

01173



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERIA

"FLEXIBILIDAD DE UN SISTEMA DE
MANUFACTURA TIPO SERIAL".

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERIA
(M E C A N I C A)
P R E S E N T A :
JOSE NAVARRO ANTONIO



DIRECTOR DE TESIS: M. EN I. EUSEBIO JIMENEZ LOPEZ
CODIRECTOR DE TESIS: DR. LUIS REYES AVILA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO, D. F.

2004



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

Agradecimientos

A dios:

*Por ser la manifestación divina de la realidad
y fuente de inspiración.*

A mi Asesor :

M. I. Eusebio Jiménez López

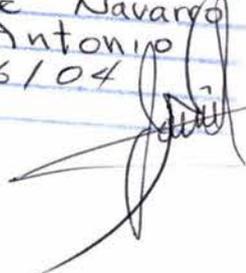
*Por ser un ejemplo de entrega y constancia profesional y
por ser el guía de una etapa importante en mi vida.*

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la
UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el
contenido de mi trabajo recaptional.

NOMBRE: José Navarro

Antonio

FECHA: 02/06/04

FIRMA: 

AL CIIDIR IPN UNIDAD OAXACA

*Por las facilidades otorgadas
para la realización de este trabajo.*

*A los profesores de la facultad de ingeniería:
División de Estudios de Posgrado
UNAM*

*Por el invaluable valor de sus enseñanzas
durante el trayecto por esa institución.*

A los profesores:

Dr. Marcelo López Parra

M. I. Francisco Cuenca Jiménez

M. I. Leopoldo González González

Dr. Luis Reyes Ávila

Dedicatorias

A mis Padres:

Leonardo Navarro †

Carmen A. Antonio

*Por haberme traído a la vida y por los principios
que me inculcaron y que permitieron alcanzar mis sueños*

A mi esposa:

Victoria J. Zárate

Por ser mi apoyo y compañera incondicional.

Y muy en especial a mi hijo:

José de Jesús

*Que con su dinamismo y alegría, es la fuente de inspiración
para continuar en la lucha diaria.*

A mis Hermanos:

Rosalía, Rogelio, Ramón, Marcelina,

Elena, Juliana, Jerónimo y Berenice

Por creer siempre en mi y brindarme su confianza y respaldo

A todos los Amigos

*Que de alguna manera me han alentado
para seguir adelante.*

Índice

PRÓLOGO		I
RESUMEN		IV
INTRODUCCIÓN		1
CAPÍTULO 1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	6
1.1	Definición del problema	7
1.2	Restricciones del problema	8
1.3	Planteamiento del problema	9
1.4	Descripción del módulo de soldadura de PT	11
1.5	Crónica de proceso en el módulo de soldadura	13
CAPÍTULO 2	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE MANUFACTURA	14
2.1	Ecuación de forma	14
2.2	Ecuación de primitivas	19
2.3	Tiempos de procesos	24
CAPÍTULO 3	PLANEACIÓN OPERACIONAL DEL SISTEMA PRODUCTIVO	26
3.1	Flexibilidades de un sistema productivo	26
3.2	Análisis de la modificación y selección de la maquinaria para nuevo proceso	28
3.3	Análisis operativo de la máquina seleccionada	30
3.4	Tiempos de proceso de la máquina R_3	34
3.5	Algunas consideraciones sobre el ciclo del robot R_3	36
3.6	Método de sincronización por vórtice perfecto a TpU' fijos	38
3.7	Sincronización de 3 tipos del módulo de soldadura	41
3.7. 1	Definición del TpU y algunas consideraciones sobre los tipos de sincronización	43

3.7. 1.1	Algunas consideraciones sobre los tipos de sincronización	44
3.8	Tiempo de ciclo y crónicas de proceso para Sin^1 , Sin^2 y Sin^3	46
CAPÍTULO 4	EL CONTROL DE PROCESOS	55
4.1	Algunas consideraciones sobre la sincronización global de sistemas productivos	55
4.2	El sistema de control de un sistema productivo	57
4.2.1	Generalidades del sistema de control	57
4.2.2	El modelo de control	60
4.3	El diseño del sistema de control	70
4.4	El código binario operacional referencial	74
4.5	Control del módulo de soldadura usando un CBOR	81
CAPÍTULO 5	SIMULACIÓN	83
5.1	Consideraciones generales para la programación y simulación	83
5.2	Programación y simulación	84
Conclusiones		93
Referencias		94
Apéndice A		97
Apéndice B		99
Apéndice C		106

NOMENCLATURA

A_1	Almacén de materia prima
A_C	Actuador (cilindro neumático)
M_{02}	Mesa de trabajo 2
PT	Pieza de trabajo
$R_3, R_4, \text{ y } R_5$	Robots soldador y transportador
B_2	Banda transportadora
A_2	Almacén de producto terminado
RP	Restricciones de planta
Rpr	Restricciones de proceso
RC	Restricciones de control
RM	Restricciones del modelo
Dp	Distribución de planta
PF	Planos de fabricación
PE	Planeación estratégica
Vpa	Volumen de producción anterior
Vpm	Volumen de producción modificado
PA	Planeación táctica
PO	Planeación operacional
$O_{2,3,\dots}$	Operaciones de manufactura
$\beta_{sub1,2,3..}$	Subproductos
$\frac{M}{T}$	Marcaje
$\overset{S}{U}$	Unión por soldadura
$\overset{Pr}{U}$	Unión de preparación
$A, \beta, C, F\dots$	Materia prima
β_{MP}	Subconjunto de materia prima
β_{PP}	Subconjunto de piezas de preparación

β_{MAE}	Subconjunto de material agregado o extraído
β_{SUB}	Subconjunto de subproductos
β_{PT}	Subconjunto de piezas de trabajo
$P_{A,B,C,\dots}^{PM}$	Primitiva de manufactura de la materia prima
$P_{\beta_{SUB1,2,3,\dots}}^{PM}$	Primitiva de manufactura de subproductos
$P_{s_1,2,3,\dots}^{PM}$	Primitiva de manufactura de la soldadura
$V_{PT,PT}^{PM}$	Volumen de la pieza de trabajo
$V_{A,B,C,\dots}^{PM}$	Volumen de la materia prima A, B,...
D_{pa}	Distribución de planta anterior
PF'	Nuevos planos de fabricación
T_{FP}	Tiempos fijos del proceso
M	Colección de máquinas integrada a D_{pa} ,
$M_{1,2,3,\dots}$	Máquinas que \in a D_{pa} ,
D_{pf}	Distribución de planta final
F_{TC}	Flexibilidad tipo C o máxima
$TFS1$	Tiempos fijos del proceso
T_{pU}	Tiempo unitario de proceso
T_{NF}	Tiempos no fijos
$V_{p'}$	Volumen de producción
J_T	Jornada de trabajo
M_M	Máquina modificada.
τ_{CMM}	Conjunto de lugares geométricos del ciclo de M_M .
J_T	Jornal de trabajo fijo y conocido.
$Sin^1, Sin^2, Sin^3 \dots$	Tipos de sincronizaciones.
MMG	Máquina de máxima jerarquía
$MANT$	Máquina antecesora
$MPRE$	Máquina predecesora

$S_4 \dots S_7;$	Sensores principales.
$S_{C2};$	Sensor de completud
X	Un conjunto de entradas
y	Un conjunto de salidas
A	Un conjunto de estados
S	Un conjunto de elementos de señalización
M	Un conjunto de elementos de trabajo (máquinas)
R	Un sistema de procesamiento de señales
+	Disyunción
•	Conjunción
-	Negación
∨	“o”
∧	“y”
⌋	Negación
OR	“o”
AND	“y”
NOT	Negación

Prólogo

El presente trabajo de tesis tiene el propósito de generar conocimiento escrito para las futuras generaciones de la Maestría en Ingeniería Mecánica, interesadas en la planeación operacional de sistemas de manufactura.

Una de las herramientas más poderosas que asiste a las actividades de la planeación operacional, es la simulación computacional de sistemas productivos, direccionada a la imitación de los movimientos controlados y sincronizados de la maquinaria de trabajo.

La reproducción en términos virtuales de los sucesos operativos que se presentan en las líneas de producción, constituye una valiosa herramienta para analizar y predecir los fenómenos presentados en la manufactura de componentes.

Los beneficios derivados de la simulación computacional integran desde aspectos estratégicos para las empresas que utilizan simulación, hasta cuestiones de entrenamiento y seguridad para los operarios.

En la actualidad los modernos sistemas productivos funcionan en términos de “alta flexibilidad”. Esto es debido a los constantes incrementos o decrementos de los volúmenes de producción y también por la introducción de nuevos productos.

Cada cambio de proceso y operaciones de manufactura en las líneas de producción implica, por principio de cuentas, generar una evaluación operativa de la maquinaria ante dicho cambio y, posteriormente, determinar la factibilidad del nuevo proyecto (relativo al cambio).

El tiempo y el costo de una nueva implementación ya sea por incremento o decremento del volumen de producción o por las necesidades de nuevos productos en los mercados, resultan ser estratégicos para las industrias.

Dentro de los múltiples beneficios derivados de la simulación computacional destacan los siguientes:

- 1) Reducción de tiempo y costo de una nueva implementación o modificación en las líneas de producción.
- 2) Predicción de problemas actuales y futuros.
- 3) Soluciones alternativas y evaluadas para futuras implementaciones.
- 4) Capacitación eficiente y funcional del personal operativo.

Para diseñar y construir un simulador de sistemas de manufactura, es necesario establecer los modelos relacionados con las diferentes etapas de la planeación operacional. El diseño de modelos resulta ser la tarea más complicada en la generación de simuladores.

Cabe señalar que un reducido número de industrias mexicanas utiliza la simulación para el diseño de planes estratégicos. Esto es debido a que el software comercial es relativamente caro y en general al desconocimiento de dicha herramienta.

En este trabajo de tesis se presenta una forma sistemática para diseñar y construir un simulador computacional el cual imita los movimientos sincronizados de la maquinaria de trabajo, integrada a un sistema de manufactura tipo serial.

Las operaciones en la línea de producción estudiada, son imitadas por robots de tres grados de libertad modelados con el álgebra de "cuaterniones".

Se utiliza la plataforma de cálculo formal Mathematica para programar los modelos cinemáticos y de control relacionados con la maquinaria de trabajo.

Uno de los objetivos de este trabajo, es motivar a todas aquellas personas interesadas en la planeación operacional de sistemas de manufactura, a diseñar y construir simuladores computacionales y, con ello, contribuir al asesoramiento profesional de las empresas mexicanas en la aplicación de las técnicas de simulación.

Este trabajo pertenece a la línea de investigación "Simulación de sistemas de manufactura", desarrollada por la Sección Mecánica de la DEPMI, UNAM. Asimismo, el trabajo forma parte del acervo bibliográfico del laboratorio de Mecatrónica localizado en dicha institución.

Resumen

La simulación computacional es una herramienta que asiste a la planeación operacional de sistemas de manufactura. Sin embargo, por la complejidad de su diseño y construcción, así como en la implementación, la simulación casi no es utilizada por las industrias mexicanas. En este trabajo de tesis se presenta una forma sistemática para construir un simulador computacional relacionado con un sistema de manufactura tipo serial. El módulo de producción estudiado, consiste en la aplicación de cordones de soldadura a un componente metal-mecánico. Fueron utilizados robots articulados de tres grados de libertad para imitar las operaciones de soldadura. Los modelos cinemáticos de posicionamiento relacionados con el robot, se generan usando el álgebra de cuaterniones. Para construir el sistema de control de operaciones del módulo en estudio fue utilizado un código binario de procesos. Los modelos cinemáticos y los modelos de control fueron programados en la plataforma de cálculo formal Mathematica. Finalmente, los resultados derivados de este informe podrán ser utilizados para simular los sistemas de manufactura más complejos.

Palabras clave: Simulación, sistemas flexibles de manufactura, cinemática, álgebra de cuaterniones, control de procesos.

Introducción

En este trabajo de tesis se pretende cumplir con los siguientes objetivos:

- 1) Analizar un método de producción bajo cambios de diseño del componente y el tiempo de producción.
- 2) Sincronizar localmente usando el método del vórtice, el módulo de producción.
- 3) Sincronizar globalmente el módulo de producción usando el código binario operacional referencial.
- 4) Simular las operaciones del módulo.

En la actualidad los sistemas de manufactura son diseñados bajo el concepto de flexibilidad; es decir, que dichos sistemas sean capaces de manufacturar una gran cantidad de productos de diferentes características y, que además, puedan incrementar o decrementar los volúmenes de producción[1].

El hecho de que un sistema productivo sea flexible implica que la maquinaria sea también flexible; es decir que pueda realizar diferentes operaciones de manufactura con diferentes tasas de productividad. Así, por ejemplo, el robot IBR 2400/16 ABB puede ejecutar tareas tales como: 1) soldadura, 2) ensamble, 3) transporte y 4) aplicación de sellos entre otras[2]. Este robot es considerado como una máquina altamente flexible.

Sin embargo, la flexibilidad de un sistema de manufactura depende de que los estándares de calidad no sean reducidos y de que los tiempos de manufactura sean minimizados. Por tanto, el nivel de flexibilidad se medirá por todo el conjunto de máquinas que componen un sistema de manufactura y no por una máquina en particular. Por ejemplo, si una línea de producción integra un robot IRB 2400/16 ABB y una máquina no flexible, no se puede decir que la línea es flexible.

Dentro del contexto de flexibilidad de un sistema productivo se encuentra término "sincronización" es decir, cualquier cambio, ya sea en el diseño de los componentes o un aumento o decremento de los volúmenes de producción, implica que cada máquina en su conjunto (módulo) debe ser sincronizada. La sincronización de procesos se realiza de la manera siguiente[3,4]:

- 1) Sincronización local.
- 2) Sincronización global.

Al proceso de distribución de tiempos sobre las rutas de trabajo de la maquinaria de tal forma que el tiempo de producción unitaria (TpU) sea satisfecho se le llama sincronización. Es local si dicho proceso se realiza sobre un módulo y, es global si se realiza en todo el conjunto de módulos que integra una línea de producción[3,4].

Cabe hacer notar que, la flexibilidad de un sistema productivo está en relación directa con el proceso de sincronización local, específicamente en aquellos casos en que la línea requiere incrementar los volúmenes de producción, puesto que si una distribución de tiempos, direccionada por un TpU mínimo, indica que la operación de una máquina está en los límites permisibles de operación [5], entonces es posible que dicha maquinaria genere productos no adecuados. Además, los paros en la línea de producción serían constantes, puesto que si una máquina opera en los límites de operación, implica que su ciclo de vida será reducido, lo que a su vez implica que se dañará constantemente.

Por otro lado, el proceso de la sincronización global consiste en coordinar todos los módulos y, por consiguiente, todas sus máquinas, de tal forma que el tiempo de producción unitaria sea satisfecho lo que implica que el volumen de producción estimado también sea satisfecho[6].

Para el caso de que la línea de producción sea serial, el proceso de sincronización global se resume a superponer los módulos sobre un solo módulo; es decir, el final [5]. Para el caso de sistemas productivos no seriales, la sincronización global se realiza del mismo modo con la diferencia de que el sistema de control es diferente.

Recientemente se ha propuesto una técnica para sincronizar, localmente, módulos de producción. Dicha técnica es llamada "vórtice" [4,5,6]. En este método, las máquinas que componen un módulo se relacionan por medio de una entidad geométrica (en forma de vórtices) generando grupos de sincronización. Cada grupo es sincronizado a TpU usando el sistema de "sensado de ida". El vórtice tiene como origen la máquina de máxima Jerarquía (la más lenta) o también llamada referencial y termina por conectar una máquina antecesora inicial y una sucesora final.

El método del vórtice no es aplicable si la diferencia entre el tiempo de producción unitario y el tiempo máximo de una operación de manufactura es mínima [4,5].

Por otro lado, para sincronizar globalmente sistemas de manufactura seriales, se ha propuesto un esquema operacional llamado "Código Binario Operacional Referencial" (CBOR). Dicho código muestra los modos operacionales de la maquinaria y las líneas de control en código binario. Es llamado "referencial" por el hecho de que es construido bajo el concepto de TpU perfecto; es decir, sin variaciones en el volumen de producción[3,7].

Del CBOR se pueden interpretar las líneas de control los cuales pueden ser interpretados en varios dominios: 1) el proposicional, 2) el binario y 3) el simbólico. Por tanto, el CBOR es un esquema que representa el control de procesos y operaciones de un sistema de manufactura [3,5].

En este trabajo de tesis se estudia la flexibilidad de un módulo de producción hipotético; es decir, un sistema productivo idealizado. Dicho módulo procesa un

componente formado por tres cajas huecas sobre las cuales se realizan tres operaciones de soldadura.

El módulo en estudio fue analizado en [3,5,6]. En estos trabajos el componente está formado por dos cajas huecas y dos cordones de soldadura. Además, la línea de producción está formada por dos módulos 1) marcaje y 2) soldadura. En este trabajo de tesis solo se analiza, en términos de flexibilidad, sincronización local y global, el módulo de soldadura. La pieza de trabajo es modelada usando ecuaciones de forma, primitivas de manufactura y matrices de primitivas [8]. Todo esto con el propósito de modificar dichos modelos con los realizados en [2]. Se integra, además, la simulación del proceso hecho en matemática [8]. El modelo del robot, en este caso, de tres grados de libertad se anexa en el apéndice C, ya que dicho módulo fue desarrollado en [2].

Diversos trabajos han realizado estudios relacionados con la flexibilidad de manufactura, en [1] se diseñó y construyó un sistema flexible de manufactura semi-industrial mediante la utilización del "know-how" adquirido mediante el diseño y construcción de la celda flexible de manufactura, en [9] se estudió la relación entre la estrategia de negocio y la flexibilidad de manufactura, encontrándose que existe una relación uno a uno entre estas variables, en [10] se estudia la relación entre la estructura interna de la empresa y la magnitud de la flexibilidad de su tecnología, en [11] se enfoca en el diseño de una estrategia de control para un sistema simple que opera en un ambiente estocástico con retraso de información, en [12] mediante comparaciones de resultados computacionales con los métodos existentes indican que, el método heurístico es una alternativa viable para generar esquemas de diseño eficientes y efectivos para sistemas de manufactura flexibles, en [13] describe el desarrollo de un modelo aproximado para diseñar sistemas de manufactura como una sociedad de agentes autónomos que reducen el grado e impacto de incertidumbre y gradúa el nivel deseado de productividad, en [14] se examinan las implicaciones competitivas de la habilidad de una empresa para cambiar fácilmente

su manufactura de generaciones sucesivas de productos de alto-volumen con ciclos de vida cortos, en [15] se analiza dos problemas en la planeación de la producción de agrupar y montar un sistema de flujo flexible que es un subconjunto importante de FMSs donde la asignación de rutas de las partes es unidireccional, en [16] desarrolla un análisis sistemático y una evaluación aproximada ante la necesidad de comparar estrategias cuantitativas basados en una medida de flexibilidad del producto.

Este trabajo de tesis está dividido en 5 capítulos y tres apéndices los cuales se resumen a continuación:

En el capítulo 1 se define el problema a solucionar, las restricciones y la descripción del sistema productivo, así como una crónica de operaciones.

En el capítulo 2 se caracteriza el componente usando ecuaciones de forma, primitivas y matrices de primitivas [8].

En el capítulo 3 se discuten los diferentes tipos de flexibilidades de un sistema productivo. Además, se sincroniza localmente, el módulo de soldadura usando el método del vórtice.

En el capítulo 4 se utiliza un CBOR para representar los módulos operacionales de la maquinaria. Se discuten los dominios proposicionales, binario y simbólico relacionados con el sistema de control.

En el capítulo 5 se muestran las salidas gráficas de la simulación del módulo.

Finalmente, se dan las conclusiones y tres apéndices: en el apéndice A se presenta el plano de fabricación del componente, en el apéndice B se presenta el modelado de un robot de 3 GDL usando cuaterniones [7] y en el apéndice C se da el programa de simulación.

Capítulo 1

Definición del problema

Introducción: En este capítulo se presenta el componente el cual deberá ser procesado en el sistema de manufactura motivo de estudio. En un trabajo realizado en [2], se ha modelado un sistema productivo compuesto por 2 módulos: 1) marcaje y 2) soldadura. Dicho sistema consiste en aplicar 2 operaciones (marcaje y soldadura) al componente mostrado en la figura 1.1.

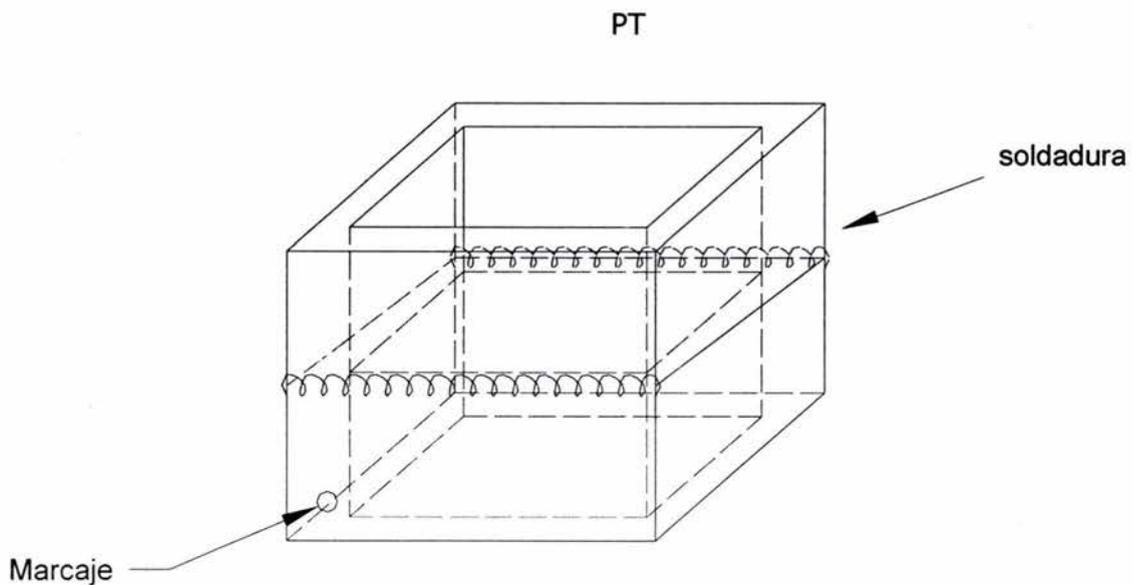


Figura 1.1. Componente (PT)

En este trabajo de tesis se introducirán nuevas modificaciones de proceso al componente mostrado en la figura 1.1, las cuales consisten en agregar una pieza F sobre el producto, y soldarla mediante un robot. Asimismo se estudiará la máxima capacidad de producción del sistema modificado. La figura 1.2 muestra al nuevo componente el cual será analizado a lo largo de este trabajo.

