

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“CONFIGURACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL
SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE BARRAS
CALIENTES PARA UNA PRENSA HIDRÁULICA”.**

INFORME DE SUFICIENCIA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
*INGENIERO MECÁNICO***

ALEJANDRO TAKENORI HIGA HIGA

PROMOCIÓN 2001-II

LIMA-PERÚ

2012

CONTENIDO

PROLOGO	1
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Objetivo General	3
1.3. Objetivos Específicos	4
1.4. Justificación	4
1.5. Alcances	5
1.6. Recursos	6
2.DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	8
2.1. Sistema de Alimentación de barras calientes	8
3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	12
3.1. Diagrama de flujo del sistema.	12
3.2. Alimentación manual de barras calientes	12
4. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y ALCANCE DE LA SOLUCIÓN	15
4.1. Nivel de producción encontrado	15
4.2. Nivel de riesgo encontrado	16
4.3. Identificación del problema	17
4.4. Identificación del problema	19
4.5. Hipótesis de trabajo	19
5. MARCO TEÓRICO	21
5.1. Cinemática directa e inversa	21
5.2. Parámetros Denavit-Hartenberg	23
5.3. Matriz Jacobiana	32
5.4. Configuraciones singulares	34
5.5. Tipos de coordenadas empleadas	35

5.6.	Movimiento del brazo robótico	39
5.7.	Carga de un robot	41
5.8.	Velocidad de un robot	41
5.9.	Repetitividad de un robot	41
5.10.	Exactitud del robot	41
5.11.	Concepto de lenguaje de alto nivel para programación de un robot	43
6.	DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN	46
6.1.	Diagrama de medios-fines	46
6.2.	Configuración del sistema	46
6.3.	Implementación del sistema	54
6.4.	Pruebas preliminares de producción	65
6.5.	Estimado de costos y tiempos necesarios	68
	CONCLUSIONES	71
	RECOMENDACIONES	73
	BIBLIOGRAFÍA	74
	ANEXOS	75

PROLOGO

El presente informe consta de seis capítulos y presenta la forma como se ha configurado e implementado el sistema de alimentación de barras calientes para una prensa hidráulica que forma bolas de molienda de acero al carbón.

En el primer capítulo se presenta el tema analizando los antecedentes, objetivos, la justificación de su realización, los alcances y los recursos.

En el segundo capítulo se describe el producto obtenido del proceso de conformado. El producto son bolas para molienda sin tratamiento térmico. Las bolas para molienda después del proceso de conformado pasan a una serie de tratamientos térmicos para darle las propiedades finales que necesita una bola para molienda. La dureza, resistencia al desgaste, resistencia al impacto son algunas de las principales propiedades de las bolas para molienda.

El tercer capítulo describe el proceso de conformado de las bolas de cinco pulgadas para molienda a partir de una barra de aproximadamente siete metros de longitud y un diámetro de 3.25 pulgadas. Las bolas se conforman en caliente con una prensa hidráulica.

En el cuarto capítulo identificamos el problema. Al analizar el sistema, se determina que el operador es el cuello de botella de la línea de producción. La necesidad de aumentar la producción nos lleva a buscar una forma más rápida de alimentar la prensa hidráulica, para lo cual se utilizará con un brazo robótico.

En el quinto capítulo se menciona la teoría referente al mecanismo del brazo robótico, así como los puntos singulares a tomar en cuenta al momento que se programa el robot. Se indica el principio de funcionamiento del brazo robótico.

En el sexto capítulo se desarrolla la solución del problema con la integración de un brazo robótico al sistema de alimentación de barras calientes a una prensa hidráulica. Se detalla el programa del robot y las modificaciones necesarias para que el robot encaje en el sistema.

El informe ha sido desarrollado como requisito para obtener el título profesional de ingeniero mecánico, además constituye un aporte viable para realizar un proceso industrial que brinda desarrollo y beneficios a la actividad minera.

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La demanda de minerales en el Perú está en aumento y con ello crece la necesidad de consumibles en la actividad minería. Las bolas de acero para molienda de minerales es un consumible en la minería. La demanda de las bolas de acero, por lo tanto, se ha incrementado en los últimos años y los nuevos proyectos mineros dan como resultado la necesidad de incrementar la producción de bolas de molino en todas las medidas. En el mercado peruano tenemos una necesidad de producción que se ha incrementado en 80% teniendo competencia local y extranjera.

1.2. Objetivo General

El objetivo general es configurar e implementar un sistema de alimentación de barras calientes de acero de 3.25 pulgadas de diámetro y 20.5 cm de longitud para aumentar la producción a 3 toneladas por hora y conseguir un grado de seguridad de los operarios del 100 por ciento.

1.3.Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- 1°. Configurar un sistema de alimentación de barras calientes de acero de 3.25 pulgadas de diámetro y 20.5 cm de longitud para aumentar la producción a tres toneladas por hora y conseguir un grado de seguridad de los operarios.
- 2°. Implementar un sistema de alimentación de barras calientes de acero de 3.25 pulgadas de diámetro y 20.5 cm de longitud para aumentar la producción a tres toneladas por hora y conseguir un grado de seguridad de los operarios.
- 3°. Realizar pruebas de un sistema de alimentación de barras calientes de acero de 3.25 pulgadas de diámetro y 20.5 cm de longitud para aumentar la producción a tres toneladas por hora y conseguir un grado de seguridad de los operarios.
- 4°. Definir los costos y tiempos de fabricación de un sistema de alimentación de barras calientes de acero de 3.25 pulgadas de diámetro y 20.5 cm de longitud para aumentar la producción a tres toneladas por hora y conseguir un grado de seguridad de los operarios.

1.4.Justificación

Académica:

Porque se explica la manera de configurar el sistema de una manera racional, eficaz y eficientemente

Tecnológica:

Porque se desarrollan sistemas productivos localmente que ayudan a producir mayor valor agregado

Productiva:

Porque se alcanzan producciones mayores que originan mayor utilidad económica.

1.5.Alcances

El desarrollo del tema implica los siguientes alcances:

- Implementar una canaleta de cadenas accionado por un motor eléctrico para el desplazamiento de las barras calientes provenientes de la cizalla.
- Programar un brazo robótico para la alimentación de barras calientes a una prensa hidráulica
- Implementar un sistema de extracción de bolas calientes de la prensa hidráulica.
- lograr una producción de 1900 a 2100 toneladas por mes de bolas de acero prensadas.

Se desarrollaran los siguientes pasos:

- 1°. Configurar de un sistema de alimentación de barras calientes.
- 2°. Implementar de un sistema de alimentación de barras calientes.

- 3°. Realizar las pruebas preliminares de funcionamientos.
- 4°. Determinar los costos y tiempos de fabricación.
- 5°. Luego de cumplir con lo anterior, realizar la prueba final para comprobar que el alimentador de las barras calientes es confiable y eficiente, al lograr una producción de bolas de acero prensadas en un rango de 1900 toneladas a 2015 toneladas por mes.

1.6.Recursos

El presente trabajo ha sido desarrollado con los siguientes recursos:

- Hardware: brazo robótico, controlador, prensa hidráulica, canaletas.
- Software: INFORM III, AutoCad, MsProject
- Instrumentos de medición: cronómetro (tiempo), centímetro (precisión), bolas de acero (carga).
- Transporte: montacargas, grúa puente
- Recursos humanos: Ing. Mecánico: programación, Técnico electrónico: instalación de señales, tendido eléctrico, sensores, técnico mecánico: sistema neumático, anclaje del robot, guardas de seguridad, supervisor de seguridad: evaluación de riesgos, verificación del cumplimiento con los estándares de la empresa.
- Normas y estándares: La empresa maneja un sistema integrado de gestión en donde están ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001. También maneja un sistema de códigos de práctica segura los cuales van más allá de las normas internacionales vigentes.

- **Manuales:**
 - DX100 instruction for North American
 - DX100 operator's manual for material handling
 - DX100 operation instruction for current I/O
 - DX100 option instruction for inform language
 - DX100 option for manual brake release function
 - Motoman MH50 instruction
- **Basic programing with material handling, training manual**

CAPÍTULO 2.

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

2.1.Sistema de Alimentación de barras calientes

2.1.1. Diagrama de bloques de la planta

La figura 2.1 muestra el diagrama de bloques de la planta

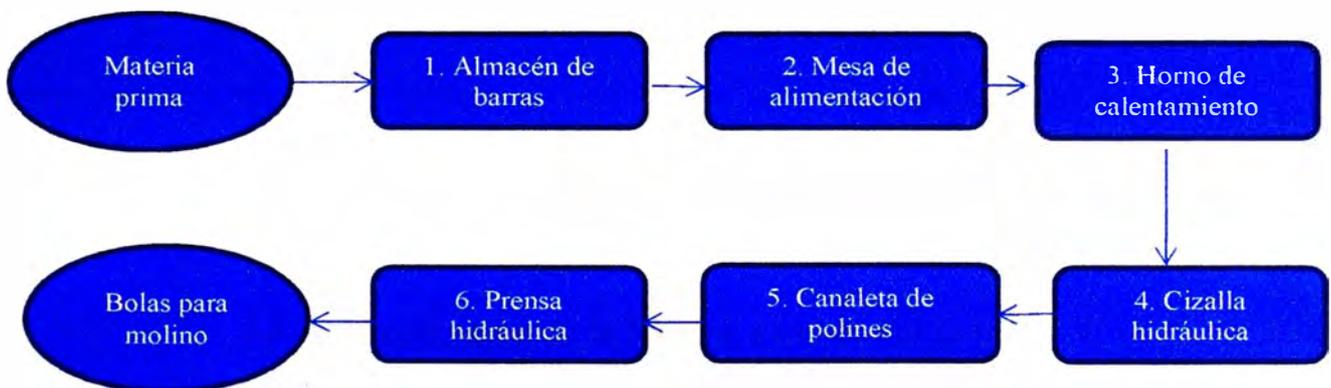


Fig. 2.1. Diagrama de bloques de la planta

2.1.2. Ubicación de los componentes de la planta

La figura 2.2 muestra la ubicación de los componentes de la planta

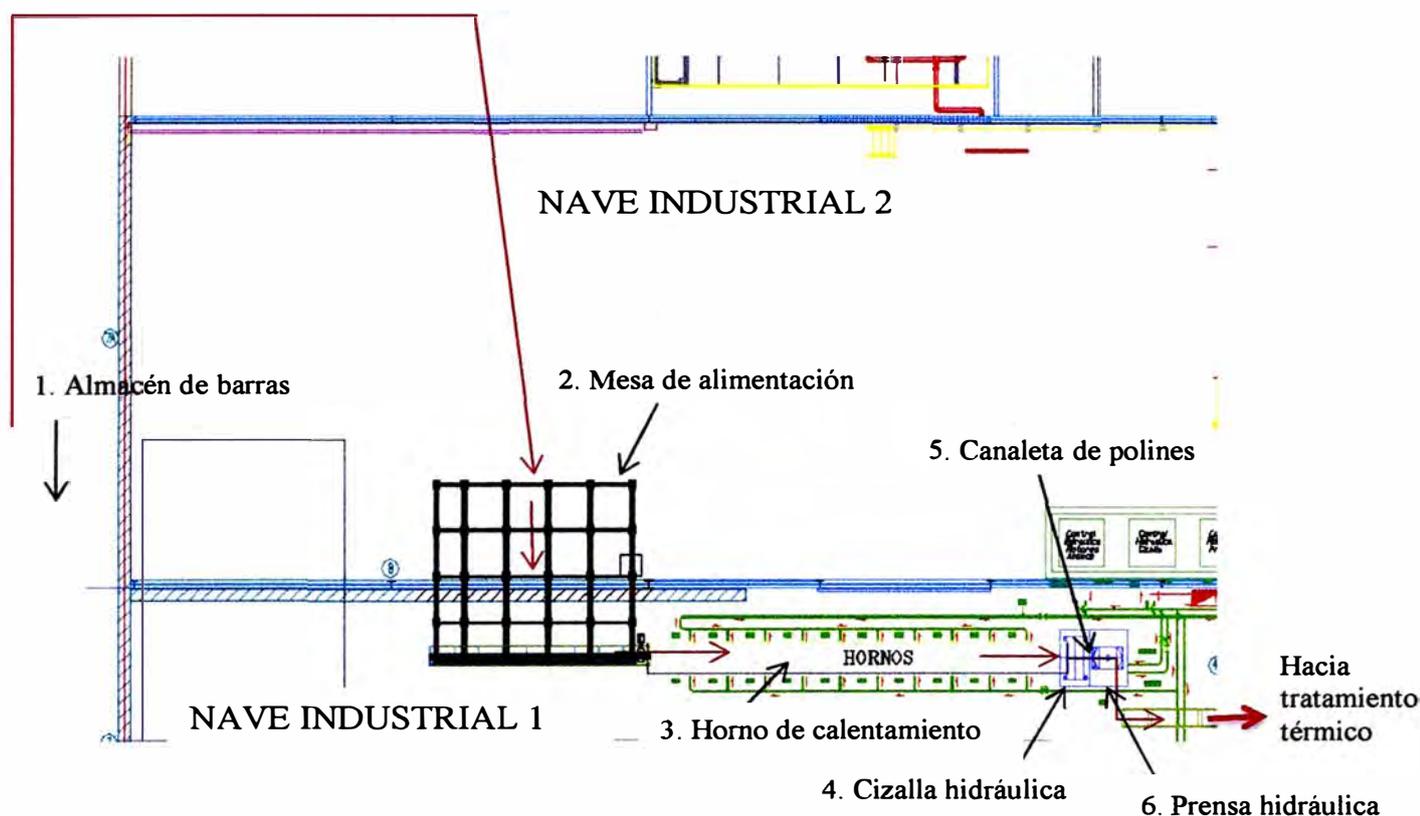


Fig. 2.2. Ubicación de los componentes en la planta

2.1.3. Explicación de la función de cada subsistema

Barras de acero: Barras de acero al carbono con contenido de carbono mayor al 0.8% y micro aleaciones para darle al producto terminado mejores propiedades de resistencia al impacto y al desgaste. Vienen en diámetro de 3.25 pulgadas y una longitud aproximada de siete metros. Las barras se obtienen por proveedores locales como también extranjeros. Las barras vienen en paquetes de tres toneladas aproximadamente. Las barras se transportan a la mesa de alimentación a través de un montacargas.

- 1°. Almacenamiento de barras: Las barras se apilan por paquete. Cada paquete tiene un peso aproximado de tres toneladas. Se tienen hasta cinco niveles de barras entre los cuales van unos separadores para que pueda entrar las uñas del montacargas.
- 2°. Mesa de alimentación: Sistema mecánico para alimentar las barras una por una hacia el proceso de producción. Consiste en un plano inclinado donde se coloca el paquete de barras y se corta las amarras de las mismas. Después sigue un plano de mayor inclinación donde las barras se alinean una por una. Al final del plano existe topes para retener las barras. Finalmente tenemos un sistema de alimentación neumático consistente de pistones y polines. El sistema “pinch and roll” son dos ruedas (superior e inferior) que sujetan la barra y la desplaza hacia el horno a la velocidad adecuada para su calentamiento.
- 3°. Horno de calentamiento: consiste de módulos cilíndricos con quemadores a los lados. Los quemadores son a gas natural. Es un horno abierto con flujo constante de material. Al final del horno también tenemos un sistema “pinch and roll” para sujetar la barra al momento de ser cortada por la cizalla.
- 4°. Cizalla: es una prensa hidráulica con una cuchilla para cortar la barra a las dimensiones requeridas para formar la bola. La longitud puede ser regulada manualmente por un tornillo y un sensor en su extremo que manda una señal para detener el “pinch and roll” y cortar la barra.

