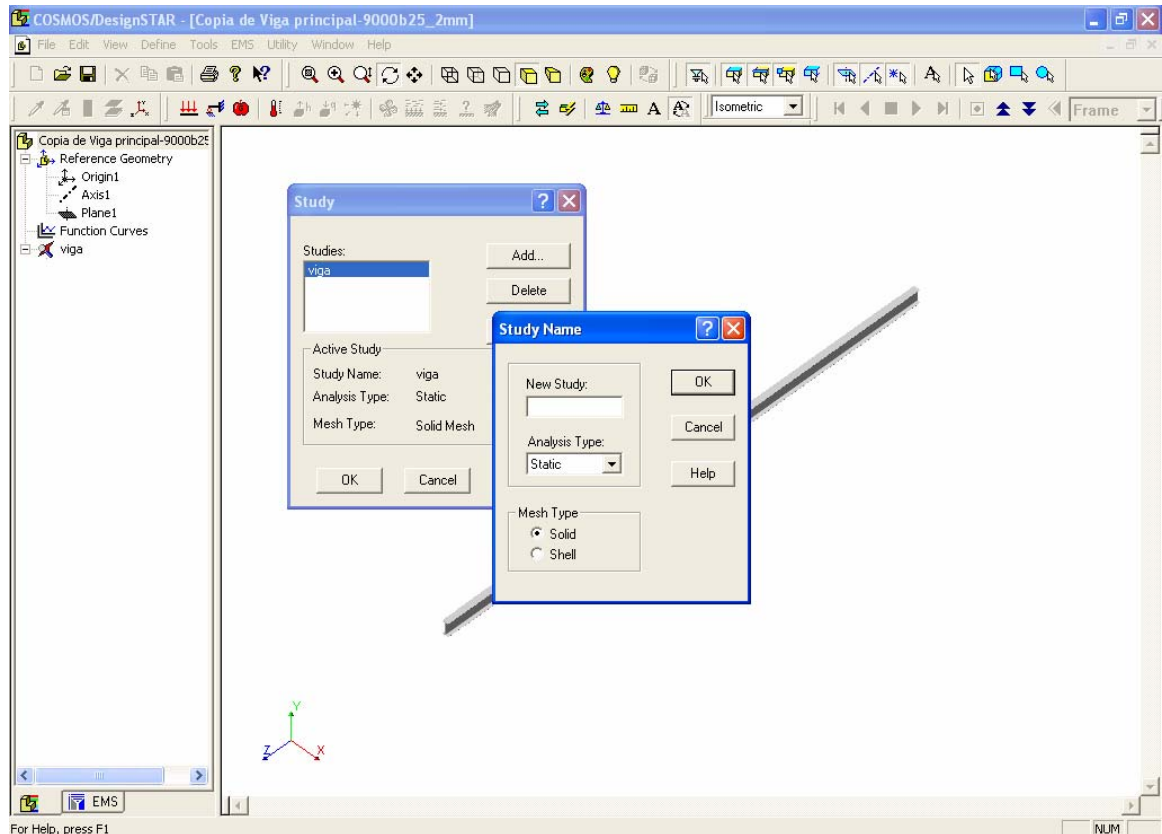
Primero, se debe importar el objeto dibujado en 3D, en un software compatible tal como el Solidworks, software de diseño gráfico.

Figura 60. Importación de la pieza a Cosmos.



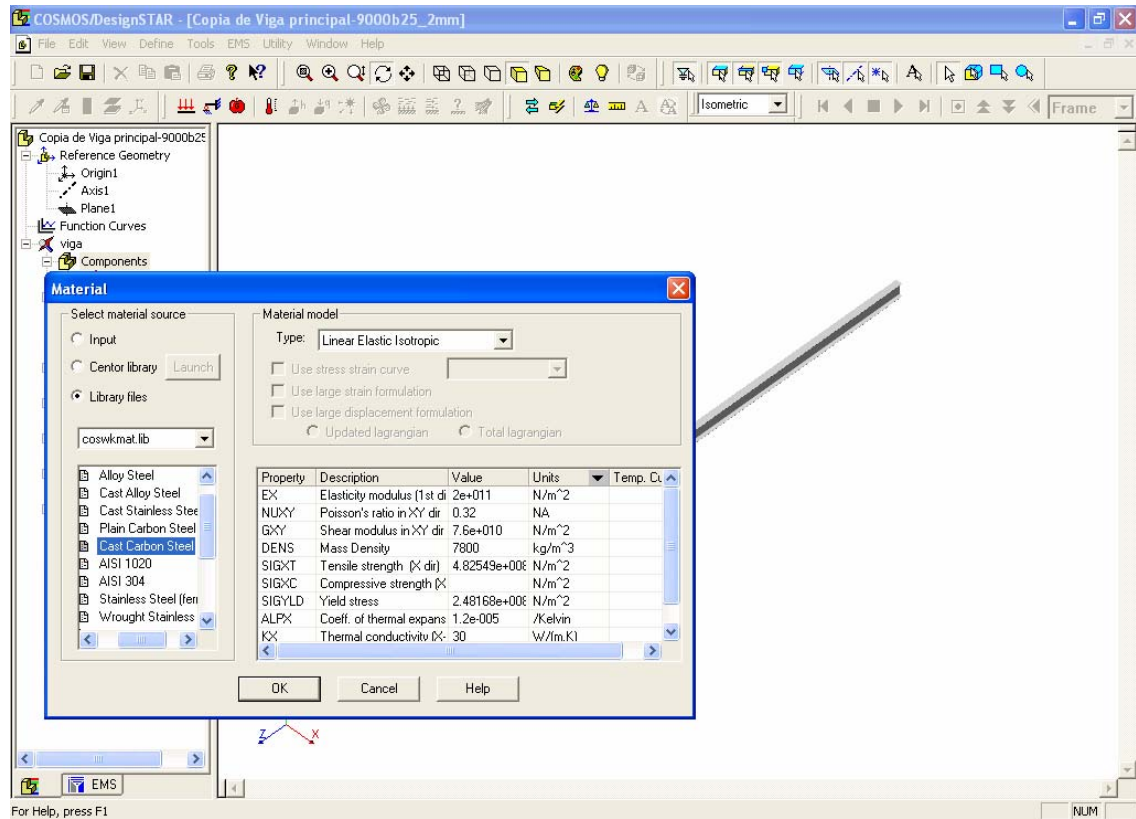
Posteriormente, se debe crear un proyecto, de tipo “sólido” y “estático”.

Figura 61. Creación del tipo de proyecto en Cosmos.



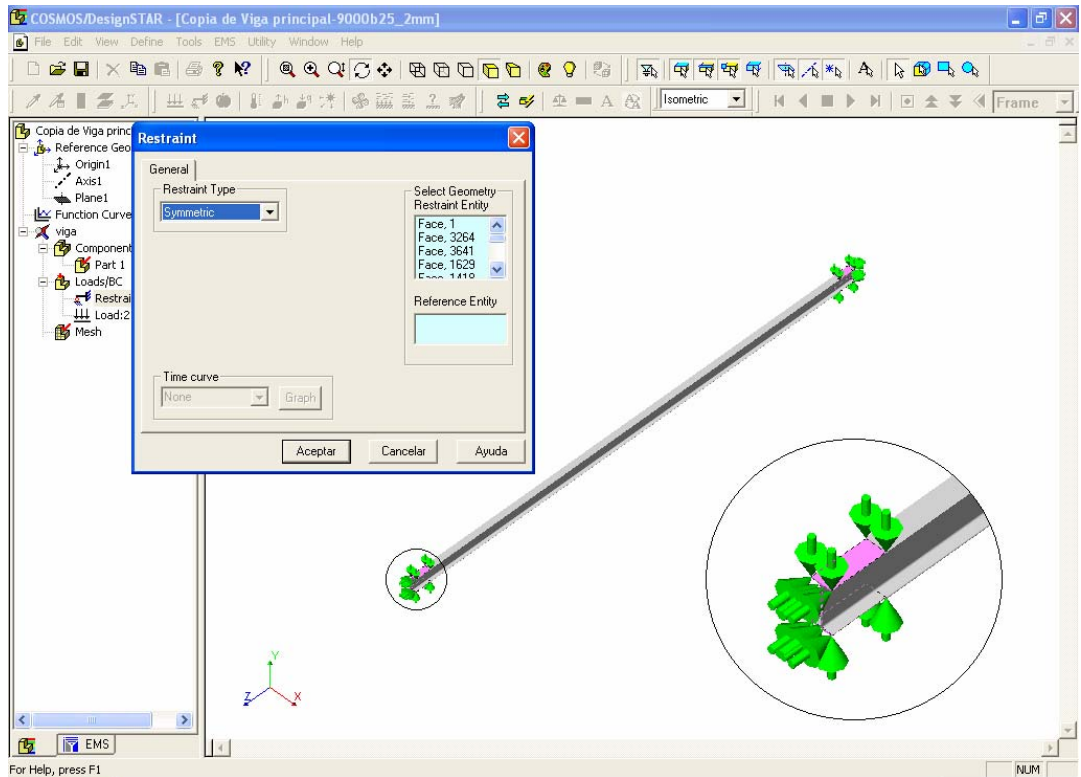
El siguiente paso, es el de seleccionar el tipo de material que va a tener la pieza a ser analizada. Que en el presente caso por ser una viga de acero estructural, la opción más adecuada que nos ofrece el software, ya que sus propiedades son muy similares, es la de “Cast Carbon Steel” (acero al carbono de tipo fundición – $S_y = 248 \text{ MPa}$).

Figura 62. Selección del tipo de material para la simulación.



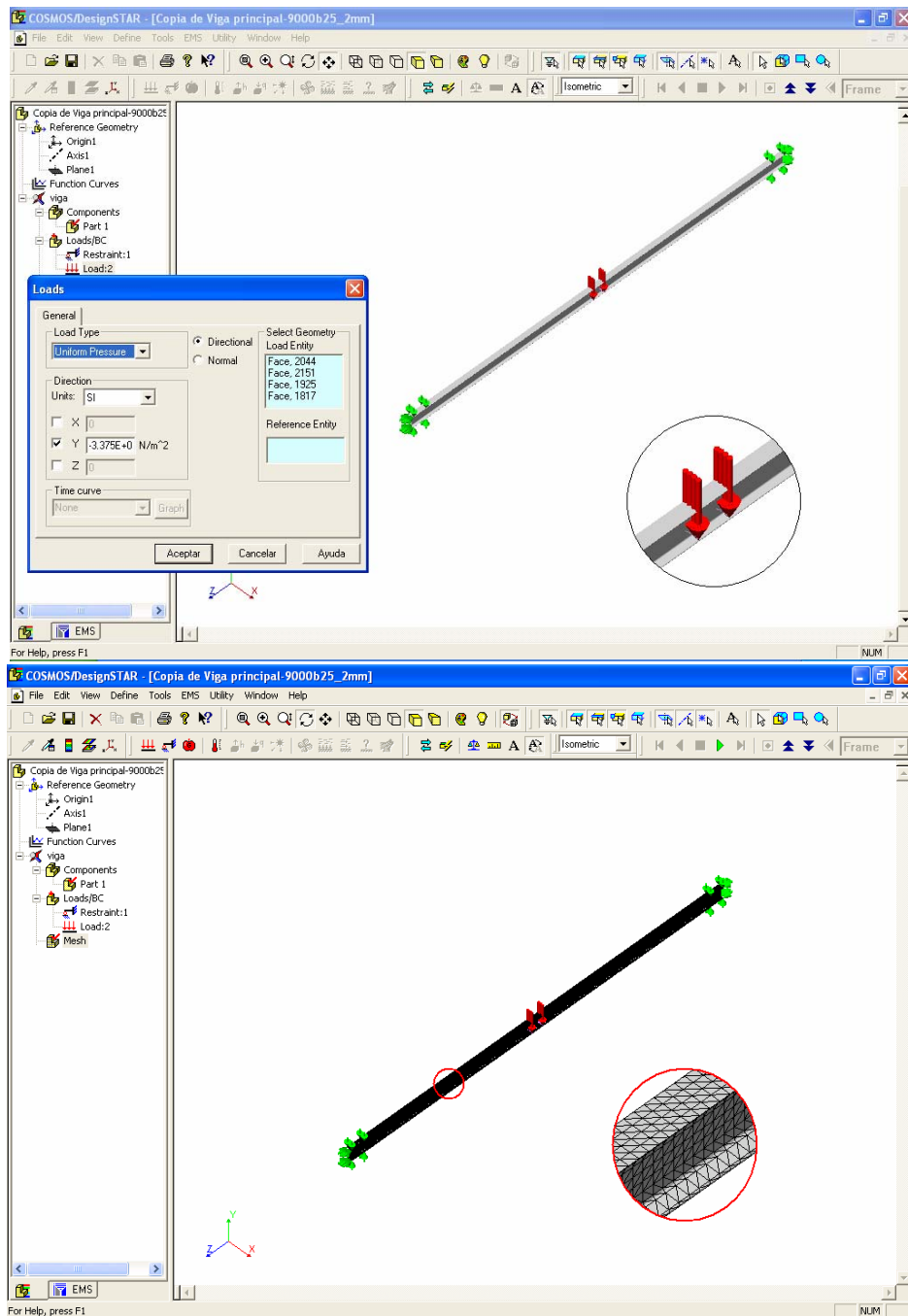
Después de haber escogido el tipo de material para toda la pieza, se deben aplicar las restricciones a los extremos de la viga. Las restricciones son de apoyo simple “simétricas” en todas las direcciones (x, y, z). (Ver figura 63)

Figura 63. Restricciones en la simulación.



De igual forma, se deben aplicar las cargas a las que esta sometida la viga. La carga estará presente sobre la viga como una presión, ya que se encuentra actuando sobre el área de contacto entre las ruedas y la viga. Esta área es bastante pequeña, cuyo ancho es casi despreciable para el ojo humano, y tiene en largo de la rueda del trole. Bajo cada uno de estas cuatro ruedas, existen cuatro pequeñas áreas de contacto, entonces se debe repartir la carga en cuatro partes iguales, una para cada rueda. La fuerza aplicada a cada una de las áreas será la suma de la carga a levantar que en este caso es de una tonelada, más el peso del trole, el elevador y la cadena, que es alrededor de unos 410 Kilogramos, dividido en cuatro. La carga se aplica directamente sobre las áreas de contacto, vertical hacia abajo. Luego se procede a realizar el llamado "Mesh" o malla de nodos. (Ver figura 64)

Figura 64. Se aplican cargas a la pieza y se elabora el llamado "Mesh".



Una vez realizado lo anterior, se puede proceder a llevar a cabo el estudio como se observa en la figura 65.

Figura 65. Se resuelve el problema por medio del "Iterative Solver" del Cosmos.

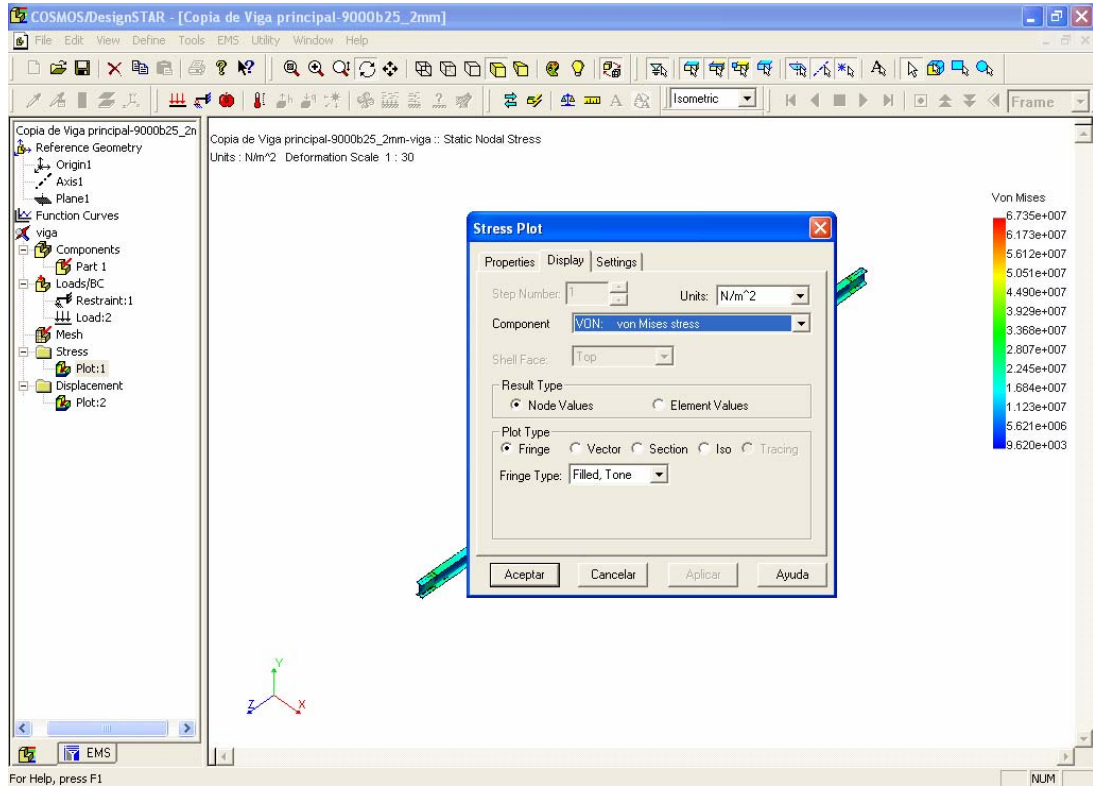


Una vez terminado el estudio, podemos hacer lo cambios correspondientes si son necesarios, y analizar los resultados.