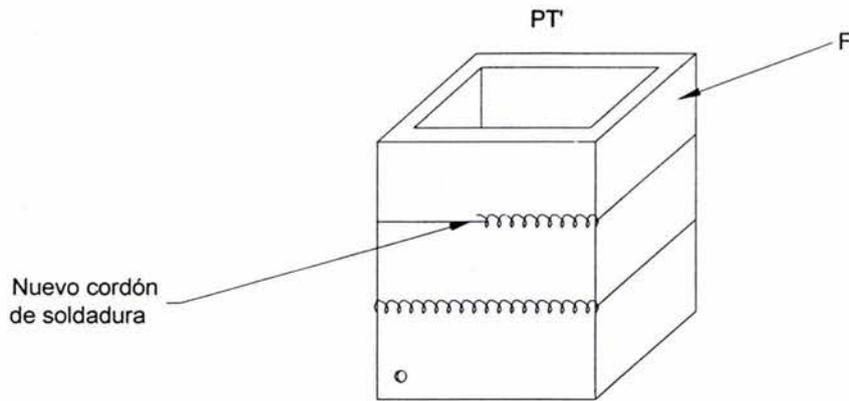


Figura 1.2. Características del nuevo componente

1.1 Definición del problema

“Se requiere integrar a la pieza PT mostrada en la figura 1.1 un nuevo componente (F), la pieza F debe ser soldada a PT usando una distribución de planta ya establecida. Es necesario estimar el nuevo volumen de producción derivado de la implementación. Antes de proceder a modificar el sistema productivo, se requiere simular las operaciones de la maquinaria de trabajo integrando la nueva operación de soldadura”.

De acuerdo con el problema anteriormente descrito, ya se conoce la distribución de planta del sistema productivo y, por tanto, se requiere evaluar su flexibilidad. La cual consiste en 2 aspectos:

- 1) Nuevo volumen de producción.
- 2) Modificación del componente.

En este trabajo solo será estudiado el módulo de soldadura, pues dicho módulo es el que integra la nueva modificación. La figura siguiente muestra la distribución actual del sistema productivo.

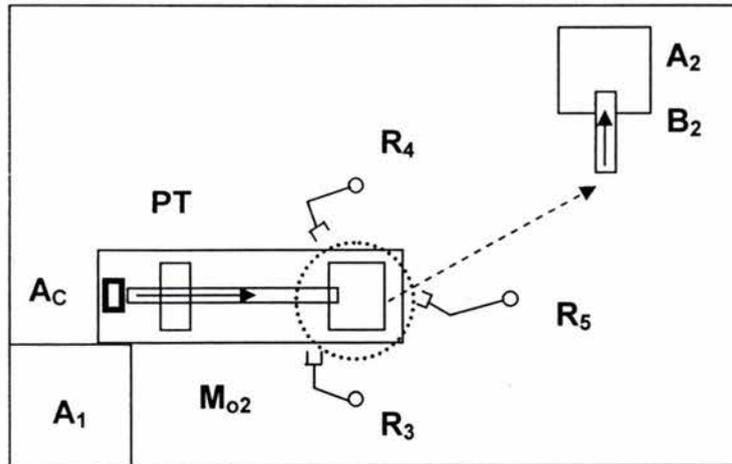


Figura 1.3. Distribución de planta para procesar al componente PT

Elementos de la distribución de planta

- A₁** Almacén de materia prima
- A_C** Actuador (cilindro neumático)
- M₀₂** Mesa de trabajo 2
- PT** Pieza de trabajo
- R₃, R₄, y R₅** Robots soldador y transportador
- B₂** Banda transportadora
- A₂** Almacén de producto terminado

1.2 Restricciones del problema

Para modelar la modificación planteada en la sección anterior, se utilizará la parte de las restricciones propuestas en [2,5,6] así como las asociadas con el nuevo problema. Estas son:

- 1) Restricciones de planta (RP).
 - Área de trabajo conocida y fija.
 - Distribución de almacén conocida y fija.
 - La distribución de maquinaria es conocida y fija.

2) Restricciones de proceso (Rpr).

- Jornada de trabajo: 16 horas/día.
- La modificación del componente, así como sus consideraciones dimensionales y de manufactura se muestran en el plano de fabricación localizado en el apéndice A.
- No se integran operarios a la línea de producción.

3) Restricciones de control (RC).

- Sensores de presencia en cada componente localizado en lugares estratégicos.
- Operación automática del sistema productivo.
- Sin paros de emergencia.

4) Restricciones del modelo (RM)

- Operaciones de manufactura “perfectas”.
- Operación de maquinaria “perfecta”.
- Se considera satisfecho el estimado de costos.
- No se incluyen estudios relacionados con optimización de tiempos y movimientos.
- Los tiempos de proceso son discretos.
- No se incluyen los perfiles de trayectoria, ni los modelos de velocidad y aceleración.
- La simulación de las operaciones se realiza con robots de 3 GDL.

1.3 Planteamiento del problema

En esta sección se plantea en términos generales, el problema por modelar, esto es:

Dada D_p , PF , $PE = \hat{PE}$, V_{pa}

encuentre:

- 1) La planeación táctica (PA) y
- 2) La planeación operacional (PO)
- 3) V_{pm}

tal que:

- 1) $R_p = \hat{R}_p$
- 2) $R_{pr} = \hat{R}_{pr}$
- 3) $R_c = \hat{R}_c$
- 4) $R_M = \hat{R}_M$

sean satisfechas”.

Los acrónimos utilizados en el problema descrito anteriormente son los siguientes:

Dp: Distribución de planta

PF: Planos de fabricación

PE: Planeación estratégica

V_{pa} : Volumen de producción anterior

V_{pm} : Volumen de producción modificado

En este trabajo se analizará la planeación táctica (PA) que consiste en:

- 1) Generar el modelo de ecuaciones de forma.
- 2) Representar las operaciones mediante primitivas de manufactura.
- 3) Generar las ecuaciones de primitivas.

Para el caso de la planeación operacional (PO) se estudiarán los siguientes modelos:

- 1) Trayectorias de operación de la nueva modificación.
- 2) Sistema de control.
- 3) Modelos cinemáticos de los robots utilizados.
- 4) Simulación del sistema de manufactura.

1.4 Descripción del módulo de soldadura de PT

En esta sección se describen brevemente las operaciones de manufactura relacionadas con el componente PT mostrado en la figura 1.1, así como cada máquina que compone el módulo de soldadura. En este caso, no se tomará en cuenta el módulo de marcaje.

El módulo de soldadura estudiado en [3,5] consiste en aplicar dos cordones de soldadura al subproducto β_{sub1} mostrado en la figura 1.4. Las operaciones de soldadura son realizadas por 2 robots de 3 GDL.

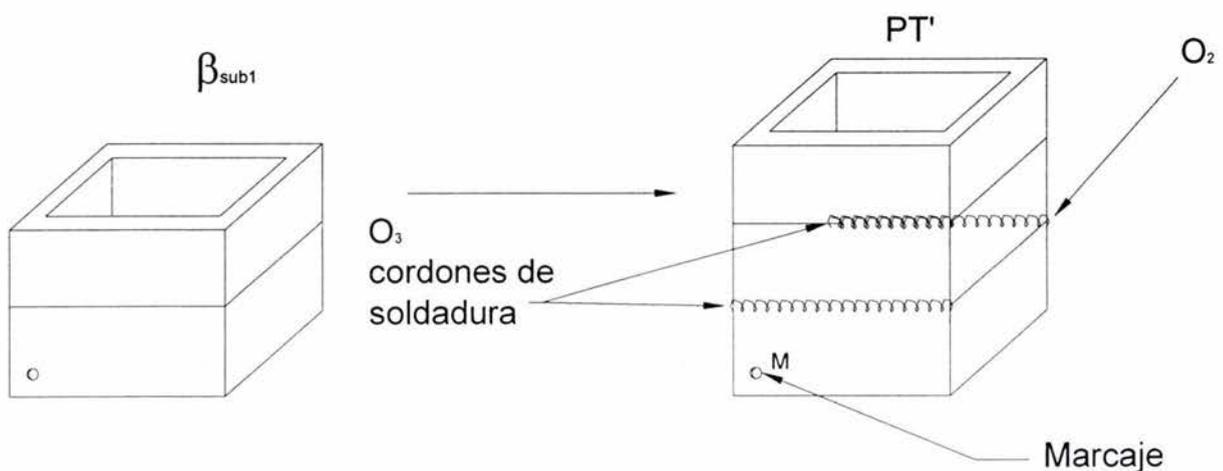


Figura 1.4 Operaciones de manufactura en el módulo de soldadura

La marca "M" mostrada en la figura 1.4, fue hecha previamente en el módulo de marcaje. Por otro lado, las operaciones principales de manufactura y las operaciones de transporte se definen a continuación:

- 1) Principales: soldadura (O_2) y soldadura (O_3).
- 2) Secundarias: transportes; primarios, secundarios, y de precisión.

La figura siguiente muestra los elementos de trabajo que componen el módulo de soldadura y su distribución sobre el área de trabajo.

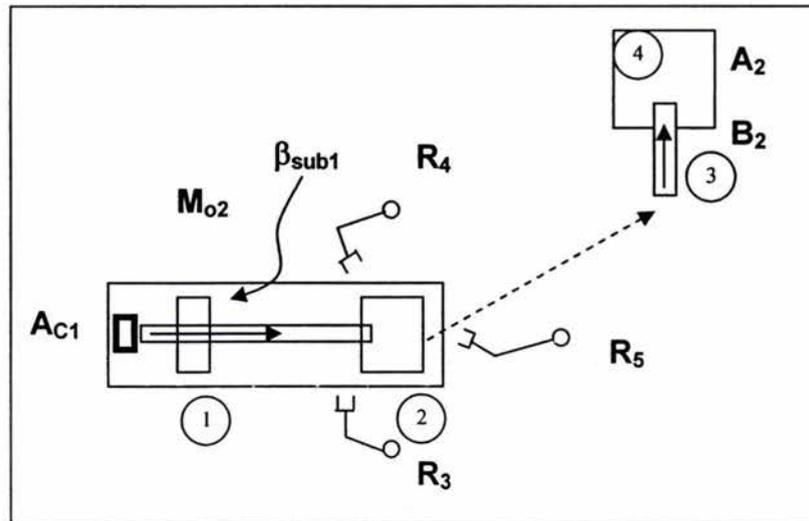


Figura 1.5 Elementos de trabajo del módulo de soldadura.

1.5 Crónica de proceso en el módulo de soldadura

El interés en esta sección es describir a través de una crónica de proceso, las tareas de los elementos de trabajo asociadas con el módulo de soldadura estudiado [5], esto es:

“Una vez colocada la pieza β_{sub1} sobre la mesa M_{02} , el actuador A_{c1} se activa, dicho actuador desplaza por un sistema de guías al componente hasta ubicarlo en la posición (2). Los robots R_3 y R_4 aplican 2 cordones de soldadura sobre la pieza de trabajo. El componente β_{sub2} generado es trasladado de la posición (2) a la posición (3) por medio del robot R_5 . Finalmente, el producto terminado es introducido al almacén (A_2) por medio de una banda (B_2)”.

Cabe hacer notar que el almacén A_2 es de productos terminados.

Capítulo 2

Caracterización del sistema de manufactura

Introducción. En este capítulo se presentan las modificaciones a las ecuaciones de forma y a las ecuaciones de primitivas [2,8,17] generadas por la introducción del nuevo componente y de la tercera operación de soldadura. Se redefinen los nuevos tipos de proceso y son discutidos los TpU's, y el volumen de producción modificado.

2.1 Ecuación de forma

En esta sección es generada la ecuación de forma, la cual definirá la nueva representación del componente estudiado en esta tesis.

Considere que el producto mostrado en la figura 1.2, puede ser descompuesto según se muestra en la figura 2.1.

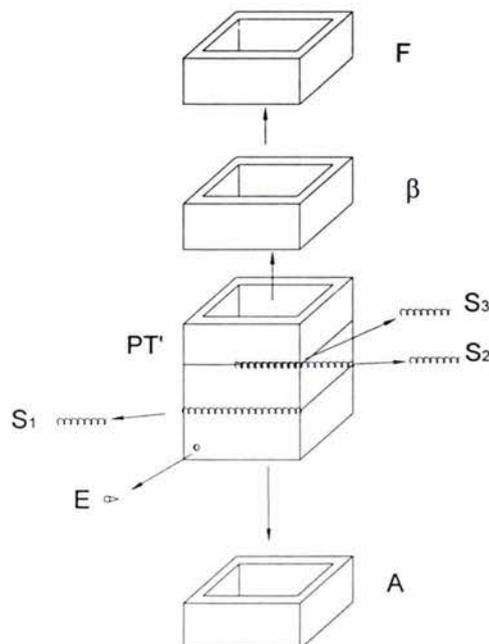


Figura 2.1 Descomposición del nuevo producto PT'

El conjunto F y el cordón S₃ mostrados en la figura anterior, representan las modificaciones al nuevo producto. De hecho, la modificación real se muestra en la figura siguiente:

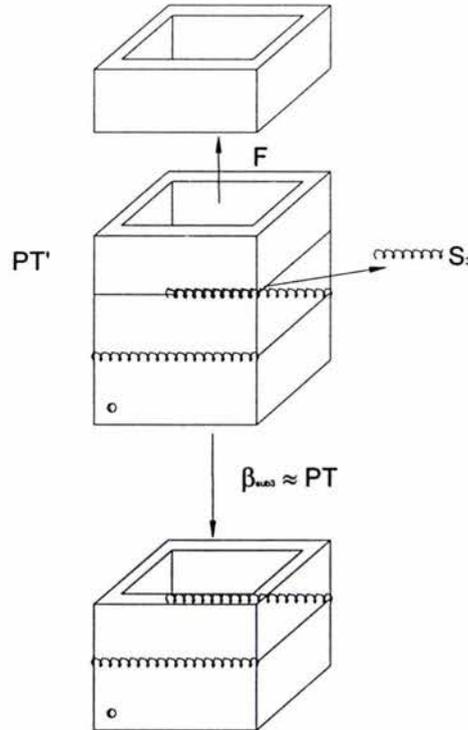


Figura 2.2 Representación completa de PT'

El componente PT tiene asociada la siguiente ecuación de forma [2]:

$$PT \approx \beta_{sub3} = (((C \overset{M}{T} E) \overset{S}{U} S_1) \overset{S}{U} S_2) \quad (2.1)$$

o, equivalentemente,

$$PT \approx \beta_{sub3} = (((\overset{Pr}{AU} \beta) \overset{M}{T} E) \overset{S}{U} S_1) \overset{S}{U} S_2) \quad (2.2)$$

Aquí, $C = AU \overset{Pr}{\beta}$

En términos de subpartes la ecuación (2.2) se descompone en las siguientes formas:

$$\begin{aligned}
 1) \quad \beta_{sub1} &= C \overset{M}{T} E = (A \overset{Pr}{U} \beta) \overset{M}{T} E \\
 2) \quad \beta_{sub2} &= \beta_{sub1} \overset{S}{U} S_1 \\
 3) \quad \beta_{sub3} &= \beta_{sub2} \overset{S}{U} S_2
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Considere ahora que S_3 es el cordón de soldadura asociado con la nueva modificación. Entonces,

$$PT' = PT \overset{S}{U} S_3 \tag{2.4}$$

En términos de subpartes, la expresión (2.4) se representa de la manera siguiente:

$$PT' \approx \beta_{sub4} = \beta_{sub3} \overset{S}{U} S_3 \tag{2.5}$$

Por otro lado, al descomponer β_{sub3} , de acuerdo con la expresión (2.1), se tiene el siguiente resultado:

$$PT' \approx \beta_{sub4} = (((C \overset{M}{T} E) \overset{S}{U} S_1) \overset{S}{U} S_2) \overset{S}{U} S_3 \tag{2.6}$$

o, equivalentemente,

$$\begin{aligned}
 PT' \approx \beta_{sub4} &= (((\underbrace{(A \overset{Pr}{U} \beta)}_C) \overset{M}{T} E) \overset{S}{U} S_1) \overset{S}{U} S_2) \overset{S}{U} S_3 \\
 &\quad \underbrace{\hspace{10em}}_{\beta_{sub1}} \\
 &\quad \underbrace{\hspace{15em}}_{\beta_{sub2}} \\
 &\quad \underbrace{\hspace{20em}}_{\beta_{sub3}} \\
 &\quad \underbrace{\hspace{25em}}_{\beta_{sub4}}
 \end{aligned} \tag{2.7}$$

La ecuación de forma asociada con la nueva modificación será, en este caso, la expresión (2.7). Cabe señalar que, por el hecho de introducir una nueva operación (de soldadura), la sucesión con la que fue construida la expresión (2.2), es extendida a O_{1234} .

Nota: En esta tesis se considera que el componente preparado C' , sale del almacén A_1 (de materias primas), en la configuración mostrada en la figura 2.3.

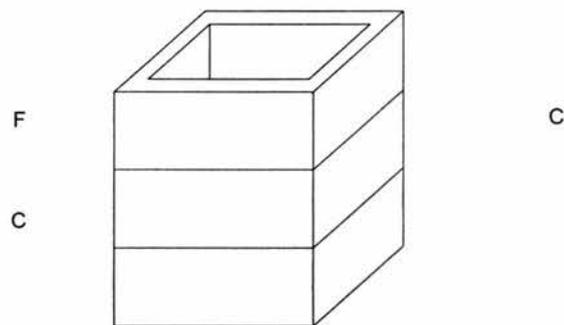


Figura 2.3 Componente preparado

Al considerar la configuración de C' , la expresión (2.6) debe ser modificada, esto es:

$$PT' \approx \beta_{sub4} = (((C' \overset{M}{T} E) \overset{S}{U} S_1) \overset{S}{U} S_2) \overset{S}{U} S_3 \quad (2.8)$$

Note que,

$$C' = C \overset{Pr}{U} F \quad (2.9)$$

o, equivalentemente,

$$C' = ((A \overset{Pr}{U} \beta) \overset{Pr}{U} F) \quad (2.10)$$

Por tanto, la expresión (2.8) se puede escribir en términos de la ecuación (2.10) de la manera siguiente:

$$PT' \approx \beta_{sub4} = ((((((A \overset{Pr}{U} \beta) \overset{Pr}{U} F)^{M_T} E) \overset{S}{U} S_1) \overset{S}{U} S_2) \overset{S}{U} S_3) \quad (2.11)$$

The diagram shows the equation (2.11) with several curly braces underneath it, indicating the grouping of terms into sub-processes:

- A brace under $(A \overset{Pr}{U} \beta)$ is labeled C .
- A brace under $(A \overset{Pr}{U} \beta) \overset{Pr}{U} F$ is labeled C' .
- A brace under $((A \overset{Pr}{U} \beta) \overset{Pr}{U} F)^{M_T}$ is labeled β_{sub1} .
- A brace under $((A \overset{Pr}{U} \beta) \overset{Pr}{U} F)^{M_T} E$ is labeled β_{sub2} .
- A brace under $((A \overset{Pr}{U} \beta) \overset{Pr}{U} F)^{M_T} E \overset{S}{U} S_1$ is labeled β_{sub3} .
- A brace under the entire expression $((A \overset{Pr}{U} \beta) \overset{Pr}{U} F)^{M_T} E \overset{S}{U} S_1 \overset{S}{U} S_2 \overset{S}{U} S_3$ is labeled β_{sub4} .

La forma geométrica de la expresión (2.11), se muestra en la figura 2.4.

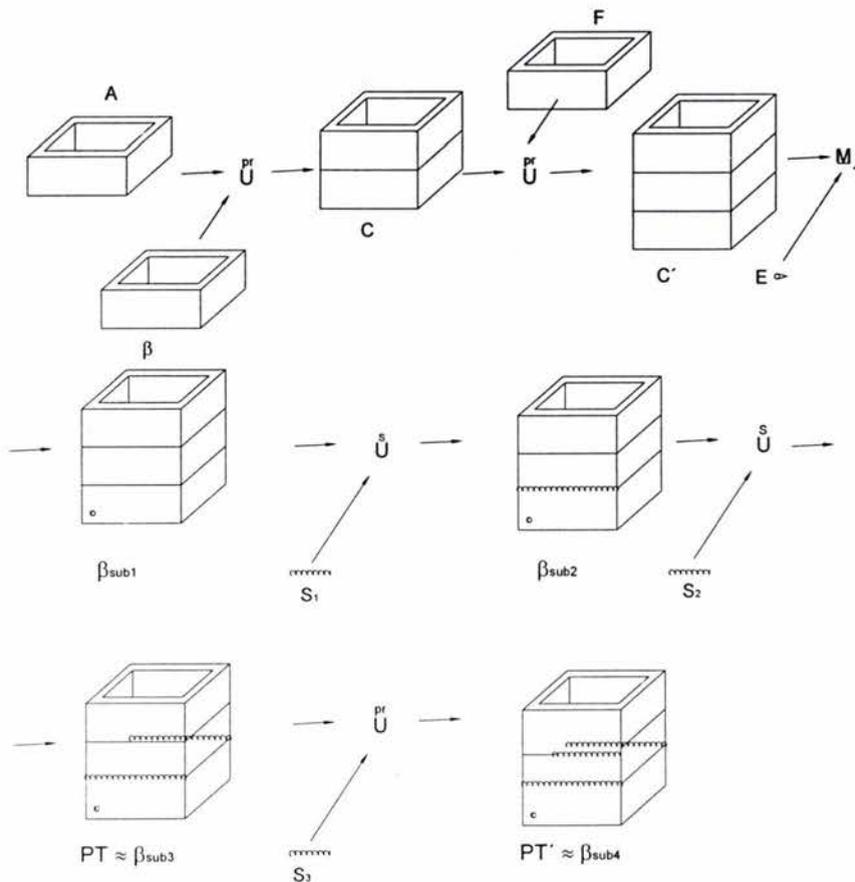


Figura 2.4 Representación geométrica de la ecuación de forma

Para finalizar esta sección, a continuación se caracteriza el dominio de manufactura asociado con el componente PT'.

$$\begin{aligned}
 1) \quad \beta_{MP} &= \{A, \beta, F\} \\
 2) \quad \beta_{PP} &= \{C, C'\} \\
 3) \quad \beta_{MAE} &= \{E, S_1, S_2, S_3\} \\
 4) \quad \beta_{SUB} &= \{\beta_{sub1}, \beta_{sub2}, \beta_{sub3}, \beta_{sub4}\} \\
 5) \quad \beta_{PT} &= \{PT, PT'\}.
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

2.2 Ecuación de primitivas

El interés en esta sección, es definir las nuevas primitivas de manufactura relacionadas con el componente estudiado. Las primitivas del componente PT son las representadas en la ecuación (2.13) [2,8]. En este trabajo se analizarán las primitivas asociadas con F, C', S₃, β_{sub4} y PT'.