- 5°. Canaleta de polines: una canaleta inclinada con polines para que la barra cortada se deslice por gravedad y se ubique cerca del operador para su alimentación hacia la prensa hidráulica.
- 6°. Prensa hidráulica: una prensa hidráulica de 400 toneladas para forjar la barra en caliente. Se utilizan dos estampas semi-esféricas (superior e inferior) para dar la forma a la bola. El operador coloca el pedazo de barra caliente en la prensa hidráulica para su deformación en bola caliente.

CAPÍTULO 3.

DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

3.1. Diagrama de flujo del sistema.

3.1.1. Flujo del proceso productivo

En la figura 3.1 se muestra el flujo del proceso de producción de bolas de cinco pulgadas para molienda de minerales a partir de barras de 3.25 pulgadas de diámetro y aproximadamente siete metros de longitud. En este proceso se utiliza una prensa hidráulica de cuatrocientos toneladas.

3.2. Alimentación manual de barras calientes

3.2.1. Detalle del proceso de la alimentación manual

La cizalla corta la barra caliente una longitud necesaria para formar la bola en la prensa hidráulica, de ahí la barra caliente cae por gravedad a través de una canaleta de polines hasta la prensa hidráulica. Un operador utiliza una tenaza para sujetar la barra caliente, levantarla y colocarla en la prensa. El operador mantiene la barra en posición vertical entre las estampas de la prensa hasta que la prensa baje y llegue a sujetar la barra. Usualmente el operador realiza una segunda operación de prensado de la bola, rotándolo en cualquier sentido para borrar cualquier

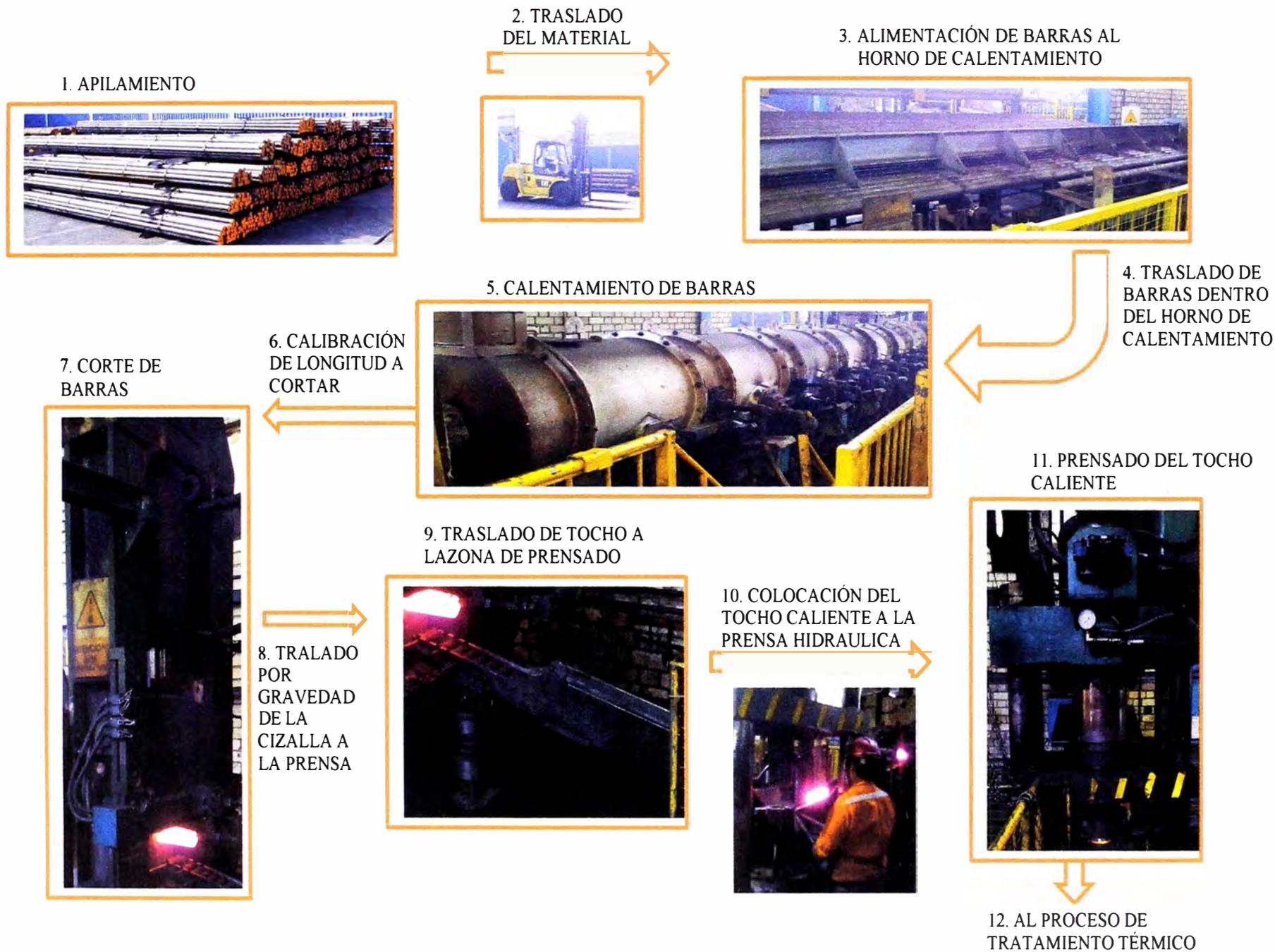


Fig. 3.1. Diagrama de flujo del sistema de conformado de bolas para molienda

imperfección producto del proceso. Las barras vienen en longitudes aproximadas de siete metros y los pedazos de barras para generar la bola son de unos 20.5 centímetros de longitud. Al final de cada barra sobra un tramo de barra que no llega a la longitud requerida “la cola” el cual el operador tiene que tomar con la tenaza y llevarlo a un cilindro para su desecho.

CAPÍTULO 4.

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA Y ALCANCE DE LA SOLUCIÓN

4.1. Nivel de producción encontrado

4.1.1. Historia de la capacidad de producción vs la demanda

En la figura 4.1 se muestra la capacidad instalada de la planta y el crecimiento de la demanda desde el año 2005 hasta el año 2012 en bolsas de cinco pulgadas. Se aprecia que desde el 2011 la demanda ya supera la capacidad de producción de la planta.

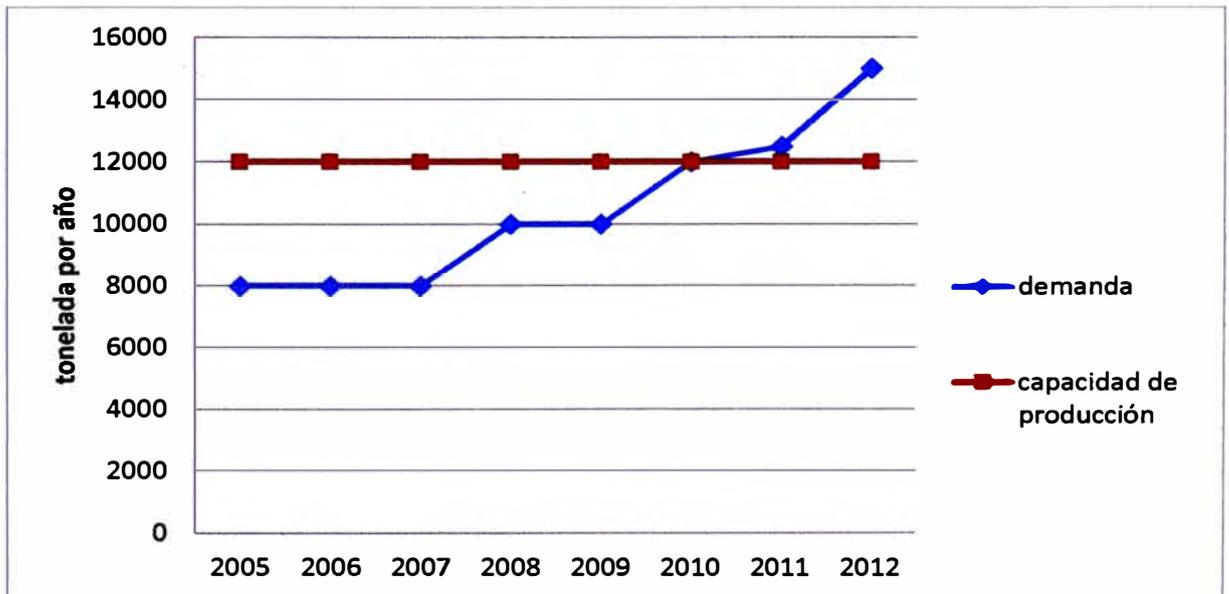


Fig. 4.1 Nivel de producción de la empresa vs la demanda del mercado

4.1.2. Proyección de la demanda

La figura 4.2 muestra una proyección de la demanda hasta el año 2022 para bolas de cinco pulgadas.

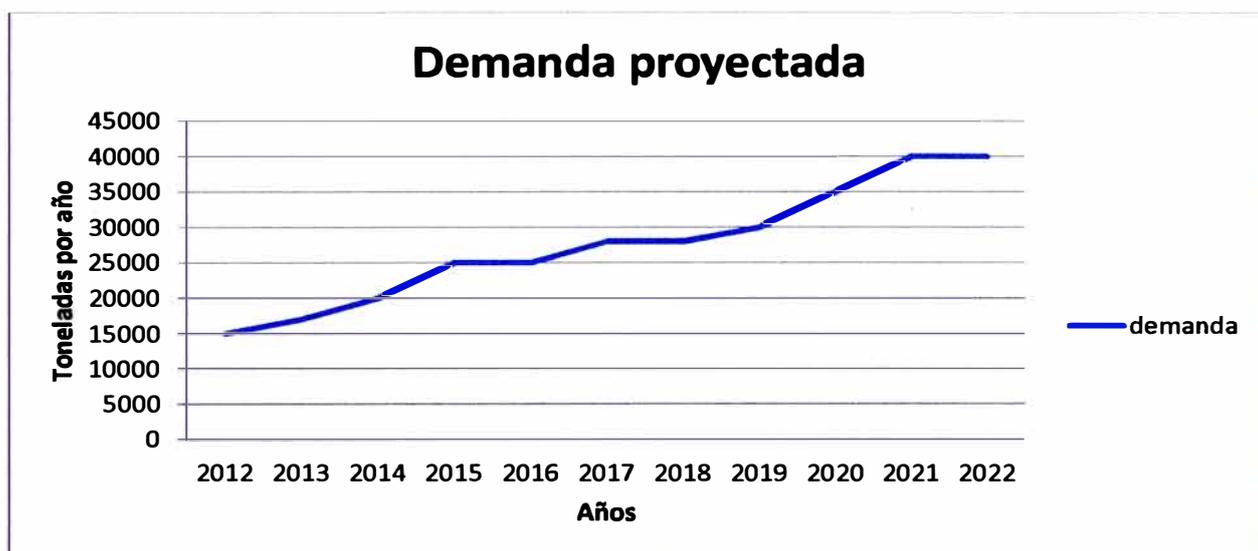


Fig. 4.2 Demanda proyecta hasta el año 2020

4.2. Nivel de riesgo encontrado

4.2.1. Descripción del equipamiento de protección encontrado

Equipos de protección personal:

- Casco
- Lentes de grado tres
- Guantes de cuero para soldadura
- Zapatos de seguridad con punta de acero
- Careta
- Mandil de soldadura
- Tapones para orejas

Equipos adicionales:

Ventilador para escamilla

Botones de parada de emergencia

Administrativos:

Procedimiento de prensado.

Procedimiento para cambio de estampas.

Procedimiento de aislamiento de equipo.

Procedimiento para trabajos en calientes.

4.2.2. Grado de riesgo encontrado

Para valorar el grado del riesgo se ha utilizado la escala de puntuación de Anglo American PLC, y se muestra en la tabla 4.1. Como se observa en la tabla 4.1 en nivel del riesgo del paso uno, dos y seis es alto por lo tanto requiere una acción preventiva desde el punto de vista de seguridad.

4.3. Identificación del problema

Considerando:

- a. Que la demanda supera la oferta actual de producción de la empresa.
- b. Que existe una proyección de demanda al alza.
- c. El aumentar la producción demanda condiciones más seguras de operación.

Se plantea el problema mediante la siguiente interrogante:

¿Es factible configurar e implementar un sistema de alimentación de barras calientes de acero de 3.25 pulgadas de diámetro y 20.5 cm de

longitud para aumentar la producción a tres toneladas por hora y conseguir un grado de seguridad de los operarios del 100 por ciento?

Tabla 4.1 Nivel de evaluación de riesgo del trabajo en la prensa hidráulica

No.	Paso / Tarea	Análisis			
		Probabilidad	Consecuencias	Valor de riesgo	Nivel de riesgo
1	Se coge el Tocho con la tenaza	3	3	13	H
2	Se despliega el Tocho sobre la estampa inferior en forma vertical	3	3	13	H
3	Se procede a realizar el conformado de la bola accionando los pedales dela prensa.	3	2	8	M
4	Si es necesario se realiza de 2 golpes para alcanzar una mejor cosmética	3	2	8	M
5	Golpear la bola con un martillo o con la punta de la tenaza para que se despegue de la estampa inferior/superior	3	2	8	M
6	Con la tenaza se empuja la bola de la estampa inferior, para que caiga hacia la canaleta	3	3	13	H

La tabla completa se muestra en el anexo A.1 y la matriz de riesgos se muestran en el anexo A.2.

4.4. Identificación del problema

Considerando:

- d. Que la demanda supera la oferta actual de producción de la empresa.
- e. Que existe una proyección de demanda al alza.
- f. El aumentar la producción demanda condiciones más seguras de operación.

Se plantea el problema mediante la siguiente interrogante:

¿Es factible configurar e implementar un sistema de alimentación de barras calientes de acero de 3.25 pulgadas de diámetro y 20.5 cm de longitud para aumentar la producción a tres toneladas por hora y conseguir un grado de seguridad de los operarios del 100 por ciento?

4.5. Hipótesis de trabajo

Considerando:

- a. Que la planta tiene capacidad potencial de crecimiento.
- b. Que si el porcentaje de participación de la empresa en el mercado se mantiene, al aumentar la demanda, se garantizara una mayor venta.
- c. Si se usa sistema mecánicos autónomos además de aumentar la producción redundara la no intervención de operarios, por lo tanto disminuyendo el riesgo correspondiente

Se puede plantear la siguiente hipótesis que constituyó el punto de partida para resolver el problema ordenada y sistemáticamente, expresada de la manera siguiente:

Es factible configurar e implementar un sistema de alimentación de barras calientes de acero de 3.25 pulgadas de diámetro y 20.5 cm de longitud para aumentar la producción a tres toneladas por hora y conseguir un grado de seguridad de los operarios del 100 por ciento

CAPÍTULO 5.

MARCO TEÓRICO

5.1.Cinemática directa e inversa

5.1.1. Cinemática directa

Referencia consultada:

APELLIDO Y NOMBRE DEL AUTOR	Antonio Barrientos
TITULO DEL TEXTO O FUENTE	Fundamentos de Robótica

“La cinemática directa consiste en determinar cual es la posición y orientación final del extremo del robot, con respecto a un sistema de coordenadas que se toma como referencia, conocidos los valores de articulaciones y los parámetros geométricos de los elementos del robot.”