Como la pieza es de acero, se debe: verificar si el análisis de esfuerzos es de tipo "Von Mises" puesto que el material es de tipo "dúctil", cambiar el tipo de unidades que deseamos que se desplieguen en el diagrama final, el tiempo de simulación y el tipo de diagrama a desplegar (por puntos, discreto, vectorial, o de tipo "continuo") como se mostrará a continuación.

Las unidades seleccionadas a desplegar fueron el N/m^2 o en otras palabras, pascales. El tipo de experimento seleccionado fue "Von Mises" y el diagrama de tipo "continuo".

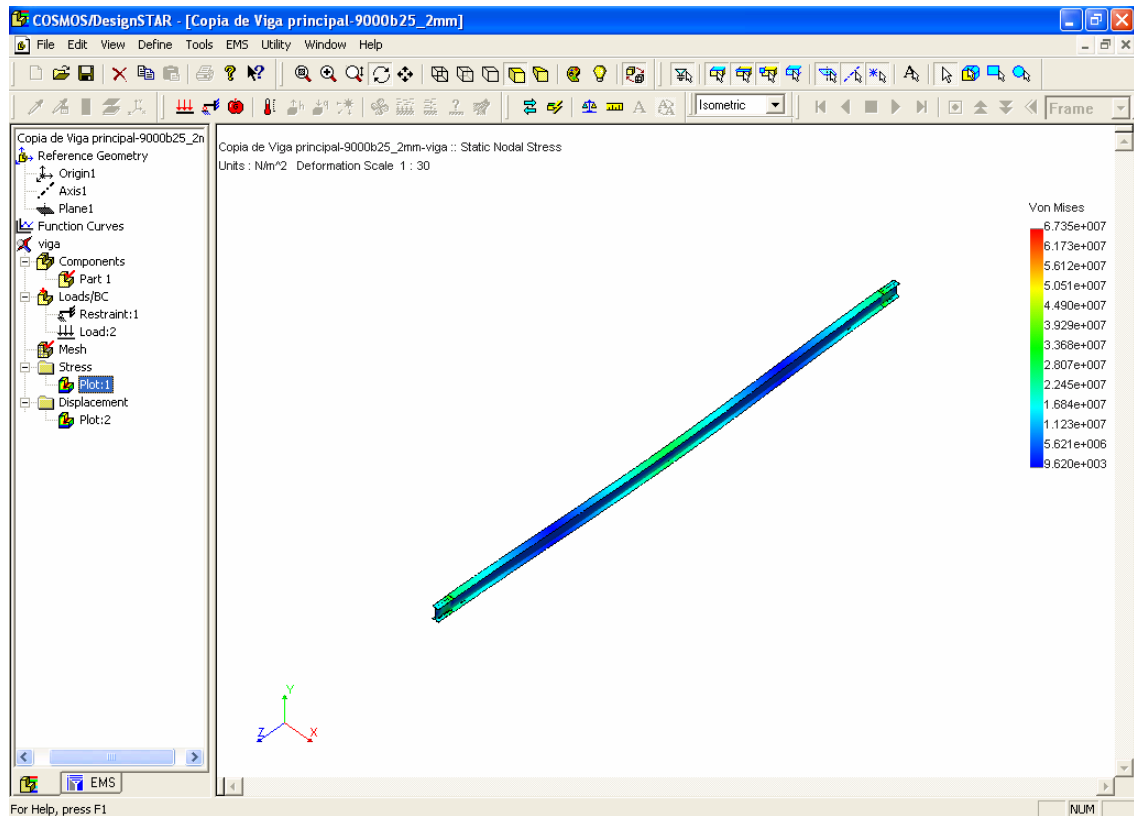
Figura 66. Verificación y/o corrección del tipo de análisis del experimento.



En la figura 66 se puede apreciar los resultados finales, donde se puede comprobar que los cálculos, el dimensionamiento, y la selección del perfil son correctos.

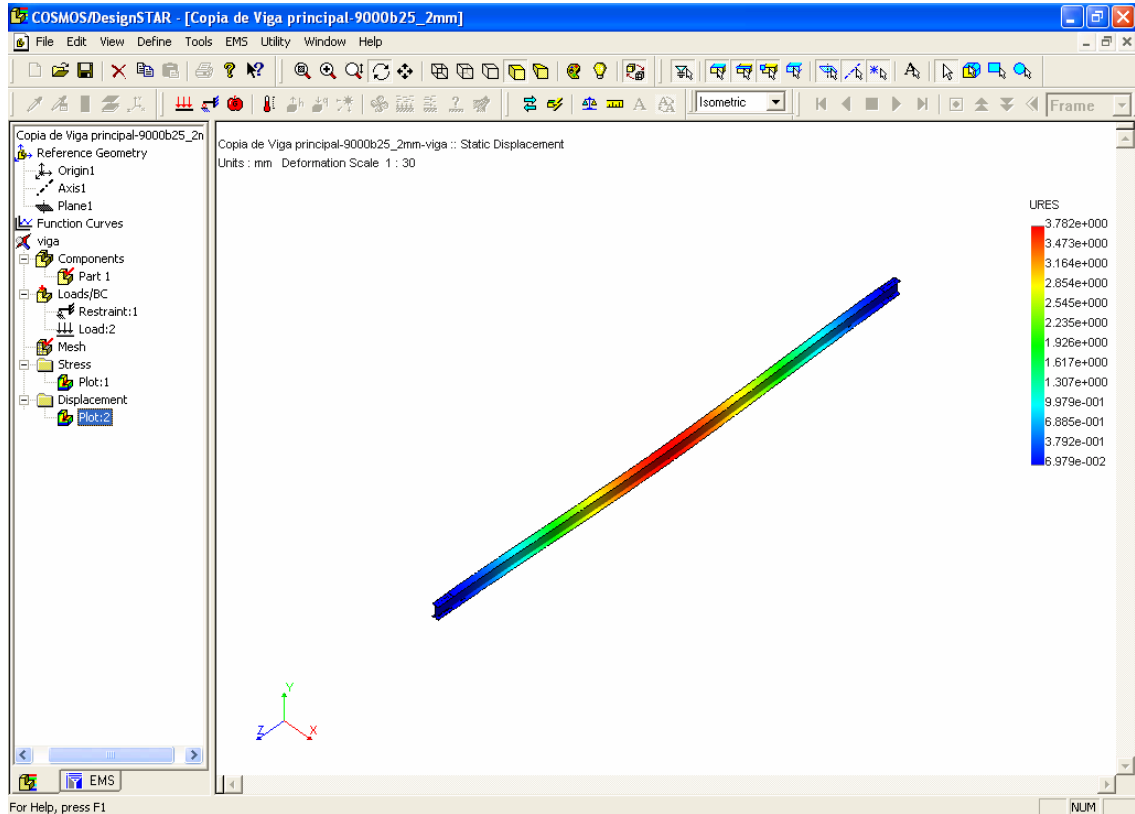
El software muestra de forma didáctica al usuario los tipos de esfuerzos que sufre la pieza, mediante una banda de colores que indica el máximo y mínimo o una especie de peligro y seguridad respectivamente. Se puede ver que la viga no muestra en ninguna zona esfuerzos máximos o peligrosos, ésto debido a que la viga está diseñada con un factor de seguridad de 2.2.

Figura 67. Resultado final de los tipos de esfuerzos sobre la viga. (Unidades en Pascales).



De igual forma se analiza el diagrama de deformación en unidades de milímetros (figura 67). Se puede apreciar que la máxima deformación se encuentra en el centro de la viga donde sabemos que se encuentra el máximo momento flector. En rojo se observa una deformación de 3.7 milímetros, que para una viga de 9 metros de longitud es una deformación casi despreciable e incluso hasta insignificante.

Figura 68. Resultado final de las deformaciones sobre la viga. (Unidades en milímetros).



En la figura 68 se puede apreciar, que los cálculos y la selección de la viga son correctos, y que en el peor de los casos se tendrá una deformación de alrededor de 3 mm, en el centro de la viga de 9m de longitud, lo cual es despreciable en relación con la longitud total de la viga principal. En cuanto a los esfuerzos, se puede ver claramente que están dentro de un margen de seguridad donde el comportamiento del acero tiende a ser estable. El esfuerzo máximo permanece en el peor de los casos muy por debajo de los 5 MPa. El software utiliza colores de una forma didáctica para mostrarle al usuario el margen de peligro o seguridad de la pieza de trabajo que en este caso es la viga del puente grúa. El azul sería sinónimo de seguridad y el rojo de peligro o alerta; una especie de mínimo y máximo.

5.3 CÁLCULO ESTRUCTURAL DE LAS COLUMNAS

En primera instancia, para el diseño de las columnas, se debe saber que la carga a la cual estarán sometidas estará dada por la suma de la carga a levantar más el peso del dispositivo, y el peso de la viga.

El peso de la viga es de 360kg, puesto que su perfil tiene un factor de 37,8 Kg/m. Teniendo en cuenta una carga total de 1.8 Ton o aproximadamente 17.66 KN, con una altura deseada de 2.5m, utilizando un factor de seguridad de N=3, tomando el caso crítico cuando ambos extremos están atornillados (K=1), y teniendo en cuenta el tipo de perfil que se desea, se puede realizar los cálculos respectivos.

Para el diseño se supone que es una columna larga, es decir, utiliza la ecuación de Euler para despejar el momento de inercia de la formula de carga crítica.

$$\left. \begin{aligned} P_{cr} &= \frac{(\pi^2 \cdot E \cdot A)}{(K \cdot L_e / r)^2} \\ r &= \sqrt{\frac{I}{A}} \\ P_{cr} &= N \cdot P_a \end{aligned} \right\} I = \frac{P_{cr} \cdot (KL_e)^2}{\pi^2 \cdot E} \quad (5.12)$$

Teniendo en cuenta que el módulo de elasticidad del acero es de 207×10^9 N/m² o de 207 MPa, se calcula el momento de inercia:

$$I = \frac{(3 \cdot 17,658)(1 \cdot 2.5)^2}{\pi^2 \cdot (207 \times 10^9)} = 233 \times 10^{-9} m^4 = 23.3 cm^4$$

Obtenido el momento de inercia, se busca en las tablas de perfiles en acero estructural, en la sección de perfiles de tipo europeo IPE, el perfil en "I" cuyo momento de inercia este cercano al obtenido y por encima del mismo.

En la tabla 18 encontramos el perfil **IPE 140**, que es uno de los más cercanos y más comunes de hallar.

Por consiguiente nuestro nuevo momento de inercia será:

$$I = I_{\min} = I_y = 44.9\text{cm}^4$$

$$A = 16.4\text{cm}^2$$

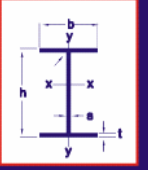
Calculo del Radio de Giro:

$$r = (I/A)^{1/2} = 1.65\text{cm}$$

Calculo de la Razón de Delgadez:

$$R.D = \frac{K \cdot L}{r} = \frac{1.0 \cdot 250}{1.65} = 151.51 \quad (5.13)$$

Tabla 18. Dimensiones y propiedades de la columna seleccionada.

	Norma Técnica ASTM A36 / A36M - 96											
	PERFIL TIPO EUROPEO IPE											
	DIMENSIONES						AREA	PESO	MOMENTO DE INERCIA		MODULO DE SECCION	
	h	b	s	t	r		cm ²	Kg./M	I _x	I _y	W _x	W _y
mm								cm ⁴		cm ³		
IPE 80	80	46	3.8	5.2	5	7.64	6.0	80.1	8.49	20.0	3.69	
IPE 100	100	55	4.1	5.7	5	10.30	8.1	171.0	15.90	34.2	5.79	
IPE 120	120	64	4.4	6.3	7	13.20	10.4	318.0	27.70	53.0	8.65	
IPE 140	140	73	4.7	6.9	7	16.40	12.9	541.0	44.90	77.3	12.30	
IPE 160	160	82	5.0	7.4	9	20.10	15.8	869.0	68.30	109.0	16.70	
IPE 180	180	91	5.3	8.0	9	23.90	18.8	1320.0	101.00	146.0	22.20	
IPE 200	200	100	5.6	8.5	12	28.50	22.4	1940.0	142.00	194.0	28.50	
IPE 220	220	110	5.9	9.2	12	33.40	26.2	2770.0	205.00	252.0	37.30	
IPE 240	240	120	6.2	9.8	15	39.10	30.7	3890.0	284.00	324.0	47.30	
IPE 260	270	135	6.6	10.2	15	45.90	36.1	5790.0	420.00	429.0	62.20	
IPE 300	300	150	7.1	10.7	15	53.80	42.2	8360.0	604.00	557.0	80.50	
IPE 340	330	160	7.5	11.5	18	62.60	49.1	11770.0	788.00	713.0	98.50	
IPE 360	360	170	8.0	12.7	18	72.70	57.1	16270.0	1040.00	904.0	123.0	
IPE 400	400	180	8.6	13.5	21	84.50	66.3	23120.0	1320.00	1160.0	146.0	
IPE 450	450	190	9.4	14.6	21	98.80	77.6	33740.0	1680.00	1500.0	176.0	
IPE 500	500	200	10.2	16.0	21	116.00	90.7	48200.0	2140.00	1930.0	214.0	
IPE 550	550	210	11.1	17.2	24	134.00	106.0	67120.0	2670.00	2440.0	254.0	
IPE 600	600	220	12.0	19.0	24	156.00	122.0	92080.0	3387.00	3069.0	308.0	

Catálogo de Productos de la Cia. General de Aceros S.A

Tabla 19. Propiedades del acero estructural.

Material ASTM núm. y productos	Resistencia última, s_u *		Resistencia a la cedencia, s_y *		Porcentaje de alargamiento en 2 plg
	ksi	MPa	ksi	MPa	
A36–Perfiles, placas y barras de acero al carbón	58	400	36	248	21
A242–Perfiles, placas y barras de baja aleación y alta resistencia					
≤ 3/4 plg de espesor	70	483	50	345	21
3/4 a 1 1/2 plg de espesor	67	462	46	317	21
1 1/2 a 4 plg de espesor	63	434	42	290	21
A500–Tubería estructural formada en frío					
Redonda, grado A	45	310	33	228	25
Redonda, grado B	58	400	42	290	23
Redonda, grado C	62	427	46	317	21
Perfilada, grado A	45	310	39	269	25
Perfilada, grado B	58	400	46	317	23
Perfilada, grado C	62	427	50	345	21
A501–Tubería estructural formada en caliente, redonda o perfilada	58	400	36	248	23
A514–Placa de acero aleado templado y enfriado de alta resistencia a la cedencia					
≤ 2 1/2 plg de espesor	110	758	100	690	18
2 1/2 a 6 plg de espesor	100	690	90	620	16
A572–Perfiles, placas y barras de acero de baja aleación de columbio–vanadio de alta resistencia					
Grado 42	60	414	42	290	24
Grado 50	65	448	50	345	21
Grado 60	75	517	60	414	18
Grado 65	80	552	65	448	17

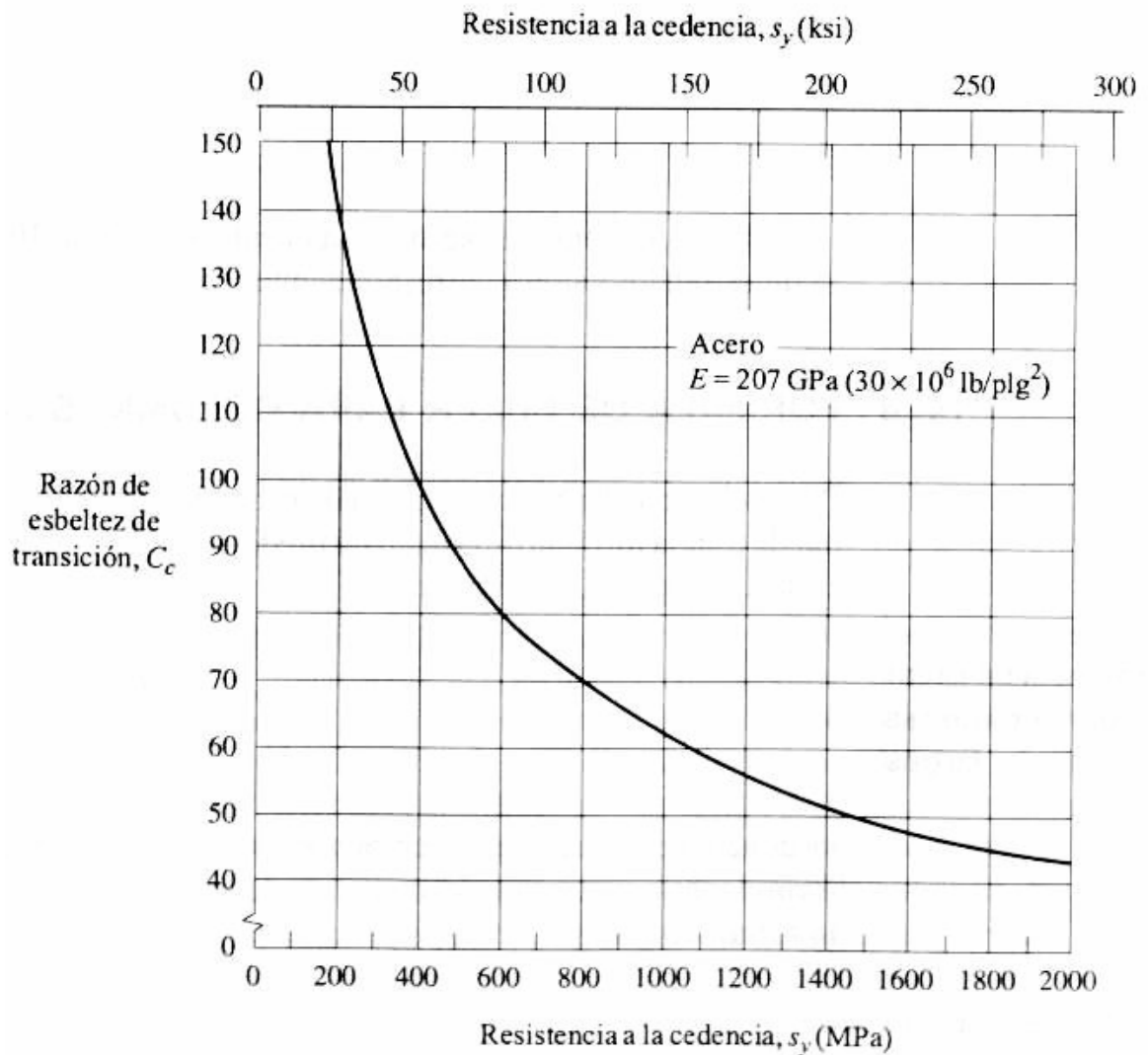
*Valores mínimos; pueden ser más elevados.