Las primitivas del conjunto PT son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 1) \quad P_A^{PM} &= \{G_A, \ell_A, M_A\} \\
 2) \quad P_B^{PM} &= \{G_B, \ell_B, M_B\} \\
 3) \quad P_C^{PM} &= \left\{ P_A^{PM}, P_B^{PM}, \text{operación de preparación} \right\} \\
 4) \quad P_E^{PM} &= \left\{ \left\{ G_E, P_C^{PM} \right\}, \left\{ p \in \partial c, e_j \in \mathfrak{R}^3, \varphi_E, \ell_E \right\}, \left\{ \tau_{E, v_E}, w_{H_1}, w_C \right\}, \left\{ H_1, k_{ij} \right\} \right\} \\
 5) \quad P_{\beta_{sub1}}^{PM} &= \left\{ P_C^{PM}, P_E^{PM}, \text{operación de marcaje} \right\} \\
 6) \quad P_{S_1}^{PM} &= \left\{ \left\{ G_{S_1}, P_{\beta_{sub1}}^{PM} \right\}, \left\{ q \in \partial_{SUB1}, e_2 \in \mathfrak{R}^3, \ell_{S_1} \right\}, \left\{ \tau_{S_1, v_{S_1}}, w_{H_2}, w_{\beta_{sub1}} \right\}, \left\{ H_2, k_{ij} \right\} \right\} \\
 7) \quad P_{\beta_{sub2}}^{PM} &= \left\{ P_{\beta_{sub1}}^{PM}, P_{S_1}^{PM}, \text{operación de soldadura} \right\} \\
 8) \quad P_{S_2}^{PM} &= \left\{ \left\{ G_{S_2}, P_{\beta_{sub2}}^{PM} \right\}, \left\{ r \in \partial_{\beta_{sub2}}, e_2 \in \mathfrak{R}^3, \ell_{S_2} \right\}, \left\{ \tau_{S_2, v_{S_2}}, w_{H_3}, w_{\beta_{sub2}} \right\}, \left\{ H_3, k_{ij} \right\} \right\}
 \end{aligned} \tag{2.13}$$

$$9) P_{\beta \text{ sub3}}^{\text{PM}} = \{P_{\beta \text{ sub2}}^{\text{PM}}, P_{S2}^{\text{PM}}, \text{operación de soldadura}\}$$

Finalmente, la primitiva del producto PT se presenta por medio de la siguiente matriz [8,17]:

$$M_{\text{PT}} = \begin{Bmatrix} G_{\text{PT}} \\ P_{\text{PT}}^{\text{PM}} \\ V_{\text{PT}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} G_A & G_B & G_C & G_E & G_{S1} & G_{S2} & G_{\beta \text{ sub1}} & G_{\beta \text{ sub2}} & G_{\beta \text{ sub3}} \\ P_A^{\text{PM}} & P_B^{\text{PM}} & P_C^{\text{PM}} & P_E^{\text{PM}} & P_{S1}^{\text{PM}} & P_{S2}^{\text{PM}} & P_{\beta \text{ sub1}}^{\text{PM}} & P_{\beta \text{ sub2}}^{\text{PM}} & P_{\beta \text{ sub3}}^{\text{PM}} \\ V_A^{\text{PM}} & V_B^{\text{PM}} & V_C^{\text{PM}} & V_E^{\text{PM}} & V_{S1}^{\text{PM}} & V_{S2}^{\text{PM}} & V_{\beta \text{ sub1}}^{\text{PM}} & V_{\beta \text{ sub2}}^{\text{PM}} & V_{\beta \text{ sub3}}^{\text{PM}} \end{Bmatrix} \quad 2.14$$

Cabe señalar que V_A^{PM} significa “volumen de la materia prima A” caracterizado por la primitiva de manufactura.

El interés ahora es concentrado sobre la generación de las primitivas de manufactura asociadas con el componente PT motivo de estudio. En primer lugar es importante mencionar que el hecho de modificar el producto preparado C por C' implica cambiar algunos parámetros de las primitivas de PT, en particular a $P_{\beta \text{ sub1}}^{\text{PM}}$. Esto es:

$$P_{\beta \text{ sub1}}^{\text{PM}} = \{P_{C'}^{\text{PM}}, P_E^{\text{PM}}, \text{operación de marcaje}\}$$

Aquí, $P_{C'}^{\text{PM}}$ tiene las siguientes características:

$$P_{C'}^{\text{PM}} = \{P_C^{\text{PM}}, P_F^{\text{PM}}, \text{operación de preparación}\}$$

La geometría de C' es la mostrada en la figura 2.4. En segundo término se hace notar que la forma de la caracterización de primitivas de PT está en relación con la sucesión O123. Se entiende entonces que las primitivas de PT se caracterizan de acuerdo con el siguiente orden:

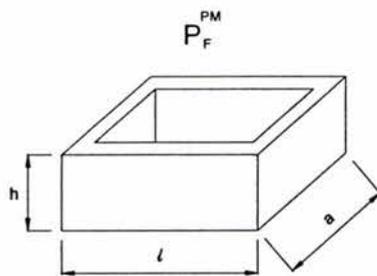
$$10) P_C^{\text{PM}} = \{G_F, \ell_F, M_F\} \quad (2.15)$$

$$11) P_{C'}^{PM} = \{P_C^{PM}, P_F^{PM}, \text{operación de preparación}\}$$

$$12) P_{S3}^{PM} = \{G_{S3}, P_{\beta \text{ sub3}}^{PM}, \{r \in \partial_{\beta \text{ sub3}}, \underline{e}_2^{IV} \in \mathbb{R}^3, \ell_{S3}\}, \{t_{S1}, v_{S1}, W_{\beta \text{ sub3}}, W_{H_3}, \{H_3, K_{ij}\}\}\}$$

$$13) P_{\beta \text{ sub4}}^{PM} = \{P_{\beta \text{ sub3}}^{PM}, P_{S3}^{PM}, \text{operación de Soldadura}\}$$

La información geométrica y de manufactura de las primitivas anteriormente caracterizadas se presentan en la siguiente figura:

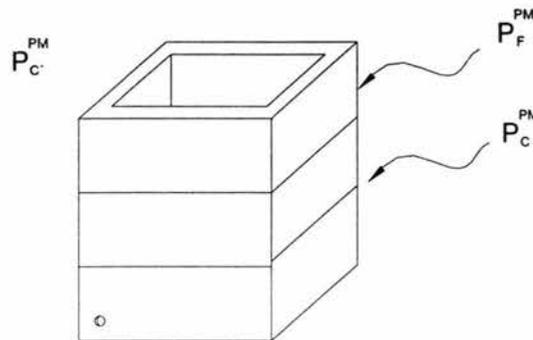


G_F : Caja rectangular hueca

ℓ : $l \times h \times a$

M_F : Acero 1040

a) P_F^{PM}



Operación de preparación

b) $P_{C'}^{PM}$

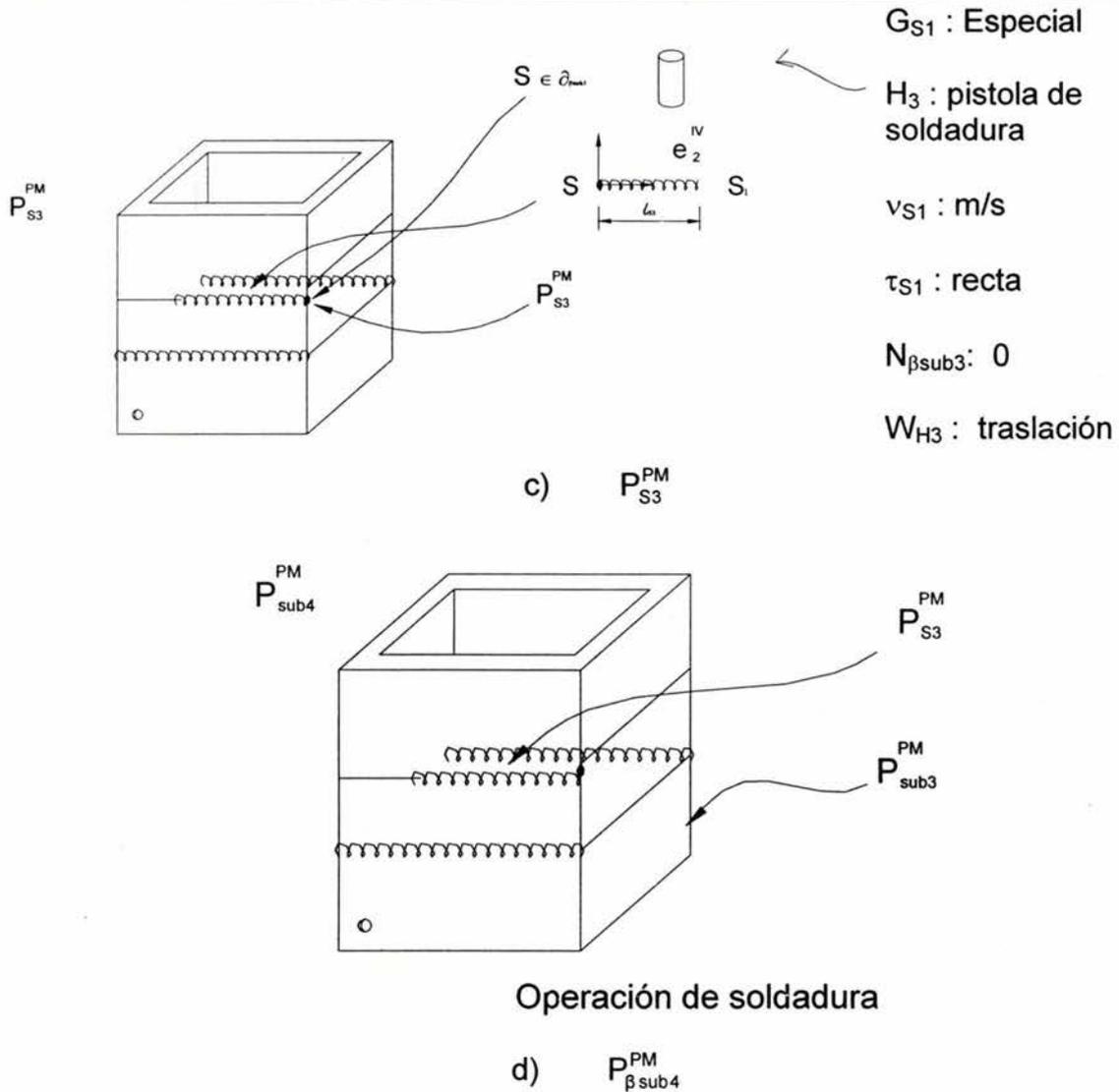


Figura 2.5 Caracterización de primitivas de manufactura para PT'

La ecuación de volúmenes modificados [8,17] relacionada con el componente PT es la siguiente:

$$V_{PT}^{PM} \approx V_{\beta sub3}^{PM} \approx (((V_C^{PM} - V_E^{PM}) + V_{S1}^{PM}) + V_{S2}^{PM}) \quad (2.16)$$

y sus respectivas ecuaciones de subvolúmenes son:

$$1) V_{\beta sub1}^{PM} = (V_C^{PM} - V_E^{PM}) \quad (2.17)$$

$$2) V_{\beta \text{ sub2}}^{\text{PM}} = (V_{\beta \text{ sub1}}^{\text{PM}} + V_{S1}^{\text{PM}})$$

$$3) V_{\beta \text{ sub3}}^{\text{PM}} = (V_{\beta \text{ sub2}}^{\text{PM}} + V_{S2}^{\text{PM}})$$

Cabe señalar que $V_C^{\text{PM}} = (V_A^{\text{PM}} \pm V_{\beta}^{\text{PM}})$ y, por lo tanto, la ecuación (2.16) se puede escribir de la manera siguiente:

$$V_{\text{PT}}^{\text{PM}} \approx V_{\beta \text{ sub3}}^{\text{PM}} \approx (((V_A^{\text{PM}} \pm V_{\beta}^{\text{PM}}) - V_E^{\text{PM}}) + V_{S1}^{\text{PM}}) + V_{S2}^{\text{PM}} \quad (2.18)$$

Para el caso del nuevo producto PT' se debe formular la ecuación de volúmenes modificado. Para ello considere las siguientes equivalencias:

$$a) P_F^{\text{PM}} \Leftrightarrow V_F^{\text{PM}} \quad (2.19)$$

$$b) P_{C'}^{\text{PM}} \Leftrightarrow V_{C'}^{\text{PM}}$$

$$c) P_{S3}^{\text{PM}} \Leftrightarrow V_{S3}^{\text{PM}}$$

$$d) P_{\beta \text{ Sub4}}^{\text{PM}} \Leftrightarrow V_{\beta \text{ Sub4}}^{\text{PM}}$$

$$e) P_{\text{PT}'}^{\text{PM}} \Leftrightarrow V_{\text{PT}'}^{\text{PM}}$$

Note que la ecuación de volúmenes asociada con PT' se puede escribir de la manera siguiente:

$$V_{\text{PT}'}^{\text{PM}} \approx V_{\beta \text{ sub4}}^{\text{PM}} = (V_{\text{PT}}^{\text{PM}} + V_{S3}^{\text{PM}}) \quad (2.20)$$

Sin embargo, dicha expresión no integra al volumen V_F^{PM} ni a $V_{C'}^{\text{PM}}$. Para construir correctamente la ecuación de volúmenes modificada relacionada con PT' se procede de la manera siguiente:

$$V_{\beta sub1}^{PM} = V_{C'}^{PM} - V_E^{PM} \Leftrightarrow (((V_A^{PM} \pm V_{\beta}^{PM}) + V_F^{PM}) - V_E^{PM}) \quad (2.21)$$

$$V_{PT'}^{PM} \approx V_{\beta sub4}^{PM} = ((((((V_A^{PM} \pm V_{\beta}^{PM}) + V_F^{PM}) + V_E^{PM}) + V_{S1}^{PM}) + V_{S2}^{PM}) + V_{S3}^{PM}) \quad (2.22)$$

La ecuación (2.21) representa las expresiones de volúmenes modificados relacionada con PT y con la sucesión O1234. Para finalizar esta sección es necesario construir la matriz de primitivas asociada con el producto PT' en estudio, esto es:

$$M_{PT} = \begin{Bmatrix} G_{PT} \\ P_{PT}^{PM} \\ V_{PT}^{PM} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} G_A & G_{\beta} & G_F & G_C & G_{C'} & G_E & G_{S1} & G_{S2} & G_{S3} & G_{\beta sub1} & G_{\beta sub2} & G_{\beta sub3} & G_{\beta sub4} \\ P_A^{PM} & P_{\beta}^{PM} & P_F^{PM} & P_C^{PM} & P_{C'}^{PM} & P_E^{PM} & P_{S1}^{PM} & P_{S2}^{PM} & P_{S3}^{PM} & P_{\beta sub1}^{PM} & P_{\beta sub2}^{PM} & P_{\beta sub3}^{PM} & P_{\beta sub4}^{PM} \\ V_A^{PM} & V_{\beta}^{PM} & V_F^{PM} & V_C^{PM} & V_{C'}^{PM} & V_E^{PM} & V_{S1}^{PM} & V_{S2}^{PM} & V_{S3}^{PM} & V_{\beta sub1}^{PM} & V_{\beta sub2}^{PM} & V_{\beta sub3}^{PM} & V_{\beta sub4}^{PM} \end{Bmatrix} \quad (2.23)$$

MP PP MAE *suβ*

2.3 Tiempos de procesos

En esta sección se caracterizan los tiempos de procesos asociados con la manufactura del componente PT' motivo de estudio. Por otro lado, los tiempos de procesos relacionados con PT son los siguientes [2,8]:

$$1) T_{FE} = 2 \text{ s} \quad (2.24)$$

$$2) T_{FS1} = 14 \text{ s}$$

$$3) T_{FS2} = 14 \text{ s}$$

Para el caso del tiempo fijo de la nueva operación de soldadura, es necesario observar el plano de fabricación mostrado en el apéndice A. La siguiente relación proporciona el tiempo fijo T_{FS3} :

$$T_{FS3} = \frac{l_{S3}}{V_{S3}} = 4 \text{ s} \quad (2.25)$$

Aquí, l_{S3} y V_{S3} son la longitud del cordón S_3 y la velocidad de aplicación de la soldadura, respectivamente.

Por otro lado, el T_{pU} del producto PT es 22 s [2]. Para el caso de PT' dicho tiempo debe ser calculado.

La sumatoria de tiempos fijos para PT' es la siguiente:

$$\sum_{i=1}^4 T_F = T_{FE} + T_{FS1} + T_{FS2} + T_{FS3} = 34 \text{ s} \quad (2.26)$$

Capítulo 3

Planeación operacional del sistema productivo

Introducción. En este capítulo se presenta la planeación operacional asociada con el módulo de soldadura el cual manufacturará el componente PT' motivo de estudio. Son definidos cinco tipos de flexibilidades las cuales se presentan en un sistema de manufactura: 1) Tipo A, 2) Tipo B, 3) Tipo C, 4) Tipo D y 5) Tipo E. En este trabajo de tesis se utilizará la flexibilidad tipo C. Posteriormente, es seleccionado, de acuerdo con las flexibilidades utilizadas, la máquina encargada de aplicar la nueva operación de soldadura. Se diseñan las trayectorias de ciclo de dicha máquina y se procede a rediseñar el sistema de control de operaciones utilizando el método del vórtice [4,7]. Finalmente, se determina el máximo volumen de producción del módulo en estudio y se genera una crónica de operación incluyendo el TpU propuesto.

3.1 Flexibilidades de un sistema productivo

Una de las cualidades de los sistemas de manufactura actuales es la flexibilidad de las máquinas de trabajo a cambios de volúmenes de producción o a nuevas implementaciones derivadas de la concepción de nuevos productos.

La flexibilidad de un sistema de manufactura se define de la manera siguiente [12]:

“Es la capacidad de respuesta de un sistema productivo ante variaciones en los volúmenes de producción y/o a la manufactura de nuevos productos”.

Se pueden caracterizar y clasificar las flexibilidades de la manera siguiente:

- 1) Flexibilidad tipo A. Se presenta cuando un sistema productivo puede ser modificado de acuerdo con las variaciones del volumen de producción. Dicha

- variación o modificación debe tomar en cuenta únicamente la maquinaria de proceso previamente distribuida de las líneas de producción anteriores.
- 2) Flexibilidad tipo B. Este tipo de flexibilidad es igual a la tipo A con la diferencia de que las variaciones se presentan en el diseño y manufactura de nuevos productos y no en los volúmenes de producción.
 - 3) Flexibilidad tipo C. La flexibilidad máxima se presenta cuando un sistema productivo es capaz de responder ante variaciones en los volúmenes de producción y a la manufactura de nuevos productos.
 - 4) Flexibilidad parcial tipo D. En esta flexibilidad el sistema responde a variaciones de volúmenes de producción y/o modificaciones a productos integrando nueva maquinaria o, en su caso, sustituyendo elementos de trabajo. Aquí se debe de preservar la parte de la maquinaria de la anterior línea de producción.
 - 5) Flexibilidad nula tipo E. Un sistema de manufactura se considera rígido o de flexibilidad nula cuando ante variaciones de los volúmenes de producción y/o a la introducción de nuevos productos, no puede responder, es decir, se requerirá cambiar toda la maquinaria y hacer un nuevo diseño de la línea de producción.

Es importante mencionar que la flexibilidad de un sistema productivo se determina siempre que este ya exista o, en su caso, evaluar la flexibilidad del sistema antes de ser implementado. Además, el tipo de maquinaria usada en la producción determina el grado de flexibilidad del sistema de manufactura.

En este trabajo de tesis se utilizará el nivel de flexibilidad tipo C o máxima, pues existen variaciones tanto en el volumen de producción como en la geometría y manufactura del producto estudiado. Para finalizar esta sección, es importante agregar que, la introducción de maquinaria sofisticada como robots industriales y CNC, así como desarrollos tecnológicos como la automatización industrial, permiten hoy en día, diseñar sistemas de manufactura con un alto grado de flexibilidad.

3.2 Análisis de la modificación y selección de la maquinaria para nuevo proceso

En esta sección se determina la(s) máquina(s) que será la encargada de realizar la nueva operación de soldadura sobre el componente en estudio. Para ello, es necesario definir el siguiente problema:

“ Dada D_{pa} , PF' , T_{FP} , encuentre:

- 1) $M = \{M_1, \dots, M_i\} \in D_{pa}$
- 2) D_{pf}

tal que:

- a) $PT' = \hat{PT}'$
- b) $F_{TC} = \hat{F}_{TC}$

sean satisfechas”.

Aquí, D_{pa} es la distribución de planta anterior, PF' son los nuevos planos de fabricación; T_{FP} son los tiempos fijos del proceso, M es una colección de máquinas integrada a D_{pa} , D_{pf} es la distribución de planta final y F_{TC} es la flexibilidad tipo C o máxima. Es importante señalar que el hecho de cambiar de posición una máquina, si el proceso así lo requiere, no implica que $F_{TC} \Leftrightarrow \hat{F}_{TC}$. Lo que sí implica es que cambia la distribución de planta.

Para poder encontrar la máquina o las máquinas del conjunto D_{pa} sujetas a cambios de proceso, se deben considerar los siguientes pasos:

- 1) Las máquinas seleccionadas deberán ser de operación principal.

- 2) Identificar las operaciones principales anteriores y las máquinas asociadas.
- 3) Identificar, en el nuevo producto, la operación agregada (nueva).
- 4) Generar una crónica de proceso integrando la nueva modificación.
- 5) Identificar la(s) máquina(s) principal(es) más cercana con la nueva operación.
- 6) Seleccionar la(s) máquina(s) cercana al nuevo proceso.

Cabe señalar que las nuevas operaciones deben de ser equivalentes con las primeras, esto con el propósito de utilizar las mismas máquinas del sistema productivo anterior. Para el caso de una nueva operación no equivalente se debe considerar la flexibilidad tipo D.