La figura 5.1 muestra un mecanismo de cadena abierta el cual muestra los ángulos conocidos θ_1 , θ_2 y θ_3 , y se pide determinar el punto de referencia en el plano (x,y,ϕ)

Por ejemplo si tuviésemos un sistema de dos grados de libertad x e y que representan la posición del punto de referencia quedarían definidos con las siguientes fórmulas:

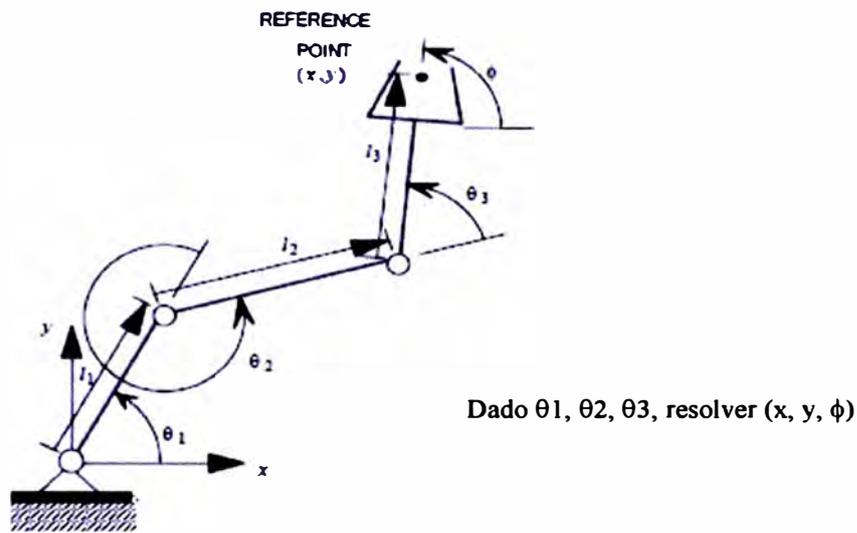


Fig. 5.1. Ubicación de un punto de coordenada en función de los ángulos

$$x = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (5.1)$$

$$y = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (5.2)$$

5.1.2. Cinemática inversa

Referencia consultada:

APELLIDO Y NOMBRE DEL AUTOR	Antonio Barrientos
TITULO DEL TEXTO O FUENTE	Fundamentos de Robótica

Mediante la cinemática inversa se resuelve se determina los ángulos que debe adoptar el robot para posicionar y orientar el extremo conocido.”

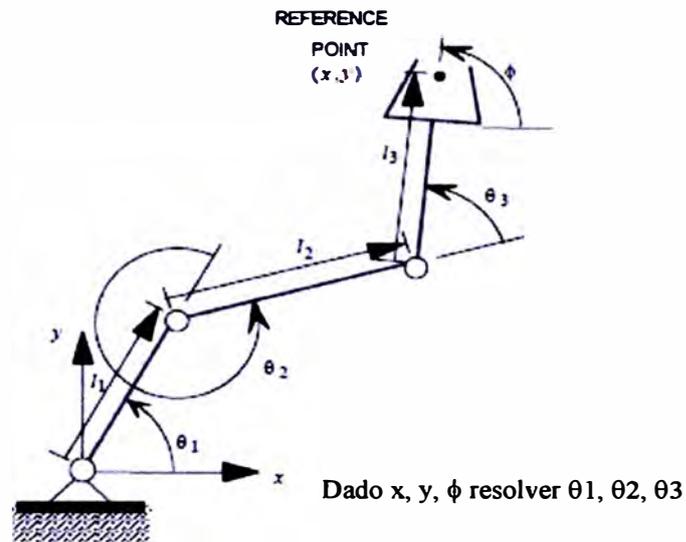


Fig. 5.2. Ubicación de los ángulos dados el punto de coordenadas

Cabe notar que para lograr la ubicación del punto de referencia existen dos alternativas tal como se muestra en el fig. 5.3

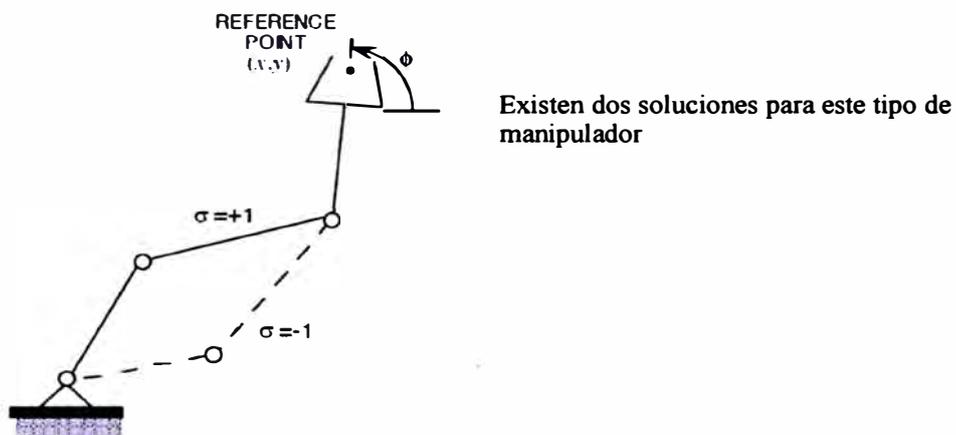


Fig. 5.3. Dos disposiciones de las articulaciones para un solo punto de coordenadas.

5.2. Parámetros Denavit-Hartenberg

5.2.1. Transformación de coordenadas

Referencia consultada:

APELLIDO Y NOMBRE DEL AUTOR	Antonio Barrientos
TITULO DEL TEXTO O FUENTE	Fundamentos de Robótica

Si se tiene un robot con muchos grados de libertad, es difícil resolver el problema cinemático. En este caso se utiliza la transformación de coordenadas. Se define un sistema de coordenadas inicial, generalmente a la base del robot, y en cada eslabón se genera un sistema de coordenadas relativo. Así se puede obtener la posición final de la articulación en función de los parámetros del robot, ya sean por articulación rotativa o prismática.

Un mecanismo es un sistema de cuerpos rígidos o sistemas de referencias A, B y C. Pero D es el sistema de referencia que se considera fijo, ver fig. 5.4.

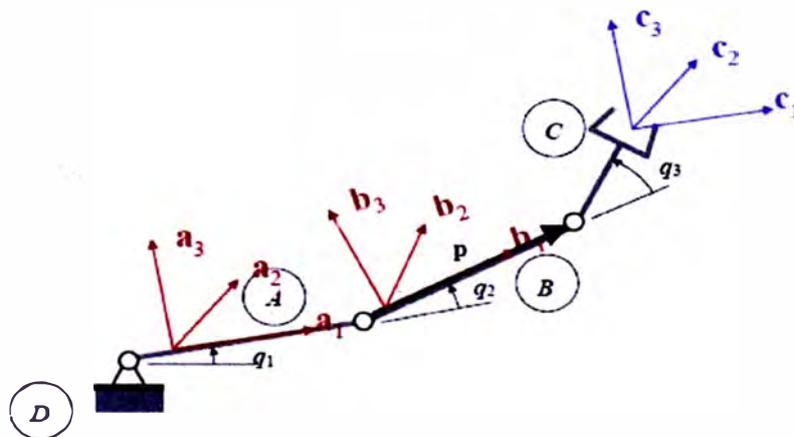


Fig. 5.4. Mecanismo con sistema de referencias A, B, y C. sistema de referencia D se considera fijo

Matriz homogénea de transformación:

Considerar el siguiente sistema A y B, fig. 5.5

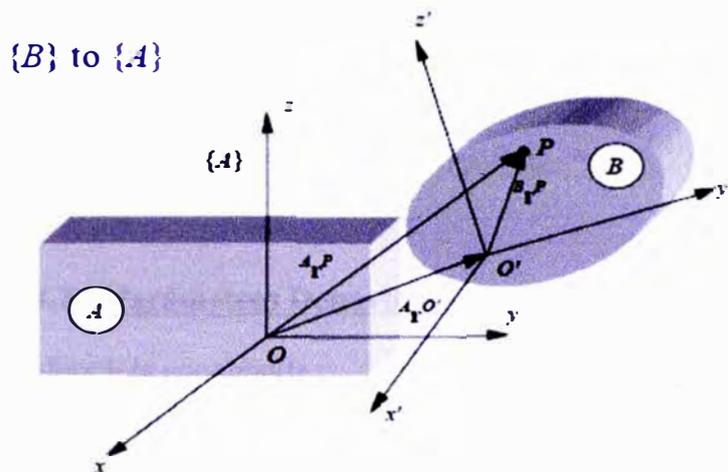


Fig. 5.5. Sistema de referencia A y B en el espacio

$${}^A\mathbf{r}^{P'} = {}^A\mathbf{R}_B \quad {}^B\mathbf{r}^{P'} + {}^A\mathbf{r}^{O'} \quad (5.3)$$

$$\begin{bmatrix} {}^A\mathbf{r}^{P'} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^A\mathbf{R}_B & | & {}^A\mathbf{r}^{O'} \\ \hline \mathbf{0}_{1 \times 3} & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B\mathbf{r}^{P'} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Entonces la matriz homogénea es:

$${}^A\mathbf{T}_B = \begin{bmatrix} {}^A\mathbf{R}_B & | & {}^A\mathbf{r}^{O'} \\ \hline \mathbf{0}_{1 \times 3} & | & 1 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Por ejemplo: matriz con traslación (4, -3, 7) + rotación (y, 90) + rotación (z, 90)

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 4 \\ 1 & 0 & 0 & -3 \\ 0 & 1 & 0 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Entonces un punto (7, 3, 2) sería en el otro sistema (6, 4, 10)

$$\begin{bmatrix} 6 \\ 4 \\ 10 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 4 \\ 1 & 0 & 0 & -3 \\ 0 & 1 & 0 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 7 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Entonces si un robot tiene seis grados de libertad, su matriz de transformación sería:

$$T = {}^0T_6 = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_6 \quad (5.8)$$

5.2.2. Parámetros Denavit-Hartenberg (D-H)

Referencia consultada:

APELLIDO Y NOMBRE DEL AUTOR	Antonio Barrientos
TITULO DEL TEXTO O FUENTE	Fundamentos de Robótica

Para representar la relación existente entre dos elementos contiguos en robótica se suele utilizar la representación de Denavit – Hartenberg (D-H), propuesta en 1955. Es un método matricial que permite establecer de manera sistemática un sistema de coordenadas (S_i) ligado a cada eslabón (i) de una cadena articulada, pudiéndose a continuación determinar las ecuaciones cinemáticas de la cadena completa.

Sólo se necesita cuatro transformaciones básicas para pasar de un sistema al siguiente, siempre y cuando los sistemas (S_{i-1}) y (S_i) se han definido de acuerdo a las normas determinadas por los parámetros D-H. Estas cuatro transformaciones son las siguientes:

1. Rotación alrededor del eje Z_{i-1} un ángulo θ_i : $T(z, \theta_i)$
2. Traslación a lo largo de Z_{i-1} una distancia d_i : $T(0, 0, d_i)$
3. Traslación a lo largo de X_i una distancia a_i : $T(a_i, 0, 0)$
4. Rotación alrededor del eje X_i un ángulo α_i : $T(x, \alpha_i)$,

Conocidas las cuatro transformaciones de los parámetros D-H se puede determinar la transformación resultante de una articulación (i-1) hacia (i) dado por la siguiente ecuación:

$${}^{i-1}A_i = T(z, \theta_i) T(0, 0, d_i) T(a_i, 0, 0) T(x, \alpha_i), \quad (5.9)$$

Esta última fórmula se puede expresar matricialmente de la siguiente manera,

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\text{sen}\theta_i & 0 & 0 \\ \text{sen}\theta_i & \cos\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\text{sen}\alpha_i & 0 \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Luego de simplificarla se obtendrá que:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \text{sen}\theta_i & \text{sen}\alpha_i \text{sen}\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \text{sen}\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\text{sen}\alpha_i \cos\theta_i & a_i \text{sen}\theta_i \\ 0 & \text{sen}\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Donde θ_i , a_i , d_i , α_i son los parámetros D-H del eslabón i.

5.2.3. Procedimiento para obtener los parámetros D-H (θ_i , a_i , d_i ,

α_i)

A continuación se muestran los 16 procedimientos:

- 1° Numerar los eslabones comenzando con 1 (primer eslabón móvil de la cadena) y acabando con n (último eslabón móvil). Se numerará como eslabón 0 a la base fija del robot.

- 2° Numerar cada articulación comenzando por 1 (la correspondiente al primer grado de libertad y acabando en n).
- 3° Localizar el eje de cada articulación. Si esta es rotativa, el eje será su propio eje de giro. Si es prismática, será el eje a lo largo del cual se produce el desplazamiento.
- 4° Para i de 0 a $n-1$, situar el eje Z_i , sobre el eje de la articulación $i+1$.
- 5° Situar el origen del sistema de la base (S_0) en cualquier punto del eje Z_0 . Los ejes X_0 e Y_0 se situaran de modo que formen un sistema dextrógiro con Z_0 .
- 6° Para i de 1 a $n-1$, situar el sistema (S_i) (solidario al eslabón i) en la intersección del eje Z_i con la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i . Si ambos ejes se cortasen se situaría (S_i) en el punto de corte. Si fuesen paralelos (S_i) se situaría en la articulación $i+1$.
- 7° Situar X_i en la línea normal común a Z_{i-1} y Z_i .
- 8° Situar Y_i de modo que forme un sistema dextrógiro con X_i y Z_i .

- 9° Situar el sistema (S_n) en el extremo del robot de modo que Z_n coincida con la dirección de Z_{n-1} y X_n sea normal a Z_{n-1} y Z_n .
- 10° Obtener θ_i como el ángulo que hay que girar en torno a Z_{i-1} para que X_{i-1} y X_i queden paralelos.
- 11° Obtener d_i como la distancia, medida a lo largo de Z_{i-1} , que habría que desplazar (S_{i-1}) para que X_i y X_{i-1} quedasen alineados.
- 12° Obtener a_i como la distancia medida a lo largo de X_i (que ahora coincidiría con X_{i-1}) que habría que desplazar el nuevo (S_{i-1}) para que su origen coincidiese con (S_i).
- 13° Obtener α_i como el ángulo que habría que girar entorno a X_i (que ahora coincidiría con X_{i-1}), para que el nuevo (S_{i-1}) coincidiese totalmente con (S_i).
- 14° Obtener las matrices de transformación $i-1A_i$.
- 15° Obtener la matriz de transformación que relaciona el sistema de la base con el del extremo del robot $T = {}^0A_1, {}^1A_2 \dots {}^{n-1}A_n$.
- 16° La matriz T define la orientación (submatriz de rotación) y

posición (submatriz de traslación) del extremo referido ala base en función de las n coordenadas articulares.