El American Institute of Steel Construction especifica $E = 29 \times 10^6$ lb/plg² (200 GPa) para acero estructural.

Resistencia de Materiales Aplicada. MOTT, Robert

Conociendo la resistencia a la cedencia del acero estructural (36 Ksi), podemos encontrar el “corte de columna” o “ C_c ” para comprobar los cálculos.

Figura 69. Razón de esbeltez de transición o corte de columna contra resistencia a la cedencia del acero.



Diseño de Elementos de Máquinas. MOTT, Robert

Teniendo un C_c de 138 para el acero estructural según su S_y de 36 Ksi, se puede comprobar que nuestros cálculos son correctos y que nuestra columna efectivamente es “larga” (Euler). Nuestro perfil tipo europeo **IPE 140** se eligió correctamente.

5.4 DISEÑO DE LA PLACA BASE

Después de haber seleccionado la viga principal y las columnas que la soportarán, se debe calcular las dimensiones mínimas de la placa base o zapata de cada una de las mismas. Según el perfil seleccionado de la columna tenemos:

$$b_f = 73\text{mm} = 2.87\text{pulg}$$

$$d = 140\text{mm} = 5.51\text{pulg}$$

$$\text{Carga de } 17,658\text{N} = 3,969\text{lbf} = 3.97\text{klb}$$

$$P_u = (1.6) \times (3,969) = 6.4\text{klb}$$

$$\text{Área mínima} = b_f \times d = 15.82 \text{ pulg}^2$$

$$f'_c(\text{concreto}) = 3 \text{ klb/pulg}^2$$

$$A_1/A_2 = 1$$

Suponiendo un área de 50 pulg²

$$F_p = 0.35 (f'_c) = (0.35) \times 3 = 1.05 \text{ klb/pulg}^2$$

$$f_p = (6.4/50) = 0.128 \leq 1.05 \rightarrow \text{Bien} \quad (5.13)$$

Se selecciona una placa de (5.87 pulg. X 8.51 pulg.) = 49.9 pulg²

Es decir tenemos una placa de (15cm x 22cm)

$$m = (8.51 - (0.95 \times 5.51))/2 = 1.637 \text{ pulg.}$$

$$n = (5.87 - (0.8 \times 2.87))/2 = 1.787 \text{ pulg.}$$

$$L = \frac{\sqrt{d \cdot b_f}}{4} = \frac{\sqrt{15.82}}{4} = 0.99 \approx 1 \rightarrow m, n, L \quad (5.14)$$

$$t_p = (2 \cdot 1.8) \cdot \sqrt{\frac{0.128}{36}} = 0.214 \text{ pulg} \approx \frac{1}{4} \text{ pulg}$$

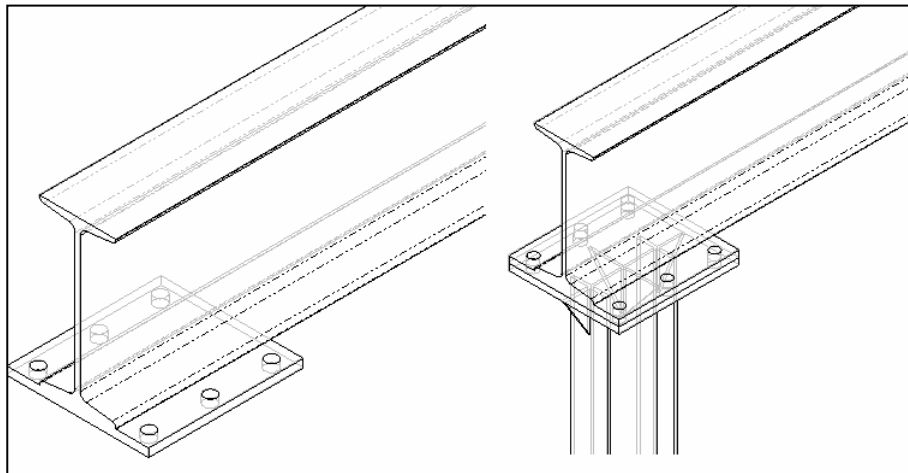
Como resultado se obtiene una placa cuyas mínimas dimensiones son: 5.87x8.51x0.25, todo en pulgadas. (Ver anexos - planos)

5.5 UNIÓN VIGA COLUMNA

Después de consultar con personas expertas en estructuras metálicas, se logró llegar a una solución conjunta, la más sencilla y efectiva de todas. Dicha solución se plantea a continuación.

Debido a que el puente grúa no está sometido a cargas externas laterales, y todas sus cargas son verticales a excepción de una carga inercial debida al movimiento del carrito a lo largo de la viga, que por ser de magnitud pequeña se considera despreciable. En otras palabras, prácticamente las uniones se podrían considerar como apoyos simples, lo cual indica que el diseño de las uniones será básicamente constructivo. Utilizando tornillos estructurales A325 y soldadura de filete, perimetral, tipo E7013 o E9013, para unir las platinas a la viga por proceso manual.

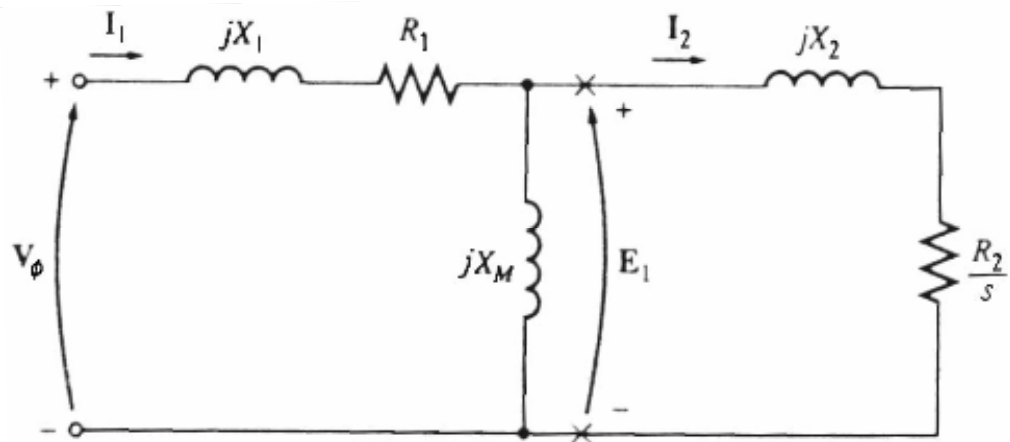
Figura 70. Unión Viga – Columna.



En la siguiente sección, se busca hacer un análisis de la estabilidad del sistema, (planta, sensor, controlador), haciendo aproximaciones por medio de analogías.

5.6 ANÁLISIS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Figura 71. Circuito equivalente de un motor de inducción.



Máquinas Eléctricas. CHAPMAN, Stephen

Donde:

X_1 = reactancia del estator, en ohms

X_2 = reactancia del rotor, en ohms

R_1 = resistencia del estator, en ohms

R_2 = resistencia del rotor, en ohms

X_M = reactancia de la rama de magnetización en ohms

V_ϕ = voltaje de fase, en voltios

Aunque hay varias formas de resolver el circuito de la figura anterior para la corriente I_2 quizás la más fácil sea determinar el equivalente Thevenin. El teorema de Thevenin establece que cualquier circuito lineal que pueda separarse del resto del sistema mediante dos terminales puede reemplazarse por una sola fuente de voltaje en serie con una impedancia equivalente. Si se aplicara esto al circuito equivalente del motor de inducción, el circuito resultante sería una simple combinación de elementos en serie, como se mostrará más adelante. Para

calcular el equivalente Thevenin del lado de entrada del circuito equivalente del motor de inducción, primero se abren los terminales del circuito en las X y se halla el voltaje de circuito abierto resultante allí.

Luego, para encontrar la impedancia de Thevenin, se cortocircuita la fuente del voltaje de fase y se encuentra la Z vista "mirando" hacia adentro de los terminales. En la siguiente figura se muestra los terminales abiertos utilizados para encontrar el voltaje de Thevenin.

La magnitud del voltaje de Thevenin V_{TH} es:

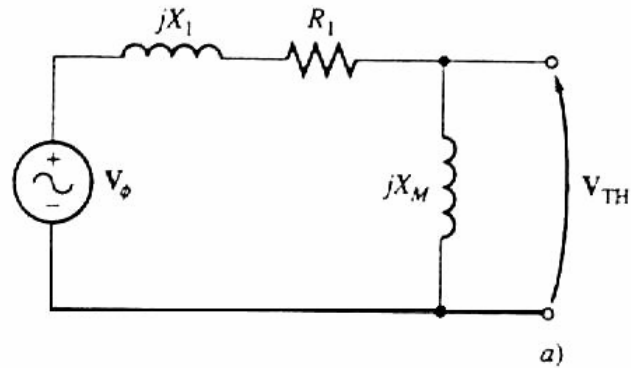
$$V_{TH} = V_{\phi} \cdot \left[\frac{X_M}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_M)^2}} \right] \quad (5.15)$$

Puesto que la reactancia de magnetización $X_M \gg X_1$ y $X_M \gg R_1$, la magnitud del voltaje de Thevenin, es:

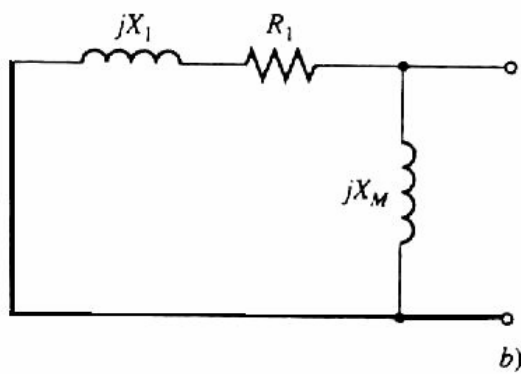
$$V_{TH} \approx V_{\phi} \cdot \left[\frac{X_M}{X_1 + X_M} \right] \quad (5.16)$$

A continuación se muestra el resultado final del circuito equivalente simplificado del motor de inducción.

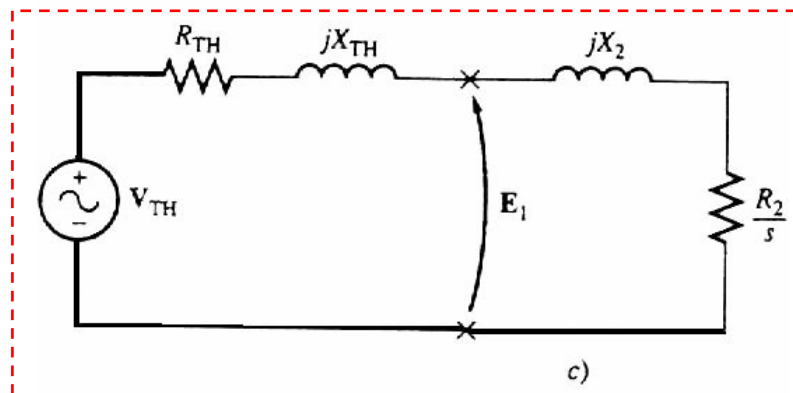
Figura 71. A) Voltaje equivalente de Thevenin en el circuito de entrada de un motor de inducción. B) Impedancia equivalente de Thevenin en el circuito de entrada. C) **Circuito equivalente resultante simplificado en un motor de inducción.**



$$V_{TH} = \frac{X_M}{\sqrt{(R_1^2 + (X_1 + X_M)^2)}} \cdot V_\phi$$



$$Z_{TH} = \frac{jX_M \cdot (R_1 + jX_1)}{(R_1 + j(X_1 + X_M))}$$



5.6.1 Analogía y Aproximación de la Función de Transferencia de la Planta

Tabla 20. Características de los bloques funcionales eléctricos.

Bloque funcional	Ecuación descriptiva		Energía almacenada/ potencia disipada
	a)	b)	
<i>Energía almacenada</i>			
Inductor	$v = L \frac{di}{dt}$	$i = \frac{1}{L} \int v dt$	$E = \frac{1}{2} L i^2$
Capacitor	$v = \frac{1}{C} \int i dt$	$i = C \frac{dv}{dt}$	$E = \frac{1}{2} C v^2$
<i>Energía disipada</i>			
Resistor	$v = R i$	$i = \frac{v}{R}$	$P = \frac{1}{R} v^2$

Ingeniería de Control. BOLTON, W

Teniendo en cuenta la tabla anterior y el circuito equivalente final del motor, se hace una analogía, buscando una aproximación como se muestra:

$$v(t) = [i(t) \cdot R_{TH}] + \left[L_{TH} \cdot \frac{di(t)}{dt} \right] + \left[L_2 \cdot \frac{di(t)}{dt} \right] + \left[i(t) \cdot \frac{R_2}{s'} \right] \quad (5.17)$$

Aplicando la transformada de Laplace se tiene:

$$V(s) = [I(s) \cdot R_{TH}] + [(L_{TH}) \cdot s \cdot I(s)] + [L_2 \cdot s \cdot I(s)] + \left[I(s) \cdot \frac{R_2}{s'} \right]$$

$$V(s) = \left[I(s) \cdot \left(R_{TH} + \frac{R_s}{s'} \right) \right] + [s \cdot I(s) \cdot (L_{TH} + L_2)]$$

$$V(s) = I(s) \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_s}{s'} \right) + s \cdot (L_{TH} + L_2) \right] \quad (5.18)$$

Donde:

s' = deslizamiento de motor

Se deja la ecuación anterior pendiente y se procede a calcular el torque del motor de inducción a carga plena:

$$T = \frac{P_{out}}{\omega_m}$$

$$T = \frac{(2hp) \cdot (746w / hp)}{(1725rev / min) \cdot (2\pi rad / rev) \cdot (1 min / 60s)} = 8.26N \cdot m \quad (5.19)$$

Donde:

T = torque en el eje del motor en N*m

P_{out} = potencia de salida del motor en hp

ω_m = velocidad del rotor a carga plena, en rev/min

El torque inducido lo podemos expresar como el cociente entre la potencia convertida o potencia mecánica desarrollada por el motor y la velocidad angular del rotor, es decir:

$$T = \frac{P_{conv}}{\omega} \quad (5.20)$$

Donde:

T = torque inducido, N*m

P_{conv} = potencia desarrollada, kW

ω = velocidad angular del rotor, r/min

Pero a su vez la potencia convertida se puede expresar también de la siguiente forma:

$$P_{conv} = (1 - s') \cdot P_{AG} \quad (5.21)$$

Donde:

P_{AG} = Potencia consumida en el entrehierro, kW

Teniendo en cuenta que el único elemento del circuito equivalente donde puede ser consumida la potencia en el entrehierro es la resistencia $(R_2)/s'$. Por ende esta potencia esta dada como la potencia de entrada menos la potencia de pérdida en el núcleo y el rotor, o también como: [7]

$$P_{AG} = 3 \cdot I^2 \cdot \left(\frac{R_2}{s'} \right) \quad (5.22)$$

Donde:

R_2 = Resistencia del rotor

En otras palabras reemplazando, la ecuación (5.22) en la (5.21) se tienen:

$$P_{conv} = 3 \cdot I^2 \cdot (1 - s') \cdot \left(\frac{R_2}{s'} \right) \quad (5.23)$$

Y si se substituye la ecuación (5.23) en la (5.20):

$$\varpi = \frac{[3 \cdot R_2 \cdot (1 - s')] \cdot I^2}{T \cdot s'} \quad (5.24)$$

En otras palabras tenemos que:

$$\varpi(t) = K' \cdot I^2(t) \quad (5.25)$$

$$K' = \frac{3 \cdot R_2 \cdot (1 - s')}{s'} \quad (5.26)$$

Donde K es una constante de proporcionalidad que multiplica el cuadrado de la corriente que circula por el circuito equivalente.