La caracterización siguiente asociada con el módulo de soldadura, satisface los pasos anteriormente señalados:

- 1) R_3 y R_4
- 2) Soldadura (O_2) $\rightarrow R_3$, Soldadura $O_3 \rightarrow R_4$.
- 3) O_4 soldadura en PT'.
- 4) El producto $\beta_{sub1} = C^T_M E$ es transportado por A_{C2} . En la mesa M_{O2} los robots R_3 y R_4 aplican dos cordones de soldadura sobre β_{sub2} . En la parte superior de β_{sub2} , en referencia al cordón S_1 , se localiza el cordón S_3 de la nueva modificación. Una máquina "x" debe aplicar soldadura sobre β_{sub2} generando $\beta_{sub3} = PT'$. El robot R_5 transporta β_{sub3} hacia el almacén A_2 de productos terminados.
- 5) La máquina más cercana con la nueva operación es R_3 .
- 6) La máquina de proceso por modificar es R_3 .

La figura siguiente muestra el esquema del módulo de soldadura relacionada con la crónica de procesos señalada en el paso 4).

- 3) Determinar un ciclo operativo unitario para la nueva operación (no considerar los ciclos de las operaciones anteriores).
- 4) Asociar tiempos de ciclo con los lugares geométricos.
- 5) Verificar que la máquina realice la operación bajo parámetros cinemáticos admisibles.
- 6) Si el paso 5) es satisfecho, determinar la secuencia de operaciones sobre el componente en estudio.
- 7) Modificar los ciclos operativos de las operaciones anteriores e incluir el ciclo de nueva operación.
- 8) Asociar tiempos a los ciclos de operación.
- 9) Verificar en su conjunto las operaciones de la máquina bajo el inciso 5).

La siguiente caracterización está asociada con la máquina R_3 y con los pasos anteriormente señalados:

- 1) La nueva operación (O_4) se localiza en el radio de alcance del robot R_3 .
- 2) El nuevo lugar geométrico de operación se muestra en la figura siguiente:

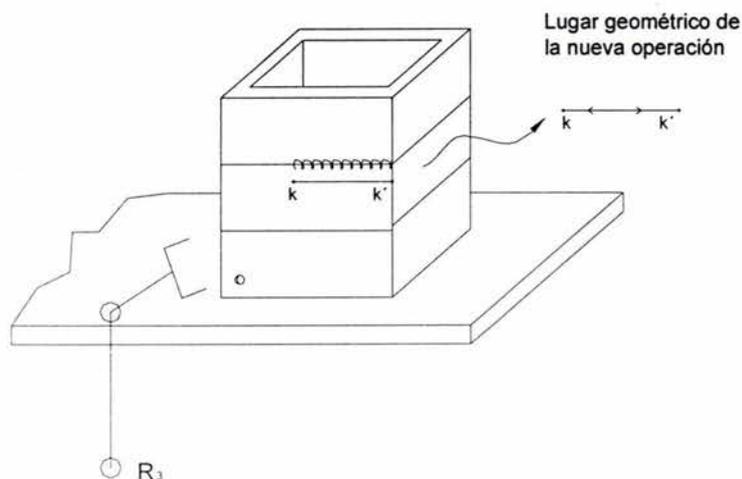


Figura 3.2. Definición del nuevo lugar geométrico

- 3) y 4) El ciclo operativo unitario para la nueva operación y los tiempos asignados se muestran en la figura siguiente:

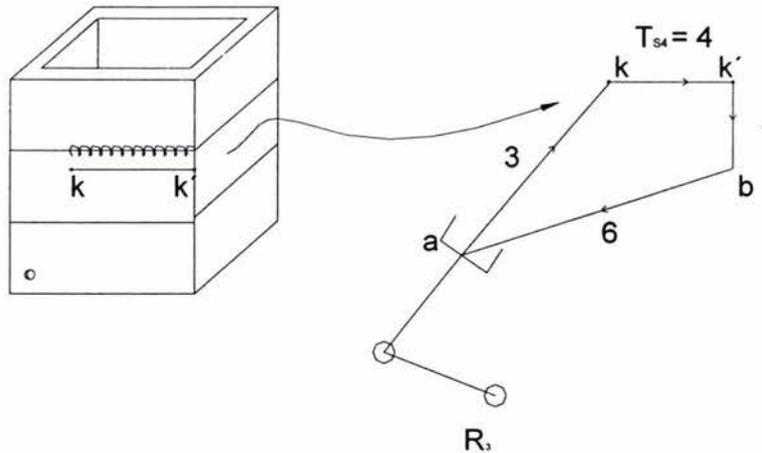


Figura 3.3. Ciclo operativo preliminar de la nueva operación

Observación: El ciclo operativo mostrado en la figura 3.3 es preliminar y, por tanto, no es el definitivo.

- 5) Se considera que R_3 satisface los parámetros cinemáticos admisibles [5].
- 6) Existen exactamente dos sucesiones de operaciones las cuales puede efectuar el robot, estas son:
- 6.1) $O_{(2,3),4}$
- 6.2) $O_{4,(2,3)}$

Note que la permutación (2,3) significa que las operaciones O_2 y O_3 se aplican simultáneamente de acuerdo con el proceso anterior.

Cabe señalar que si el proceso lo requiere, es posible modificar la simultaneidad de las operaciones O_2 y O_3 . Si esto fuera el caso, entonces existirían 6 opciones: O_{234} , O_{243} , O_{324} , O_{342} , O_{423} , O_{432} .

Para poder seleccionar la sucesión adecuada se tiene que considerar los siguientes aspectos:

- 1) "Home" del robot (o punto de referencia de la herramienta del robot).
- 2) Distancias entre los puntos iniciales de aplicación de soldadura.
- 3) Analizar si la forma de aplicación no afecta en lo general el componente (su manufacturabilidad)

Para el caso de estudio analizado en esta tesis, la secuencia seleccionada es $O_{(2,3),4}$ por las siguientes razones:

- a) No se modifica el "Home" del robot R_3 .
 - b) No se modifica el "Home" del robot R_4 .
 - c) Es posible realizar el nuevo cordón una vez terminadas las operaciones (O_2, O_3).
- 7) Los ciclos operativos de R_3 incluyendo la nueva operación se presentan en la figura siguiente:

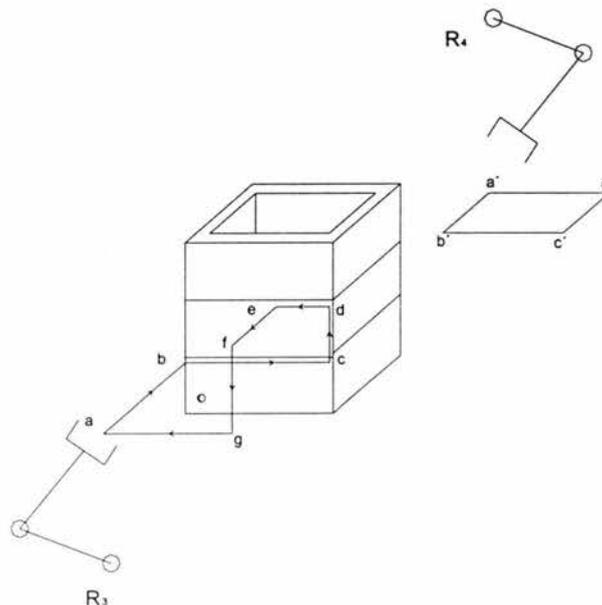


Figura 3.4 Lugares geométricos propuestos para R_3 y R_4

Cabe hacer notar que el ciclo operativo a-b-c-d-e-f-g-a de la máquina R_3 ha sido propuesto y no significa que sea el ciclo final.

8) La asociación de tiempos de ciclo para las operaciones de los robots R_3 y R_4 se muestra en la figura 3.5.

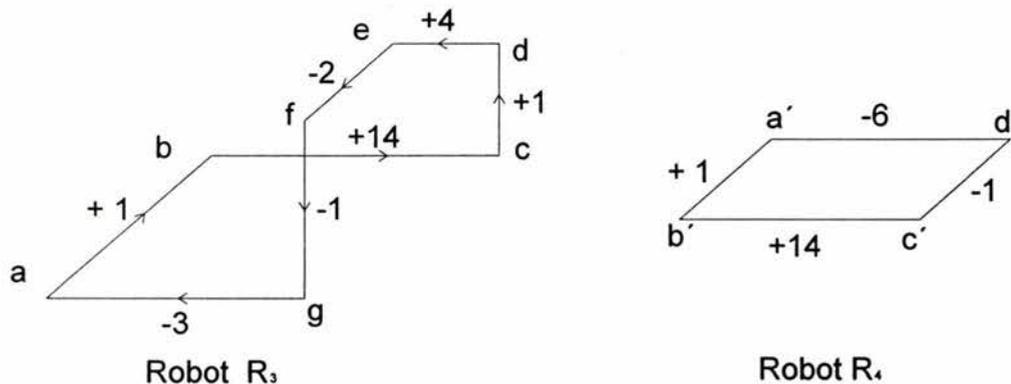


Figura 3.5 Asignación de tiempos a los ciclos operativos

9) Se considera que la máquina R_3 satisface los parámetros cinemáticos admisibles.

Observación. Los tiempos asignados a los ciclos operativos fueron propuestos solo para verificar si la máquina R_3 puede operar bajo parámetros cinemáticos admisibles.

3.4 Tiempos de proceso de la máquina R_3

En esta sección se estudian los tiempos de proceso asociados con el robot R_3 . También se determinarán los rangos de volumen de producción bajo caracterización de T_{pU} propuestos.

Los tiempos fijos del módulo de soldadura son:

$$1) T_{FS1} = 14 \text{ s}$$

$$2) T_{FS2} = 14 \text{ s}$$

$$3) T_{FS3} = 4 \text{ s}$$

Puesto que los robots R_3 y R_4 operan simultáneamente en la aplicación de los cordones S_1 y S_2 , entonces $T_{FS1,S2} = 14$ s. La sumatoria de tiempos fijos es la siguiente:

$$\sum_{i=1}^2 T_F = T_{FS1,S2} + T_{FS3} = 18 \text{ s}$$

Aquí, $T_{FS1,S2}$ T_{FS3} son los tiempos fijos de aplicación de las soldaduras. El T_{pU} asociado con el producto PT es 22 s [2,3,4,5]. Para el caso del PT' motivo de estudio en este informe, el T_{pU}' puede variar según el tiempo total de ciclo del robot R_3 , es decir:

$$T_{pU}' = \sum T_F + \sum T_{NF} \quad (3.1)$$

Aquí, $\sum T_{NF}$ es la sumatoria de tiempos no fijos. Por ejemplo, de acuerdo con la figura 3.6, los tiempos no fijos son:

$$1) T_{a-b} = 1$$

$$2) T_{c-d} = 1$$

$$3) T_{e-f} = 2$$

$$4) T_{f-g} = 1$$

$$5) T_{g-a} = 3$$

Por tanto, $T_{pU}' = 18 + 8 = 26$ s

Cabe señalar que el $T_{pU}' = 26$ s, está asociado con la asignación de tiempos no fijos asociados con la figura 3.6. Por otro lado, el volumen de producción está en función del T_{pU}' y la jornada de trabajo J_T , es decir:

$$V_p' = \frac{J_T (\text{s/anuales})}{T_{pU}' (\text{s/piezas})} = \text{piezas/anuales} \quad (3.2)$$

Es importante hacer notar que si el TpU' disminuye, entonces Vp' aumenta y viceversa, si TpU' aumenta, Vp' disminuye.

La siguiente proposición es de fundamental importancia en este trabajo de tesis:

“Si la variación del volumen de producción está en función del TpU , y el TpU está en función de los tiempos no fijos asociados con la máquina por modificar (en el sentido de proceso), entonces el volumen de producción está en función de los tiempos no fijos.”

3.5 Algunas consideraciones sobre el ciclo del robot R_3

Una vez determinadas las relaciones existentes entre el TpU' , Vp' y ΣT_{NF} , el siguiente objetivo es evaluar los ciclos operativos tanto del robot R_3 como los asociados con R_4 .

La máquina de especial interés es R_3 , pues dicha máquina integra el ciclo que definirá en TpU' y, este, a su vez, determinará el volumen de producción.

En primer lugar, la asignación de los tiempos no fijos no debe ser arbitraria. En realidad dicha asignación depende de los parámetros admisibles cinemáticos de la máquina de estudio. En segundo lugar, el diseño del ciclo operativo de la máquina está en función de la sucesión de operaciones utilizada para generar al producto PT' y de las necesidades de sensado relacionados con el control de operaciones.

Los lugares geométricos que determinan el ciclo operativo de la máquina por modificar se caracterizan de dos formas [5]:

- 1) Fijos.
- 2) Modificables.

Planeación operacional del sistema productivo

Los lugares geométricos fijos se asocian con las operaciones principales (tiempos fijos) y los modificables a los tiempos no fijos u operaciones de acercamiento y/o retiro.

Note que, tanto los lugares geométricos como los tiempos no fijos pueden ser modificados o rediseñados, excepto los relacionados con las operaciones principales.

La figura siguiente muestra 4 configuraciones de ciclos operativos de la máquina R_3 , así como la asignación de tiempos no fijos los cuales satisfacen los parámetros cinemáticos admisibles:

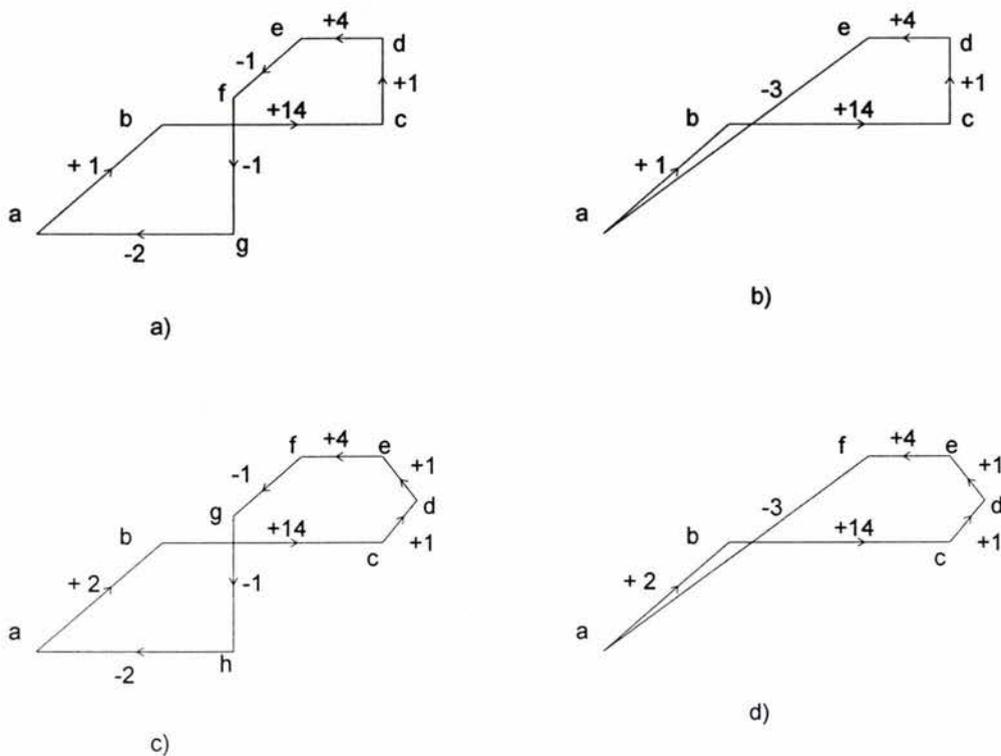


Figura 3.6 Configuraciones de los ciclos operativos de R_3

Cabe señalar que los cuatro ciclos mostrados en la figura 3.6 están sujetos a "home" fijo de R_3 . Por otro lado, los TpU'_s relacionados para cada ciclo son:

Planeación operacional del sistema productivo

$$1) \quad T_{pU'_a} = 18 + 6 = 24 \text{ s/pieza.}$$

$$2) \quad T_{pU'_b} = 18 + 5 = 23 \text{ s/pieza.}$$

$$3) \quad T_{pU'_c} = 18 + 8 = 26 \text{ s/pieza.}$$

$$4) \quad T_{pU'_d} = 18 + 7 = 25 \text{ s/pieza.}$$

Note que el volumen de producción máximo se presenta en $T_{pU'_b}$ y el mínimo en $T_{pU'_c}$, siempre que dichas $T_{pU'}$,s sean fijos y la jornada de trabajo J_T también.

3.6 Método de sincronización por vórtice perfecto a $T_{pU'}$ fijos

En esta sección se presenta la sincronización de operaciones en el módulo de soldadura usando el método del vórtice perfecto a $T_{pU'}$ fijo desarrollado [4,5,6].

Dicho método depende de las siguientes consideraciones:

- 1) La máquina de máxima jerarquía opera a ciclo continuo.
- 2) Los tiempos de ciclo de la máquina de máxima jerarquía satisface el T_{pU} .
- 3) La sumatoria de los tiempos de ida de la máquina antecesora final (si existe) y la sucesora final (si existe) y de el tiempo de ida de la máquina de máxima jerarquía satisface el T_{pU} .

La distribución de maquinaria del módulo de soldadura asociada con el componente PT integra [2,3]:

- 1) Una máquina antecesora (A_{C2}).
- 2) Dos máquinas principales (R_3, R_4).
- 3) Dos máquinas sucesoras (R_5, B_2).

La configuración del vórtice sucesor final es la mostrada en la figura siguiente [5,6]:

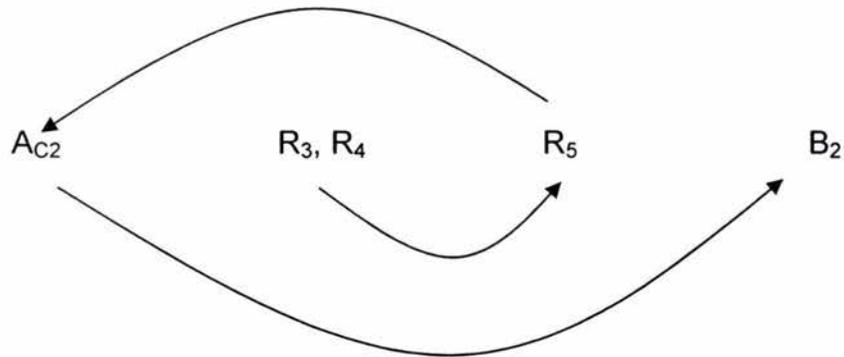


Figura 3.7 Vórtice perfecto sucesor en el módulo de soldadura

Considere ahora el $TpU = 22$ s y R_3 la máquina de máxima jerarquía, entonces para satisfacer el inciso 3) se pueden presentar varios esquemas, tres de ellos se presentan en la figura siguiente:

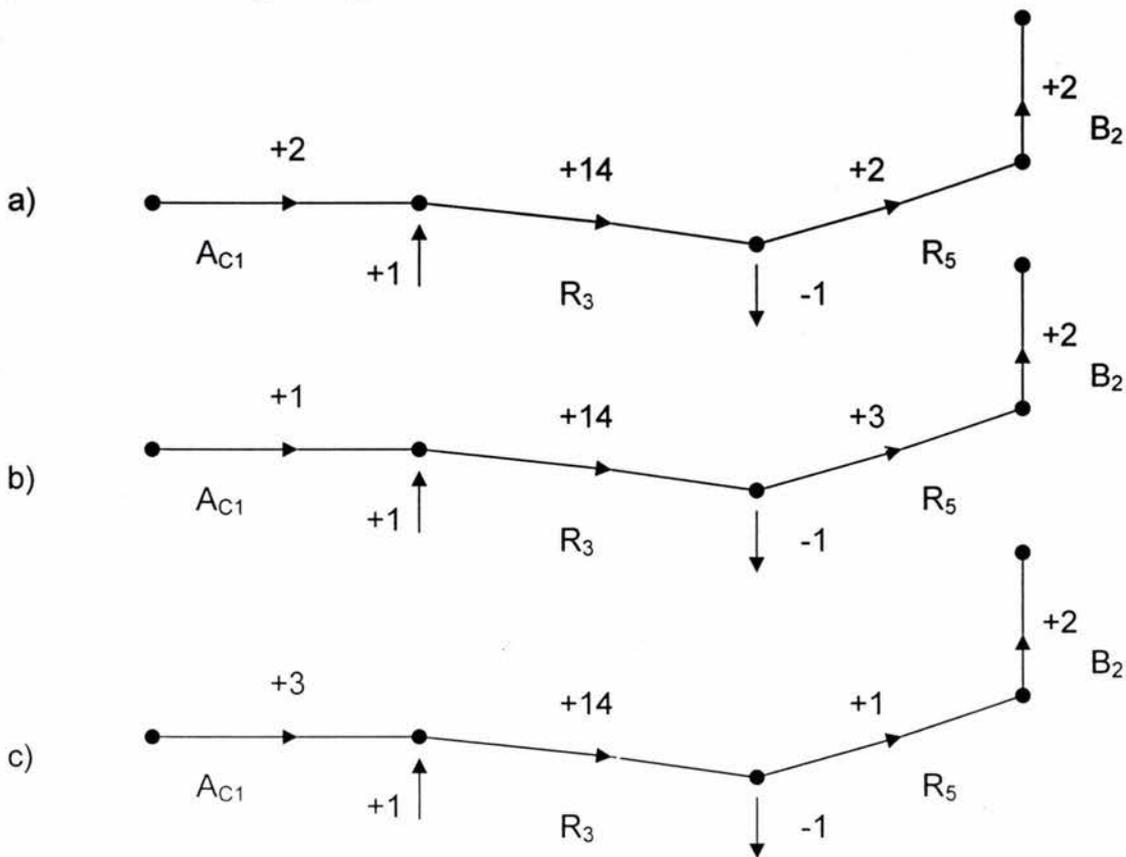


Figura 3.8 Sincronización a TpU fijo

Note en la figura anterior que la suma de los tiempos de ida de las máquinas A_{C1} , R_5 , y B_2 con el tiempo fijo de R_3 para cualquiera de los 3 casos, es de 22 s o sea el T_{pU} .

Uno de los principales problemas de la sincronización por vórtice perfecto a T_{pU} fijo es la severa restricción que se impone en cada tiempo de ida de la maquinaria no principal, en este caso, A_{C1} , R_5 y B_2 .

Cabe señalar que el tiempo de vuelta de R_3 restringe los tiempos de ida de las máquinas antecesoras y sucesoras, esto es:

- 1) Si el tiempo de vuelta de la máquina de máxima jerarquía es mínimo, entonces la suma de los tiempos de ida de las máquinas no principales disminuye.
- 2) Si la suma de los tiempos de ida de las máquinas no principales es crítico, entonces la sincronización por vórtice perfecto a T_{pU} fijo es inadmisibles.