En la figura 5.6 se muestra los parámetros D-H (θ_i , a_i , d_i , α_i) para un brazo (i) en un robot tipo puma modelo 560 con seis grados de libertad

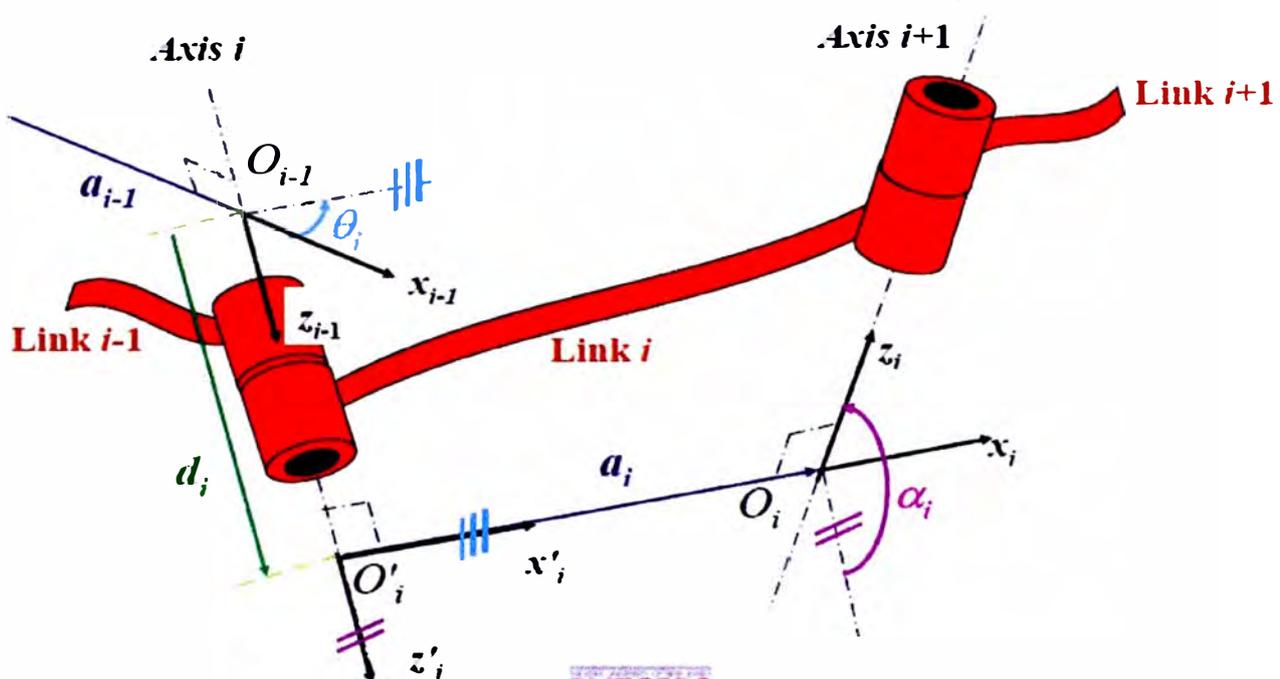


Fig. 5.6. Parámetros D-H para un brazo (i) de un manipulador

La tabla 5.1 muestra los parámetros D-H del brazo robótico de la figura 5.7 en la que se resalta el parámetro a_2

Tabla 5.1 Parámetros D-H del brazo robótico PUMA 560

i	a_i	d_i	α_i	θ_i
1	0	0	90	var
2	a_2	d_2	0	var
3	0	0	90	var
4	0	d_4	90	var
5	0	0	90	var
6	0	d_6	0	var

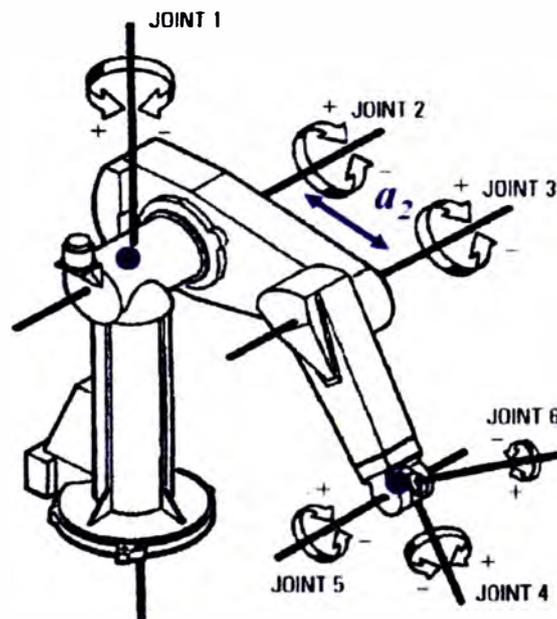


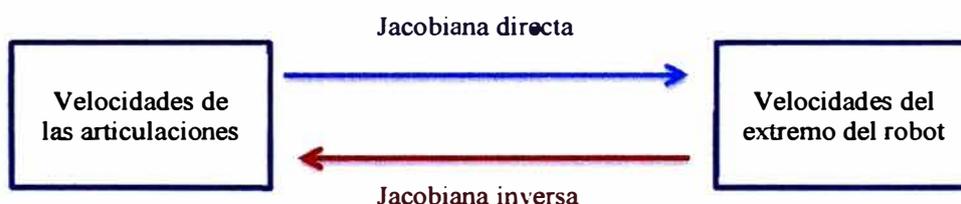
Fig.5.7. Para un brazo PUMA 560 con seis grados de libertad

5.3. Matriz Jacobiana

5.3.1. Matriz Jacobiana directa

El sistema de control del robot debe establecer que velocidades debe imprimir a cada articulación para conseguir que el extremo desarrolle una trayectoria temporal correcta.

Por eso es necesario disponer de una relación entre las velocidades de las coordenadas articulares y las de la posición y orientación del extremo del robot. La relación entre ambos vectores de velocidades se obtiene a través de la denominada matriz Jacobiana.



Para obtener la relación entre las velocidades de las articulaciones y del extremo del robot, se toman la derivadas de las ecuaciones del modelo cinemático directo. Si tomamos un robot en el sistema cartesiano, entonces el extremo del robot se encuentra en el punto (x, y, z) con una orientación (α, β, γ) y el robot tiene n grados de libertad (q_1, q_2, \dots, q_n) , entonces:

$$x = f_x(q_1, \dots, q_n) \quad y = f_y(q_1, \dots, q_n) \quad z = f_z(q_1, \dots, q_n) \quad (5.12)$$

$$\alpha = f_\alpha(q_1, \dots, q_n) \quad \beta = f_\beta(q_1, \dots, q_n) \quad \gamma = f_\gamma(q_1, \dots, q_n) \quad (5.13)$$

Si se derivan con respecto al tiempo entonces:

$$\dot{x} = \sum_1^n \frac{\partial f_x}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad \dot{y} = \sum_1^n \frac{\partial f_y}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad \dot{z} = \sum_1^n \frac{\partial f_z}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (5.14)$$

$$\dot{\alpha} = \sum_1^n \frac{\partial f_{\alpha}}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad \dot{\beta} = \sum_1^n \frac{\partial f_{\beta}}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad \dot{\gamma} = \sum_1^n \frac{\partial f_{\gamma}}{\partial q_i} \dot{q}_i \quad (5.15)$$

Expresado en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} \quad , J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_x}{\partial q_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_y}{\partial q_1} & \dots & \frac{\partial f_y}{\partial q_n} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Donde J es la matriz jacobiana.

La matriz Jacobiana depende de los valores instantáneos de las articulaciones q_i , por lo tanto el valor de la matriz Jacobiana será diferente en cada momento.

5.3.2. La matriz Jacobiana inversa

Del mismo concepto del anterior la matriz Jacobiana inversa da una relación que permite obtener las velocidades del extremo a partir de las velocidades de las articulaciones. Esto expresado matricialmente se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \vdots \\ \dot{q}_n \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Aunque el planteamiento es simple, resulta laborioso encontrar la inversa de la matriz Jacobiana [J]. Primero que la matriz Jacobiana no siempre es cuadrada, solo será cuadrada cuando el robot sea de seis grados de libertad. Aun así fuese una matriz cuadrada, los elementos

de la matriz Jacobiana son funciones trigonométricas y su inversa de 6×6 lo que hace compleja su calculo, resultando poco practico.

Una segunda y mejor alternativa es la evaluación numérica de la matriz Jacobiana para una determinada configuración de articulaciones, después determinar su inversa lo que hace el cálculo mas practico. Tenemos que tener en cuenta que el valor numérico de la matriz Jacobiana cambia a medida que el robot se mueve y se debe calcular sus valores constantemente mientras se mueve el robot. También existen muchas configuraciones en las cuales la matriz Jacobiana no tiene inversa. Estos puntos son los puntos singulares. Así mismo existe la posibilidad de que la matriz no sea cuadrada, en todo caso, y cuando esto ocurra se podrá usar un tipo de matriz pseudoinversa, que puede tener la forma $(J J^T)^{-1}$

La tercera alternativa que también requiere un procedimiento algebraico de calculo complicado parte del modelo cinemático inverso, lo que permite obtener las derivada de las ecuaciones generadas y por lo tanto encontrar la matriz jacobiana inversa.

5.4. Configuraciones singulares

Físicamente la configuración singular se da cuando en determinado punto el robot pierde o gana grados de libertad y matemáticamente se representa cuando la determinante de la matriz Jacobiana es cero. Generalmente pasa cuando se alinean dos o más ejes de las articulaciones

del robot. En la configuración singular es imposible que su extremo se mueva en una determinada dirección cartesiana.

En el momento de la programación de los movimientos del robot se debe de tener en cuenta los puntos singulares, para evitarlos y también se debe de considerar que para un punto determinado del extremo del robot podrían haber mas de una configuración del robot, debiendo tener cuidado al seleccionar la trayectoria apropiada del robot

Con los resultados del cálculo basados en los conceptos mencionados se puede delinear el algoritmo de movimiento del robot. Dichos conceptos se articulan tal como se muestra en la figura 5.8

5.5. Tipos de coordenadas empleadas

El brazo robótico utilizado, Motoman MH50, tiene diversas opciones de sistema de coordenada: coordenada de articulación, coordenada cartesiana, coordenada cilíndrica, coordenada de herramienta y coordenada de usuario.

5.5.1. Coordenada de articulación

Cada eje del manipulador se mueve independientemente. Como se muestra en la figura 5.9

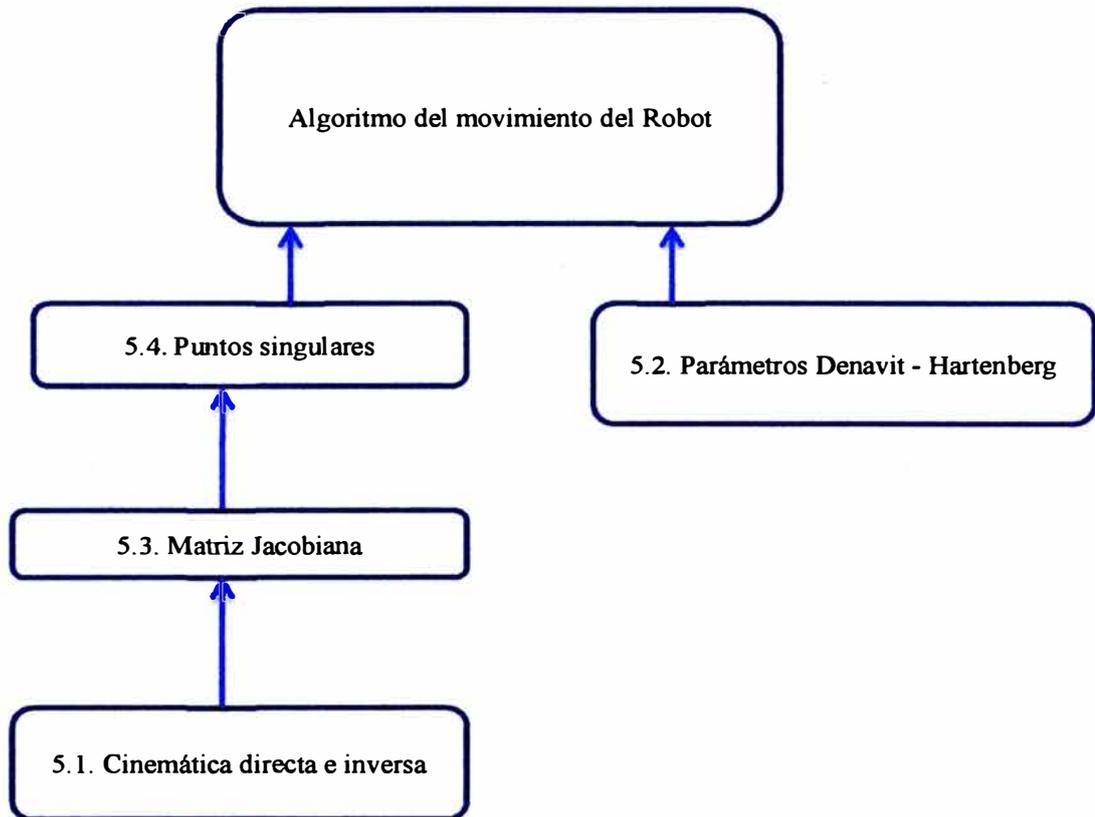


Fig. 5.8 Correlación de conceptos necesarios para perfilar el algoritmo de movimiento del robot.

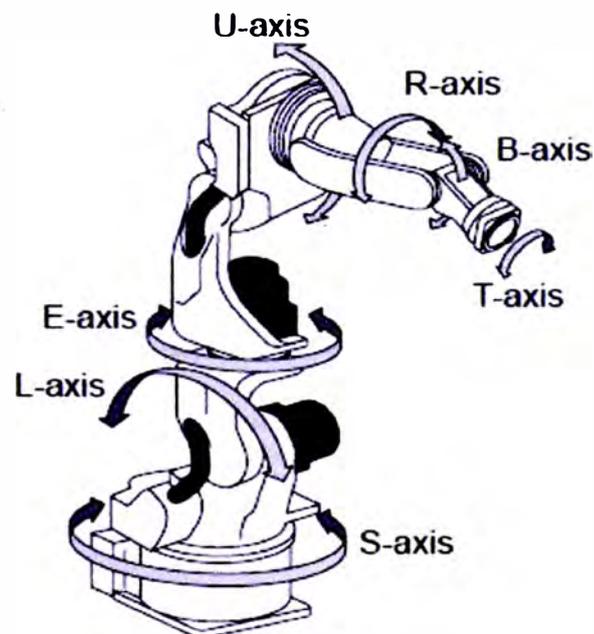


Fig. 5.9 movimientos de los ejes de un robot

5.5.2. Coordenadas cartesianas

El extremo final del manipulador se mueve paralelo a los ejes X-, Y-, Z-, como se muestra en la figura 5.10.

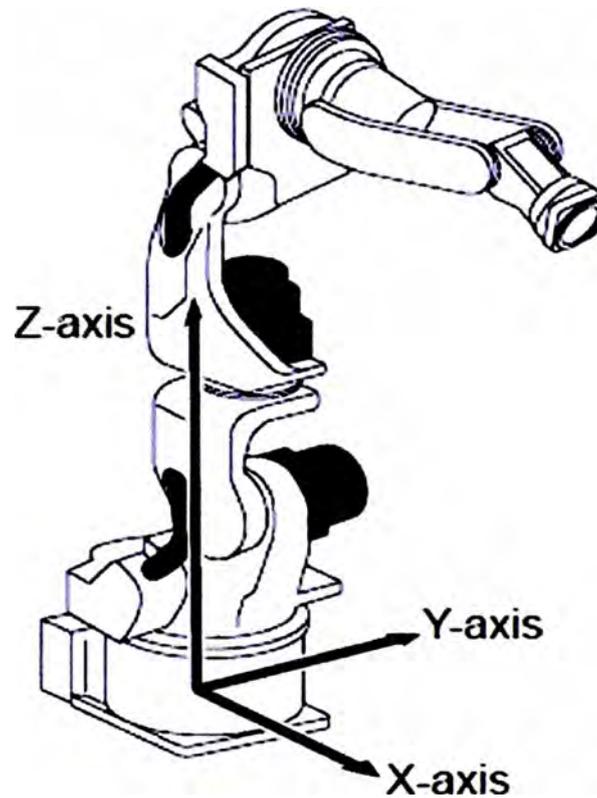


Fig. 5.10. Coordenadas cartesianas del Robot MH-50

5.5.3. Coordenadas cilíndricas

El eje t se mueve alrededor del eje S . El eje r se mueve paralelo al eje L del brazo. Para movimiento vertical, el extremo final del manipulador se mueve paralelo al eje Z , como se muestra en la figura 5.11.