Si se deriva a ambos lados, la ecuación (5.25) obtenemos:

$$\frac{d\varpi(t)}{dt} = 2 \cdot K' \cdot [I(t)] \quad (5.27)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (5.27):

$$s \cdot W(s) = 2 \cdot K' \cdot I(s)$$
$$I(s) = \frac{2 \cdot K' \cdot W(s)}{s} \quad (5.28)$$

Finalmente si se reemplaza la ecuación (5.28) en la ecuación (5.18), para obtener la función de transferencia del actuador:

$$V(s) = \left[\frac{2 \cdot K' \cdot W(s)}{s} \right] \cdot [(R_{TH} + R_2) + s(L_{TH} + L_2)]$$
$$\frac{W(s)}{V(s)} = \frac{s}{2 \cdot K' \cdot \left[\left(R_{TH} + \frac{R_2}{s'} \right) + s(L_{TH} + L_2) \right]} \quad (5.29)$$

Ahora se debe encontrar los valores de cada uno de los parámetros que intervienen en la ecuación (5.29).

Lo primero será obtener el deslizamiento del motor, refiriéndose a la tabla que se muestra a continuación para motores de inducción. Según el número de polos del

motor y la velocidad sincrónica del motor, se puede calcular entonces el deslizamiento del mismo a carga plena.

Tabla 21. Velocidades de motores de corriente alterna – deslizamiento

Velocidades de motores CA		
<i>Número de polos</i>	<i>Velocidad sincrónica (rpm)</i>	<i>Velocidad con carga total (rpm)</i>
2	3 600	3 450
4	1 800	1 725
6	1 200	1 140
8	900	850
10	720	690
12	600	575

Máquinas Eléctricas. CHAPMAN, Stephen

Se calcula entonces el deslizamiento del motor a plena carga como se plantea a continuación:

$$s' = \frac{n_{\text{sinc}} - n_m}{n_{\text{sinc}}} * 100\% \quad (5.30)$$

$$s' = \left(\frac{1,800 - 1,725}{1,800} \right) \times 100$$

$$s' = 4.16\%$$

Donde:

n_{sinc} = velocidad de sincrónica, en rev/min

n_m = velocidad del rotor a carga plena, en rev/min

s' = deslizamiento, adimensional

Lo siguiente será calcular el resto de parámetros, los cuales, por medio de una herramienta computacional como el Matlab, para agilizar los cálculos.

Calculo de Parámetros Importantes en Matlab

A continuación se creará un archivo-m en MATLAB para hacer los cálculos de la impedancia de Thevenin utilizando ecuaciones exactas para V_{TH} y Z_{TH} , en lugar de ecuaciones aproximadas, ya que el computador puede efectuar con facilidad los cálculos exactos. Los “datos ingresados” al programa son datos reales medidos en laboratorio, de un motor de inducción trifásico de 2 hp de potencia y comparados con un ejemplo resuelto en el libro de máquinas eléctricas de Chapman.

```
» %Primero se inicializa los valores necesarios (datos ingresados)
» r1 = 0.4;                               %Resistencia del estator
» x1 = 1.106;                             %Reactancia del estator
» r2 = 1.8;                               %Resistencia del rotor
» x2 = 0.464;                             %Reactancia del rotor
» xm = 26.3;                             %Reactancia de la rama de magnetización
» v_phase = 460 / sqrt (3);              %Voltaje de fase
» n_sync = 1800;                         %Velocidad sincrónica (r/min)
» w_sync = 188.5;                       %Velocidad sincrónica (rad/s)
»
» %Cálculo del voltaje y la impedancia Thevenin
» v_th = v_phase * ( xm / sqrt (r1^2 + (x1 + xm) ^2) );
» z_th = ((j*xm) * (r1 +j*x1)) / (r1 + j*(x1 + xm));
» r_th = real (z_th);
» x_th = imag (z_th);
»
» z_th
z_th =
    0.3683 + 1.0667i
» r_th
```

r_th =
0.3683
» x_th
x_th =
1.0667
» v_th
v_th =
254.8362

Haciendo un resumen se tienen los siguientes datos para sustituir en la ecuación (5.29), se tiene que:

$$R_1 = 0.4 \text{ [Ohms]}$$

$$R_2 = 1.8 \text{ [Ohms]}$$

$$L_{TH} = 0.00284 \text{ [Henrios]}$$

$$L_2 = 0.00123 \text{ [Henrios]}$$

$$X_{TH} = 1.066 \text{ [Ohms]}$$

$$R_{TH} = 0.37$$

Substituyendo lo anterior en la ecuación (5.29) se tiene finalmente la siguiente función, correspondiente a la planta como sigue:

$$W_p = \left[\frac{s}{0.0003 \cdot s + 2.62} \right] \quad (5.31)$$

5.6.2 Analogía y Aproximación de la Función de Transferencia del Sensor

Lo que se debe encontrar a continuación es la función de transferencia de los sensores.

Los sensores a usar son finales de carrera electromecánicos, los cuales funcionan internamente con un muelle o resorte que enciende o apaga un contacto, mandando así una señal de un (1) si esta accionado y un (0) si no o está. Por esa razón, la función de transferencia de un final de carrera de este tipo es de orden cero. En otras palabras, la función de transferencia del final de carrera (W_s) coincide con la constante de restitución del resorte interno, la cual se midió con un dinamómetro en laboratorio:

$$W_s = \frac{Y(s)}{X(s)} = K = 600 \quad (5.32)$$

Donde:

K = constante de restitución del final de carrera, 600 N/m

5.6.3 Analogía y Aproximación de la Función de Transferencia del Controlador

Después de hallar la función de transferencia de la planta y el sensor, se debe hallar el tipo de controlador a usar y su función de transferencia.

Para tomar la decisión de qué tipo de “lazo” utilizar para el control, se encontró buscando en la bibliografía que aunque el control por lazo abierto es usado, generalmente cuando se desea respuestas dinámicas rápidas se utiliza el lazo cerrado.

Cuando los requerimientos del accionamiento necesitan de una respuesta dinámica rápida, de alta exactitud en la velocidad o de control del par, el control a lazo abierto no brinda esta posibilidad. Es por eso que se hace necesario operar el motor en lazo cerrado, cuando la operación en régimen dinámico del accionamiento representa un papel fundamental en los indicadores del sistema en el que él es parte. [15]

Por esta razón se tomó la alternativa del control, mediante lazo cerrado para así estabilizar el sistema.

Teniendo como función de transferencia de un controlador integral: [9]

$$W_c = \frac{K_i}{T_i \cdot s} \quad (5.33)$$

Donde:

W_c = función de transferencia del controlador (integral)

K_i = ganancia de acción integral

T_i = constante de tiempo integral

En busca de los valores correspondientes de las constantes de dicho controlador se opta por utilizar uno de los métodos de ajuste mediante criterios de errores de integración mínimo, como es el método de la “Integral de valor absoluto del error (IAE)” el cual es un método bastante preciso muy usado, que se basa en parámetros de ajuste de tipo experimental.

A continuación usando los criterios del método de (IAE) se busca calcular las constantes deseadas del controlador integral.

Tabla 22. Ajuste de integral mínima de error para entrada a perturbaciones.

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right)$$

Integral de error	ICE	IAE	IAET
$K_c = \frac{a_1}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{b_1}$	$a_1 = 1.305$	0.984	0.859
	$b_1 = -0.959$	-0.986	-0.977
$\tau_i = \frac{\tau}{a_2} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{b_2}$	$a_2 = 0.492$	0.608	0.674
	$b_2 = 0.739$	0.707	0.680

De la tabla anterior se toma la sección que pertenece sólo al bloque integral y con la columna de (IAE) se calcula las constantes respectivas, obteniendo así:

$$K_c = 0.0003 \text{ y } T_i = 0.1527$$

Para el análisis del sistema en tiempo discreto, debido a que las señales son de tipo digital y los dispositivos a usar deben ser de igual forma de este tipo; siendo la función de transferencia del sistema:

$$G_p = \left[\frac{600 \cdot s}{0.0003 \cdot s + 2.62} \right] \quad (5.34)$$

Multiplicado dicha función por el retenedor digital de orden cero para el análisis discreto, y transformándolo medio de la transformada Z obtenemos:

$$Z \left\{ \left(\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \right) \cdot \left(\frac{600 \cdot s}{0.0003 \cdot s + 2.62} \right) \right\} = 600 \cdot (z - 1) \cdot \left(\frac{z}{z - 0.00067} \right) \quad (5.35)$$

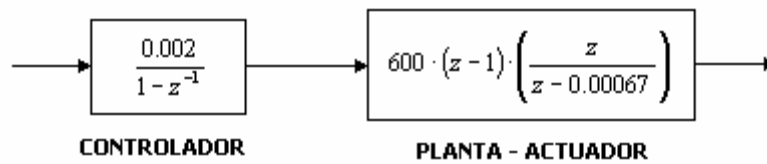
Teniendo los valores halados por el método del “Ajuste de la Integral mínima del Error, IAE”, se puede obtener la función del controlador de tipo digital en tiempo discreto sabiendo que:

$$K i_d = \frac{K_p}{T_i} \quad (5.36)$$

Luego,
$$\frac{K i_d}{1 - z^{-1}} = \frac{0.002}{1 - z^{-1}}$$

Finalmente depuse de hacer las transformaciones respectivas e introducir el retenedor de orden cero, para el análisis digital, el diagrama de bloques en lazo abierto del sistema es como se muestra en la siguiente figura.

Figura 72. Diagrama de bloques del sistema en lazo abierto, en tiempo discreto.



Para observar la el comportamiento y la estabilidad del sistema discreto, se simuló en Matlab, obteniendo como resultado la figura 73, donde se puede apreciar un comportamiento de tipo PT1 de naturaleza estable, y la figura 74, donde se obtiene el lugar de la raíces, dentro del círculo unitario donde se puede comprobar a estabilidad de dicho sistema de manera satisfactoria.

Figura 73. Respuesta en tiempo discreto usando MATLAB

Figura 74. Lugar de las raíces del círculo unitario, usando Matlab.

5.6.4 Control Secuencial - Autómata Programable

A continuación se muestra la secuencia de control del P.L.C, en forma de estados.

Estado de Inicio	Entrada digital 1.5
Final de Carrera	FC_1.1.A
	FC_1.1.B
	FC_1.2.A
	FC_1.2.B
	Cadena_recog_A
	Cadena_recog_B
Estado Derecha	Salida digital Q0.0
Final de Carrera	FC_2.A
	FC_2.B
Estado Detener-Abajo	Salida digital Q0.3
Temporizador Abajo	T_1
Estado Detener Elevador	
Temporizador Etapa 1	T_3
Estado Arriba	Salida digital Q0.2
Final de Carrera	Cadena_recog_A
	Cadena_recog_B
Estado Detener-Derecha	Salida digital Q0.0
.	
.	
.	(Cíclico)
.	
.	
Temporizador Etapa N	T_N
Estado Arriba	Salida digital Q0.2

Final de Carrera	Cadena_recog_A
	Cadena_recog_B
Estado Detener-Izquierda	Salida digital Q0.1
Final de Carrera	FC_1.1.A
	FC_1.1.B
	FC_1.2.A
	FC_1.2.B
Estado Detener-Fin	

Nota: Para un mayor entendimiento y un análisis más detallado del algoritmo de control del P.L.C, ver anexos y ver la sección 5.8.

5.7 SENSORES ELECTROMECÁNICOS - FINALES DE CARRERA

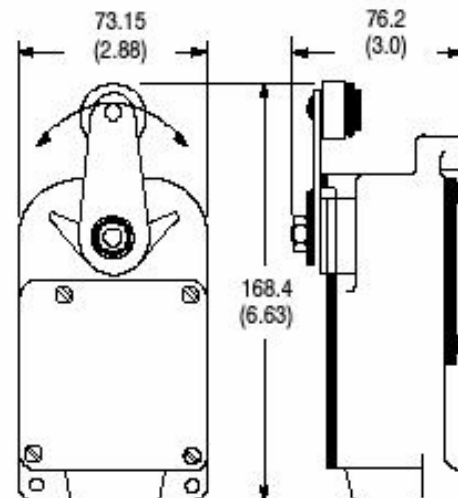
A continuación, se describe todo sobre la selección del tipo de final de carrera, según el ambiente y el tipo de trabajo; además se muestran las posibles configuraciones eléctricas internas de los finales de carrera además de sus dimensiones físicas.

Figura 75. Configuraciones eléctricas internas de los contactos y dimensiones del final de carrera seleccionado.

Configuraciones y capacidad nominal de los contactos

	C	H	N	O												
D		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pos. de palanca</th> <th>Pos. de contactos 1</th> <th>Pos. de contactos 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Off</td> <td>C</td> <td>O</td> </tr> <tr> <td>A</td> <td>O</td> <td>O</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>O</td> <td>C</td> </tr> </tbody> </table>	Pos. de palanca	Pos. de contactos 1	Pos. de contactos 2	Off	C	O	A	O	O	B	O	C		
Pos. de palanca	Pos. de contactos 1	Pos. de contactos 2														
Off	C	O														
A	O	O														
B	O	C														
F		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pos. de palanca</th> <th>Pos. de contactos 1</th> <th>Pos. de contactos 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R</td> <td>C</td> <td>O</td> </tr> <tr> <td>Off</td> <td>O</td> <td>O</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>O</td> <td>C</td> </tr> </tbody> </table>	Pos. de palanca	Pos. de contactos 1	Pos. de contactos 2	R	C	O	Off	O	O	L	O	C		
Pos. de palanca	Pos. de contactos 1	Pos. de contactos 2														
R	C	O														
Off	O	O														
L	O	C														
G		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Pos. de palanca</th> <th>Pos. de contactos 1</th> <th>Pos. de contactos 2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R</td> <td>C</td> <td>O</td> </tr> <tr> <td>Off</td> <td>C</td> <td>C</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>O</td> <td>C</td> </tr> </tbody> </table>	Pos. de palanca	Pos. de contactos 1	Pos. de contactos 2	R	C	O	Off	C	C	L	O	C		
Pos. de palanca	Pos. de contactos 1	Pos. de contactos 2														
R	C	O														
Off	C	C														
L	O	C														
CA	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>6 A, 120 V</td> </tr> <tr> <td>3 A, 240 V</td> </tr> <tr> <td>1.5 A, 480 V</td> </tr> <tr> <td>1.2 A, 600 V</td> </tr> </tbody> </table>		6 A, 120 V	3 A, 240 V	1.5 A, 480 V	1.2 A, 600 V	CC	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>2.2 A, 115 V</td> </tr> <tr> <td>1.1 A, 230 V</td> </tr> <tr> <td>0.4 A, 550 V</td> </tr> </tbody> </table>	2.2 A, 115 V	1.1 A, 230 V	0.4 A, 550 V					
6 A, 120 V																
3 A, 240 V																
1.5 A, 480 V																
1.2 A, 600 V																
2.2 A, 115 V																
1.1 A, 230 V																
0.4 A, 550 V																
Trabajo normal																

Dimensiones—mm (pulgadas)



Rango de temperatura ambiente

0 °C a +40 °C (+32 °F a +104 °F) de temperatura mínima basada en la ausencia de agua o humedad de congelación.

Figura 76. Selección del tipo de final de carrera.

801 Uso general							
Guía de selección							
Tipo de palanca	Operación de contactos	Tipo de envolverte	Tipo de contactos y capacidad ①	Fuerza de operación (máx.)	Recorrido de operación de los contactos (nominal)	Sobrecarrera (min.)	Número de catálogo
Envolverte NEMA Tipo 1							
Rodillo	Retorno por muelle de acción lenta	Figura 1	A	15.58 N (3.5 lbs) 15.58 N (3.5 lbs)	8° 3°	3° 8°	801-ASA11 801-ASB11
		Figura 18	A	15.58 N (3.5 lbs)	8°	3°	801-ASA12
		Figura 2	C	10.0 N (2.25 lbs) 10.0 N (2.25 lbs) 10.0 N (2.25 lbs) 10.0 N (2.25 lbs)	30° 25° 15°	25° Vea la Figura 20 30° 40°	801-ASC17 801-ASD17 801-ASF17 801-ASG17
		Figura 2	C	22.25 N (5.0 lbs) 37.82 N (8.5 lbs) 22.25 N (5.0 lbs) 37.82 N (8.5 lbs) 22.25 N (5.0 lbs) 37.82 N (8.5 lbs) 10.0 N (2.25 lbs)	25° 9° 25° 9° 25° 9° 30°	30° 40° 30° 40° 30° 40° 25°	801-ASC21 801-ASC21X 801-ASN21 801-ASN21X 801-ASO21 801-ASO21X 801-ASC313
		Figura 4	H	22.25 N (5.0 lbs) 31.15 N (7.0 lbs)	30° 10°	20° 43°	801-ASH22 801-ASH26X
	Retorno por muelle de acción instantánea	Figura 3	C	17.8 N (4.0 lbs) 31.15 N (7.0 lbs) 17.8 N (4.0 lbs)	25° 9° 25°	30° 44° 30°	801-ASC25 801-ASC25X 801-ASN25 801-ASN25X
		Figura 5	C	22.25 N (5.0 lbs)	25°	15°	801-ASC27
		Figura 6	C	17.8 N (4.0 lbs)	25°	15°	801-ASC29
		Figura 7	C	28.92 N (6.5 lbs)	68°	12°	801-ASC218
		Figura 8	C	22.25 N (5.0 lbs)	68°	12°	801-ASC220
Acción instantánea mantenida	Tipo trinquete mantenimiento	Figura 19	C	10.0 N (2.25 lbs)	38°	24°	801-AMC211

Figura 77. Selección del tipo de final de carrera.