Note que el tiempo crítico mencionado anteriormente, se asocia con un tiempo tal que algunas de las máquinas no principales no satisfaga los parámetros cinemáticos admisibles.

Considere el $T_{pU}' = 24$ s asociado con el producto PT' motivo de estudio. Los tiempos de ida y vuelta de la máquina R_3 son los siguientes:

$$1) \quad T_{ida,R3} = T_{a-b} + T_{b-c} + T_{c-d} + T_{d-e} + T_{e-f} = 21 \text{ s.}$$

$$2) \quad T_{vuelta R3} = T_{f-g} + T_{g-a} = 3 \text{ s.}$$

Note que se tienen solo 3 s para repartirlos entre los tiempos de ida de las máquinas no principales A_{C2} , R_5 y B_2 . Dichos tiempos se muestran en el esquema siguiente:

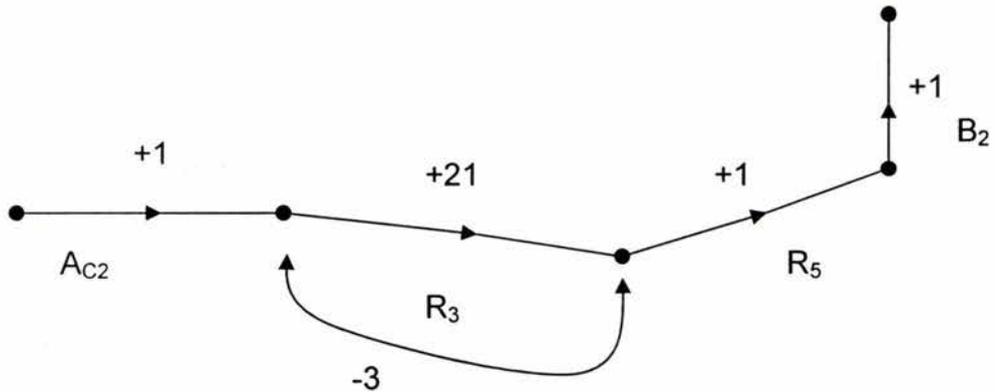


Figura 3.9 Tiempos de proceso para $TpU' = 24$ s

3.7 Sincronización de 3 tipos del módulo de soldadura

El interés en esta sección es utilizar tres tipos de sincronizaciones para controlar, monitorear y coordinar los movimientos y operaciones del módulo de soldadura asociado en este caso, con la manufactura del producto PT' . Dichas sincronizaciones son las siguientes:

- 1) Vértice perfecto o TpU fijo (\sin^1).
- 2) Sincronización simultánea por sensor (\sin^2).
- 3) Ciclo intermitente de la máquina de máxima jerarquía (\sin^3).

Considere ahora el siguiente problema:

“Datos:

D_p, TpU' , fijos M_M, τ_{CMM}, J_T

encuentre:

- 1) \sin^1, \sin^2, \sin^3 .

tal que:

$$1) Vp' = \hat{Vp}'$$

$$2) Rc = \hat{Rc}$$

sean satisfechas".

Aquí, Dp' es la distribución de planta final modificada.

TpU' : es un tiempo de producción unitario fijo.

M_M : es la máquina modificada.

τ_{CMM} : es el conjunto de lugares geométricos del ciclo de M_M .

J_T : es el jornal de trabajo fijo y conocido.

Sin^1, Sin^2, Sin^3 : son tres tipos de sincronizaciones.

Vp' : es el volumen de producción.

Rc : son las restricciones del control.

Cabe recordar que las restricciones de control han sido definidas en el capítulo 1 de esta tesis. Por otro lado, el hecho de encontrar cada una de las sincronizaciones mencionadas en el problema anterior implica:

- 1) Definir nuevos tiempos de ciclo de la maquinaria en base al TpU' propuesto.
- 2) Diseñar el sistema de control.
- 3) Construir un código binario.
- 4) Construir los modelos de control para cada máquina.

Para dar mayor fluidez a este trabajo se seleccionará la sincronización a vórtice perfecto [4,5,6].

3.7.1 Definición del TpU y algunas consideraciones sobre los tipos de sincronización

Para sincronizar el módulo de soldadura en estudio se utilizará un $TpU' = 28$ s y un sistema de rectas relacionadas con los lugares geométricos del ciclo operativo de R_3 . Dicho sistema se muestra en la figura 3.10.

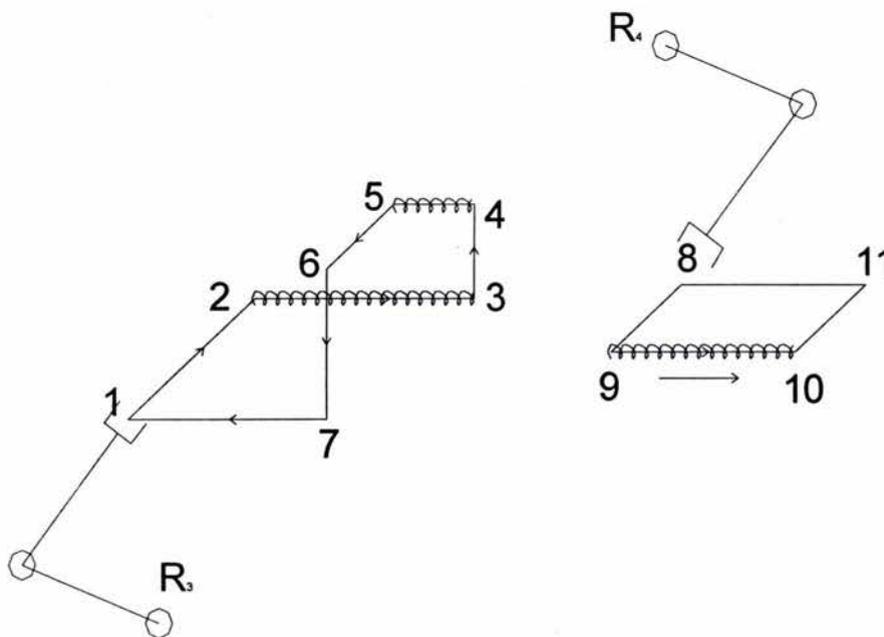


Figura 3.10 Lugares geométricos de los robots R_3 y R_4 para PT'

Es importante mencionar que el volumen de producción derivado del TpU propuesto es 617,142 p/anales, y $\Sigma T_F = 18$ s, por tanto, el intervalo de tiempo secundario es de 10 s. Se considerará en esta tesis las siguientes historias de movimiento de los robots R_3 y R_4 , así como el movimiento de la banda B_2 :

- 1) El ciclo operativo de R_4 no varía en configuración y tiempo de proceso.
- 2) Los robots R_3 y R_4 inician operaciones simultáneamente de izquierda a derecha.
- 3) No se tomará en cuenta la banda B_2 .

3.7.1.1. Algunas consideraciones sobre los tipos de sincronización

En esta sección se discuten en términos generales los tipos de sincronización que serán utilizados para satisfacer el TpU presupuesto.

1) Sincronización por vórtice perfecto a TPU fijo

En este tipo de sincronización se ha discutido en secciones anteriores, sin embargo, es necesario establecer algunos puntos relevantes:

- 1.1) La sincronización a TpU fijo con vórtice perfecto implica que la máquina de máxima jerarquía opere a ciclo continuo [5,6].
- 1.2) La restricción anterior implica que el intervalo de tiempos secundario ($I_{TS} = TpU - \sum T_F$) sea repartido en las trayectorias de ida de las máquinas no principales.
- 1.3) Si I_{TS} es reducido, entonces los modos operativos de las máquinas no principales sobre las trayectorias de ida tienden a ser inadmisibles.
- 1.4) El control de operaciones por vórtice perfecto bajo TpU fijo se simplifica y es más consistente.
- 1.5) Las condicionantes de control son caracterizados en forma directa.
- 1.6) El balanceo de la línea es relativamente simple.

Es importante mencionar que si I_{TS} es lo suficiente funcional, entonces el control de operaciones en lo general se simplifica usando el método el vórtice perfecto a TPU fijo.

2) Sincronización simultánea por sensor a TpU fijo

En este tipo de sincronización, la máquina de máxima jerarquía (MMG) opera a ciclo continuo. Un sensor externo que señala la finalización de la operación principal de una máquina de máxima jerarquía, dá salida simultánea a las máquinas antecesora y sucesora, respectivamente.

El hecho de que la MMG opere a ciclo continuo implica:

- 2.1) La máquina antecesora depende del I_{TS} , en el recorrido de la ida.
- 2.2) El ciclo operativo de la máxima sucesora esta restringido por $T_{CMS} \leq TpU$ (Aquí, T_{CMS} es el tiempo de ciclo de la máquina sucesora).

La sincronización simultánea simplifica el control de operaciones a partir de la finalización de operación de la MMG, es decir, todos los procesos y operaciones sucesoras.

El problema funcional se presenta en todas las operaciones antecesoras por la condición de ciclo continuo de la MMG.

3) Sincronización a ciclo intermitente

En este tipo de sincronización la MMG no opera a ciclo continuo; es decir, permanece detenida en un periodo de tiempo en su "home" una vez finalizado su ciclo operativo [5].

La operatividad de MMG a ciclo intermitente se presenta por los casos siguientes:

- 3.1) El intervalo de tiempos secundarios es relativamente grande y/o

3.2) El TpU no está asociado exclusivamente con la MMG.

Para finalizar esta sección conviene aclarar el siguiente punto:

“ Los tres tipos de sincronización se definen en una partición grupal de la siguiente característica.



Aquí, MANT es la máquina antecesora y MPRE es la predecesora.

3.8 Tiempo de ciclo y crónicas de proceso para Sin¹.

En esta sección se presenta una caracterización funcional de tiempos de procesos para la sincronización por vórtice perfecto (Sin¹). Cabe recordar que el TpU = 28 s y no se considera la banda B₂.

- **Sincronización (Sin¹).**

En la sincronización por vórtice perfecto a TpU fijo (Sin¹) se debe encontrar en primera instancia el I_{TS}. Luego,

$$I_{TS} = \text{TpU} - \Sigma T_F = 28 - 18 = 10 \text{ s}$$

Los 10 s serán repartidos de la manera siguiente:

- 1) Recorridos de acercamiento para cada operación principal en la MMG.
- 2) Recorridos de vuelta de la MMG.

Planeación operacional del sistema productivo

Por otro lado, los tiempos de recorrido de vuelta de MMG se partitionan en la forma siguiente:

- 1) Recorrido de ida de máquina antecesora.
- 2) Recorrido de ida de máquina sucesora.

El esquema siguiente muestra los tiempos de R_3 , A_{C2} y R_5 .

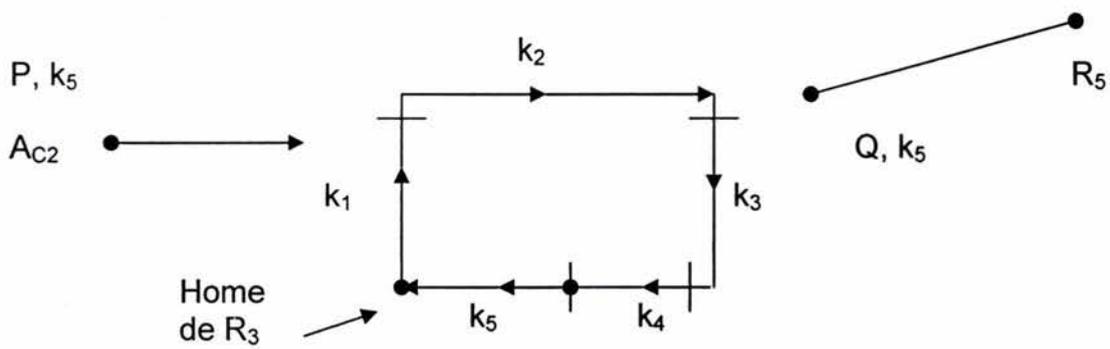


Figura 3.11 Tiempos para Sin¹

Note que en la figura anterior, k_1 , k_2 , k_3 , k_4 son tiempos de ida de la MMG. Dichos tiempos se caracterizan en la forma siguiente.

- 1) k_1 : acercamiento para la operación O_2 ($K_1=1$ s).
- 2) k_2 : tiempo fijo de O_2 ($k_2=14$ s).
- 3) k_3 : acercamiento para la operación O_4 ($k_3 = 1$).
- 4) k_4 : tiempo fijo de O_4 ($K_4= 4$ s).

Por otro lado, K_5 es el tiempo de vuelta de la MMG y $P > 1$ es un factor que determina el tiempo de ida de A_{C2} , en tanto "Q" definido por:

$$Q = 1 - P \quad (3.3)$$

o, equivalentemente.

$$Q + P = 1 \quad (3.4)$$

es el tiempo de ida del robot R_5 .

Los valores de P y Q dependen del tipo de sincronización (sucesora y predecesora).

- **Distribución de sensores**

La distribución de sensores asociada con el módulo de soldadura el cual manufactura el producto PT [3,5,6], integra los elementos de señalización mostrados en la figura 3.12.

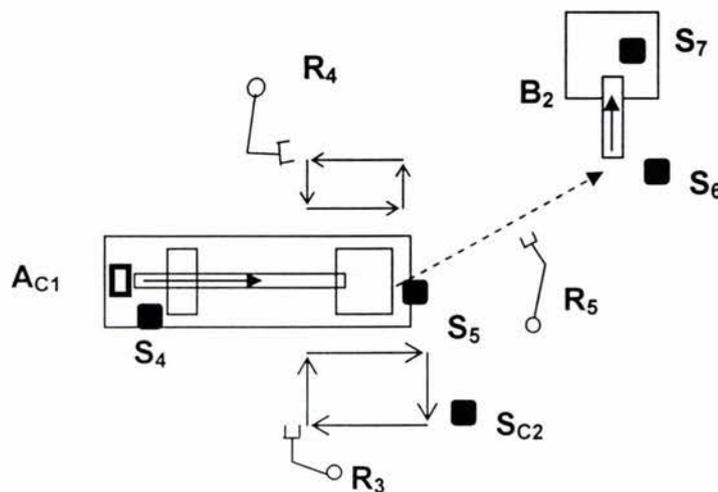


Figura 3.12 Distribución de sensores para PT

Los sensores mostrados en la figura anterior se caracterizan de la manera siguiente:

- 1) S_4, \dots, S_7 ; Sensores principales.
- 2) S_{C2} ; Sensor de completud.

Cabe mencionar que tanto los elementos de señalización primaria y de completud del recorrido de ida del módulo de soldadura, satisfacen relaciones del tipo:

$$i) \quad R_{sp}: S \times B \longrightarrow \{1,0\} \quad (3.5)$$

$$ii) \quad R_{sc}: S \times ET \longrightarrow \{1,0\}$$

Aquí, R_{sp} y R_{sc} son relaciones de sensado primario y de completud, respectivamente, S y B son los conjuntos de sensores y el dominio de manufactura. Finalmente, ET es el conjunto de los elementos de trabajo.

Por otro lado, los sensores S_4 y S_7 son elementos de señalización denominados “de sincronización modular y global”, respectivamente.

En relación con la ubicación del sensor de completud S_{C2} , es importante mencionar que la distancia comprendida entre el punto final de la soldadura y el punto de localización de dicho sensor, tiene asociado un tiempo K_5 tal que:

$$T_{CR3} = K_5 - K'_5 \quad (3.6)$$

Es decir, el tiempo K_5 reduce aun más el intervalo de tiempo secundario, pues el robot R_5 se activa una vez que el robot pase por el punto de señalización de S_{C2} .

Considere ahora que a los tiempos de ida de MMG se asocia el símbolo “+” y a los tiempos de vuelta el símbolo “-”. Más precisamente, la función

$$f: \{+, -\} \rightarrow \{T_{ida}, T_{vuelta}\} \quad (3.7)$$

definida por:

$$1) f(+) = +k_i; \quad k_i \in T_{ida} \quad (3.8)$$

$$2) f(-) = -k_j; \quad k_j \in T_{vuelta}. \quad (3.9)$$

caracteriza el ciclo operativo de la MMG. La figura siguiente muestra la caracterización de R_3 asociada con la manufactura de PT en términos del ciclo operativo:

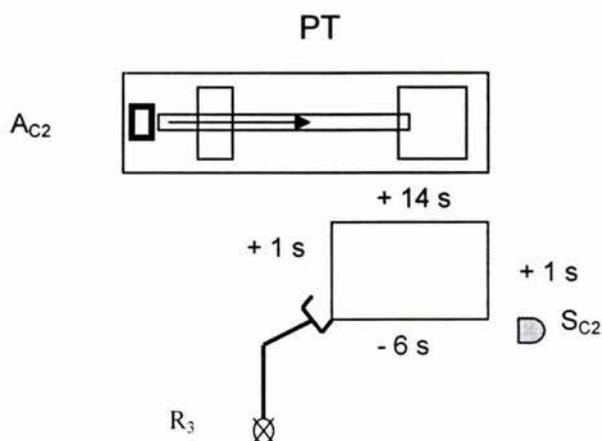


Figura 3.13. Tiempos de ida y vuelta de R_3 para PT

Para el caso del producto PT' motivo de estudio en este trabajo de tesis, la localización del sensor Sc_2 y los tiempos de ciclo para R_3 se muestran en la figura 3.14.

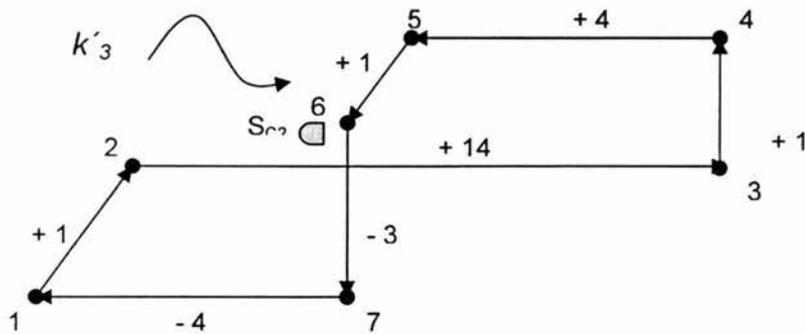


Figura 3.14 Tiempos de ida y vuelta y localización de S_{C2} para PT'

Note en la figura anterior que la suma de los tiempos de ciclo es iguala 28 s, es decir, el TpU' .

Para sincronizar el módulo de soldadura relacionado con la manufactura de PT' se sigue el procedimiento siguiente:

- 1) Seleccionar la partición grupal de máxima jerarquía.
- 2) Puesto que no se considera la banda B_2 , se puede utilizar sincronización por vórtice antecesor o sucesor.
- 3) Distribuir los tiempos de vuelta de la MMG sobre los transportes realizados por A_{C2} y R_3 .

La partición grupal de máxima jerarquía es:

$$A_{C2} \rightarrow R_3 \rightarrow R_5$$

Por otro lado, se utilizará vórtice antecesor. Dicho vórtice se muestra en la figura siguiente:

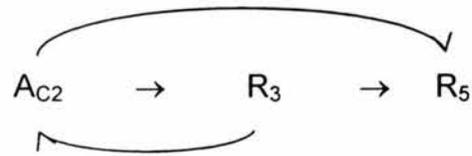


Figura 3.15 Vórtice antecesor

Los tiempos de sincronización MMG y M_{ANT} son:

$$\begin{array}{ll} 1) T_{ida}^{R_3} = 21 \text{ s}, & T_{vuelta}^{R_3} = 7 \text{ s} \\ 2) T_{ida}^{A_{C2}} = 7 \text{ s}, & T_{vuelta}^{A_{C2}} \leq 21 \text{ s} \end{array}$$

Para el conjunto A_{C2} , R_3 , R_5 se tienen los siguientes tiempos:

$$\begin{array}{ll} 1) T_{ida}^{R_3} = 21 \text{ s}, & T_{vuelta}^{R_3} = 7 \text{ s} \\ 2) T_{ida}^{A_{C2}} = 4 \text{ s}, & T_{vuelta}^{A_{C2}} \leq 21 \text{ s} \\ 3) T_{ida}^{R_5} = 3 \text{ s}, & T_{vuelta}^{R_5} \leq 21 \text{ s} \end{array}$$

Cabe mencionar que los tiempos señalados anteriormente están sujetos a ciclo continuo tanto de R_3 como de A_{C2} y R_5 , respectivamente. Por otro lado,

$$\begin{array}{ll} 1) T_{ida}^{R_3} = 21 \text{ s}, & T_{vuelta}^{R_3} = 7 \text{ s} \\ 2) T_{ida}^{A_{C2}} = 3 \text{ s}, & T_{vuelta}^{A_{C2}} = 3 \text{ s} \\ 3) T_{ida}^{R_5} = 4 \text{ s}, & T_{vuelta}^{R_5} = 4 \text{ s} \end{array}$$

La siguiente figura muestra la distribución de tiempos en el módulo de soldadura asociado con la manufactura del componente PT':

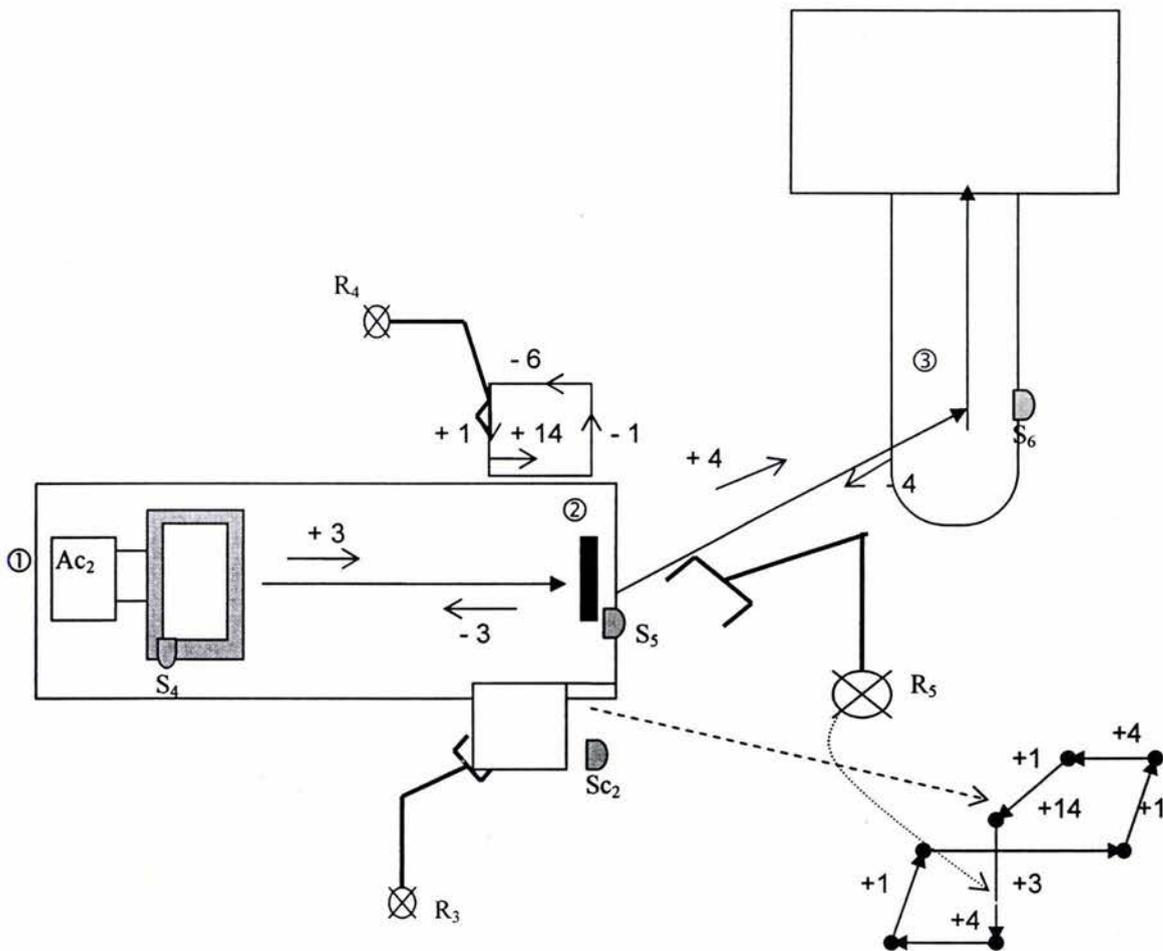


Figura 3.16 Distribución de tiempos definitivos en el módulo de soldadura para Sin¹

Para finalizar ésta sección a continuación se genera una crónica de proceso asociada con S₄, el subproducto β_{sub_2} y el tiempo de proceso T₀.