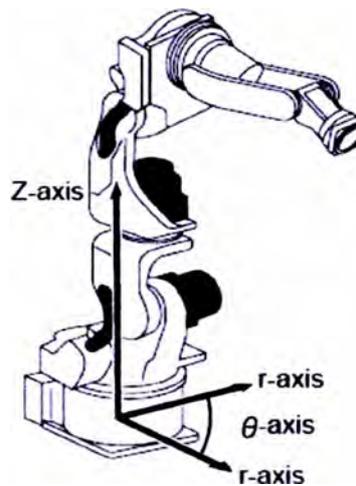


Fig. 5.11 Coordenadas cilíndricas del robot MH-50

5.5.4. Coordenadas de la herramienta

La dirección efectiva de la herramienta montada en la brida al final del brazo, es definido como el eje Z. Este eje controla las coordenadas del punto extremo de la herramienta. Se muestra en la figura 5.12

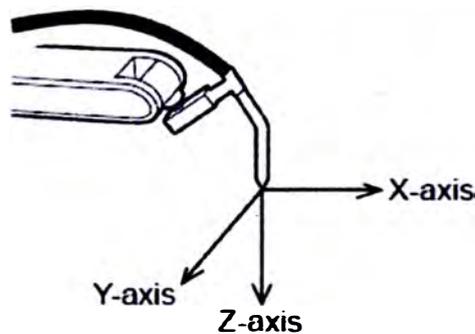


Fig. 5.12. Coordenadas de la herramienta del robot MH-50

5.5.5. Coordenadas del usuario

Las coordenadas XYZ son definidas en cualquier punto y ángulo. El extremo final de la herramienta se mueve paralelo a estos ejes, como se muestra en la figura 5.13

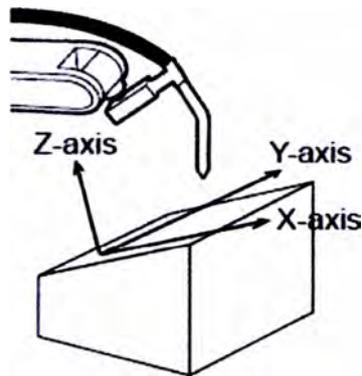


Fig. 5.13 Coordenadas del usuario del robot MH-50

5.6.Movimiento del brazo robótico

El robot puede moverse de las siguientes maneras:

1. **Movimiento por articulación:**

Se utiliza cuando el manipulador no necesita moverse en una ruta determinada hacia el siguiente punto. No se determina la ruta que sigue el manipulador. Se debe tener presente para que el brazo no colisione con otros objetos.

2. **Movimiento lineal:**

El manipulador se mueve en línea recta desde un punto hasta el siguiente.

3. **Movimiento Circular:**

El manipulador se mueve describiendo un círculo que pasa por tres puntos establecidos.

4. **Movimiento spline:**

El manipulador se mueve describiendo una parábola que pasa por tres puntos establecidos.

Tener especial cuidado cuando se programa al robot en coordenadas cartesianas, porque para un punto en el espacio (x,y,z) y ángulos (r_x,r_y,r_z) del extremo final del brazo, pueden existir varias configuraciones de las posiciones del brazo robótico. Al pasar de una posición en estas circunstancias puede causar una colisión porque la ruta a seguir del brazo robótico puede ser inesperada.

Con los conceptos anteriores se puede delinear las bases para la programación del robot según la figura 6.14

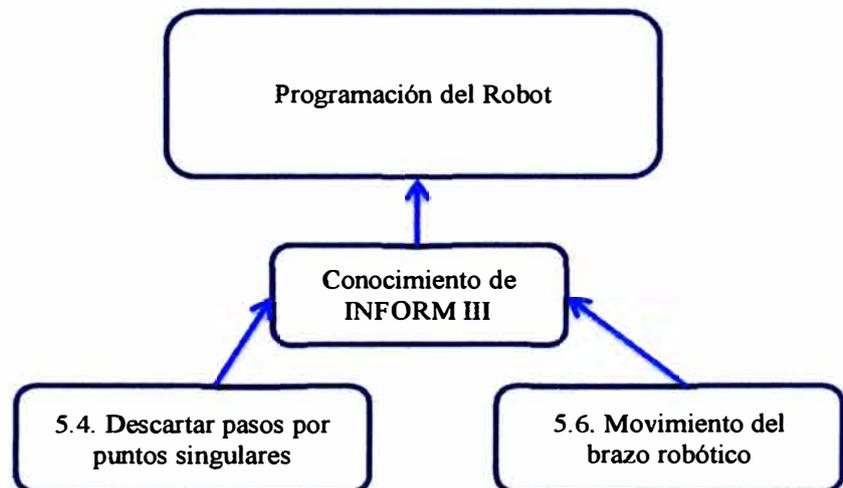


fig. 5.14 Correlación de conceptos necesarios para perfilar las bases para la programación del robot

El INFORM III es el lenguaje de programación del controlador que se ha usado implicando su aprendizaje y dominio especializado. Este lenguaje ha sido desarrollado por Motoman, prestigiosa empresa que fabrica robots y controladores.

5.7. Carga de un robot

Es el peso máximo que puede cargar el brazo robótico unido a punto final. También se conoce como “payload”

5.8. Velocidad de un robot

Es la velocidad máxima que puede alcanzar el punto final del brazo robótico.

Para el caso del robot Motoman MH50 tiene un rango de velocidad lineal desde 0.11cm/s hasta 150cm/s

5.9. Repetitividad de un robot

Es el máximo error de posicionamiento del punto final al repetir el movimiento.

5.10. Exactitud del robot

El manipulador antepone el tiempo de ejecución sobre la exactitud, por lo tanto, la exactitud del robot dependerá de la velocidad del manipulador al pasar por determinado punto.

En caso de requerir mayor exactitud, el controlador tiene una opción al comando de movimiento, denominado nivel de posición (PL) por sus siglas en inglés. Varía desde cero (mayor exactitud) hasta ocho (menor exactitud).

En la figura 5.15 se muestra el nivel de posición (PL) con respecto al punto P2,

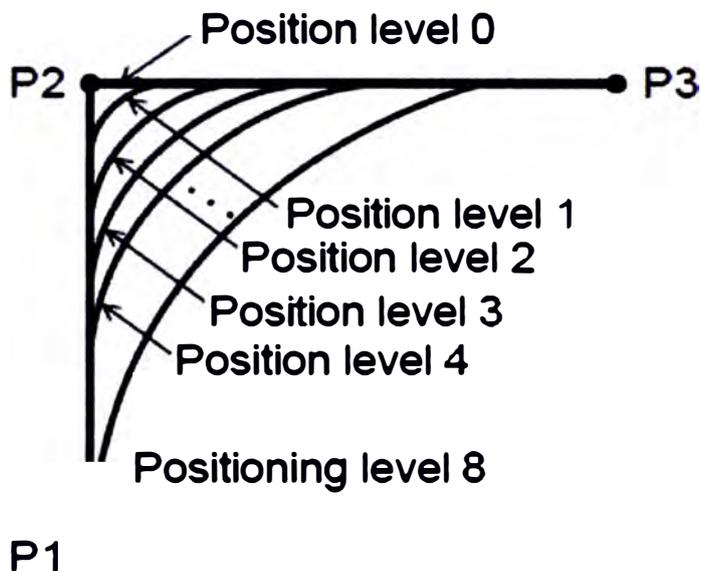


Fig. 5.15. Nivel de posición con respecto al punto P2

Por ejemplo, en la figura 5.16 los puntos P2, P4, y P5 son simplemente puntos de paso, y no requieren una gran exactitud de posición, entonces al adicionar el comando PL desde uno hasta ocho en estos puntos ocasionará que el manipulador describa círculos en estos puntos, por lo tanto reducirá el tiempo de ejecución.

En los punto P3 y P6, si se requiere la posición exacta se utilizará el comando $PL = 0$.

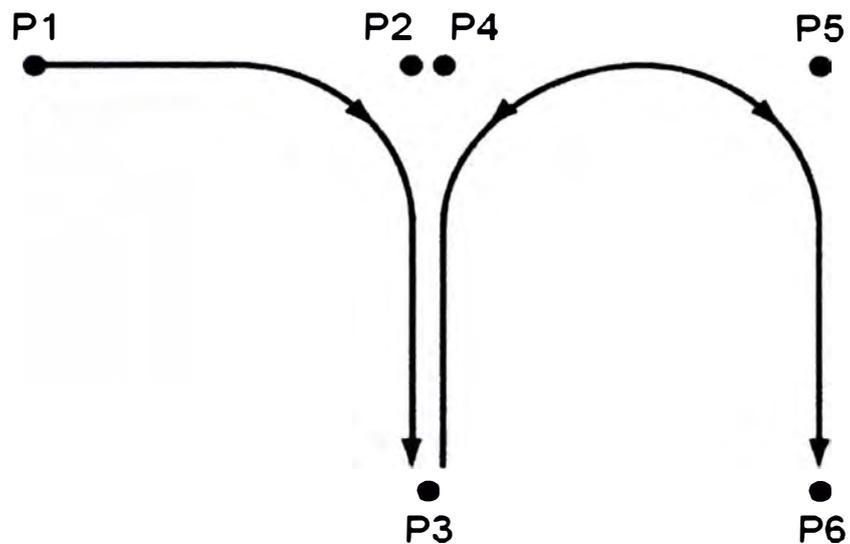


Fig. 5.16. Puntos de pasos P2 , P4 , P5
y puntos exactos P1, P3 y P6

5.11. Concepto de lenguaje de alto nivel para programación de un robot

Lenguaje de alto nivel:

Se define lenguaje de alto nivel al empleado por el operador para comunicarse con el controlador del robot.

El conjunto de instrucciones del lenguaje de alto nivel se clasifican:

- 1°. Configuración inicial.
- 2°. Comandos de movimiento
- 3°. Comandos de señales de entrada y salida
- 4°. Comandos de control
- 5°. Comandos estructurales
- 6°. Alarmas

A continuación se muestra un programa desarrollado utilizando el lenguaje INFORM III para poder entregar hacia la planta de tratamiento térmico una bola de molino prensado hidráulicamente:

```
/JOB  
  
//NAME REJECT  
  
//POS  
  
///NPOS 8,0,0,0,0,0  
  
///TOOL 0  
  
///POSTYPE PULSE  
  
///PULSE  
  
C00000=131976,-110338,-128797,12264,-3668,-48593  
C00001=130141,-71769,-113889,3701,8163,-43450  
C00002=129834,-71546,-121760,3353,11293,-43210  
C00003=129778,-71409,-123157,3303,11896,-43173  
C00004=130196,-71727,-112438,3784,7627,-43504  
C00005=124076,-47288,-97674,12875,14132,-48549  
C00006=129994,-68581,-110840,3962,8520,-43598  
C00007=131976,-110338,-128798,12264,-3667,-48594  
  
//INST  
  
///DATE 2012/08/20 12:34  
  
///COMM ROBOT REJECT BALL  
  
///ATTR SC,RW  
  
///GROUP1 RB1  
  
NOP
```

```
MOVJ C00000 VJ=0.78
WAIT IN#(2)=ON
DOUT OT#(1) OFF
DOUT OT#(3) OFF
MOVJ C00001 VJ=50.00
MOVL C00002 V=150.0
MOVL C00003 V=100.0
DOUT OT#(1) ON
TIMER T=0.50
MOVL C00004 V=100.0
MOVL C00005 V=200.0
DOUT OT#(1) OFF
TIMER T=0.50
MOVL C00006 V=200.0
MOVJ C00007 VJ=50.00
END
```

Todas las instrucciones de programación se obtuvieron del manual de programación del controlador DX100.

Acreditación en robótica:

Certificado de programación básica con movimiento de materiales del controlador DX100, con una duración de 26 horas teóricas y prácticas.

Certificado de programación avanzada del controlador DX100, con una duración de 29 horas teóricas y prácticas.

CAPÍTULO 6.

DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN

6.1. Diagrama de medios-fines

Se determinó la necesidad siguiente:

- 1°. Configurar el sistema de alimentación de barras calientes a una prensa hidráulica.
- 2°. Implementar el sistema de alimentación de barras calientes a una prensa hidráulica.
- 3°. Realizar pruebas preliminares de producción.
- 4°. Determinar los estados de costos y tiempo de implementación

A efectos de ordenar los procedimientos y lograr el objetivo principal se ha delineado el correlato entre los medios y los fines, cuya síntesis se presenta en la figura 6.1.

6.2. Configuración del sistema

6.2.1. Bosquejo del sistema

El sistema se presenta en la figura 6.2

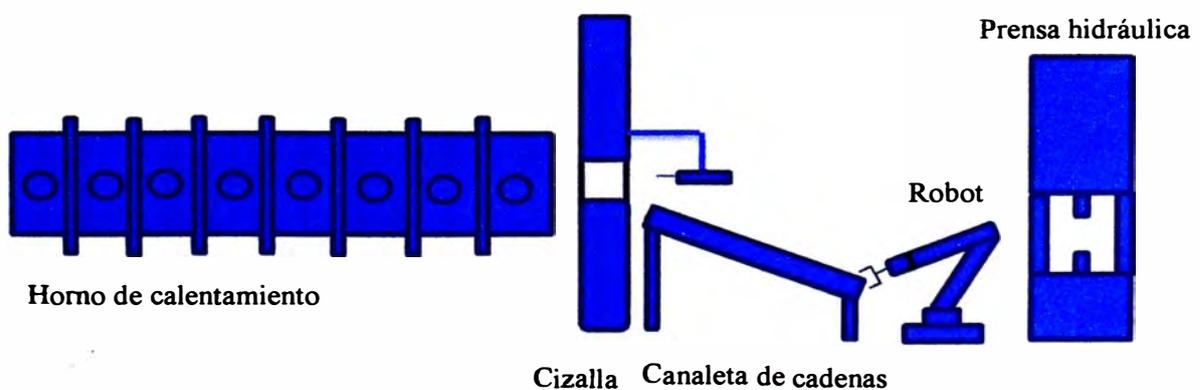


Fig. 6.2 Bosquejo del sistema de alimentación de barras calientes a prensa hidráulica