Descripción	Interruptor de final de carrera de uso general para una amplia variedad de aplicaciones.
Clasificación de contactos (Vea la Nota 1, abajo)	NEMA A600
Capacidad de temperatura (Vea Nota 3, abajo)	-0° a 40 °C (32° a 104 °F)
Actuadores	De palanca, mantenido
Clasificación de envoltente (Vea Nota 5, abajo)	NEMA Tipo 1, Tipo 4 o Tipo 7 y 9
Características adicionales	Opción de montaje: en superficie
Criterios de selección	Página 6-7

801 final de carrera



Capacidad máxima de contactos de CA por polo

Designación de clasificación NEMA	Máx voltaje de CA 50 ó 60 Hz		Corriente de transporte mantenida (A)		Corriente (A)		VA	
	2 circuitos	4 circuitos	Conexión	Ruptura	Conexión	Ruptura	Conexión	Ruptura
A600	—	A300	60.0	6.00	10	720	7200	720
A600	—	A300	30.0	3.00	10	720	7200	720
A600	—	—	15.0	1.50	10	720	7200	720
A600	—	—	12.0	1.20	10	720	7200	720
B600	—	—	3.0	3.00	5	360	3600	360
B600	—	—	15.0	1.50	5	360	3600	360
B600	—	—	7.5	0.75	5	360	3600	360
B600	—	—	6.0	0.60	5	360	3600	360

5.8 IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMABLE (P.L.C)

En ésta sección se hará una descripción tanto del proceso secuencial como del algoritmo y el programa del P.L.C para el control del transportador.

5.8.1 Descripción General del Proceso Secuencial

El transportador automático fue diseñado de tal forma que resultara flexible para adaptarse a “cualquier” tipo de proceso secuencial, pero que a la vez fuera robusto ante cambios y perturbaciones.

Sea cual sea el proceso a ser aplicado, dicho proceso puede tener prácticamente “n” etapas, pero siempre las etapas críticas serán la primera y la última. La primera, por ser la de reconocimiento y arranque del sistema, y la última por ser la de reinicio. El diseño esta hecho para que tanto la alimentación como la descarga se realicen en la primera etapa, por eso en esta etapa no existe tanque alguno. La forma de alimentación y la descarga dependen del tipo de producto a transportar en particular, como del tipo de tratamiento que se le quiera hacer al mismo. Por esta razón en este informe no se entra en el tema, pues como se acaba de decir, todo depende tanto del proceso como del producto.

Figura 78. Esquema general de las etapas de “cualquier” proceso secuencial, vista lateral.

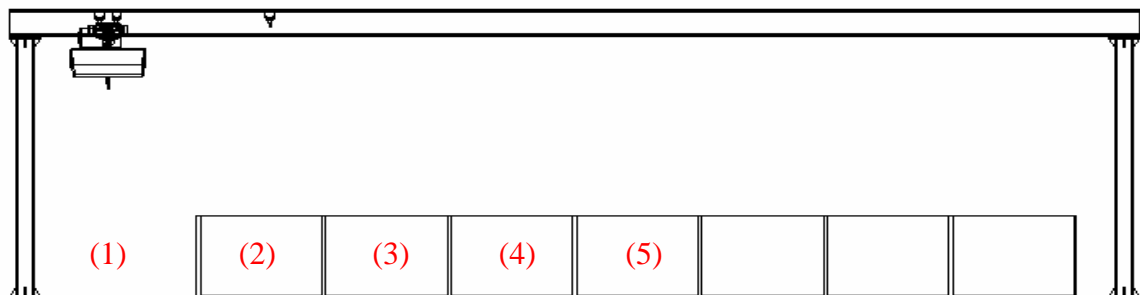
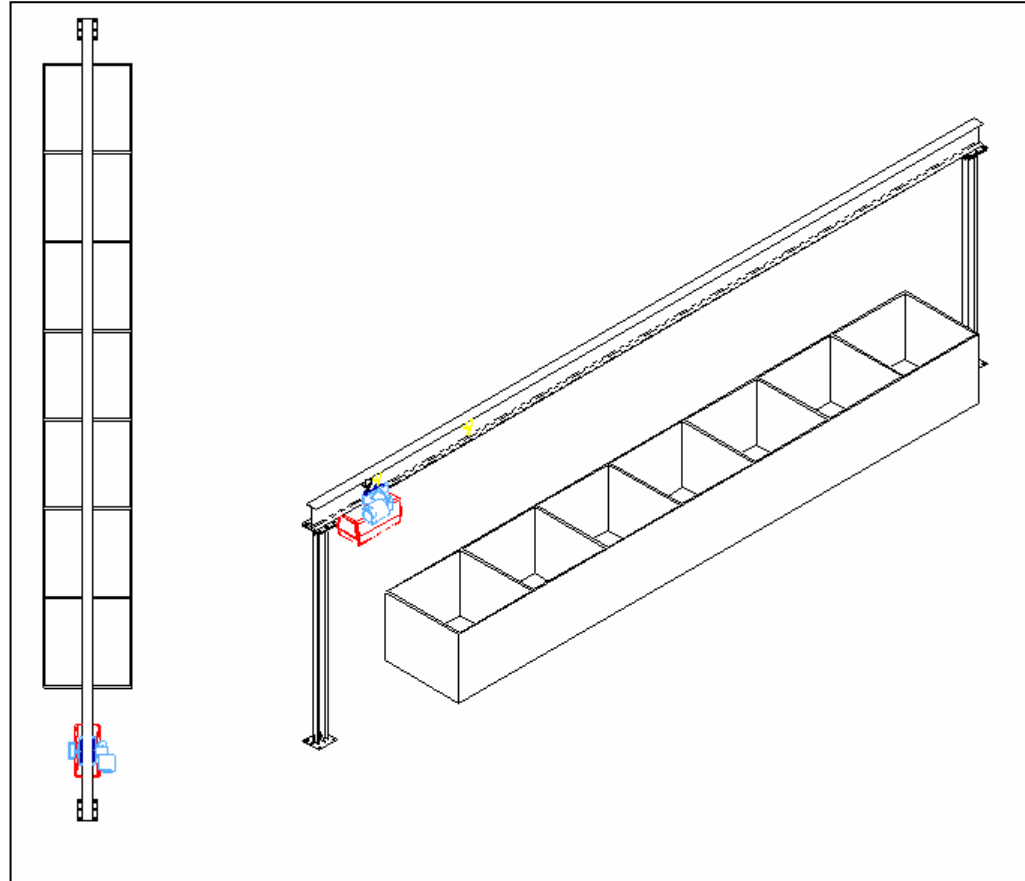


Figura 79. Vista superior e isométrica del transportador automático bidimensional.



El transporte comienza en la etapa “uno” y va avanzando consecutivamente, deteniéndose un tiempo específico en cada una de las etapas que también puede ser igual e todas. Finalmente al llegar a la etapa “n”, termina el proceso y regresa al “inicio” donde se realiza la descarga y queda listo para comenzar de nuevo. Para asegurar la posición y el avance del trole a lo largo de la viga, se fijaron finales de carrera electromecánicos especiales que indican la presencia del mismo.

En el caso particular del galvanizado, se conoce que las etapas del proceso pueden variar según la empresa manufacturera y tanto los tiempos como las concentraciones específicas de cada una éstas son confidenciales, pues las empresas galvanizadoras compiten en base a ello.

Sin embargo, en el caso general del galvanizado se puede decir que la etapa “uno” sería la etapa tanto de carga como de descarga de la piezas a recubrir. La etapa “dos” sería la llamada “**limpieza cáustica**” donde se encuentran soluciones de compuestos desengrasantes alcalinos. Su finalidad, es remover de la superficie del acero residuos de aceite, grasa y ciertos tipos de barnices, lacas y pinturas.

La etapa “tres” sería la del “**lavado**”, donde se hace un enjuague en agua limpia para evitar el arrastre de líquido de la limpieza cáustica al decapado.

La siguiente etapa, la “cuatro” sería la del “**decapado ácido**”, donde las piezas se encuentran con soluciones en base a Ácido Clorhídrico o Sulfúrico, que tienen la finalidad de remover los óxidos de la superficie del acero. Luego, vendría la etapa “cinco” o de “**lavado**” de nuevo, donde se hace un enjuague en agua limpia para evitar el arrastre de ácido y hierro en solución. La siguiente etapa sería la “seis” o de “**prefluxado**”, que se trata de una solución acuosa de Cloruro de Zinc y Amonio, que disuelve los óxidos leves que se hayan vuelto a formar sobre la superficie del acero luego de su paso por el decapado y el lavado.

La etapa “siete” o de “**crisol de galvanización**” es la etapa donde se finalmente se forma la capa del recubrimiento. Luego vendría la etapa de “**enfriamiento**” o etapa “ocho”, que se realiza por lo general con agua. Y por último, vendría la etapa “nueve” o de “**pasivación**”, que se realiza mediante una solución de cromatos o una solución de silicatos, para evitar las manchas de corrosión blanca sobre el galvanizado.

El transportador fue diseñado con redundancia, para darle robustez, seguridad y confiabilidad a todo el sistema. Se ubicaron dos finales de carrera por cada una de las etapas, pero debido a que la etapa inicial es la más crítica y delicada de todas, y puesto que funciona en ambas direcciones, es la única que tiene cuatro sensores, uno para cada rueda como se muestra en la siguiente figura.

Figura 80. Diagrama de la ubicación de los finales de carrera sobre la viga.

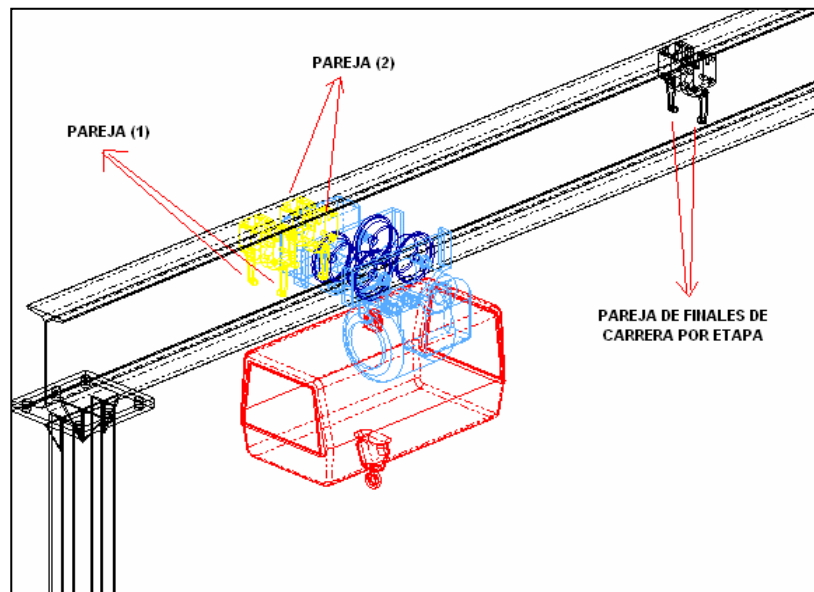
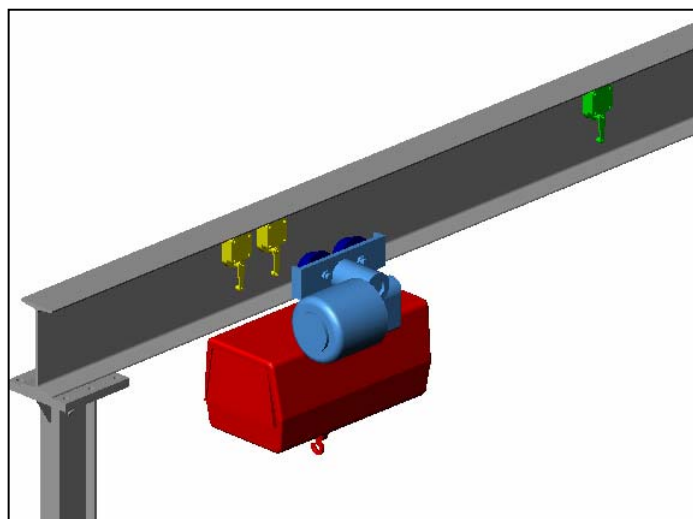


Figura 81. Diagrama de la ubicación de los finales de carrera sobre la viga.



5.8.2 Descripción del Programa

Como el proceso es de tipo secuencial, bastará con hacer la programación de una sola etapa, y las siguientes tendrán una programación similar, de una forma cíclica, con la diferencia de que se cambiarán los nombres de las variables de etapa en etapa. Por ejemplo, si en la primera fase se usaron los finales de carrera uno, dos, tres y cuatro, es decir las entradas I1, I2, I3 e I4, en la siguiente etapa se usarán entonces las entradas I5 e I6 y así sucesivamente hasta la última pareja de finales de carrera.

Los temporizadores serán semejantes, en cada etapa existirá el mismo tipo de temporizador pero con tiempos diferentes e independientes para cada etapa, estos temporizadores se encargarán de limitar el tiempo del frenado dinámico de la carga sobre cada una de las etapas.

Se usó el lenguaje “Ladder”, ya que es muy conocido a nivel mundial y es compatible con casi cualquier tipo de P.L.C, independientemente de la marca. El estado de “cadena recogida” dentro del programa, está dado gracias a una señal que envía un interruptor electromecánico dentro del elevador a la botonera de mando. El estado de “cadena extendida” sin embargo, solo depende de la velocidad de elevación del proceso, y la altura a la cual se quiere descender la carga; por esta razón este estado está dado por medio de programación. Tanto el tiempo de elevación y descenso de la carga se da por medio de programación y es flexible según la necesidad de cada tipo de proceso en particular.

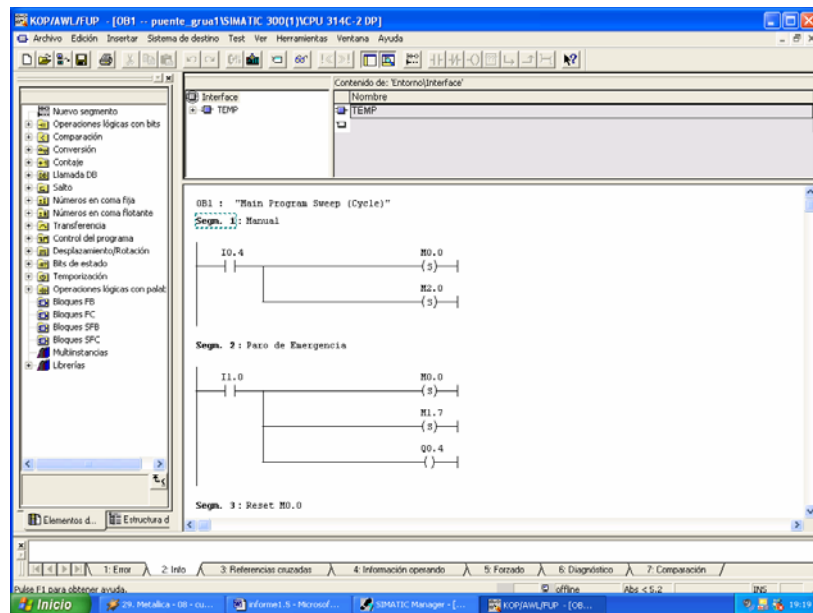
El programa tiene dos modos de operación; tanto de modo “Automático” como de modo “Manual”. En el modo “Manual”, el operario puede controlar el sistema completamente desde la “botonera de mando”. El modo “Automático” fue programado para que tuviera cierta “inteligencia” por decirlo de alguna manera. Tiene la capacidad de corregir con acciones si el estado inicial es incorrecto, y

siempre empezará hasta corregir su posición y condiciones iniciales. El caso ideal para que comience el proceso, es cuando el elevador tiene la cadena recogida y el trole se encuentra en la posición inicial o primera etapa; en el caso contrario, el P.L.C tiene la capacidad según su programación para reconocer su posición y corregir su estado y ubicación.

En caso de alguna falla o emergencia, el operario tiene la posibilidad de generar un “paro de emergencia”, en el cual quedará al mando del sistema; primero que nada se detendrá inmediatamente todo el proceso. El “paro de emergencia” es muy útil y necesario para evitar accidentes pues además de “congelar” las funciones de todos los actuadores, le brinda al operario control total sobre el sistema pudiendo así evitar problemas o inconvenientes.

A pesar de que el software de programación del controlador lógico programable fue el STEP7 de Siemens para poder programar un P.L.C de la familia “Simatic S7 300”, el programa es compatible con cualquier tipo de P.L.C y es compatible con las funciones usadas del lenguaje Ladder.

Figura 82. Entorno del software de programación usado, STEP7/ de Siemens.



5.8.3 Algoritmo De Control

A continuación, se muestra el algoritmo de control del P.L.C, donde se explica de una forma más sencilla la lógica usada para el control del proceso. La sección en color rojo, sólo se simboliza en una sección para evitar la extensión indefinida del diagrama, pero en la realidad esta sección se ramifica en cada una de las líneas de unión de todo el algoritmo.

Figura 83. Algoritmo de control del P.L.C.