“Crónica de procesos”

En el tiempo T_0 , el componente β_{sub_2} se localiza en la posición ①. El sensor S_4 detecta la pieza y la transporta a ② en 3 segundos. En T_3 el sensor S_5 detecta la pieza y activa los robots R_3 y R_5 , los cuales inician con las operaciones de soldadura O_2 y O_3 sobre β_{sub_2} . En T_{18} dichos robots finalizan los cordones S_1 y S_2 , produciendo el componente β_{sub_3} . En T_{19} el robot R_3 inicia la operación O_4 . En T_{23} dicho robot termina la aplicación del cordón S_3 generando la pieza $\beta_{sub_4} \approx PT'$. En T_{24} el sensor Sc_2 detecta a R_3 en el regreso a home y da señal a R_5 para transportar a PT' al lugar ③. En ③ se localiza el sensor S_4 el cual finaliza las operaciones en T_{31} . Antes el actuador Ac_1 regreso a home en T_6 y el robot R_5 finaliza su ciclo en T_{35} ”

Capítulo 4

El control de procesos

Introducción. En este capítulo se propone un código binario de procesos para sincronizar globalmente el módulo de soldadura modificado [5,6,7]. Dicho código está formado por dos matrices: 1) tiempo sensado y 2) tiempo-maquinaria. Los tiempos de proceso relacionados con la sincronización local por vórtice, son discretizados uniformemente. Para cada tiempo de activación de un sensor, existe una línea del diagrama escalera de un PLC y un modelo de control.

4.1 Algunas consideraciones sobre la sincronización global de sistemas productivos

Para poder lograr que un sistema de manufactura genere la producción estimada, es necesario sincronizarlo en términos de tiempos de proceso [3]. Existen dos tipos de sincronizaciones relacionadas con sistemas productivos tipo seriales [5,6]; estas son:

- 1) Sincronización local modular a TpU.
- 2) Sincronización global a TpU.

Una línea de producción que integre un número grande de operaciones de manufactura debe ser modularizado o particionado. Cada módulo es independiente de los restantes y debe ser sincronizado, en este caso a TpU.

En el capítulo 3 de este trabajo de tesis se ha usado el método de vórtice perfecto para sincronizar localmente el módulo de soldadura a $TpU = 28$ s. Dicha sincronización se realizó en términos de una distribución de tiempos fijos y tiempos secundarios o no fijos.

En la sincronización global, todo el sistema productivo deberá satisfacer el TpU lo cual implica que los módulos de producción de los cuales se compare, deben ser analizado simultáneamente a TpU.

Dicho análisis debe integrar los siguientes aspectos [6]:

- 1) Balance de la línea de producción en términos de distribuciones estratégicas de piezas de trabajo.
- 2) Garantizar que la segunda, tercera, ... etc, pieza de trabajo sea producida, en el sistema, a TpU.
- 3) Diseñar un sistema de control externo del cual permita operar, controlar, coordinar y monitorear los elementos de trabajo que comparen el sistema productivo.

La sincronización global es, por sí misma, compleja si se quiere analizar los aspectos de control interno de las máquinas. Por otro lado, la sincronización global se simplifica, si solo se toma en cuenta los aspectos operacionales externos; es decir, controlar antes y después de aplicar una determinada operación, una máquina o un dispositivo de trabajo.

En este trabajo de tesis se analizará la sincronización global del módulo de soldadura usando aspectos operacionales externos. Esta forma de sincronización permitirá utilizar un código binario de procesos con el cual, es posible interpretar los ciclos operativos de los elementos de trabajo en código binario, así como el sistema de control.

Para finalizar esta sección es importante mencionar que, puesto que el módulo de soldadura es unitario; es decir, existe un sólo modulo, la sincronización local y la global son equivalentes en el sentido de los tiempos de procesos, no así en sus caracterizaciones generales.

4.2 El sistema de control de un sistema productivo

En esta sección se discuten algunas consideraciones de interés, relacionadas con el sistema de control de sistemas productivos. Se analizan tres dominios de control: 1) el proposicional, 2) el binario y 3) el simbólico, mediante los cuales, se genera un "modelo de control" asociado con tiempo "condicional" [5,6]. Finalmente, se presenta una metodología usada para construir modelos de control puntuales, modulares y globales.

4.2.1. generalidades del sistema de control

Para lograr que una línea de producción genere, ya sea en forma manual, semiautomática o totalmente automática, productos de tal forma que los volúmenes de producción estimados sean satisfechos, es necesario controlar cada uno de los elementos de trabajo o dispositivos relacionados con dicha línea.

Si el control es máquina por máquina, entonces se dice que es "control puntual". Si el control se realiza a un conjunto de máquinas de tal forma que dicho conjunto sea un módulo, entonces el control es "modular". Finalmente, si se desea controlar toda la línea, se dirá que tal control es "global".

Considere la siguiente hipótesis:

"Si una línea de producción compuesta de "n" módulos está controlada, entonces cada módulo y cada máquina está también controlada".

En términos generales un sistema de control está compuesto de tres conjuntos [6]:

- 1) Un conjunto de entradas (x)
- 2) Un conjunto de salidas (y)
- 3) Un conjunto de estados (A)

Se dice que un conjunto de entradas (señales) son procesados en algún sistema (conjunto de estados) produciendo salidas (señales).

La figura siguiente muestra un diagrama básico de control:

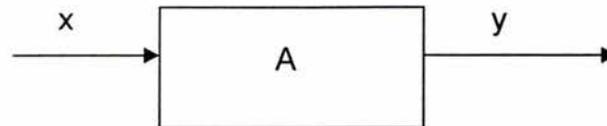


Figura 4.1 Esquema básico de control

El problema del control se puede plantear con los siguientes cuestionamientos:

- 1) ¿Qué se quiere controlar?
- 2) ¿Con qué se quiere controlar?
- 3) ¿Cómo se quiere controlar?

En general, en un sistema productivo, lo que se quiere controlar son máquinas o dispositivos de trabajo usando elementos de señalización. El cómo se quiere controlar, depende del dominio operacional de las señales y de las condiciones de lo que se quiere controlar.

Por tanto, en un sistema de control se requiere emitir señales, procesarlas y, posteriormente, direccionar las señales procesadas hacia un fin específico.

Se pueden considerar tres elementos primitivos de un sistema de control relacionado con un sistema productivo, estos son:

- 1) Un conjunto de elementos de señalización, que por lo general, son sensores (S).
- 2) Un conjunto de elementos de trabajo (máquinas), (M).
- 3) Un sistema de procesamiento de señales (R).

El sistema de procesamiento de señales está formado por:

- 1) Un dominio operacional.
- 2) Un conjunto de operaciones definidas en dicho dominio.

El dominio operacional, para el caso del control de procesos puede ser [6]:

- 1) $A^1 = \{1,0\}$ y/o.
- 2) $P = \{F,V\}$ y/o.
- 3) k

Aquí A^1 es el conjunto binario [18], P el conjunto de los valores proposicionales y k un conjunto de símbolos. En realidad, "1", "0", "F", "V" y los elementos de k son símbolos que representan variables en el sistema de control.

En cada dominio operacional se definen operaciones lógicas con las cuales, se genera una estructura algebraica. Así.

- 1) $\{A^1, +, \cdot, -\}$
- 2) $\{P, \vee, \wedge, \bar{}\}$
- 3) $\{k, \text{OR}, \text{AND}, \text{NOT}\}$

Son tres estructuras algebraicas usadas para el procesamiento de señales. La tabla siguiente describe cada una de las operaciones lógicas.

Operaciones Dominio operacional	+	•	-	∨	∧	⌈	OR	AND	NOT
A^1	Disyunción	conjunción	negación	-	-	-	-	-	-
P	-	-	-	"o"	"y"	Negación			
K	-	-	-	-	-	-	"o"	"y"	Negación

Tabla 4.1. Operaciones y dominios

Las estructuras algebraicas son isomorfas y son conocidas como "álgebra de Boole" [18].

Nótese que:

- 1) Si el dominio operacional es A^1 , entonces el control es "binario".
- 2) Si el dominio operacional es P, entonces el control es "proposicional".
- 3) Si el dominio es k, entonces el control es "simbólico".

Es importante señalar que los conjuntos de entrada y salida deben ser subconjuntos del dominio operacional que se quiera utilizar.

4.2.2. El modelo de control

En esta sección se analiza un problema de control simple entre una máquina y un conjunto de sensores con el objetivo de plantear una metodología que sirva para generar el sistema de control de líneas de producción [6].

El problema:

"Se desea controlar el inicio de operación de una máquina (M_1) por medio de tres sensores (S_1 , S_2 y S_3), con las siguientes condiciones: *la máquina se activa si los sensores S_1 y S_2 se activan o si el sensor S_3 está activado*. Se debe de encontrar un modelo de control en los tres dominios operacionales".

- **Dominio proposicional**

Para generar el modelo de control en el dominio proposicional, es necesario identificar del problema lo siguiente:

- 1) Proposiciones de entrada.
- 2) Proposiciones de salida.
- 3) Operadores o conectivos lógicos.

Las proposiciones de entrada son:

- a) El sensor S_1 está activo (p).
- b) El sensor S_2 está activo (q).
- c) El sensor S_3 está activo (r).

La proposición de salida es:

- d) La máquina M_1 está activa(s).

Los conectivos lógicos son:

- i) “ \wedge ” : “y”
- ii) “ \vee ” : “o”

Es importante señalar que las proposiciones de entrada y salida han sido descritas en términos de valor “verdadero” de sus significados.

Considere ahora la siguiente proposición:

“Si los sensores S_1 y S_2 están activados o si el sensor S_3 está activado, entonces la máquina M_1 se activa (inicia su operación)”.

La proposición descrita anteriormente es equivalente a la fórmula siguiente:

$$(p \wedge q) \vee r \Rightarrow S$$

Dicha fórmula está en función del conector condicional \Rightarrow

Por otro lado, considere la siguiente proposición:

“La máquina M_1 se activa (inicia su operación) si y solo si los sensores S_1 y S_2 están activados o si el sensor S_3 está activado”.

La fórmula que describe la proposición anteriormente descrita es:

$$S \Leftrightarrow (p \wedge q) \vee r$$

o, equivalentemente:

$$\text{Si } S \Rightarrow (p \wedge q) \vee r \text{ y } (p \wedge q) \vee r \Rightarrow S$$

Nótese que siempre que la proposición $(p \wedge q) \vee r$ tome el valor “verdadero”, entonces la proposición “S” toma el valor “verdadero”, en caso contrario, si $(p \wedge q) \vee r$ toma el valor “falso” entonces S toma el valor “falso”.

Por tanto, la máquina M_1 inicia su operación cuando $(p \wedge q) \vee r$ toma valores “verdaderos”. El objetivo ahora es encontrar o determinar en que condiciones la proposición $(p \wedge q) \vee r$ toma valores “verdaderos”. Esto se logra analizando las operaciones lógicas “ \vee ” y “ \wedge ” los cuales se definen por las tablas siguientes:

\wedge	\vee	F
\vee	\vee	F
F	F	F

a)

\vee	\vee	F
\vee	\vee	F
F	\vee	F

b)

Tabla 4.2 Operaciones lógicas para $(p \wedge q) \vee r$

Observe que el dominio proposicional es $p = \{V, F\}$ y es necesario usar solamente los significados de las proposiciones relacionadas en $(p \wedge q) \vee r$ [6].

El campo de valores de la proposición $(p \wedge q) \vee r$ se genera por la relación $C_v = 2^n$ donde "n" es el número de proposiciones. Note que $n = 3$ y, por tanto, $C_v = 8$. La tabla siguiente muestra el campo de valores para $(p \wedge q) \vee r$:

	1	2	3	4	5
	p	q	r	$p \wedge q$	$(p \wedge q) \vee r$
1	V	V	V	V	V
2	V	V	F	V	V
3	V	F	F	F	F
4	F	F	F	F	F
5	F	F	V	F	V
6	F	V	V	F	V
7	F	V	F	F	F
8	V	F	V	F	V

Tabla 4.3 Campo de valores para $(p \wedge q) \vee r$

Observe de la tabla anterior que:

- 1) Las filas 1, 2, 5, 6 y 8 generan valores "verdaderos".
- 2) Las filas 3, 4 y 7 generan valores "falsos".

Por tanto el “inicio de la máquina M_1 ” se presenta en 5 combinaciones del campo de valores, es decir, cuando la proposición $(p \wedge q) \vee r$ toma valores verdaderos. El modelo de control para la máquina M_1 en el dominio proposicional es:

- 1) $(p \wedge q) \vee r \Rightarrow S$
- 2) $S \Leftrightarrow (p \wedge q) \vee r$
- 3) (\neg, \wedge, \vee) , es decir, la tabla de valores.

- **Dominio binario**

Para poder encontrar el modelo de control del problema en el dominio binario, es necesario identificar los sensores y la máquina usando los siguientes símbolos [6,18]:

- 1) x_1, \dots, x_n , para sensores
- 2) y_1, \dots, y_n para máquinas
- 3) Las operaciones

Note que : $S_1 \Leftrightarrow x_1$, $S_2 \Leftrightarrow x_2$, $S_3 \Leftrightarrow x_3$, $M_1 \Leftrightarrow y_1$. Por otro lado, las operaciones son: $\bullet : A^1 \times A^1 \rightarrow A^1$ y $+$: $A^1 \times A^1 \rightarrow A^1$, las cuales son definidas por las tablas 4.4 y 4.5.

\bullet	1	0
1	1	0
0	0	0

Tabla 4.4 Valores de la conjunción

+	1	0
1	1	1
0	1	0

Tabla 4.5 valores de la disyunción

Es importante señalar que los símbolos “1” y “0” denotan:

- a) "1", señal de actuación.
 b) "0" señal de no activación.

Luego:

- i) $x_1 = \{1, 0\}$; $x_2 = \{1, 0\}$; $x_3 = \{1, 0\}$;
 ii) $y_1 = \{1, 0\}$.

Las fórmulas que gobiernan el control de la máquina M_1 son:

- A) $(x_1 \bullet x_2) + x_3 \Rightarrow y_1$
 B) $y_1 \Leftrightarrow (x_1 \bullet x_2) + x_3$

La última expresión se puede escribir:

$$y_1 = (x_1 \bullet x_2) + x_3$$

"y" es llamada "ecuación de estado".

El campo de valores de dicha ecuación es dado en la tabla 4.6.

	1	2	3	4	5
	x_1	x_2	x_3	$(x_1 \bullet x_2)$	$(x_1 \bullet x_2) + x_3$
1	1	1	1	1	1
2	1	1	0	1	1
3	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	1	0	1
6	0	1	1	0	1
7	0	1	0	0	0
8	1	0	1	0	1

Tabla 4.6. Campo de valores de la ecuación de estado

Note en la tabla 4.6 que, la máquina M_1 solo se activará en las condiciones donde la fórmula o ecuación de estado tome el valor simbólico "1".

- **Dominio simbólico**

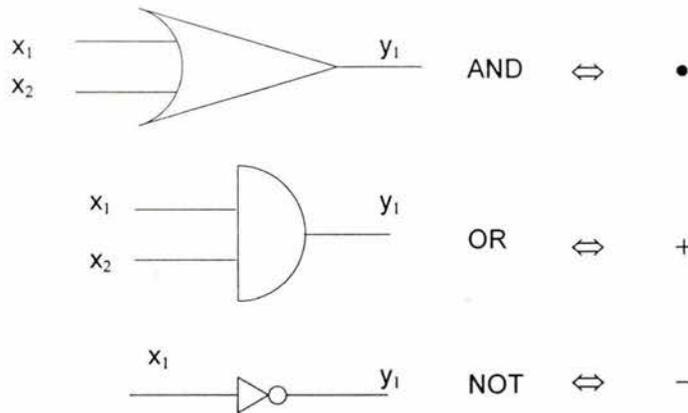


Figura 4.2 Operadores lógicos

Para poder representar el modelo simbólico, es necesario usar las mismas variables del modelo binario [6]. Así,

- 1) $(x_1 \text{ AND } x_2) \text{ OR } x_3 \text{ THEN } y_1$
- 2) $y_1 \text{ IF AND ONLY IF } (x_1 \text{ AND } x_2) \text{ OR } x_3$

La representación simbólica para la última expresión es mostrada en la figura 4.3.

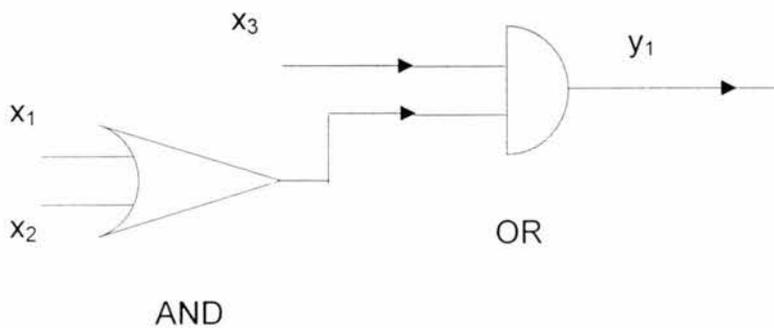


Figura 4.3 Esquema simbólico de una fórmula

Por otro lado, las formas operacionales de señales se pueden representar en un diagrama de contactos y las operaciones lógicas se representan en las formas mostradas en la figura 4.4.

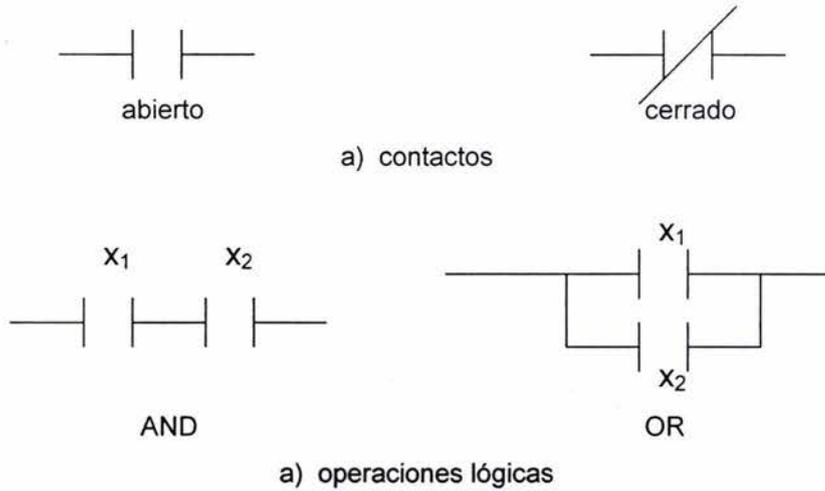


Figura 4.4 Circuitos y operaciones lógicas

La última fórmula $y_1 = (x_1 \cdot x_2) + x_3$ se representa en un diagrama de contactos según se muestra en la figura 4.5.

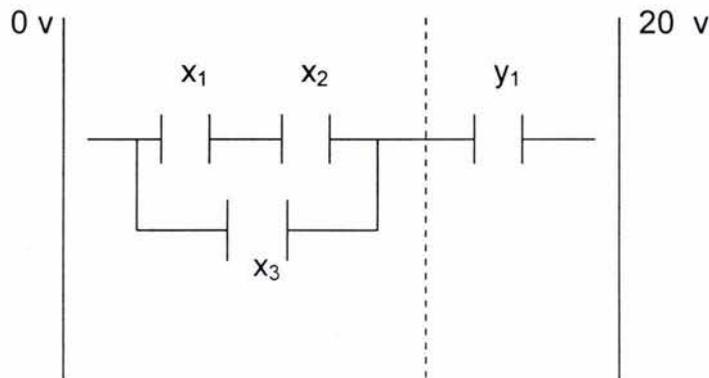


Figura 4.5 Diagrama de circuitos asociados con una ecuación de estado

Dicho diagrama es llamado “diagrama escalera” y es la forma tradicional de esquematizar el funcionamiento tradicional de un PLC (programming logic control).