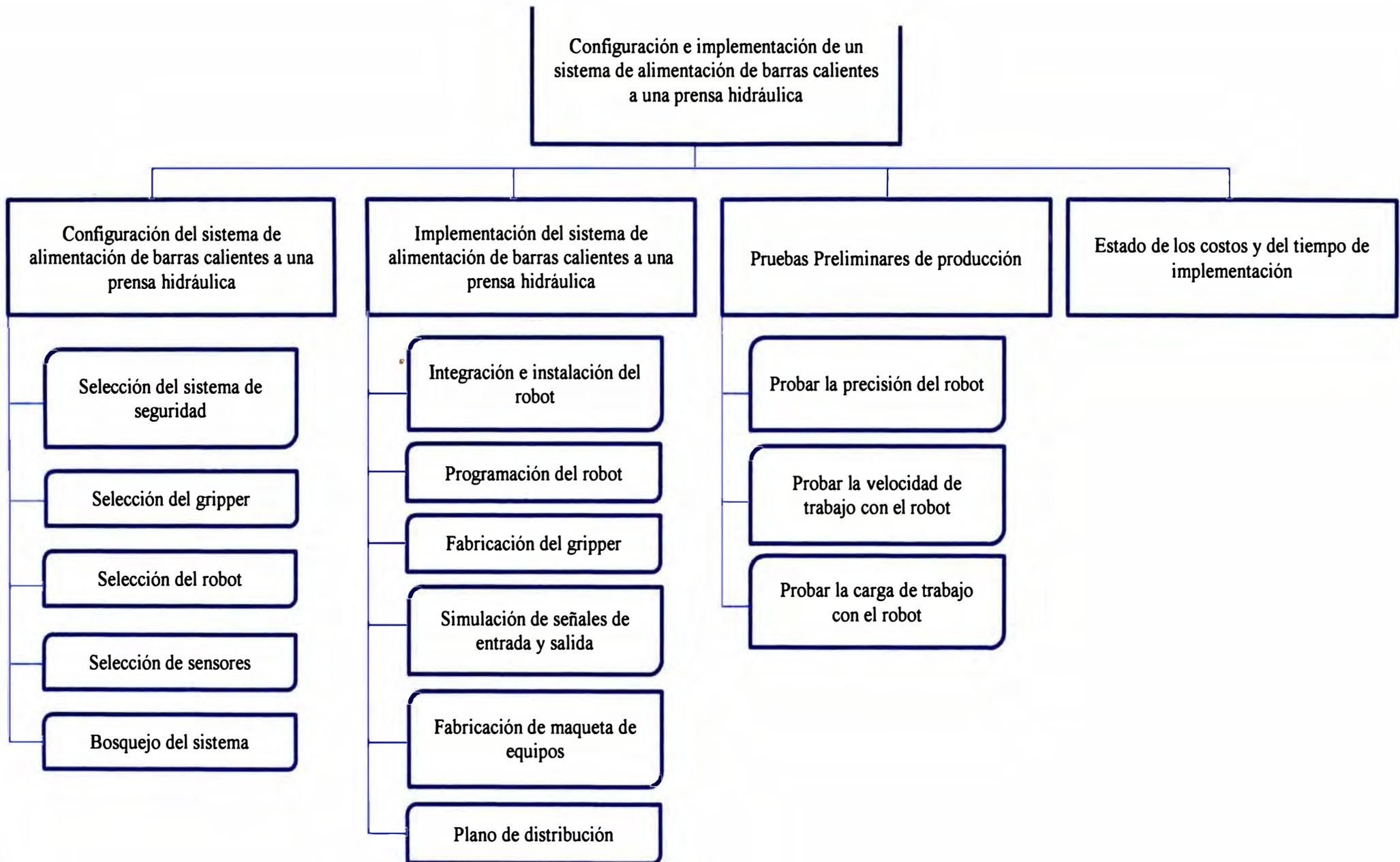


Fig. 6.1 Diagrama de medios y fines

6.2.2. Selección de Sensores

Para poder seleccionar los sensores primero se definió el diagrama de flujo del programa que se muestra en la figura 6.3

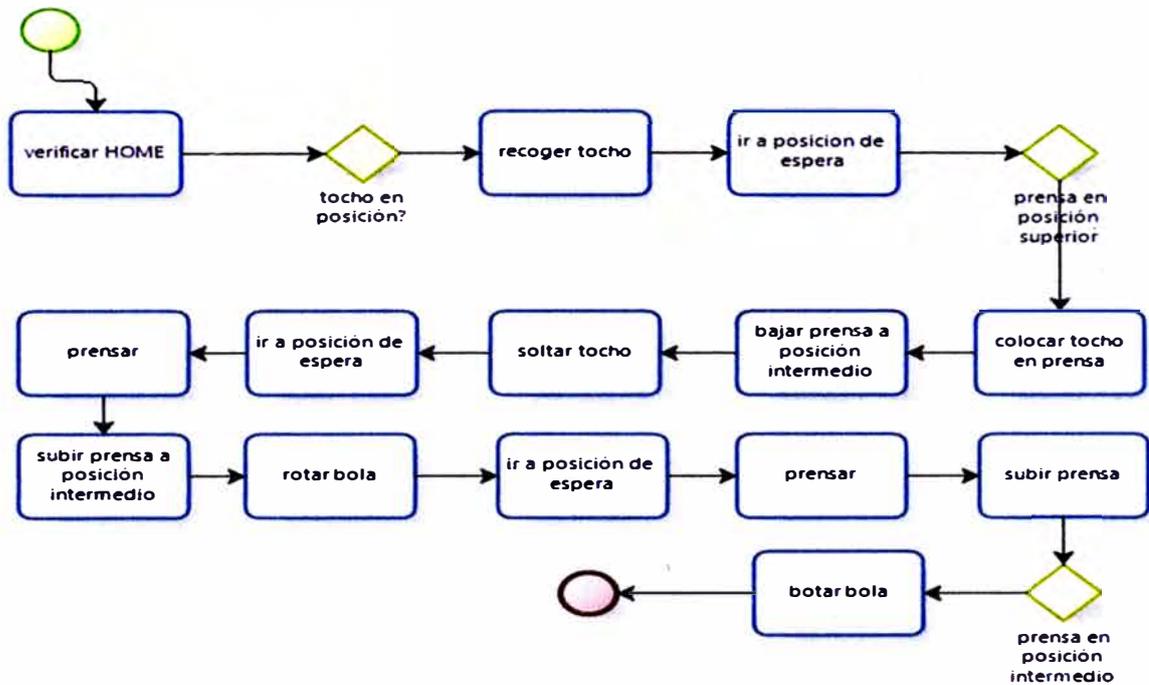


Fig. 6.3 Diagrama de flujo del programa del robot

Entrada:

1. posición del tocho para recoger
2. posición de la prensa totalmente arriba
3. posición de la prensa intermedia
4. posición de la prensa cerrada
5. Posición del tocho en prensa

Salida:

1. manipular gripper

2. bajar prensa

3. subir prensa

6.2.3. Selección del Robot

Se tomó las siguientes consideraciones:

1. Carga: Según el producto máximo que podamos trabajar, se recomienda que el robot pueda trabajar con una bola de acero de hasta 6.5 pulgadas de diámetro. En este caso el peso de la bola será de 18.66 kg y considerando un sobrepeso de 10% tendremos 20.5kg.
2. Velocidad: considerando elevar la producción a tres toneladas por hora, y una bola de cinco pulgadas cuyo peso es de 8.5kg tendremos:

$$\frac{3000 \frac{kg}{hora}}{8.5 \frac{kg}{bola}} = 352 \frac{bola}{hora}$$

$$352 \frac{bola}{hora} \times \frac{1 hora}{3600s} = 0.0977 \frac{bolas}{s}$$

Entonces tendríamos que producir una bola en 10.2s.

Se analiza el flujo del proceso, y se derivan los tiempos. Primero, el tiempo para recoger la bola y colocarla en la prensa, el tiempo de prensado, el tiempo de rotar la bola, el tiempo del segundo prensado, el tiempo de botar la bola. Segundo, se toma la distribución aproximada de los equipos, ubicación del robot, de la canaleta de cadenas, de la prensa y

se derivan las distancias que debe recorrer el robot. Tercero, se toma la velocidad de la prensa en formar cada bola. Con estos tres datos se puede sacar aproximadamente la velocidad necesaria del robot.

El tiempo de la prensa en formar la bola y subir es de 3 segundos, para el segundo golpe (volver a prensar la bola) es de 2 segundos. Entonces se van 5 segundos.

Según el diagrama de flujo, el robot tiene: 1. movimiento de la posición de espera del robot a la canaleta, y de la canaleta a la prensa, 2. movimiento de la prensa a posición de espera del robot, 3. Movimiento de posición de espera del robot a la prensa, levanta la bola y girarla, 4. Movimiento de la prensa a la posición de espera del robot. La posición de espera del robot es la más próxima a las estampas de la prensa. Entonces el recorrido mas largo es el primero, considerando que el movimiento dos toma 0.5 segundos, el movimiento tres toma 1.5 segundos, y el movimiento cuatro toma 0.5 segundo, estos serían 2.5 segundos, entonces nos queda casi 2.8 segundos para realizar el primer movimiento.

Teniendo la distribución de los equipos tomamos la longitud del recorrido del robot desde su posición de espera a la canaleta y de ahí a la prensa. Está longitud es aproximadamente: 120cm.

Entonces la velocidad mínima lineal requerida por el robot será 42.85cm/s

Precisión: La posición inicial de la barra caliente (al final de la canaleta de cadenas) y la final (entre las estampas de la prensa) no varía y es fijo, por lo tanto el robot tendrá una buena precisión, los demás puntos intermedios no son de mayor importancia para el proceso, solo considerar que no genere posibilidad de colisión del robot.

Se opta por cotizar un manipulador con las características antes descritas, obteniendo las siguientes respuestas:

- Motoman: manipulador + entrenamiento programación básica: 50 893.00 USD
- Sandiman: manipulador (usado con 10 000 horas de operación) + gripper + sensores + integración del sistema: 93 469.00 USD
- Argon: manipulador + gripper + sensores + integración: 209 000.00 USD
- Fanuc Robotics: manipulador: 53 560.00 USD

Se decidió por el manipulador de Motoman.

6.2.4. Selección del gripper

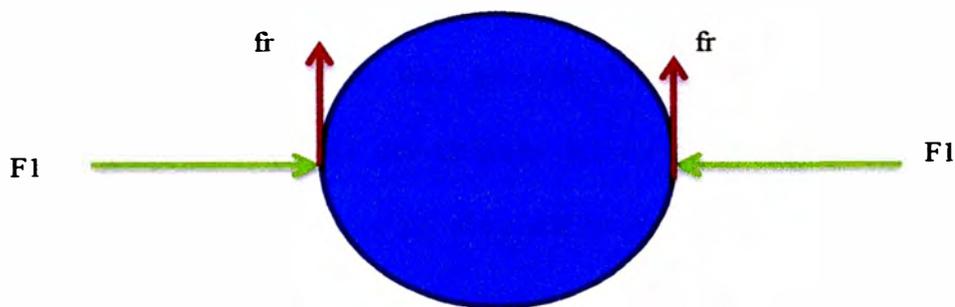
Se estimó el diámetro de la bola a agarrar y el peso máximo de carga para las especificaciones del gripper.

Requerimientos:

Geométrica:

Se trabaja con un pedazo de barra de 3.25 pulgadas de diámetro y se produce una bola de 5 pulgadas de diámetro. Entonces la longitud de trabajo de la tenaza debe de ser entre: un poco menos de 3.25 pulgadas (82.55mm) y un poco mas de 5 pulgadas (139.7mm). Consideramos entre 80mm y 150mm. La longitud de desplazamiento será: $150 - 80 = 70\text{mm}$

Fuerza:



Fr: fuerza de rozamiento

F1: fuerza que aplique la tenaza

Considerando una bola de 5 pulgadas, su masa será aproximadamente 8.5kg

El coeficiente de rozamiento estático acero – acero es de 0.53, este dato fue tomado del texto de Serway R.A., FÍSICA, Editorial McGraw-Hill, 1992.

$$fr = F_1\mu \quad (6.1)$$

$$Mg = 2fr = 2F_1\mu \quad (6.2)$$

$$(8.5)(9.81)N = 2F_1(0.53) \quad (6.3)$$

$$F_1 = 78.66N \quad (6.4)$$

Se determinó seleccionar un gripper de las siguientes características:

Amplitud: 70 mm

Fuerza: 80N

Dicho gripper es accionado electoneumáticamente y requiere una presión de 80 psi

6.2.5. Sistema de Seguridad:

Se instaló una guarda de seguridad para impedir el paso de personas al área del trabajo del robot, con un sistema desconexión del robot en caso que se abra dicha guarda de seguridad, esto es conocido como “interlock”. También se dispondrá de un botón de parada de emergencia en un punto cerca de la prensa y al brazo robótico.

La guarda de seguridad fue fabricada en la empresa y se muestra en la figura. 6.5



Fig. 6.5. Guarda de seguridad con su sistema de parada de emergencia e interlock.

En virtud de los cinco puntos anteriores es posible configurar el sistema de alimentación de barras calientes a la prensa hidráulica. Esta configuración se muestra en forma simplificada en la siguiente figura.

6.3. Implementación del sistema

6.3.1. Plano de distribución

La distribución de los equipos quedó establecida como se observa en la figura 6.6

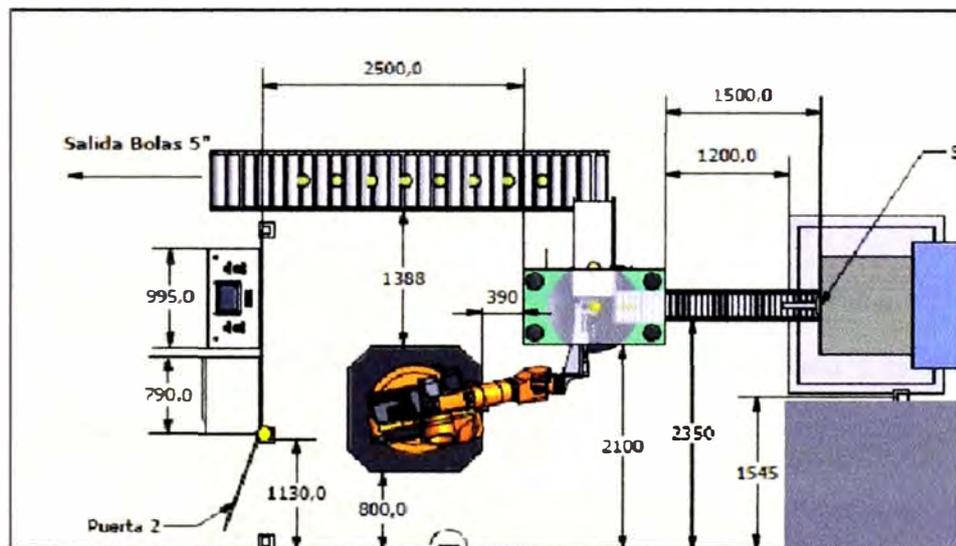


Fig. 6.6 Plano de distribución de equipos

6.3.2. Fabricación de maqueta de equipos

Se habilitó un espacio para la programación e integración del robot con su ambiente de trabajo.

Se fabricó tres maquetas de latón mostradas a continuación

1. Maqueta a escala real de la prensa que se muestra en la figura 6.7



Fig. 6.7. Maqueta de la prensa hidráulica

2. Maqueta de la canaleta de entrada fabricada a escala real, y se muestra en la figura 6.8.



Fig. 6.8 Maqueta de la canaleta entrada

3. Maqueta de la canaleta de salida fabricada a escala real y se muestra en la figura 6.9.



Fig. 6.9. Maqueta de canaleta salida

6.3.3. Simulación de señales de entrada y salida

Se fabricó una caja que permitía simular prácticamente ocho señales de entrada digital de 24V y ocho señales de salida digital de 24V, la que se muestra en la figura 6.10.



Fig. 6.10 Caja de señales de entrada y Salida

Se conectó a la bornera de input/output al controlador para poder comprobar la interacción del programa con las señales de salida y entrada. La bornera se muestra en la figura 6.11.