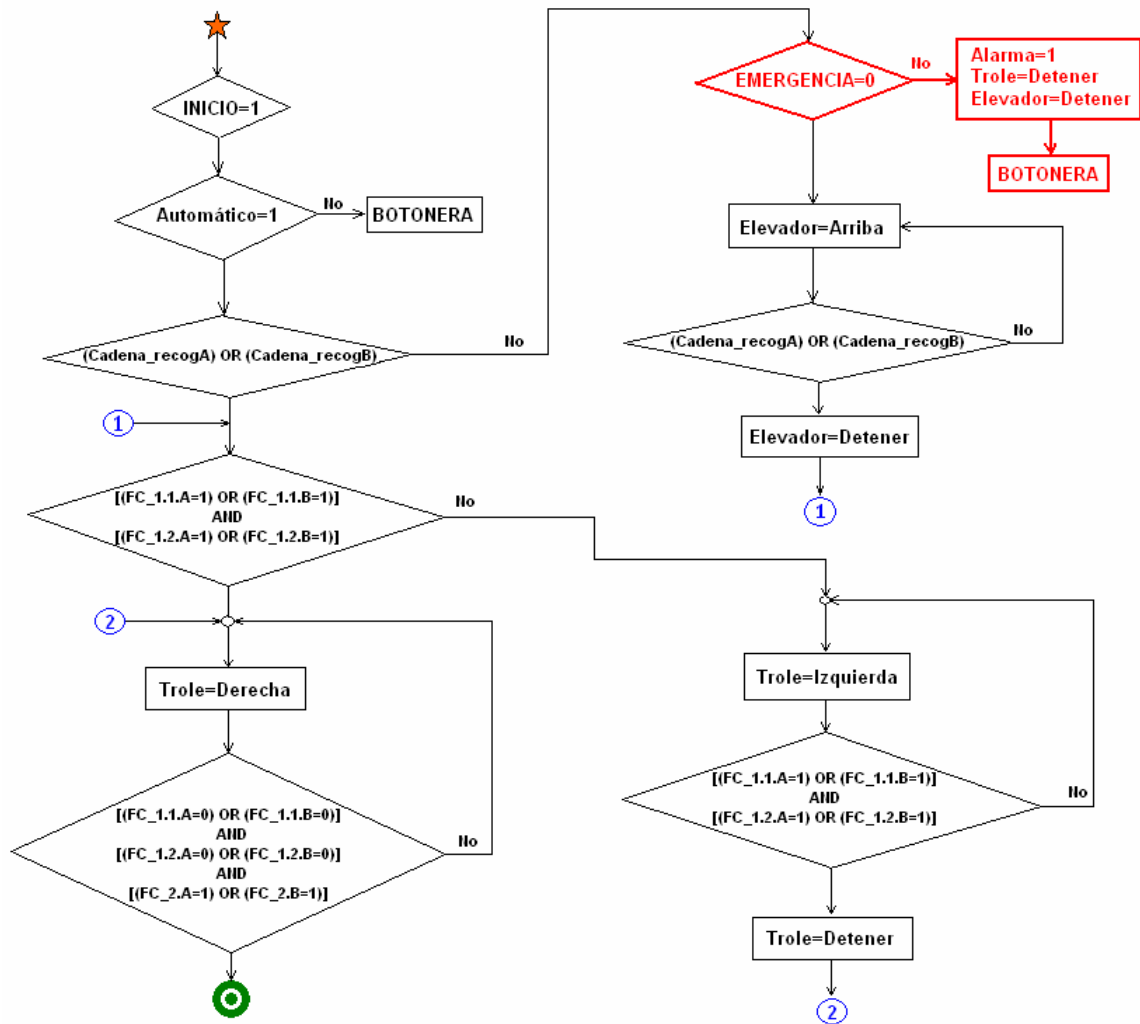
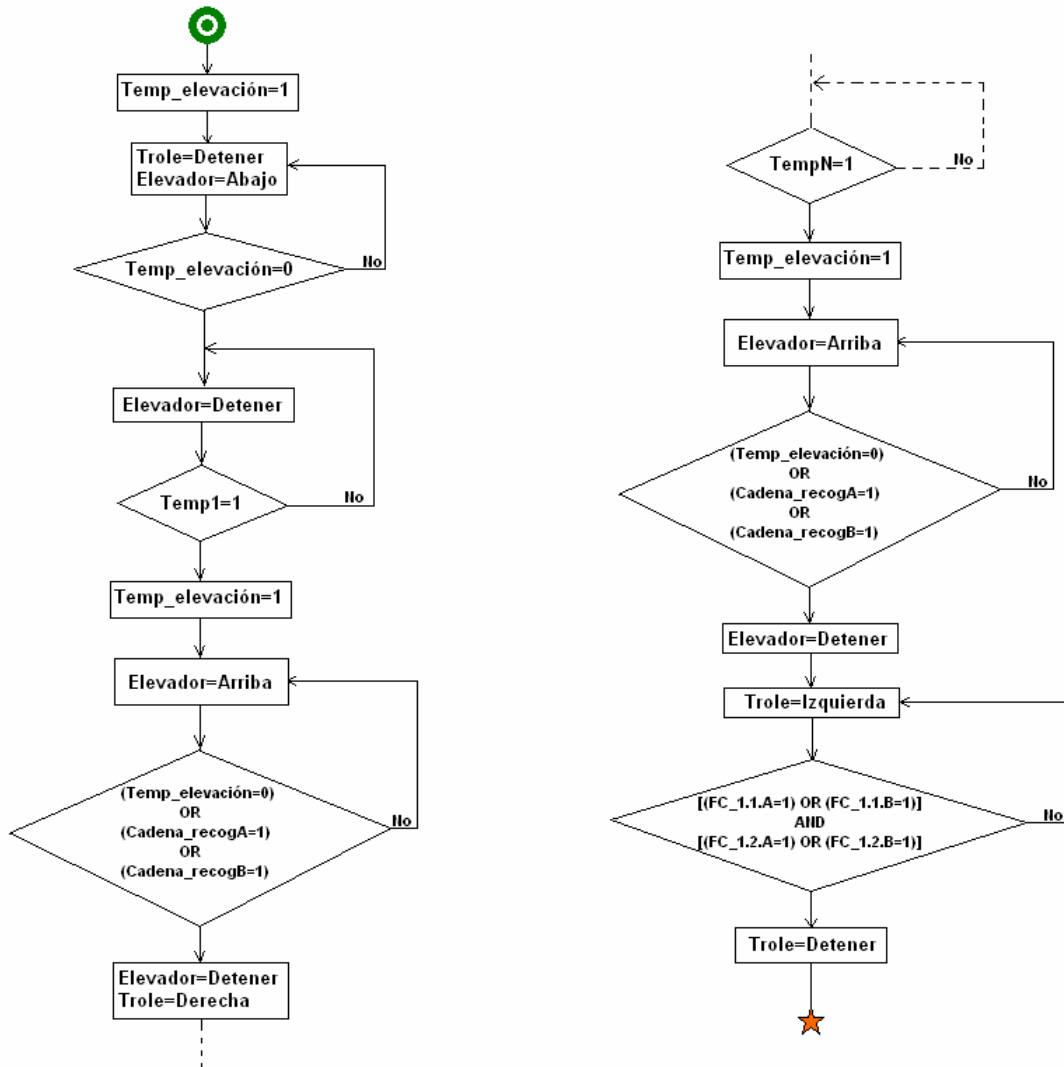


Figura 84. Continuación del algoritmo de control del P.L.C.

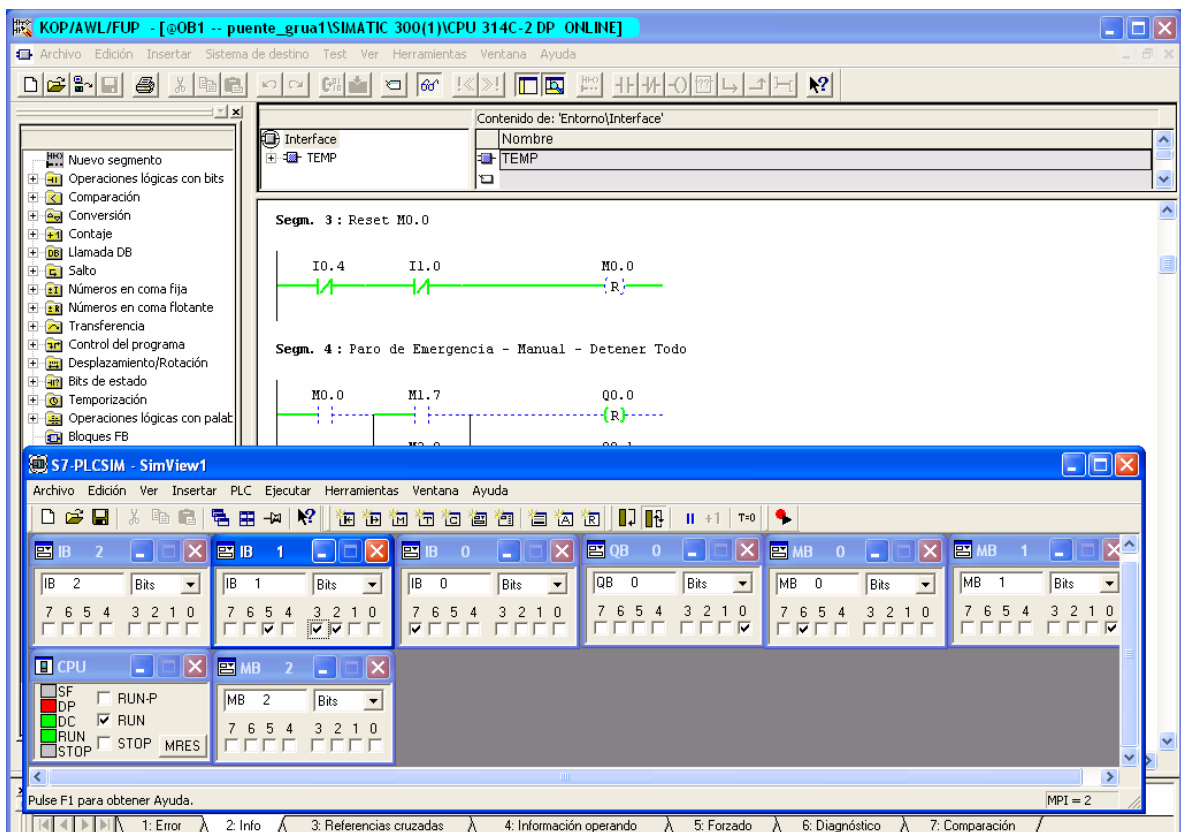


En la figura 84, se puede observar un diagrama de la continuación del algoritmo de control del P.L.C. Las líneas punteadas dentro del algoritmo simbolizan las etapas cíclicas del proceso que como se mencionaron anteriormente son repetitivas, hasta antes de llegar a la última etapa o “etapa N”.

Nota: El programa real se encuentra elaborado de forma detallada tanto en lenguaje Ladder como en código AWL. Ver “Anexos”

En la figura 85, se puede apreciar el ambiente de programación y de simulación del STEP7 de Siemens, el cual usa etiquetas de cada una de las “marcas”, “entradas” y “salidas” del programa en simulación, además de mostrar de manera didáctica con color verde el flujo de la corriente de forma lógica por cada una de las “ramas” del programa simultáneamente.

Figura 85. Simulación del programa en STEP7.



5.9 IMPLEMENTACIÓN DEL VARIADOR

Una vez entendido el funcionamiento del transportador automático bidimensional y su algoritmo de control, se procede con la implementación de los variadores de velocidad para los motores del trole y el polipasto o elevador; para que éstos funcionen con las velocidades necesarias para cada proceso secuencial en particular, llámese galvanizado, cromado, zincado, etc.

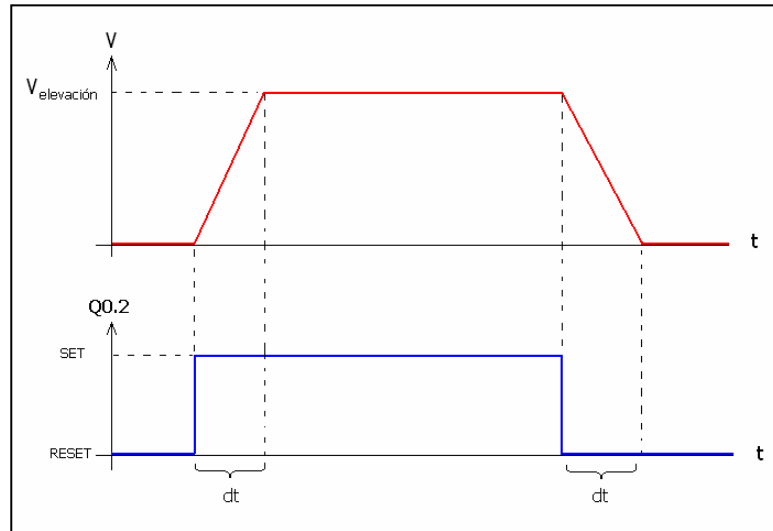
Teniendo las velocidades de elevación del polipasto y de traslación del trole deseadas, se puede introducir estos datos a los variadores, para el control de los motores.

A diferencia de los controladores lógicos programables, que se pueden programar con lenguajes universales, la programación de los variadores de velocidad, la mayoría de las veces varía dependiendo de la marca, e incluso de la referencia entre aparatos de la misma marca, sin embargo esta programación no es muy complicada. Por lo general, la forma de programar cada variador viene en un manual cuando se compra cada variador en particular.

Por otro lado, se debe tener en cuenta sin importar la marca o referencia del variador, las rampas de aceleración y de desaceleración o frenado para cada uno de los motores, a continuación se explicarán dichas rampas necesarias para este caso en particular.

Rampas de control del Elevador

Figura 86. Rampa de velocidad característica del polipasto o elevador.



En figura 86, se puede apreciar el comportamiento del elevador, según su rampa característica de velocidad. En este diagrama de tiempos se identifica la señal que controla el polipasto, la cual es dependiente de la señal “Q0.2”, emitida por el P.L.C, sabiendo que la señal “Q0.2”, se encarga de controlar la elevación de la carga. De forma semejante existe una rampa que incluso puede ser igual, la cual controlará la señal “Q0.3” del P.L.C encargada del descenso de la carga, con la diferencia que siempre que actúe esta señal, se debe tener en cuenta de cambiar el sentido de giro de dicho motor, por medio de programación con el respectivo variador.

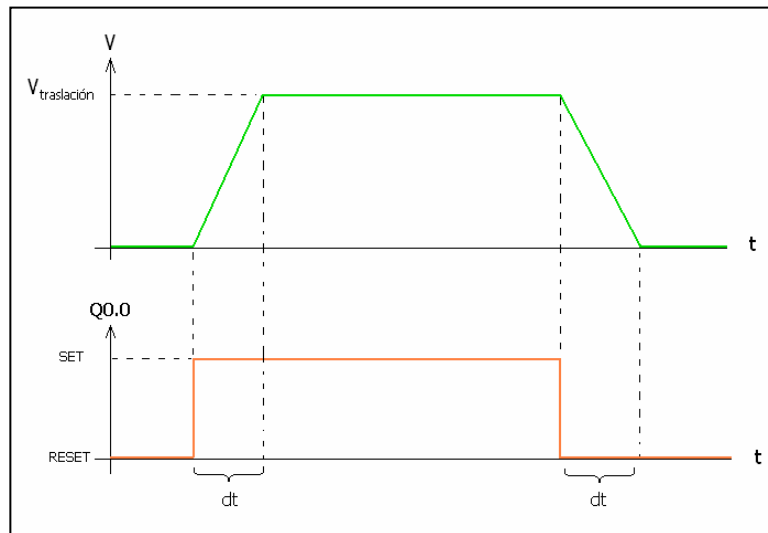
Los llamados “dt” son las pequeñas variaciones de tiempo deseadas para el arranque y el frenado del motor, que como fueron calculadas anteriormente, pueden ser de un segundo.

Rampas de Control del Trole

En la figura 87, se puede apreciar la rampa característica destinada al control del trole. De manera semejante que el polipasto, la rampa del trole interviene por el efecto de la señal "Q0.0" emitida por el P.L.C, dentro del algoritmo de control.

Cabe recordar que las rampas de avance y retroceso son iguales, con la única diferencia de que esta última (retroceso del trole) depende de la señal "Q0.1" y que igual que en el caso del elevador, se debe invertir el sentido de giro del motor por medio de programación del variador, siempre que actúe dicha señal.

Figura 87. Rampa de velocidad característica del trole.



5.9.1 Selección de Los Variadores a Usar

Los variadores, son máquinas de uso relativamente sencillo, y concreto; por esta razón las conexiones eléctricas también son directas y sencillas. Se debe tener en

cuenta de elegir un variador de velocidad para cada motor por separado y que coincida con las características de dicho motor; es decir: potencia, voltaje, frecuencia de red, tipo de comunicación, etc.

Se tienen dos motores de inducción, el del elevador y el trole, ambos trifásicos que funcionan a 240V y a una frecuencia de red de 60Hz. La única diferencia son sus potencias respectivas, 2hp y ¼ hp. Para el propósito del transportador automático, es necesario que tenga comunicación entre cada uno de los variadores y el P.L.C, el cual será el “cerebro” del sistema. Por esta razón los variadores deben tener comunicación “PROFIBUS”, sea cual sea la marca o referencia, para poder establecer la red de comunicación en paralelo entre el P.L.C y los variadores como se muestra en la figura 84. A continuación, se muestra la selección de cada uno de los variadores.