- **Formas equivalentes de los modelos**

Es posible considerar las propiedades de los operadores lógicos para generar expresiones equivalentes de control [18]. Algunas propiedades de los operadores son:

- 1) Conmutatividad: $p \vee q = q \vee p$; $x_1 + x_2 = x_2 + x_1$
 $p \wedge q = q \wedge p$; $x_1 \bullet x_2 = x_2 \bullet x_1$
- 2) Asociatividad: $(p \vee q) \vee r = p \vee (q \vee r)$; $(x_1 + x_2) + x_3 = x_1 + (x_2 + x_3)$
 $(p \wedge q) \wedge r = p \wedge (q \wedge r)$; $(x_1 \bullet x_2) \bullet x_3 = x_1 \bullet (x_2 \bullet x_3)$
- 3) Elemento neutro: $p \vee f = p$; $x_1 + 0 = x_1$
 $p \wedge v = p$; $x_1 \bullet 1 = x_1$
- 4) Distributividad: $p \vee (q \wedge r) = (p \vee q) \wedge (p \vee r)$;
 $x_1 + (x_2 \bullet x_3) = (x_1 + x_2) \bullet (x_1 + x_3)$
 $p \wedge (q \vee r) = (p \wedge q) \vee (p \wedge r)$;
 $x_1 \bullet (x_2 + x_3) = (x_1 \bullet x_2) + (x_1 \bullet x_3)$

Note que tomando en consideración la propiedad distributiva se tiene que:

$$S \Leftrightarrow (p \wedge q) \vee r$$

es equivalente a:

$$S \Leftrightarrow (p \vee r) \wedge (q \vee r)$$

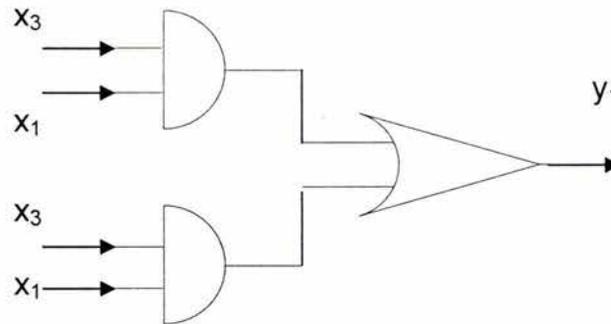
También, la ecuación de estado:

$$y_1 = (x_1 \bullet x_2) + x_3$$

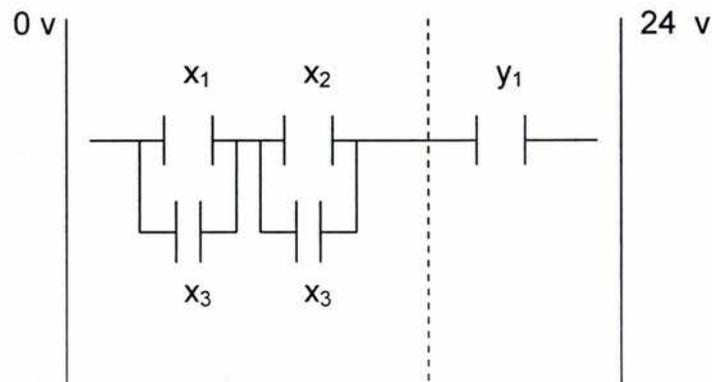
Es equivalente a:

$$y_1 = (x_1 + x_3) \cdot (x_2 + x_3)$$

Las formas equivalentes simbólicas se presentan en la figura 4.6.



a) Diagrama de flujo



b) Diagrama unifilar

Figura 4.6 Esquema simbólico de fórmulas equivalentes

- **Metodología para construir modelos de control**

En esta sección se proponen una serie de pasos para generar los modelos de control [6].

Paso 1) Definir el problema de control.

-
- Paso 2) Identificar o generar “proposiciones” y conectivos lógicos para el dominio proposicional.
- Paso 3) Generar las fórmulas proposicionales usando el condicional y el bicondicional.
- Paso 4) Generar el campo de valores de la fórmula bicondicional.
- Paso 5) Usar pasos del 2) al 5) para el dominio binario.
- Paso 6) Usar pasos del 2) al 5) para el dominio simbólico.

4.3. El diseño del sistema de control

En esta sección se discuten algunos conceptos de interés relacionados con el “diseño del sistema de control” y con un sistema productivo. Considere el siguiente problema:

“Se requiere diseñar el sistema de control de una línea de producción con las siguientes restricciones:

- 1) $TpU = \hat{T}pU$
- 2) $S_{ida} = \hat{S}_{ida}$
- 3) $Dp = \hat{D}p$
- 4) $PT_1 \cap \hat{P}T_2 = \varnothing$

Aquí, S_{ida} es un sistema de sensado de ida y Dp es la distribución de planta, ambos sistemas son conocidos, y la condición $PT_1 \cap \hat{P}T_2 = \varnothing$ indica que no debe haber alcances de piezas.

El problema del diseño de control para un sistema productivo consiste en determinar sistemáticamente los modelos de control para:

-
- 1) El sistema de máquinas – sensores (una a una)
 - 2) El sistema modular
 - 3) El sistema global

Dichos modelos deben satisfacer el TpU y el balance de la línea en términos de la distribución de piezas de tal forma que no se “alcancen entre ellos”. Así mismo, si el control requiere de un sistema de paro de emergencia, este debe ser considerado en el problema.

En el proceso de distribución del sensado de ida, el control unitario de máquinas se realiza simultáneamente. El diseño del sistema de control se realiza únicamente, en el proceso de distribución del sensado de “ida”, es decir, en la distribución estratégica de sensores principales y de completud. Con dicho sensado, se garantiza que un componente alcance el extremo final de la línea de producción lo cual implica que todas las máquinas se hallan activado. Este tipo de control (del recorrido de ida) se le llama control “uno a uno”.

Durante el proceso de control uno a uno del recorrido de ida, los tiempos de proceso no son considerados, salvo los tiempos fijos. En otras palabras, el TpU no se usa para la distribución del sensado de ida.

En el proceso de sincronización local o modular el TpU sí es tomado en cuenta. La distribución de sensores de sincronización local, para el caso del método del vórtice, generalmente recae en los sensores principales, es decir no se requieren de nuevos sensores en dicho proceso de sincronización. Sin embargo, el control uno a uno si es modificado ya que se requiere de usar “condicionantes” de sensado, esto con el propósito de controlar operaciones modulares o unitarios en módulos sucesores o antecesores.

En el método del vórtice, los sensores condicionados son: 1) él o los iniciales, 2) los iniciales y finales de cada módulo y 3) el sensor terminal. Dichos sensores, como ya se mencionó anteriormente, son principales.

El sistema de control modular debe garantizar el TpU entre cuando menos un sensor inicial del módulo y un sensor final [5]. Además, las piezas de trabajo distribuidas bajo el control modular, son tales que $PT_1 \cap \hat{PT}_2 = \varnothing$; es decir, no se alcanzan. Para el caso de la sincronización con “vórtice” las ubicaciones de las piezas son precisamente, en los extremos modulares y esto garantiza que las piezas “nunca” se alcanzan.

Por otro lado, el control global se realiza bajo el siguiente concepto [5,6]:

“Para realizar el proceso de control global, se debe considerar toda la línea como un módulo y los módulos como entidades de control unitarias”

Si se utiliza el método del vórtice, el control global se simplifica, puesto que los sensores que condicionan dicho control son principales los cuales se localizan en: 1) al inicio del módulo primario, 2) al término de la línea y 3) en algún lugar que delimite módulos intermedios.

Por otro lado, la siguiente afirmación gobernará el control de la línea de producción (módulo de soldadura) estudiada en este trabajo de tesis:

“Si una línea de producción tiene un solo módulo, entonces el control global y el modular son equivalentes”.

Es importante señalar que, una línea de producción generalmente opera bajo criterios de seguridad; esto es:

-
- 1) Sistema de seguridad para operarios.
 - 2) Sistema de seguridad para elementos de trabajo.

El proceso de control para el sensado de seguridad se realiza en primera instancia, independientemente del sensado operacional (principales, de completud y de sincronización). Dicho sensado se le llamará "bandera".

Es posible incorporar sensores bandera para otras actividades [4,5,6]:

- 1) Para generar señales intermedias para algún propósito de control.
- 2) Para sensar los regresos de la máquina durante su ciclo de operación.

Por tanto, el diseño del sistema de control debe ser realizado usando la metodología siguiente:

- 1) Generar los sistemas de control unitario en el recorrido de ida.
- 2) Identificar sensores de sincronización para el control modular.
- 3) Identificar sensores de sincronización para el control global.
- 4) Generar los modelos de control unitarios, modular y global.
- 5) Generar el sistema de control de seguridad y sus modelos.
- 6) Incorporar en un solo sistema los modelos de control de toda la línea de producción.

Cabe señalar que, los pasos mencionados anteriormente, son válidos únicamente para el método de sincronización local por vórtice.

En la siguiente sección se propone un esquema operacional, denominado código binario operacional referencial (CBOR), para generar todo el sistema de control de la línea de producción en estudio.

4.4 El código binario operacional referencial

En esta sección se utiliza un diagrama o esquema operacional para sincronizar globalmente el sistema productivo motivo de estudio. Dicho esquema es llamado “Código binario operacional referencial” (CBOR) [2,3 5,6,7].

Cabe señalar que el hecho de estudiar un solo módulo, en este caso, el de soldadura, facilitará la sincronización global, pues para este caso como ya se mencionó en la sección anterior:

“La sincronización local y global son equivalentes”.

Dicha equivalencia es válida solo para los tiempos de proceso y el TpU .

El código binario en cuestión está formado por dos submatrices:

- 1) Tiempo – sensado
- 2) Maquinaria – tiempo

La matriz Tiempo – sensado, la cual será representada por M_{T-S} , integra los tiempos de proceso discretizados en la primer columna y los elementos de sensado en la primera fila. Los sensores son colocados en la fila de acuerdo con su distribución; esto es:

- 1) Primarios
- 2) De completud
- 3) Sincronización
- 4) Bandera

Los elementos principales de la matriz M_{T-S} se muestran en la tabla 4.7.

		sincronización						
		principales		De completud		bandera		
		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X _i
T	S	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S _i
	T ₀							
	T ₁							
	T ₂							
	T _n							

Tabla 4.7 Elementos principales de la matriz M_{T-S}

Nótese en la tabla anterior que los sensores han sido simbolizados por la variable "X". Dicha variable será usada más adelante para diseñar el sistema de control del módulo de soldadura.

Es importante recordar que, los sensores de sincronización pueden ser principales o de completud o, en su caso nuevos sensores. Estos últimos, si existen, deben colocarse sobre la matriz M_{T-S} después de los sensores de completud.

Por otro lado, los tiempos de proceso se colocan en la primer columna con discretización tamaño "1" o, más bien dicho, unitaria. El número de filas relacionadas con los tiempos están en función de [6]:

- 1) El T_{pU} .
- 2) El tiempo de vuelta de la última máquina del módulo de soldadura. O en su caso, del tiempo de vuelta de alguna otra máquina que no halla completado su ciclo de operación.

Para el caso de la matriz Maquinaria-tiempo, se utilizan las mismas filas de tiempo de la matriz M_{T-S} . Las máquinas se colocan en la misma fila de los sensores

siguiendo el recorrido de ida. Los elementos primitivos, es decir; máquinas y tiempos, se encuentran en la tabla siguiente:

Colocación de máquinas para el recorrido de ida							
y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_i	
M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_i	M / T
							T_0
							T_1
							T_2
							T_n

Tabla 4.8 Elementos primitivos de la matriz M_{M-T}

Nótese en la tabla anterior que cada máquina se identifica con la variable “y”. Dicha variable será utilizada más adelante para diseñar el sistema de control.

La matriz Tiempo–sensado–maquinaria se forma con las submatrices M_{T-S} y M_{M-T} . La tabla siguiente muestra la matriz principal del CBOR:

SINCRONIZACIÓN						RECORRIDO DE IDA					
	PRINCIPALES		DE COMPLETUD	BNDERA		y_1	y_2	y_3	y_4	y_i	
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_i	y_1	y_2	y_3	y_4	y_i	
T / S	S_1	S_2	S_3	S_4	S_i	M_1	M_2	M_3	M_4	M_i	M / T
T_0											T_0
T_1											T_1
T_2											T_2
T_3											T_3
T_n											T_n

Tabla 4.9 Matriz de elementos principales del CBOR

- **Llenado principal de la matriz CBOR.**

El CBOR representa un esquema operacional en código binario de los ciclos operativos de la maquinaria [5], así como los modos operativos de los elementos de sensado descritas también en código binario. Por consiguiente, la matriz de CBOR debe ser llenada por el conjunto $\{1,0\}$.

La matriz de CBOR debe señalar o indicar todos y cada uno de los eventos que se presentan en una línea de producción [5,6]. Por tanto,

- 1) El símbolo "+1" indica recorrido de ida de una máquina específica.
- 2) El símbolo "-1" señalará vuelta de la máquina.
- 3) El símbolo "±1" indica recorrido de vuelta sumado.
- 4) El símbolo "0" indica dos aspectos:
 - a) desactivación de un sensor y
 - b) desactivación de una máquina.
- 5) El símbolo 1/0 indica actuación o desactivación de un sensor. En un tiempo específico.

Nótese que en todos los casos, los elementos primitivos, son los símbolos "1" y "0" los cuales no deben confundirse con el "uno" y el "cero" de los números reales. La tabla siguiente muestra el aspecto de un CBOR considerando los incisos 1), 2), 3) y 4): y 5) sólo en T_0 .

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	
S T	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M T
T ₀	1/0	0	0	0	0	0	0	0	T ₀
T ₁	0	0	0	0	+1	+1	0	0	T ₁
T ₂	0	0	0	0	+1	+1	0	0	T ₂
T ₃	0	0	0	0	+1	±1	0	+1	T ₃
T ₄	0	0	0	0	-1	±1	+1	±1	T ₄
T ₅	0	0	0	0	-1	±1	-1	-1	T ₅
T ₆	0	0	0	0	-1	0	0	0	T ₆

Tabla 4.10 Matriz de elementos principales del CBOR

Nótese en la tabla anterior las siguientes consideraciones:

- 1) El sensor S₁ se considera activado/desactivado por 1/0.
- 2) Los sensores restantes están todos desactivados (0).
- 3) La máquina M₁ de T₁ a T₃ realiza el recorrido de ida y de T₄ a T₆ ejecuta el recorrido de vuelta.
- 4) La máquina M₂ de T₁ a T₂ realiza el recorrido de ida; de T₃ a T₅ ejecuta el recorrido de vuelta, con suma de tiempo de ida. En T₆ la máquina está inactiva.

- **Los eventos de control y el aspecto referencial del CBOR**

En esta sección se discutirán algunos aspectos del sistema de control relacionados con los sistemas productivos. Asimismo se analizará el término “referencial” del CBOR [5,6].

Para que un sensor específico se active en una línea de producción, es necesario que exista “algo que sensor”. Por ejemplo, una pieza o una máquina o inclusive

una persona. Dicho sensor al detectar “algo”, envía señal para que se active, en este caso, una máquina.

El tiempo de detección de piezas y el envío de dicha señal por el sensor a un sistema de procesamiento de señales, en general, es casi instantáneo. Por consiguiente, dicho tiempo no se toma en cuenta en los aspectos operacionales de la línea de producción.

Supóngase que una máquina inicia su operación al activarse un sensor y finaliza al activarse otro sensor. El tiempo de operación de la máquina medida, por decirlo así, entre los dos sensores, es continuo. Si el tiempo de operación es de 10 s, la máquina, en el primer ciclo, puede llegar a su origen en 9.85 s ó 10.15 s.

Para construir el CBOR los tiempos de ciclo de las máquinas son discretizadas (unitariamente) y, por tanto, no se representan tiempos fraccionarios. Esto implica el término “referencial” del código. En otras palabras, los tiempos de ciclo son “perfectos”.

Por otro lado, cada elemento de “detección/emisión” de señal generado por un sensor o un conjunto de sensores, se representa en el CBOR por un tiempo (cTk), que en realidad no es un tiempo, es una representación de un evento de señalización. Dicho tiempo se llama “condicional”

Así, existirán cuatro tipos de tiempos condicionales [6]:

- 1) Uno a uno (recorrido de ida).
- 2) Modulares (sincronización).
- 3) Globales (sincronización).
- 4) Bandera (seguridad).

Es importante señalar que:

“Cada tiempo condicional representa un modelo de control”

Los tiempos condicionales son incrustados en la columna de los tiempos de proceso siguiendo la crónica de recorrido de ida y, posteriormente, la crónica de sincronización local y/o global. Al final, se incrustan los tiempos de condicionales de los sensores bandera.

La tabla siguiente muestra dos tiempos condicionales asociados con un proceso arbitrario:

		x ₁	x ₂	x ₃	y ₁	y ₂		
T	S	S ₁	S ₂	S ₃	M ₁	M ₂	M	T
	cTk ₀		1/0	0	0	0	0	
T ₁		0	0	0	+1	0		T ₁
cTk ₁		0	1/0	0	0	0		cTk ₁
T ₂		0	0	0	-1	+1		T ₂
T ₃		0	0	0	0	+1		T ₃
cTk ₂		0	0	1/0	0	0		cTk ₂

Tabla 4.11 Tiempos condicionales

Note en la tabla anterior que el tiempo T₀ es un tiempo condicional. Además, el símbolo “1/0” significa que un sensor está normalmente abierto o normalmente cerrado. Es importante señalar que en las casillas de los tiempos cTk se coloca “0” en el código de la máquina. Esto no implica que una determinada máquina se “detenga” en dicho tiempo, simplemente es una convención del CBOR.

En la siguiente sección se construirá el CBOR asociada con el módulo de soldadura.

4.5. Control del módulo de soldadura usando un CBOR

La tabla siguiente muestra el código binario operacional del módulo de soldadura.

		X ₁	x ₂	x ₃	X ₄	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄		
T	S	S ₄	S ₅	S ₆	S _{c2}	A _{c1}	R ₃	R ₄	R ₅	M	T
	cTk ₀		1/0	0	0	0	0	0	0	0	
T ₁		0	0	0	0	+1	0	0	0		T ₁
T ₂		0	0	0	0	+1	0	0	0		T ₂
T ₃		0	0	0	0	+1	0	0	0		T ₃
Ctk ₁		0	1/0	0	0	0	0	0	0		Ctk ₁
T ₄		0	0	0	0	-1	+1	+1	0		T ₄
T ₅		0	0	0	0	-1	+1	+1	0		T ₅
T ₆		0	0	0	0	-1	+1	+1	0		T ₆
T ₇		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₇
T ₈		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₈
T ₉		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₉
T ₁₀		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₁₀
T ₁₁		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₁₁
T ₁₂		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₁₂
T ₁₃		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₁₃
T ₁₄		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₁₄
T ₁₅		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₁₅
T ₁₆		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₁₆
T ₁₇		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₁₇
T ₁₈		0	0	0	0	0	+1	+1	0		T ₁₈
T ₁₉		0	0	0	0	0	+1	-1	0		T ₁₉
T ₂₀		0	0	0	0	0	+1	-1	0		T ₂₀
T ₂₁		0	0	0	0	0	+1	-1	0		T ₂₁

T_{22}	0	0	0	0	0	+1	-1	0	T_{22}
T_{23}	0	0	0	0	0	+1	-1	0	T_{23}
T_{24}	0	0	0	0	0	+1	-1	0	T_{24}
CTk_2	0	0	0	1/0	0	0	0	0	CTk_2
T_{25}	0	0	0	0	0	-1	-1	+1	T_{25}
T_{26}	0	0	0	0	0	-1	0	+1	T_{26}
T_{27}	0	0	0	0	0	-1	0	+1	T_{27}
T_{28}	0	0	0	0	0	-1	0	+1	T_{28}
CTk_3	1/0	0	1/0	0	0	0	0	0	CTk_3
T_{29}	0	0	0	0	+1	-1	0	-1	T_{29}
T_{30}	0	0	0	0	+1	-1	0	-1	T_{30}
T_{31}	0	0	0	0	+1	-1	0	-1	T_{31}
CTk_1	0	1/0	0	0	0	0	0	0	CTk_1
T_{32}	0	0	0	0	-1	+1	+1	-1	T_{32}
	S_4	S_5	S_6	S_{c1}	A_{c1}	R_3	R_4	R_5	

Tabla 4.12 CBOR asociada con el módulo de soldadura

Es importante señalar que el CBOR mostrado en la tabla anterior se construyó con la ayuda de la figura 3.16.

Capítulo 5

Simulación

Introducción En este capítulo se incluye la salida gráfica del módulo en estudio, para lo cual se utiliza la plataforma de cálculo formal Mathematica [19], se presenta la programación (apéndice C) y la simulación de los movimientos de los elementos de trabajo que integran la línea de producción estudiada anteriormente. Solamente se incluye la programación del módulo de soldadura.

5.1 Consideraciones generales para la programación y simulación

Para generar la simulación computacional se debe tomar en cuenta los problemas cinemáticos inversos de la maquinaria de trabajo los cuales se pueden consultar en [7]. La simulación aquí propuesta tiene asociada las consideraciones siguientes:

- 1) Los tiempos son discretos
- 2) La simulación es de posicionamiento
- 3) No se incluyen los perfiles de velocidad y aceleración
- 4) Los eslabones de los robots son simulados en modo alambre
- 5) Las rotaciones son modeladas con el álgebra de Cuaterniones [7]
- 6) Los grados de libertad simulados son como máximo tres de posicionamiento
- 7) Los robots R_3 , R_4 y R_5 son cadenas cinemáticas abiertas
- 8) Las transformaciones de la pieza de trabajo no son incluidas en la simulación
- 9) El código binario del proceso es respetado en la simulación

5.1 Programación y simulación

En este punto se presenta las salidas gráficas del módulo de soldadura y en el apéndice C el programa basada en el álgebra de Cuaterniones, utilizando como plataforma de cálculo Mathematica.

Salidas graficas del módulo de soldadura.