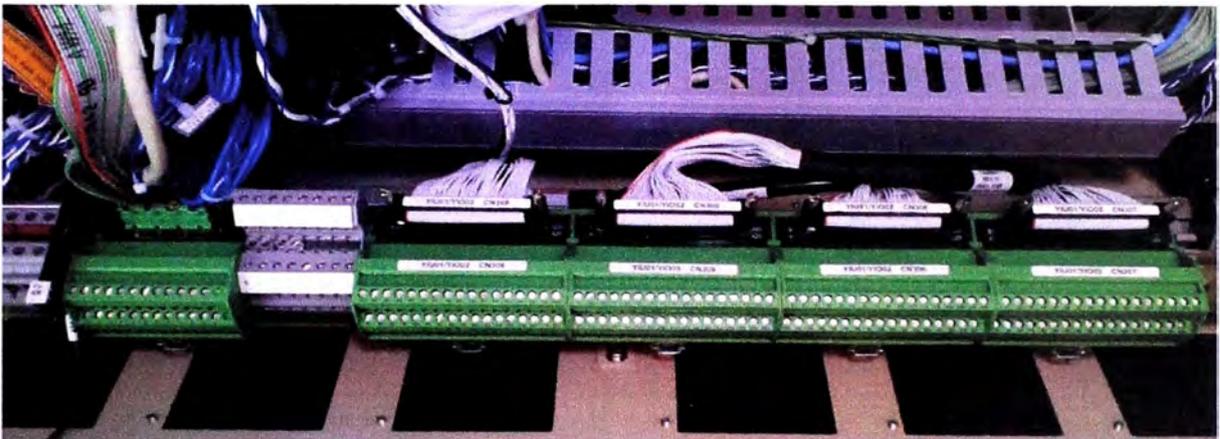


Fig. 6.11. Bornera de input output del controlador DX-100

Para asegurar la propia conexión del simulador de señales de entrada y salida con el controlador del robot fue necesario reconocer la ubicación de los correspondientes pines de entrada y salida. Y estos datos fueron obtenidos del fabricante del robot tal como se muestra en la figura 6.12.

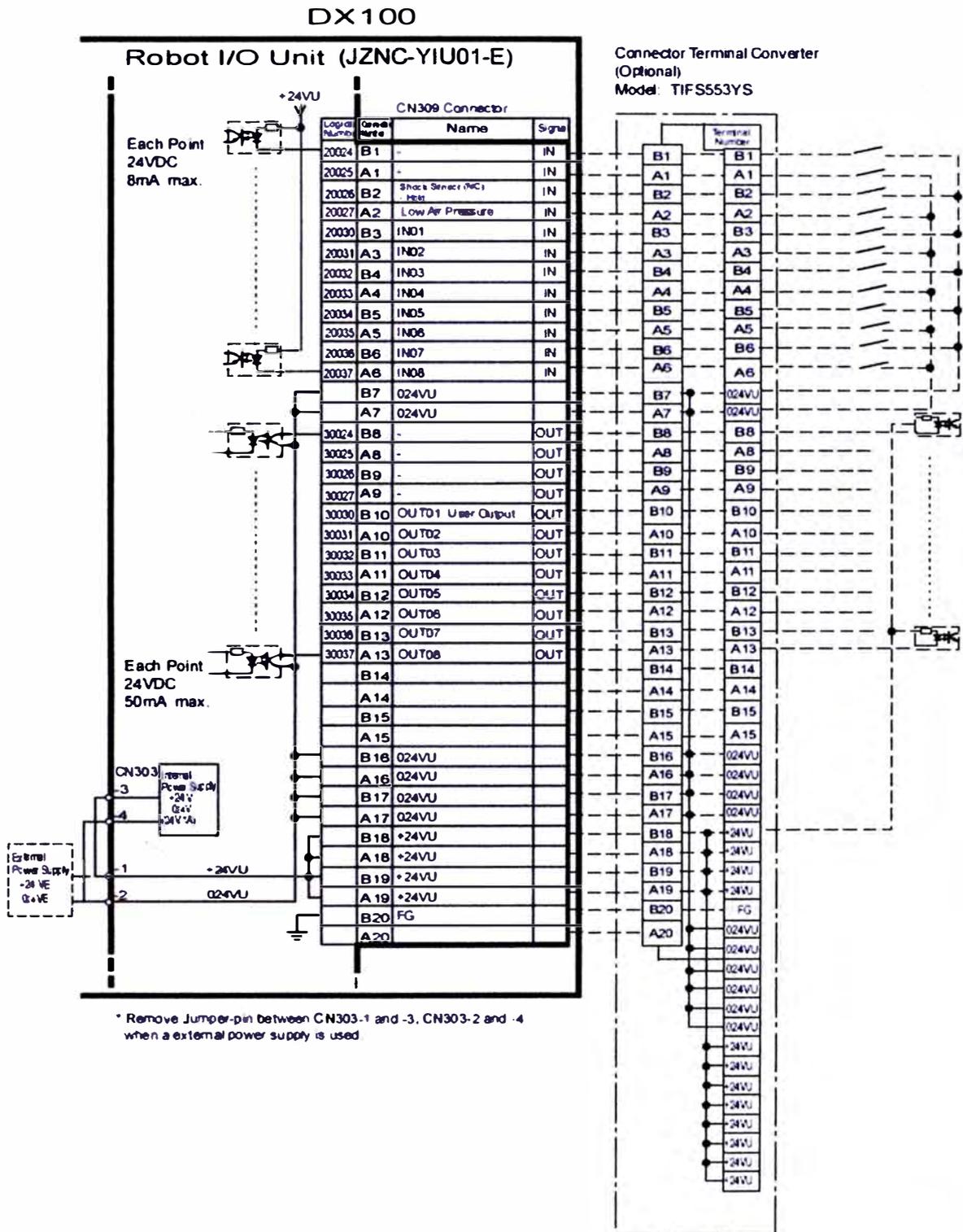


Fig. 6.12. Diagrama de las borneras para las señales de entrada y salida.

6.3.4. Fabricación de gripper

El gripper fue fabricado en instalaciones propias de la empresa y se muestra en la figura 6.13

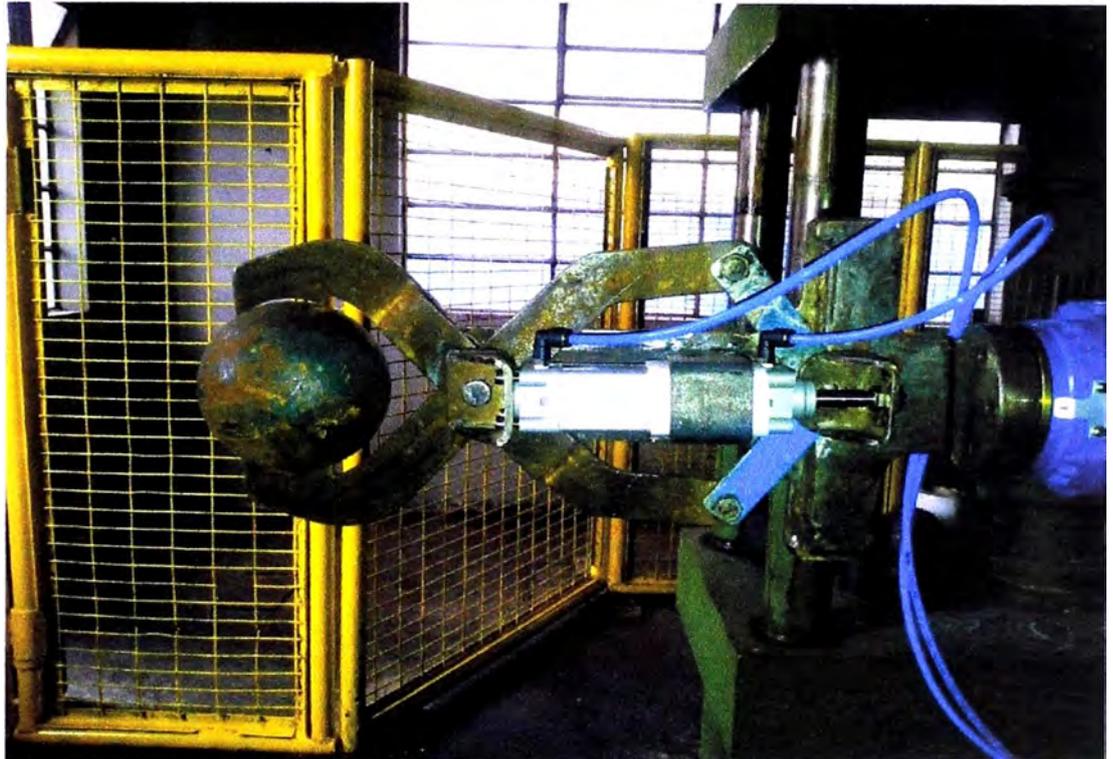


Figura 6.13. Gripper neumático instalado en el brazo robótico.

6.3.5. Programación del robot

Después que el jefe de proyecto recibió un proceso de capacitación en la programación del robot en las instalaciones del fabricante en OHI, EEUU y haber alcanzado el certificado de programación avanzada como se indicó anteriormente, se desarrollo el

programa de capacitación en robótica cuya duración se encuentra en la tabla 6.1

Tabla 6.1. Cursos de entrenamiento del controlador DX100

NOMBRE DEL CURSO	HORAS
DX100 Basic programming with material handing	26
DX100 Advance programming	29
DX100 Coordinated motion and multiple robot control programming	8
DX100 maintenance	22
DX100 Ladder Editor programming	19

6.3.5.1. Modulo principal

El programa principal con acción documentada se muestra en la tabla 6.2.

Título: Master Job

Tabla 6.2. Módulo del programa principal

N° reg.	INSTRUCCIÓN	ACCIÓN
0	NOP	Inicio del programa
1	movj vj=0.78	Verifica posición "home"
2	call job: newgrapstroke	Llamar al sub programa para recoger el tocho
3	Call job: newsecondstroke	llamar al sub programa para realizar el segundo golpe
4	Call job: reject	Llamar al sub programa para sacar bola de la prensa
5	end	

6.3.5.2. Módulo del sub programa: recoger el material

El presente módulo es llamado por el módulo principal para que el robot a través del gripper recoja el tocho caliente y lo coloque en la prensa

Título: newgrapstroke

Tabla 6.3. Módulo del sub programa recoger tocho

N° reg.	INSTRUCCIÓN	ACCIÓN
0	NOP	Inicio del programa
1	movj vj=0.78	Verifica posición "HOME"
2	wait in#(1)=on T=21	Esperar que el tocho esté posición de canaleta
3	movj vj=50	primer movimiento rápido hacia el tocho
4	movl v=150	Segundo movimiento lineal hacia el tocho
5	movl v=150	Tercer movimiento lineal a posición para agarrar el tocho
6	dout ot#(1) on	Señal para cerrar el gripper
7	timer t=0.5	tiempo para que el gripper cierre
8	Wait in#(2)=on	Esperar que la prensa este en posición superior
9	movl v=150	Primer movimiento lineal hacia la prensa
10	movl v=150	Segundo movimiento lineal hacia la prensa
11	Movl v=100	Tercer movimiento lineal hacia la prensa
12	dout ot#(2) on	Señal para bajar la prensa
13	Wait in#(4)=on	Esperar que la prensa este en posición intermedia
14	Timer t=0.5	Tiempo para comprimir poco el tocho
15	Dout ot#(2) off	Señal para detener la prensa
16	Dout ot#(1) off	Señal para abrir el gripper
17	Timer t=0.5	Tiempo para que la el gripper abra
18	movl v=200	Movimiento lineal para retirar el gripper de la zona de prensa
19	dout ot#(2) on	Señal para continuar bajando la prensa
20	movj vj=50	Movimiento para retornar a posición "home"
21	Wait in#(5) on	Esperar que la prensa baje completamente
22	dout ot#(2) off	Señal para detener la prensa
23	dout ot#(3) on	Señal para subir la prensa
	END	

6.3.5.3.Sub programa: segundo golpe de prensa

El presente módulo es llamado por el módulo principal para que el robot a través del gripper gire la bola caliente para dar una segunda prensada a la bola.

Título: newsecondstroke

Tabla 6.4. Módulo del sub programa second_stroke

N° Reg.	INSTRUCCIÓN	ACCIÓN
0	NOP	Inicio del programa
1	movj vj=0.78	Verificar la posición "HOME"
2	Wait in#(4)=on	Esperar que la prensa esté en posición intermedia
3	dout ot#(3) off	Señal para detener la prensa
4	dout ot#(1) off	Verificar que el gripper esté abierto
5	movj vj=50	Primer movimiento hacia la bola
6	movl v=250	Segundo movimiento lineal hacia la bola
7	movl v=250 PL=0	Tercer movimiento lineal hacia la bola, posición exacta
8	dout ot#(1) on	Señal para cerrar el gripper
9	timer t=0.5	Tiempo para que el gripper cierre
10	movl v=100	Primer movimiento lineal para que la bola rote
11	movl v=100 PL=0	Segundo movimiento lineal para rotar la bola con posición exacta
12	movl v=100 PL=0	Tercer movimiento lineal para rotar la bola con posición exacta
13	dout ot#(1) off	Señal para que el gripper abra
14	timer t=0.5	Tiempo para que el gripper abra
15	movl v=250	Movimiento lineal para retirar gripper de la zona de prensa
16	movj vj=50	Movimiento para retornar a posición "home"
17	dout ot#(2) on	Señal para bajar la prensa
18	Wait in#(5)=on	Esperar que la prensa baje completamente
19	dout ot#(2) off	Señal para detener la prensa
20	dout ot#(3) on	Señal para subir la prensa
21	END	

6.3.5.4.Sub programa: retiro de bola de prensa

El presente módulo es llamado por el módulo principal para que el robot a través del gripper retire la bola caliente de la prensa hacia la canaleta de salida.

Título: reject

Tabla 6.4. Módulo del sub programa second_stroke

N° Reg.	INSTRUCCIÓN	ACCIÓN
0	NOP	Inicio del programa
1	movj vj=0.78	Verificar la posición "HOME"
2	wait in#(2)=on	Esperar que la prensa esté en posición superior
3	dout ot#(1) off	Verificar que el gripper esté abierto
4	dout ot#(3) off	Señal para detener la prensa
5	movj vj=50	Primer movimiento hacia la bola
6	movl v=150	Segundo movimiento hacia la bola
7	movl v=100	Tercer movimiento hacia la bola
8	dout ot#(1) on	Señal para cerrar el gripper
9	timer t=0.5	Tiempo para que el gripper cierre
10	movl v=100	Movimiento lineal para levantar la bola
11	movl v=200	Movimiento lineal hacia la canaleta de salida
12	dout ot#(1) off	Señal para abrir el gripper
13	timer t=0.5	Tiempo para que el gripper abra
14	movl v=200	Movimiento lineal fuera de la zona de prensa
15	movj vj=50	Retorno hacia la posición "home"
16	END	

6.3.6. Integración e instalación del robot

6.3.6.1.Instalación del robot

Para la instalación del robot se fabrico una base metálica de 600mm largo 600mm ancho y 10mm alto con pintura

anticorrosiva según las especificaciones del fabricante, tal como se muestra en la figura 6.14.



Figura 6.14 Base metálica para el robot

6.3.6.2. Integración del robot

Se han integrado los siguientes componentes: la cizalla hidráulica, la canaleta de cadenas, el robot y la prensa. Como consecuencia se obtiene el sistema de alimentación de barras de acero calientes a una prensa hidráulica.

Como resultado de las actividades de los seis puntos anteriores se ha logrado la implementación del sistema de alimentación de barras calientes a la prensa hidráulica.

6.4. Pruebas preliminares de producción

Se realizaron las siguientes pruebas:

6.4.1. Probar la carga del robot

Considerando las condiciones del brazo robótico:

La carga máxima permitida en la parte final del brazo robótico es de 50kg, y se puede observar en la fig.6.16 la relación entre la carga y la distancia desde el eje B del robot.