Así como el P.L.C, los variadores pueden ser de cualquier marca. Para el caso de utilizar un P.L.C de Siemens de la familia “S300”, se pueden utilizar variadores de esta misma marca si se desea.

Los variadores por lo general, se especifican principalmente según la potencia del motor pero en kilowatios. Por esta razón, se deben transformar las unidades de potencia de los motores como sigue:

Elevador

$$P_w = \frac{2hp \cdot 745.67 \text{ watt}}{1hp} = 1491.4 \text{ watt} \approx 1.5 \text{ kW}$$

Trole

$$P_w = \frac{0.25hp \cdot 745.67 \text{ watt}}{1hp} = 186.42 \text{ watt} \approx 0.2 \text{ kW}$$

De acuerdo al catálogo de variadores de Siemens y según las características de cada uno de los motores y las necesidades del proyecto se encuentra que los variadores pertenecen a la rama de los llamados “Micromaster 420” que se encuentran en el rango entre 0.12kW y 11kW, y según lo anterior se eligen las siguientes referencias:

Tabla 23. Selección del tipo de variador.

Tensión de Red	Potencia	Convertidor
1 AC 200 V a 240 V	kW	
	0,12	6SE6420-2UC11-2AA0
	0,25	6SE6420-2UC12-5AA0
	0,37	6SE6420-2UC13-7AA0
	0,55	6SE6420-2UC15-5AA0
	0,75	6SE6420-2UC17-5AA0
	1,1	6SE6420-2UC21-1BA0
	1,5	6SE6420-2UC21-5BA0
	2,2	6SE6420-2UC22-2BA0
	3,0	6SE6420-2UC23-0CA0
3 AC 200 V a 240 V	0,12	6SE6420-2UC11-2AA0
	0,25	6SE6420-2UC12-5AA0
	0,37	6SE6420-2UC13-7AA0
	0,55	6SE6420-2UC15-5AA0
	0,75	6SE6420-2UC17-5AA0
	1,1	6SE6420-2UC21-1BA0
	1,5	6SE6420-2UC21-5BA0
	2,2	6SE6420-2UC22-2BA0
	3,0	6SE6420-2UC23-0CA0
	4,0	6SE6420-2UC24-0CA0
3 AC 380 V a 480 V	5,5	6SE6420-2UC25-5CA0
	0,37	6SE6420-2UD13-7AA0
	0,55	6SE6420-2UD15-5AA0
	0,75	6SE6420-2UD17-5AA0
	1,1	6SE6420-2UD21-1AA0
	1,5	6SE6420-2UD21-5AA0
	2,2	6SE6420-2UD22-2BA0
	3,0	6SE6420-2UD23-0BA0
	4,0	6SE6420-2UD24-0BA0
	5,5	6SE6420-2UD25-5CA0
7,5	6SE6420-2UD27-5CA0	
11	6SE6420-2UD31-1CA0	

Catálogo de Convertidores de Frecuencia

En la tabla 24, se describen las características generales de los variadores elegidos, “familia Micromaster 420”.

Todas las características particulares de los variadores elegidos: conexiones eléctricas y especificaciones se encuentran en los “ANEXOS- Variador.”

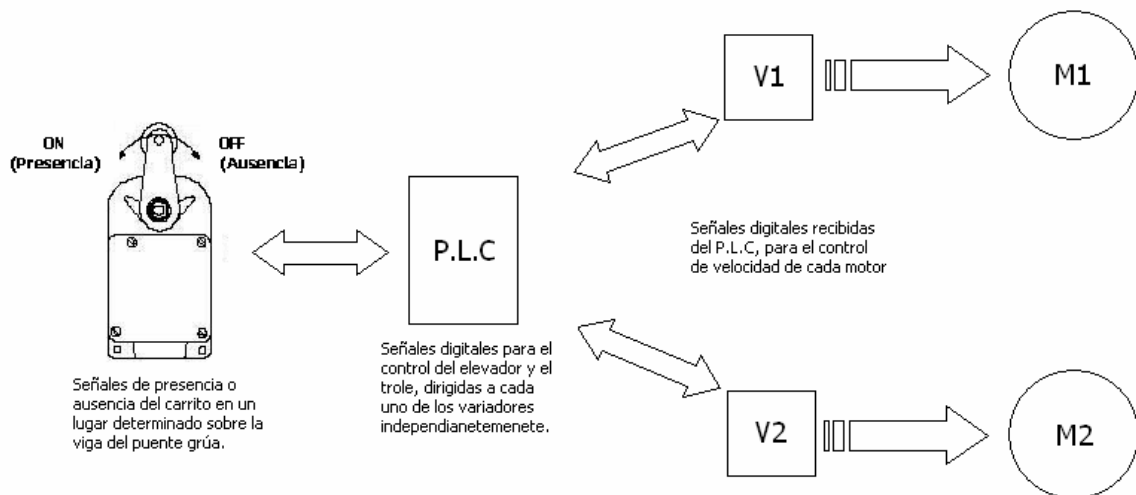
Tabla 24. Características generales de la familia de variadores Micromaster 420

MICROMASTER 420	
Características principales	<i>“El universal”</i> para redes trifásicas y conexión opcional del bus de campo, p.ej.: con cintas transportadoras, transporte de material, bombas, ventiladores y máquinas operadoras
Gama de potencias	0,12 kW a 11 kW
Gamas de tensión	1 AC 200 V a 240 V 3 AC 200 V a 240 V 3 AC 380 V a 480 V
Regulación	<ul style="list-style-type: none"> • Característica V/f • Característica multipunto (característica V/f parametrizable) • FCC (regulación corriente-flujo)
Regulación del proceso	Regulador PI interno
Entradas	3 entradas digitales 1 entrada analógica
Salidas	1 salida analógica 1 salida por relé
Conexión al sistema de automatización	El partner ideal para sus tareas de automatización, tanto SIMATIC S7-200 como SIMATIC S7-300/400 (TIA) y SIMOTION
Características adicionales	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema BICO

5.9.2 Conexiones del Sistema en General

En la siguiente figura se muestran el tipo de señales involucradas dentro del sistema, tanto de entrada como de salida.

Figura 88. Tipo de señales involucradas dentro del sistema.



Intuitivamente el tipo de conexión entre el que debe existir entre el autómata y los variadores de velocidad que controlaran los motores debe ser en “paralelo” como se muestra en la figura 89; sin embargo, este tipo de conexión se conoce según la topología de redes de comunicación como una conexión en “bus”. Este tipo de conexión permite un control simultáneo y coherente de las señales del sistema.

Debido a la necesidad de rapidez en la respuesta, el tipo de señales a controlar de tipo discreto y el tipo de conexión de tipo “punto a punto”, se optó por la familia del “Device Bus”, puesto que cumple con todos los requerimientos mencionados. Dentro de ésta familia, se encuentra el llamado “Profibus”, elegido pues dentro de la familia del “Device Bus” es uno de los medios más usados y accesibles para el control de este tipo de señales en la industria. En la figura 91, se muestra el tipo

de conexión de la red de comunicación utilizando el “Profibus” de la familia del “Device Bus” el cual cumple con los requerimientos para este sistema; donde “F.C” son los finales de carrera y los “V” los dos variadores a usar.

Figura 89. Conexión general para la comunicación entre el P.L.C y los variadores, para el control de los actuadores.

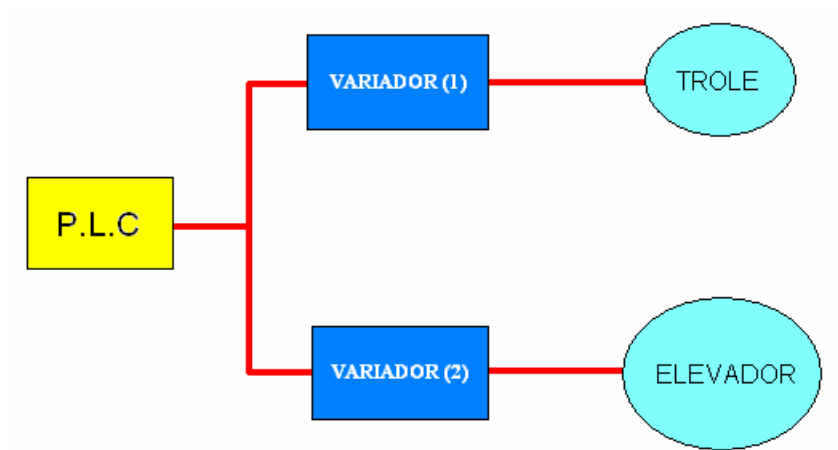


Figura 90. Diagrama jerárquico de la red de comunicación a usar.

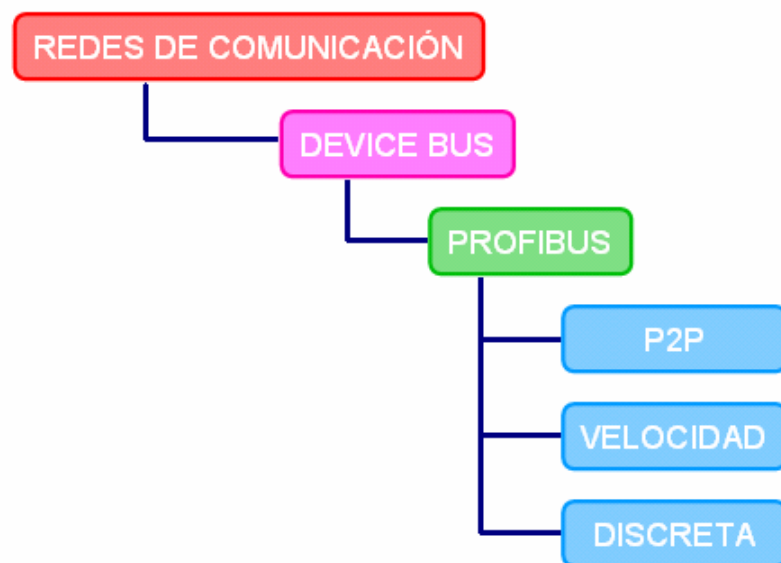
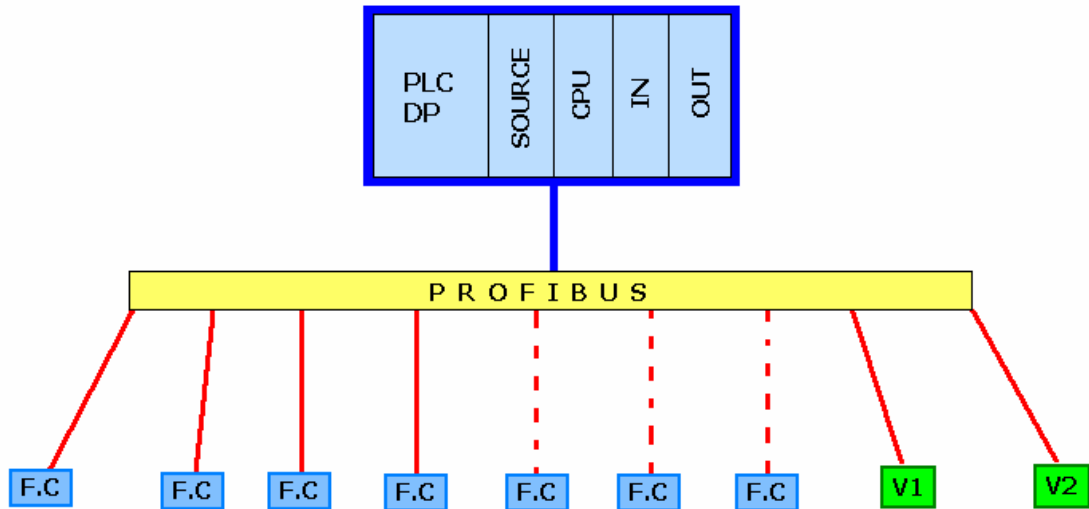


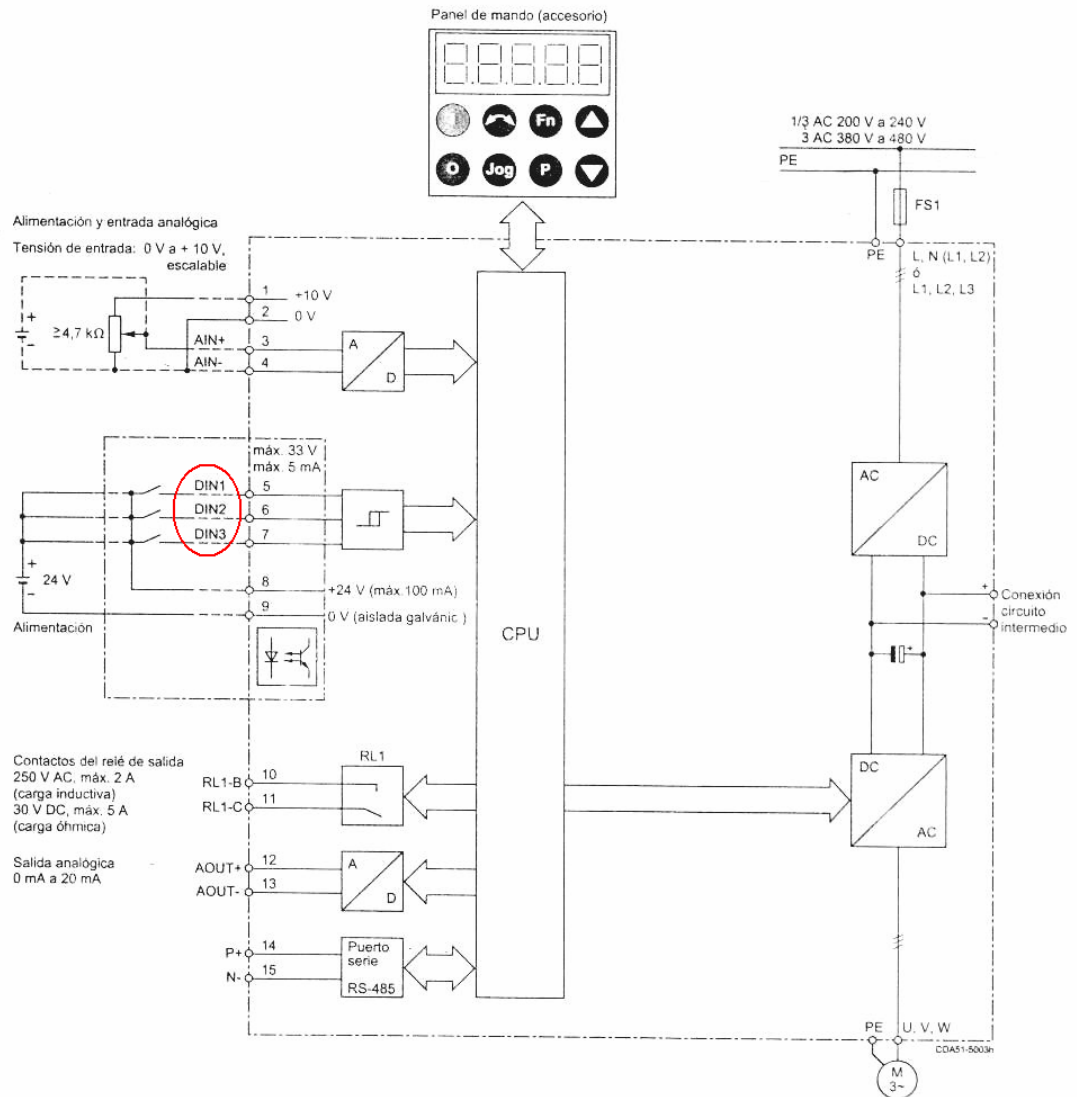
Figura 91. Esquema de comunicación, topología de BUS



Las salidas del autómata se convierten en las entradas de cada uno de los variadores, las cuales son de tipo digital, y las salidas de los variadores son las entradas de cada uno de los motores. Las salidas del P.L.C son “Q0.0”, “Q0.1”, “Q0.2” y “Q0.4”, dos por cada uno de los actuadores; donde las entradas de los variadores son “DIN1” y “DIN2”, como se muestra en la figura 92.

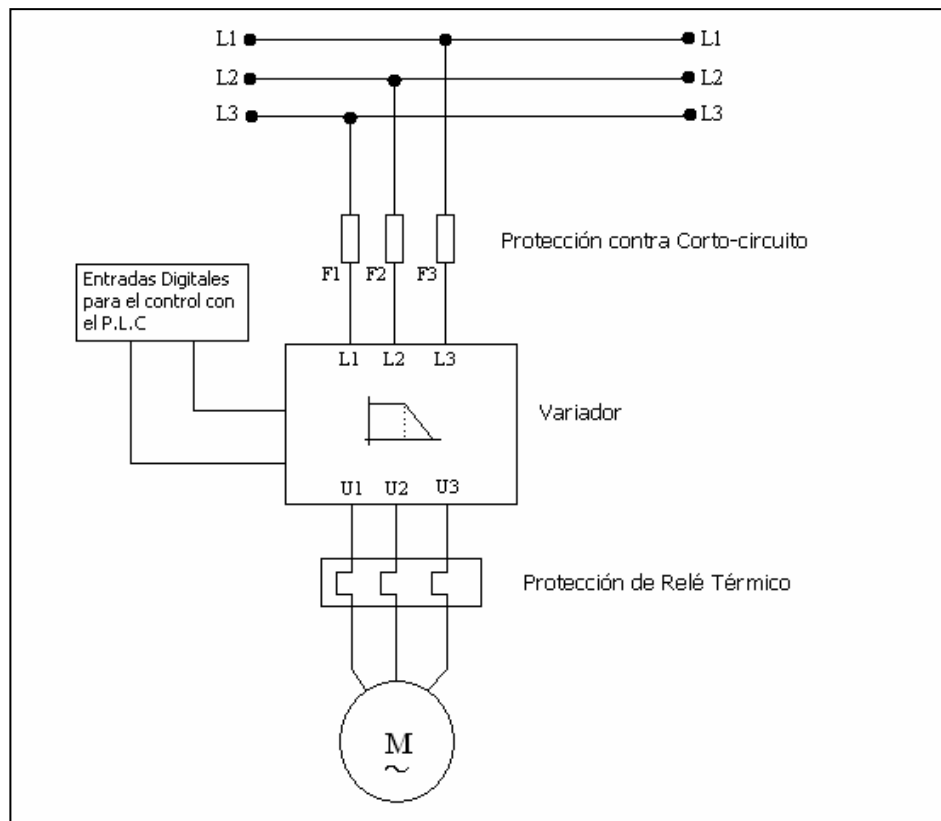
El programa funciona simultáneamente gracias al tipo de conexión utilizada, existiendo así armonía y sincronía entre los dos variadores.

Figura 92. Diagrama eléctrico del variador elegido, donde se muestran resaltadas las entradas de tipo digital, que serán las salidas del P.L.C también de tipo digital. Ver Anexos.



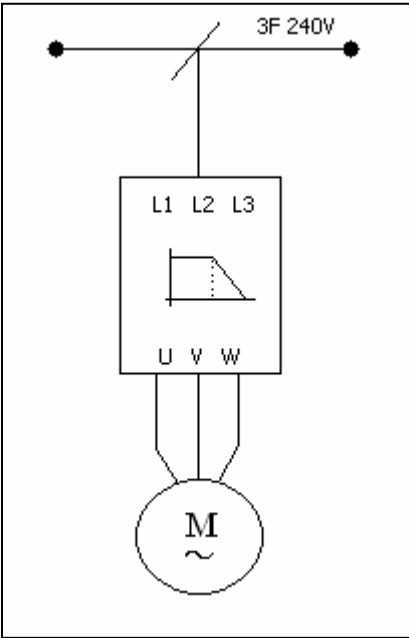
En la figura 93, se describe el esquema de conexión eléctrica para la conexión de cada variador con su respectivo motor y la red eléctrica trifásica de alimentación. Cuando se utiliza un variador comercial, se debe conectar a la red con una protección contra cortocircuito y una protección con relé térmico.

Figura 93. Conexión eléctrica de los variadores a la red eléctrica trifásica.



Sin embargo, los variadores elegidos de la familia "Micromaster 420" ya tienen internamente este tipo de protecciones y otra adicional, de forma interna; por esta razón, la conexión final queda simplificada como se indica a continuación en la figura 86. Ver "ANEXOS - Variador".

Figura 94. Diagrama simplificado de conexiones eléctricas según el tipo de variador elegido.



6. PRESUPUESTO ESTIMADO

6.1 COTIZACIÓN DE ALFREDO STECKERL HIERROS Y ACEROS S.A

VALOR DE LA INVERSIÓN

Valor para:

Un polipasto Marca COFFING de 1 Ton con 6m de cadena.

US 1.537 +I.V.A.

Valor para:

Trolley eléctrico una velocidad.

Botonera de 4 pulsadores.

US 1.070 +I.V.A.

Documentación entregada

Manual del polipasto

Certificado ISO-9001 de los equipos COFFING

Certificado de pruebas en fabrica

Certificado de la cadena y el gancho

Carta de garantía de los equipos por un Año.

6.1.1 Garantías



Los equipos ofrecidos tienen un garantía de fábrica por 12 meses a partir de la fecha de entrega. La garantía ampara daños de fabricación y de materiales.

A STECKERL HIERROS Y ACEROS S.A., ofrece a sus clientes, sin costo: 2 visitas anuales a las instalaciones donde están operando los equipos, con el fin de realizar un reporte completo del funcionamiento de estos y de esta manera dar paso a un plan de mantenimiento preventivo programado para los equipos.

Contamos con técnicos especializados que están prestos a atender cualquier inconveniente que pueda llegar a presentarse con el equipo, que pueden ser programados con mínimo un día de anticipación.

6.1.2 Condiciones Comerciales

Precio	En Dólares americanos pagaderos en pesos a la TRM, de la fecha de facturación.
Tiempo de entrega	2-3 Días.
Forma de Pago	anticipo – 50% contra entrega o a convenir
Validez de la oferta	45 Días.

	A Steckerl Hierros y Aceros S.A. // Su centro del hierro y el acero	
Ing John Heiner Ocampo <i>Jefe Division Puentes Grúa</i>		A. Steckerl Hierros y Aceros s.a. Cra 128 No. 16A-65 Fontibon
bogota@alfredosteckerl.com www.alfredosteckerl.com		Oficina: 571 - 4154001 Celular: 315 7236534

6.2 COTIZACIÓN DE PRODUCTOS SIEMENS

6.2.1 Variadores

Para motores trifásicos de corriente alterna. Nueva serie con más potencias, rendimientos y mayor cantidad de aplicaciones. Fácilmente integrables a redes “Profibus”.

Referencia	Valor
6SE6420-2UC21-5BA0	1.321.000,00 + IVA
6SE6420-2UC12-5AA0	947.000,00 + IVA

6.2.2 Aparatos de Mando y Señalización - Signum Metallic – Signum Led

Contactos móviles que garantizan una elevada seguridad de contacto. Diseño en formas planas ergonómicas para mayor comodidad operativa. Corriente térmica: 10^a, protección IP67, diámetro de montaje: 22mm.

Referencia	Valor
3SB3602-0AA11	34,700 + IVA

6.2.3 Interruptores de Posición (Finales de Carrera)

Contactos móviles dobles que garantizan una elevada seguridad de contacto. Contactos de acción instantánea. Alto grado de confiabilidad. Palanca de rodillo de ajuste fino de 10° en 10°. Ejecución especial para uso de ambientes polvorientos y abrasivos.

Referencia	Valor
3SE3 200-1G	79,200 + IVA

6.2.4 Autómatas Programables – PLC Simatic S7 – 300

Unidad Central CPU

CPU 312C, CPU compacta con MPI, alimentación 24VDC, 10DI 24VDC/6DO 24VDC, 16KBITE.

Referencia	Valor
6ES7312-5BD00-0AB0	2,341,600 + IVA

Fuente de Alimentación

Fuente PS307 2AMP entrada AC 120/230 V; salida DC24V

Referencia	Valor
6ES7307-1BA00-0AA0	630,900 + IVA

Módulo de Entradas Digitales

EM321 con separación galvánica 16DI 24VDC

Referencia	Valor
6ES7321-1BL00-0AA0	1,834,300 + IVA

6.3 PRESUPUESTO COMPLETO

<i>Dispositivo/Parte</i>	<i>Empresa</i>	<i>Teléfono</i>	<i>Referencia</i>	<i>Valor Unitario</i>	<i>Cant.</i>	<i>Valor</i>
Pulsador	Siemens	6426709	3SB3602-0AA11	34.700,00	3	104.100,00
Final de Carrera	Siemens	6426709	3SE3 200-1G	79.200,00	18	1.425.600,00
CPU	Siemens	6426709	6ES7312-5BD00-0AB0	2.341.600,00	1	2.341.600,00
Fuente de Alimentación	Siemens	6426709	6ES7307-1BA00-0AA0	630.900,00	1	630.900,00
Módulo de Entradas Digitales	Siemens	6426709	6ES7321-1BL00-0AA0	1.834.300,00	1	1.834.300,00
Variador (A)	Siemens	6426709	6SE6420-2UC12-5AA0	947.000,00	1	947.000,00
Variador (B)	Siemens	6426709	6SE6420-2UC21-5BA0	1.321.000,00	1	1.321.000,00
Polipasto(elevador)	Coffing Hoists	6331551	EC-2032	4.226.750,00	1	4.226.750,00
Trole	Coffing Hoists	6331551	MT-20035	2.942.500,00	1	2.942.500,00
Columna	Alfredo Steckerl	6331551	IPE 140	140.000,00	1	140.000,00
Viga	Alfredo Steckerl	6331551	HEA 260	902.000,00	1	902.000,00
Tornillos Estructurales	Tornillos y Partes	6305916	Grado 8	4.317,00	24	103.608,00
Placas(material, soldadura, corte, y ensamblaje)	Industrias Aceros	6449039	...	50.000,00	6	300.000,00
Pernos de Anclaje	Industrias Aceros	6449039	...	20.000,00	8	160.000,00
Transporte del Ensamble	Industrias Aceros	6449039	...	50.000,00	1	50.000,00
Montaje Total	Industrias Aceros	6449039	...	300.000,00	1	300.000,00
Trabajo de Ingeniería y Diseño						10.000.000,00
Total =						27.729.358,00

Nota: Los valores dentro del presupuesto no incluyen I.V.A

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Con la inclusión del puente grúa dentro del proceso de galvanizado, se logra eliminar el problema de transporte de carga dentro del mismo, puesto que la capacidad de carga se incrementa aproximadamente veinte veces, aumentando la productividad de la empresa.
- Mediante la automatización se logra proteger al operario del proceso, puesto que ya no es necesario su presencia física dentro del mismo, ya no estará en contacto directo con los vapores y sustancias nocivas producidas durante el proceso.
- El operario se convierte en un supervisor en contacto indirecto con el proceso, ya que la tanto la lógica, como las tareas tediosas y repetitivas las lleva a cabo el transportador automático, eliminando de esta forma los errores humanos y por ende las impurezas en la superficie de los recubrimientos finales, aumentando así la calidad del producto terminado y reduciendo pérdidas a la empresa.
- Debido a la robustez, estabilidad y seguridad, el transportador podrá ser usado de forma continua sin temor a interrupciones por fatiga o cansancio como en el caso manual con el operario, aumentando así la producción de piezas con recubrimiento de alta calidad.
- Gracias a la programación del autómeta, el sistema es flexible a cambios de forma segura, para mejorar o incrementar el tipo de recubrimiento si se desea por medio de los tiempos de permanencia de cada etapa, sin necesidad de reprogramar y cambiar toda la lógica del programa de control del sistema.

- Una de las piezas más importantes del transportador bidimensional es la viga principal, pues es donde se lleva a cabo todo el recorrido del proceso, por esta razón el cálculo y selección de la misma debe ser cuidadoso, y teniendo siempre en cuenta los factores más importantes para dichos cálculos, los cuales son: carga a levantar, luz o longitud, momento de inercia del perfil y tipo de material.
- Es muy importante la selección de los motores, pues se debe tener en cuenta que los motores de un puente grúa tienen propiedades especiales y están contruidos especialmente para trabajos específicos de carga pesada y de ciertas repeticiones por unidad de tiempo; y por tal motivo es recomendado usar motores diseñados para estos fines específicos.
- De igual forma que en el diseño de la viga principal, en las columna es importante tener en cuenta factores indispensables para su diseño y selección como: longitud efectiva, momento de inercia, área de la sección del perfil, y radio de giro entre otros, pues es crítico el correcto uso de la ecuación de “*Johnson*” o de “*Euler*” para el correcto diseño de dicha pieza.
- El uso de “banderas” o “marcas” en la programación de un P.L.C, aunque no es estrictamente necesario, es muchas veces indispensable para darle un orden lógico y generar un código un poco más fácil de entender y corregir.
- En procesos donde la seguridad es vital, la “redundancia” tanto de los sensores, como de las variables dentro de la programación de un P.L.C, juegan un papel muy importante para brindarle mayor confiabilidad al código y por ende al proceso en general.
- En el momento de programar, siempre se debe prever el peor de los casos y crear soluciones oportunas para el mismo por medio de código.

- La utilización de herramientas computacionales, fue importante y necesario para brindarle seguridad y mayor confiabilidad al diseño del transportador automático bidimensional; por medio de las simulaciones.
- En proyectos que impliquen altos costos de adquisición y montaje, el uso de simulaciones es perfectamente válido.
- El diseñador, debe tener presente en su mente una imagen de su producto pero ligado a la realidad, siempre se debe pensar en las necesidades del cliente y el operario, por encima de todo.
- Todo ingeniero mecatrónico, debe tratar por medio de sus conocimientos, eliminar tareas repetitivas en procesos industriales y plantear soluciones a problemas que atenten contra la integridad y/o la salud de quienes estén involucrados dentro del mismo.
- Muchas veces, los problemas ya tienen solución, pero no lo sabemos; todo radica en investigar y profundizar en el tema y si ese el caso, el trabajo del ingeniero radicará en adaptar dicha solución y darle un “valor agregado”.
- Por lo general, siempre existirán varias soluciones a cada problema de ingeniería. La labor del ingeniero consiste en encontrar la solución más indicada teniendo en cuenta las necesidades, la seguridad, y el presupuesto del cliente.
- Muchas veces la solución no es la más complicada, ni la más sencilla, todo radica en la capacidad del ingeniero para ser observador y desarrollar su imaginación en torno a la misma.
- Las opiniones y los conceptos de los demás siempre serán constructivas y ayudarán por lo general a madurar la idea en proceso de formación.

- Siempre al comenzar a desarrollar una idea, se debe pensar en los costos y accesibilidad la materia prima y materiales necesarios para hacerla realidad dentro de la zona o región donde se quiera llevar a cabo el proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

1. BEATY, Wayne. Manual del Motor Eléctrico. México: McGraw-Hill. 2000. 1-12 p.
2. BROCKENBROUGH, Roger. Manual de Diseño de Estructuras de Acero. Segunda Edición. Bogotá: McGraw-Hill. 1997. 51-57p.
3. BOLTON, W. Ingeniería de Control. Segunda Edición. México: Alfaomega. 2001, 43-63 p.
4. Catálogo de Convertidores de Frecuencia - Micromaster. Siemens. Alemania: Siemens, 2002
5. Catálogo de Productos. Cia. General de Aceros. Bogotá: Cia. General de Aceros, 2002.
6. Catálogo de Productos. Coffing Hoists. USA: Coffing Hoists, 2002.
7. CHAPMAN, Stephen. Máquinas Eléctricas. Tercera Edición. Bogotá: McGraw-Hill, 2000.
8. COM3LAB - Interactive Desktop Lab [CD-ROM]: Leybold Didactic GMBH, [Germany, 2000]. D-S0354 Huerth.
9. CORRIPIO, SMITH. Control Automático de Procesos – Teoría y Práctica. México: Editorial Limusa, 1999

10. ETTER, Dolores. Solución de Problemas de Ingeniería con Matlab. Segunda Edición. Colorado: Prentice Hall, 1998.
11. HELLMUT, Ernst. Aparatos de Elevación y Transporte. Tomo 2. Barcelona: Editorial Blume, 1969.
12. MCCORMAC, Jack. Diseño de Estructuras de Acero Método LRFD. México: Alfaomega. 1996, p. 159-165.
13. MOTT, Robert. Resistencia de Materiales Aplicada. Tercera Edición. México: Prentice Hall, 1996.
14. MOTT, Robert. Diseño de Elementos de Máquinas. Segunda Edición. México: Prentice Hall, 1992.
15. OGATA, Katsuhiko. Problemas de Ingeniería de Control Utilizando Matlab. Madrid: Prentice Hall, 1998.
16. PARDO, Aldo. Control de Motores en el Área Industrial. Mérida-Venezuela: II Simposio Internacional de Automatización y Nuevas Tecnologías, 2002.
17. PARDO, Aldo. Accionamientos de CA a Frecuencia Variable. Colombia: Universidad de Pamplona, 2001.
18. POSSO, Raúl. Manejo de Transporte de Materiales – Grúas. Segunda Parte. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 1985.
19. Disponible en Internet: <http://www.asimet.cl/galvanizado.htm>

20. Disponible en Internet: <http://www.construaprende.com/Trabajos/Apuntes1/A1pag29.html>
21. Disponible en Internet: <http://www.fornvalls.com/contenido2.htm>
22. Disponible en Internet: <http://www.grugalva.com.mx/proceso.htm>
23. Disponible en Internet: [http://www.grupo-maser.com/PAG_Cursos/Auto/auto2/auto2/PAGINA% 20PRINCIPAL/Automatizacion/Automatizacion.htm](http://www.grupo-maser.com/PAG_Cursos/Auto/auto2/auto2/PAGINA%20PRINCIPAL/Automatizacion/Automatizacion.htm)
24. Disponible en Internet: http://www.infra.com.mx/productos/electodos/ / clasificacion_electro.htm
25. Disponible en Internet: <http://www.monografias.com/trabajos14/uniones-desarmables/uniones-desarmables.shtml>
26. Disponible en Internet: <http://personal3.iddeo.es/joseor/plcs.htm>
27. Disponible en Internet: [http://www.vendo.com.pe/Accesorios/Caracteristicas %20de%20los%20pernos%20imperiales.htm](http://www.vendo.com.pe/Accesorios/Caracteristicas%20de%20los%20pernos%20imperiales.htm)