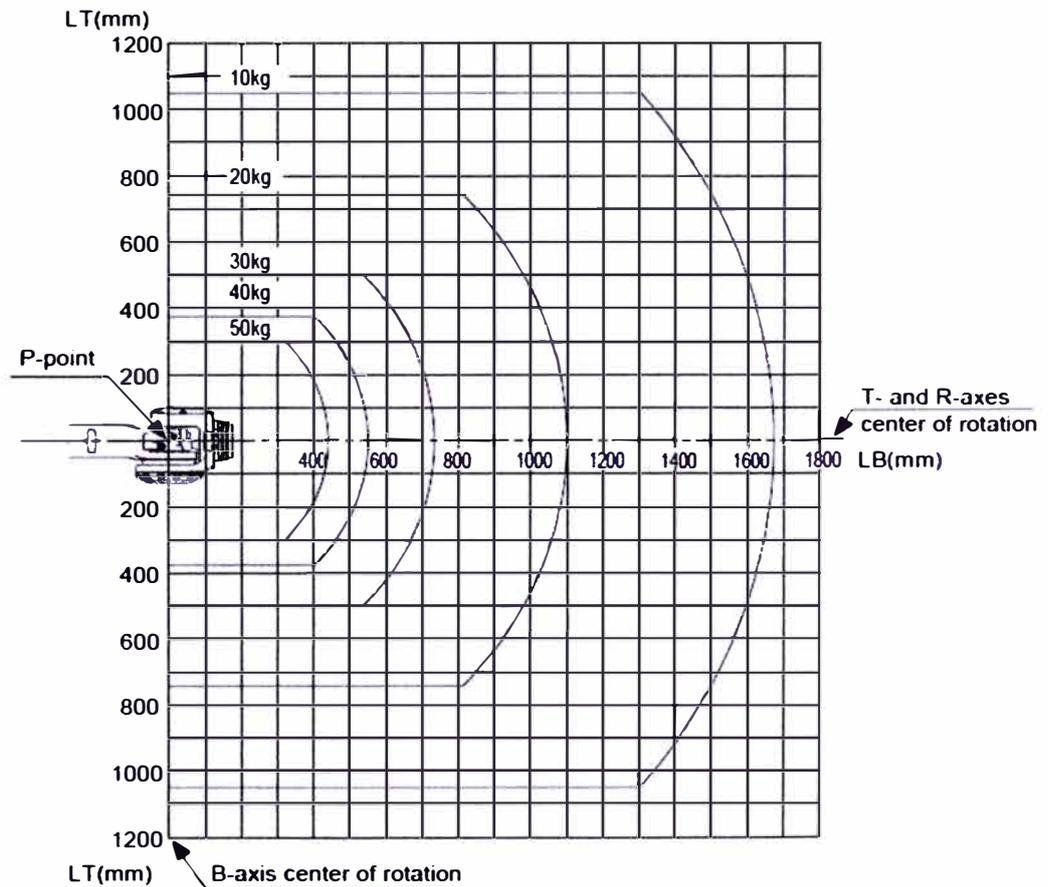


Fig. 6. 16 distancia

La tabla 6.5 muestra el momento permitido en la parte final del brazo robótico:

Tabla 6.5 Momento máximo en los ejes R, B, T

EJE	MOMENTO (N.m)
R	216
B	216
T	147

La figura 6.17 muestra los nombres de los ejes del robot MH-50

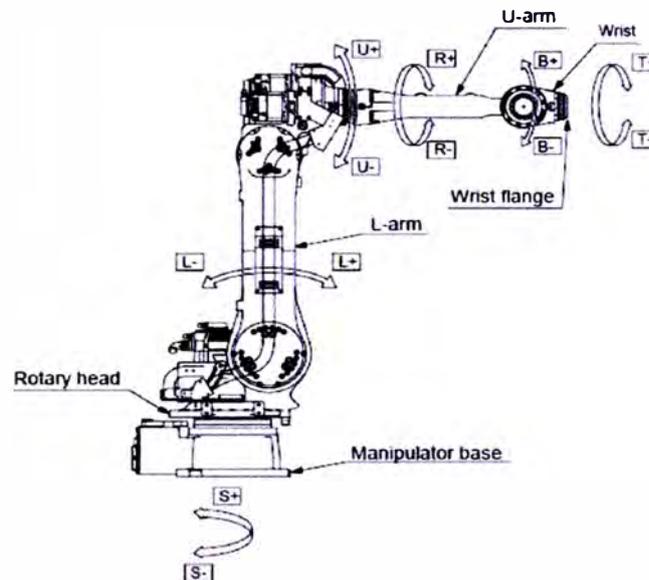


Fig. 6.17 nombre de los ejes del robot MH-50

El brazo robótico tiene acoplado un gripper de una longitud aproximada de 450 mm y carga una bola de acero de un máximo de 6 pulgadas, que es equivalente a 15kg. Por lo tanto según la fig 6.16 no existe ningún problema con la carga.

Se realizaron las pruebas de troque y temperaturas de los servo motores.

Se utilizó una bola de acero de seis pulgadas, se realizó un programa que emulada los movimientos del trabajo a realizar (sin considerar las señales de entrada y salida, ni condicionales) considerando los tiempos reales de producción. Se dejó trabajando el sistema por cinco días las 24 horas.

El controlador tiene una opción para ver el torque máximo en cada uno de sus motores y también su respectiva temperatura y se muestra los resultados en la tabla 6.6

Tabla 6.6. Torque máximo y temperatura registrada en cada eje del robot MH-50

EJ E	TORQUE PERMITIDO (N.m)	TORQUE MÁXIMO REGISTRADO (N.m)	TEMPERATURA MÁXIMA REGISTRADA (°C)	PORCENTAJE DE TORQUE (%)
S		87	45	-
L		81	45	-
U		83	44	-
R	216	131	44	60.6
B	216	64	43	29.6
T	147	88	43	59.8

Según los datos obtenidos anteriormente, se comprueba que no existe ningún problema con la capacidad de carga del robot.

6.4.2. La velocidad del robot:

La velocidad lineal mínima necesaria sería 42.85 cm/s. Según las especificaciones del manipulador Motoman MH50 tiene un rango de

velocidad lineal desde 0.11cm/s hasta 150cm/s, lo cual es suficiente para realizar las maniobras requeridas.

6.4.3. Repetitividad:

Por el proceso de producción que tenemos nos encontramos que el grado de desviación permisible entre la bola y el eje de la prensa puede ser de hasta 3 milímetros y el grado de repetitividad del robot según sus especificaciones consistenciadas es de 0,07 mm, con lo cual se comprueba que el robot cumple con los requerimientos del proceso.

6.4.4. Pruebas Preliminares de operación y producción

Luego de manejar la carga del tocho a la velocidad adecuada y la repetitividad deseada sin ningún problema se realizaron las pruebas preliminares y se obtuvieron los siguientes resultados según la tabla 6.7

Tabla 6.7 Resultados de las pruebas preliminares

Nº PRUEBA	TIPO DE PRUEBA	RESULTADO OBTENIDO
1	Producción de 10 toneladas	Producción realizada sin dificultad
2	Producción de 15 toneladas	Producción realizada sin dificultad
3	Producción de 20 toneladas	Producción realizada sin dificultad

6.5. Estimado de costos y tiempos necesarios

6.5.1. Costos

El costo de la inversión inicial considerando los gastos por las instalaciones asciende a unos 60 000 USD

Considerando:

Un ingreso mensual de 2 095 200 USD

Costos variables mensual de 1 807 920 USD

Tendremos un margen de contribución de 287 280 USD

Los costos fijos ascienden a 254 880 USD

Por lo tanto la utilidad de operación es de 32 400 USD

Descontando la participación de los trabajadores 3 240 USD

Tendremos la utilidad antes de impuesto de 29 160 USD

El impuesto a la renta es de 8 748 USD

Entonces la utilidad neta es de 20 412 USD

Considerando una tasa mensual de 1%

Los resultados se muestran en la tabla 6.8

Tabla 6.8 Periodos de retorno de capital invertido

PERIODOS	INICIAL	INTERES	AMORT.	CUOTA	FINAL
0					60,000.00
1	60,000.00	600.00	14,776.87	15,376.87	45,223.13
2	45,223.13	452.23	14,924.63	15,376.87	30,298.50
3	30,298.50	302.99	15,073.88	15,376.87	15,224.62
4	15,224.62	152.25	15,224.62	15,376.87	0.00

Por lo tanto la inversión se recupera en un periodo de cuatro meses.

6.5.2. Plan de ejecución

En la tabla 6.9 se muestra los tiempos de duración de las diferentes tareas realizadas para la configuración e implementación del sistema de alimentación de barras calientes a una prensa hidráulica.

Tabla 6.9. Duración de las tareas necesarias para el presente trabajo

TAREA	DURACIÓN
Configuración e implementación de un sistema de alimentación de barras calientes	135 days
configuración	88 days
bosquejo del sistema	1 day
Selección de sensores	2 days
Selección de control	5 days
Selección de gripper	1 day
Selección del sistema de seguridad	1 day
Configuración del tendido eléctrico	1 day
orden de compra del robot y entrega	80 days
implementación	116 days
plano de distribución	1 day
fabricación de maqueta de equipos	10 days
simulación de señales de entrada y salida	3 days
fabricación de gripper	25 days
programación del robot	17 days
integración e instalación del robot	35 days
pruebas	44 days
Preliminares	6 days
reprogramar nueva posición del robot	5 days
prueba de producción y cumplimiento del requerimiento	5 days
documentos del trabajo	1 day
fin	0 days

En el anexo B se muestra el diagrama de Gantt detallado del proyecto.

CONCLUSIONES

Habiendo obtenido lo siguiente

- 1°. La configuración del sistema de alimentación de barras calientes para una prensa hidráulica.
- 2°. La implementación física del sistema de alimentación de barras calientes para una prensa hidráulica.
- 3°. Resultados favorables en las pruebas preliminares de producción.
- 4°. La verificación de que la inversión se recupera en cuatro meses.

Y luego de realizar las pruebas finales de producción favorables indicadas en la siguiente tabla.

Tabla 7.1. Resultados de las operaciones de producción.

N° PRUEBA	TIPO DE PRUEBA	RESULTADO OBTENIDO
1	Producción de 10 toneladas	Producción realizada sin dificultad
2	Producción de 15 toneladas	Producción realizada sin dificultad
3	Producción de 20 toneladas	Producción realizada sin dificultad

Se concluye lo siguiente:

Ha sido factible configurar e implementar el sistema de alimentación de barras calientes para una prensa hidráulica que permite producir tres toneladas por hora de bolas para molienda.

El sustento de la conclusión anterior es lo que se informa en el presente trabajo.

RECOMENDACIONES

Se recomienda:

- Implementar esta solución a la futura línea de expansión de la planta de Lima.
- Realizar una investigación con la posibilidad de utilizar dos brazos robóticos y dos prensas en serie de tal manera que el primer sistema realice un golpe y el segundo sistema realice el siguiente golpe.

BIBLIOGRAFÍA

Libro:

1. Barrientos, Antonio, FUNDAMENTOS DE ROBÓTICA, Mc Graw-hill, 2007

Manuales:

1. Yaskawa Electric Corporation, DX100 INSTRUCTION FOR NORTH AMERICAN, Japon, revisión: 2. Febrero 2011
2. Yaskawa Electric Corporation, DX100 MAINTENANCE FOR NORTH AMERICAN, Japon, revisión: 2. Febrero 2011
3. Yaskawa Electric Corporation, DX100 OPERATORS MANUAL FOR MATERIAL HANDLING, Japon, revisión: 1. Julio 2011
4. Yaskawa Electric Corporation, DX100 OPTION INSTRUCTION FOR CURRENT I/O, Japon, revisión: 1. Mayo 2011
5. Yaskawa Electric Corporation, DX100 OPTION INSTRUCTION FOR INFORM LANGUAGE, Japon, revisión: 1. Octubre 2010
6. Yaskawa Electric Corporation, MH50 INSTRUCTION, Japon, revisión: 3. Julio 2011
7. Motoman inc, DX100 ROBOT CONTROLLER BASIC PROGRAMMING WITH MATERIAL HANDLING, Estados Unidos de Norte America, primera edición, 2009

ANEXOS

ANEXO A.2

MATRIZ DE RIESGOS

Matriz de Riesgo Anglo American PLC		Efecto del Peligro/Consecuencias				
Tipo de pérdida		1 Insignificante	2 Menor	3 Moderado	4 Mayor	5 Catastrófico
(S/H) Daños a las personas (Seguridad/Salud)	Requiere primeros auxilios/ Exposición a riesgos menores a la salud	Requiere tratamiento médico/ Exposición a riesgos importantes a la salud	Lesión de pérdida de tiempo/ Impacto reversible en la salud	Una fatalidad o pérdida de la calidad de vida/ Impacto Irreversible en la salud	Múltiples fatalidades/ Impacto en la salud potencialmente fatal	
(E) Impacto Ambiental	Mínimo daño ambiental - Incidente L1	Daño ambiental material - L2 incidente remediable en el	Serío daño ambiental - Incidente L2 remediable antes	Mayor daño ambiental - incidente L2 remediable	Extremo daño ambiental - incidente L2 irreversible	
(B/MD) Interrupción de actividades/ Daño material y otras pérdidas consecuentes	No hay Interrupción en las operaciones/ de US\$ 20 000 a US\$ 100 000	Breve Interrupción de las operaciones/ de US\$ 100 000 a US\$ 1 000 000	Cierre parcial/ de US\$ 1 000 000 a US\$ 10 000 000	Pérdida parcial de las operaciones/ de US\$ 10 000 000 a US\$ 75 000 000	o total de las operaciones/ Mayor a US\$ 75 000 000	
(I&R) Legal y regulatorio	Problemas legales de bajo nivel	Problemas legales menores, sin infracciones a la ley	Sería infracción de la ley/ investigación y reporte a la autoridad/ posible	Infracción a la ley/ proceso y pena posible de	Penas legales de gran consideración. Múltiples juicios y posibilidad de	
(R/S/C) Impacto en la reputación/social/comunidad	Impacto leve/ existe conocimiento público pero no preocupan	Impacto limitado/ preocupación de la comunidad local	Impacto considerable/ preocupación de la comunidad regional	Impacto nacional/ preocupación nacional	Impacto internacional/ preocupación internacional	
Probabilidad	Ejemplos	Calificación del Riesgo				
5 (Caso seguro)	El evento indeseado a ocurrido repetidas veces, una o mas veces en un año y es probable ocurra en lo que va de la año	11 (M)	16 (H)	20 (H)	23 (Ex)	25 (Ex)
4 (probable)	El evento indeseado a ocurrido pocas veces, menos de una vez por año o es probable que ocurra en el lapso de 5 años	7 (M)	12 (M)	17 (H)	21 (Ex)	24 (Ex)
3 (posible)	El evento indeseado ha ocurrido en la compañía en algun momento, o puede que ocurra en el lapso de 10 años	4 (L)	8 (M)	13 (H)	18 (H)	22 (Ex)
2 (Poco probable)	El evento indeseado ha ocurrido en la compañía en algun momento, o puede que ocurra en el lapso de 20 años	2 (L)	5 (L)	9 (M)	14 (H)	19 (H)
1 (Improbable)	El evento indeseado nunca ha ocurrido en la compañía en algun momento y es muy poco probable que ocurra en el lapso de 20 años	1 (L)	3 (L)	6 (M)	10 (M)	15 (H)
Calificación del riesgo	Nivel del riesgo	Gulas para la matriz de riesgo				
21 a 25	(Ex) Extremo	Eliminar, evitar, implementar acciones específicas/ procedimientos para administrar y controlar				
13 a 20	(H) Alto	Gestión proactiva				
6 a 12	(M) Medio	Gestión activa				
1 a 5	(L) Leve	Gestionar y controlar como se requiere				

PLANO 01