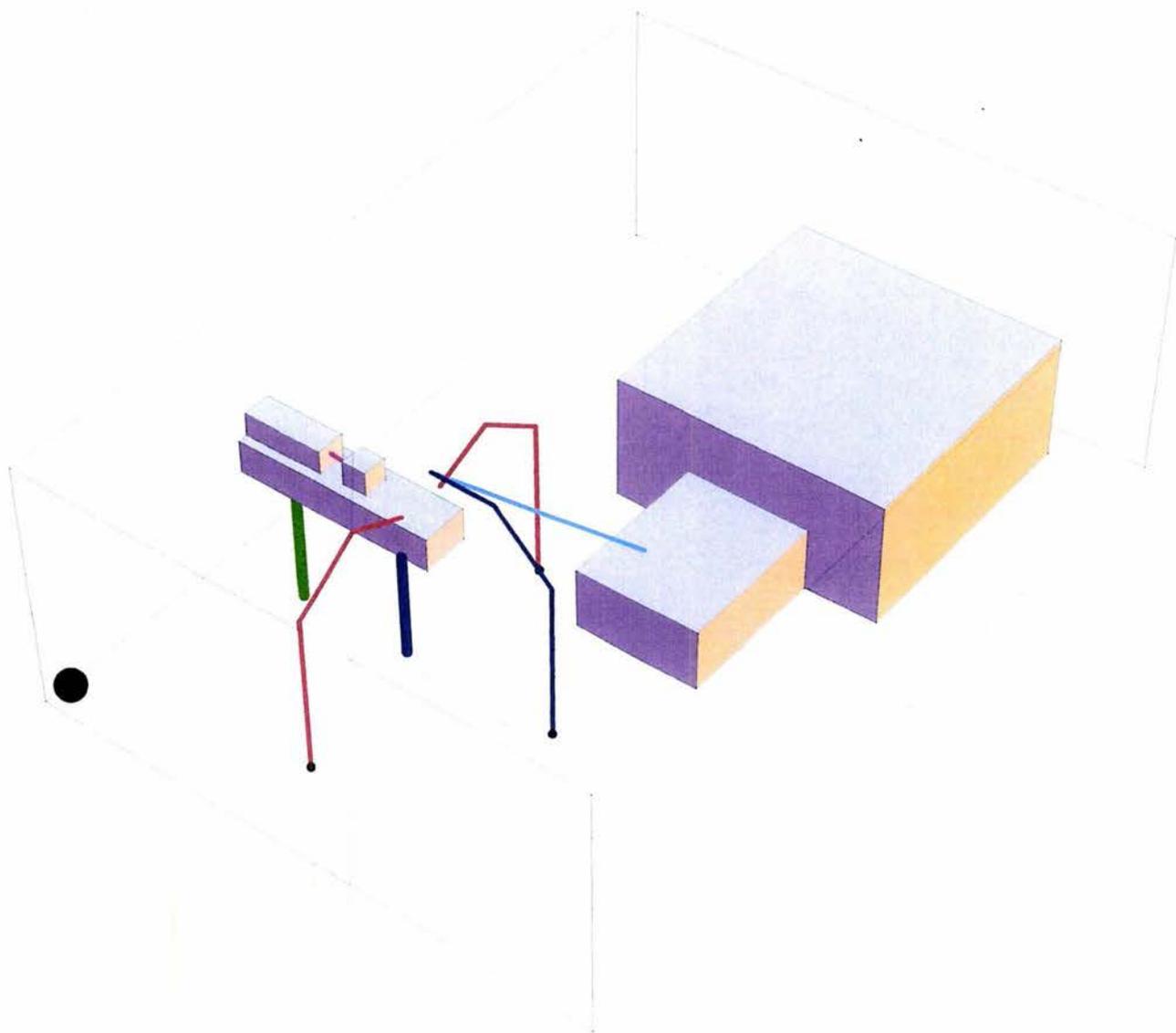


Figura 5.1 inicio del proceso en el tiempo 0.

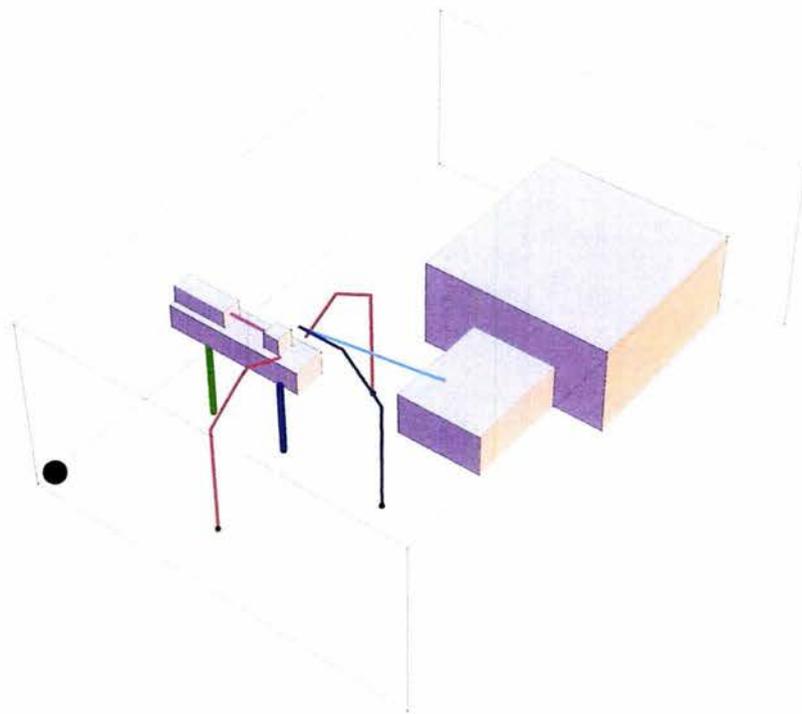


Figura 5.2 Actuador transportando la pieza de trabajo.

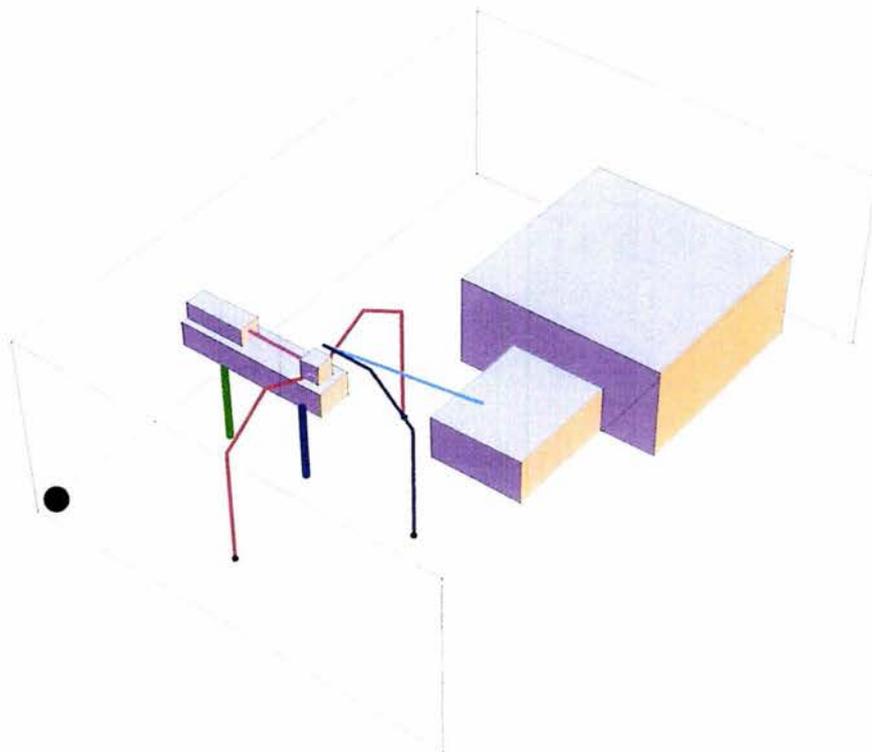


Figura 5.3 Actuador al final de la trayectoria, R₃, R₄ y R₅ en "Home".

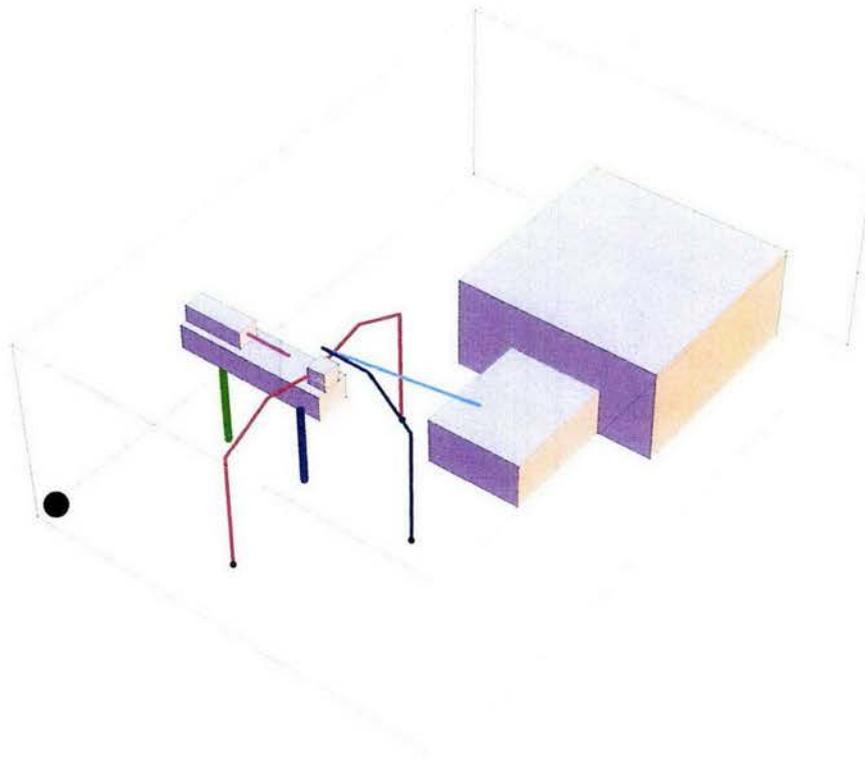


Figura 5.4 Los Robots R_3 y R_4 iniciando la operación de soldadura.

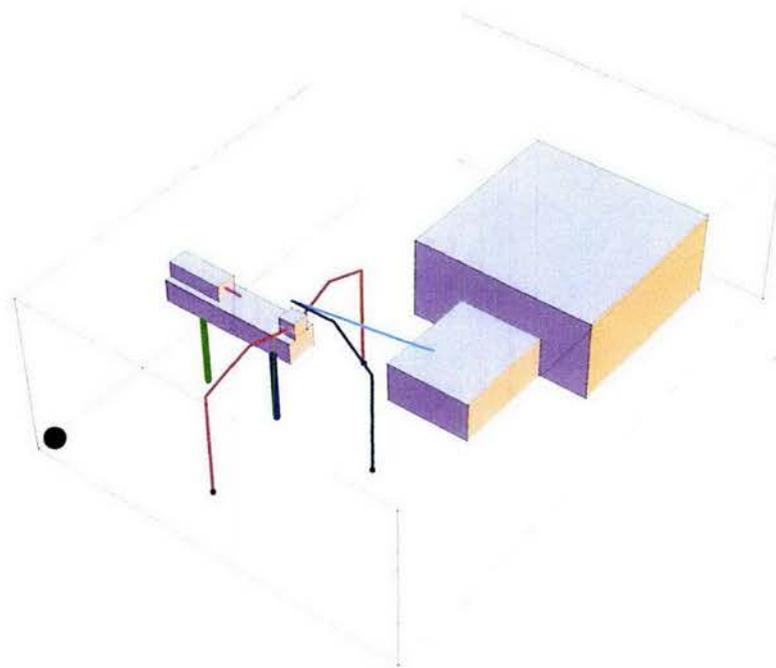


Figura 5.5 Actuador de regreso en la posición de inicio.

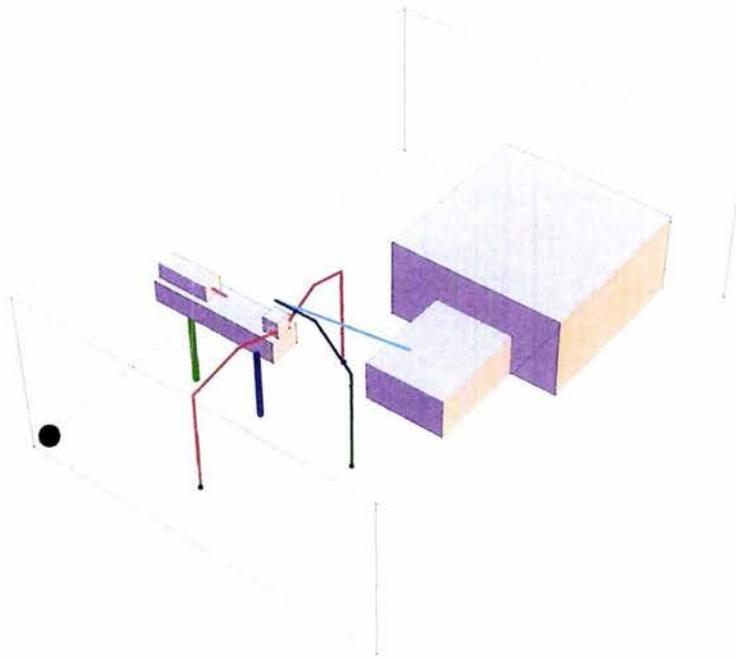


Figura 5.6 Robots R₃ y R₄ al final de la primera operación de soldadura.

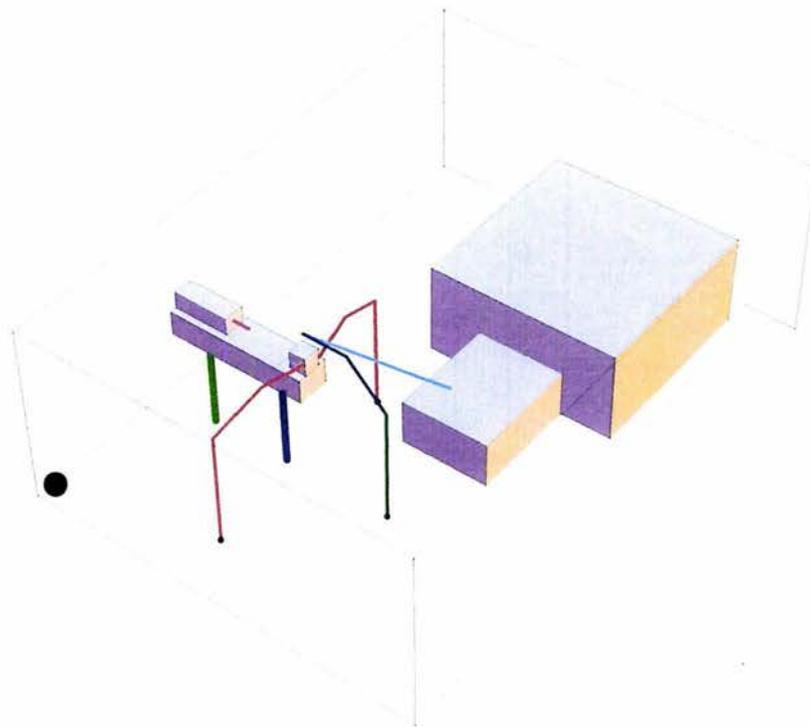


Figura 5.7 Robots R₃ iniciando la segunda trayectoria de soldadura.

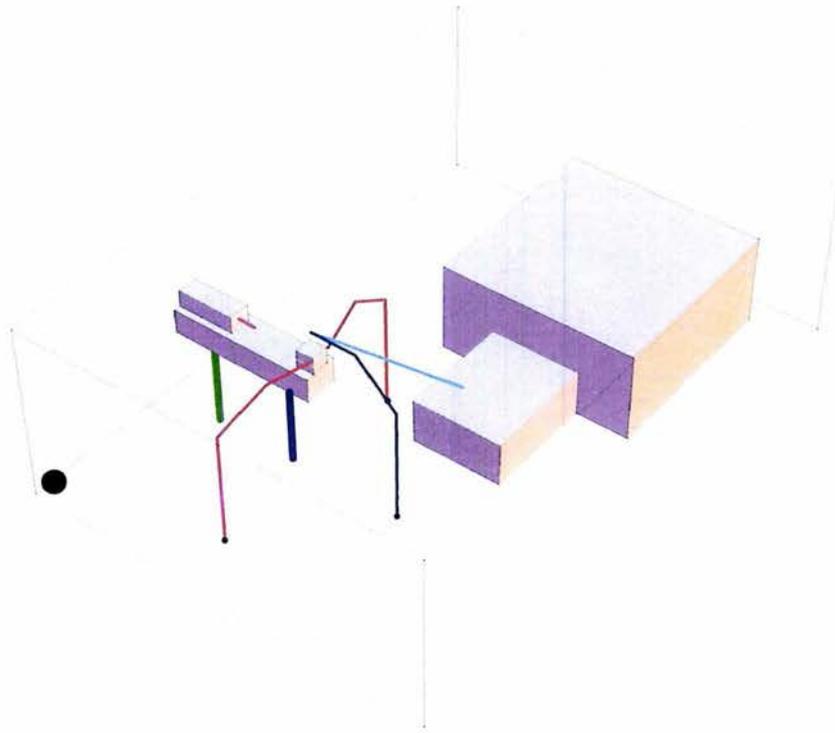


Figura 5.8 Robot R_4 de regreso a la posición de inicio "home".

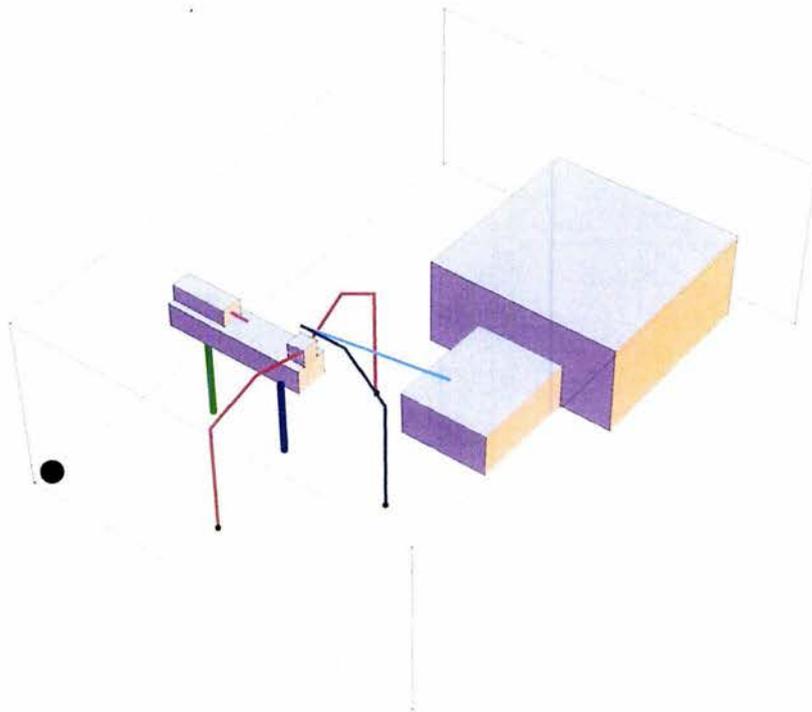


Figura 5.9 Robot R_3 al final del segundo cordón de soldadura.

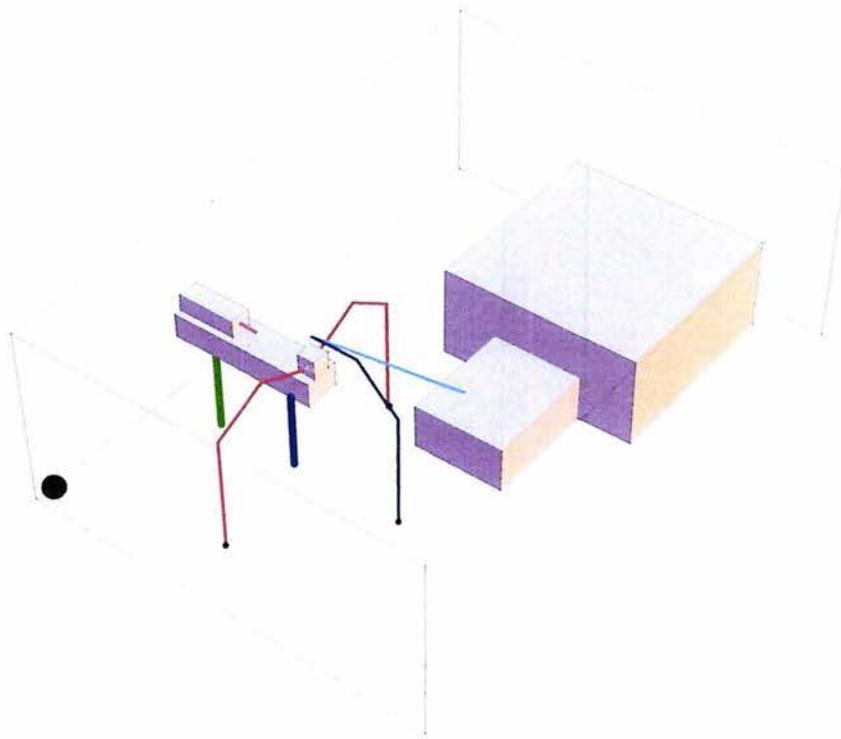


Figura 5.10 Robot R_3 durante la trayectoria de regreso y R_4 al final de la trayectoria de regreso.

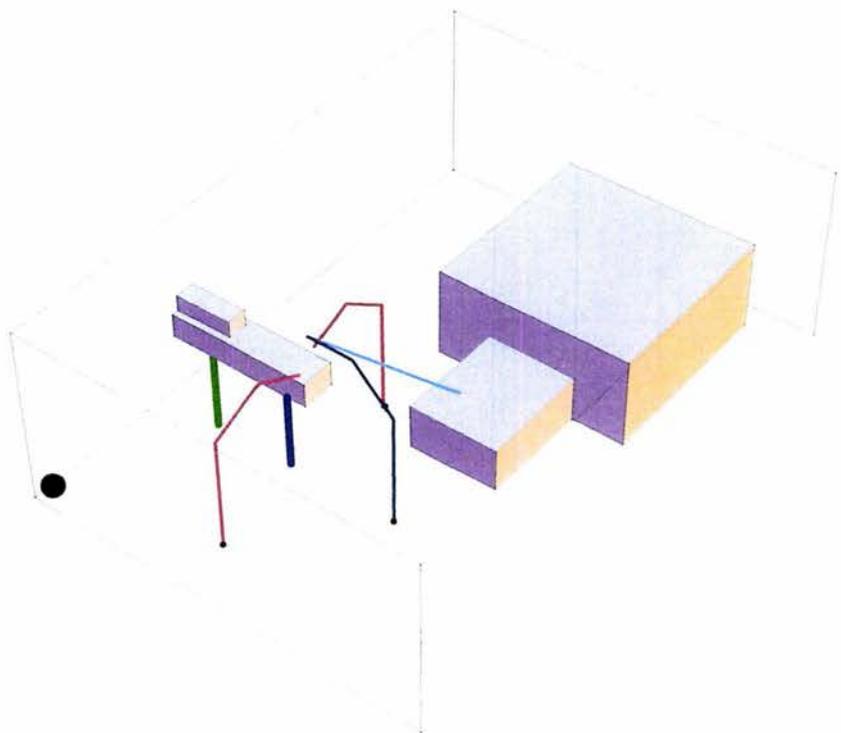


Figura 5.11 Robot R_5 en el instante que toma la pieza de trabajo para iniciar recorrido de transporte.

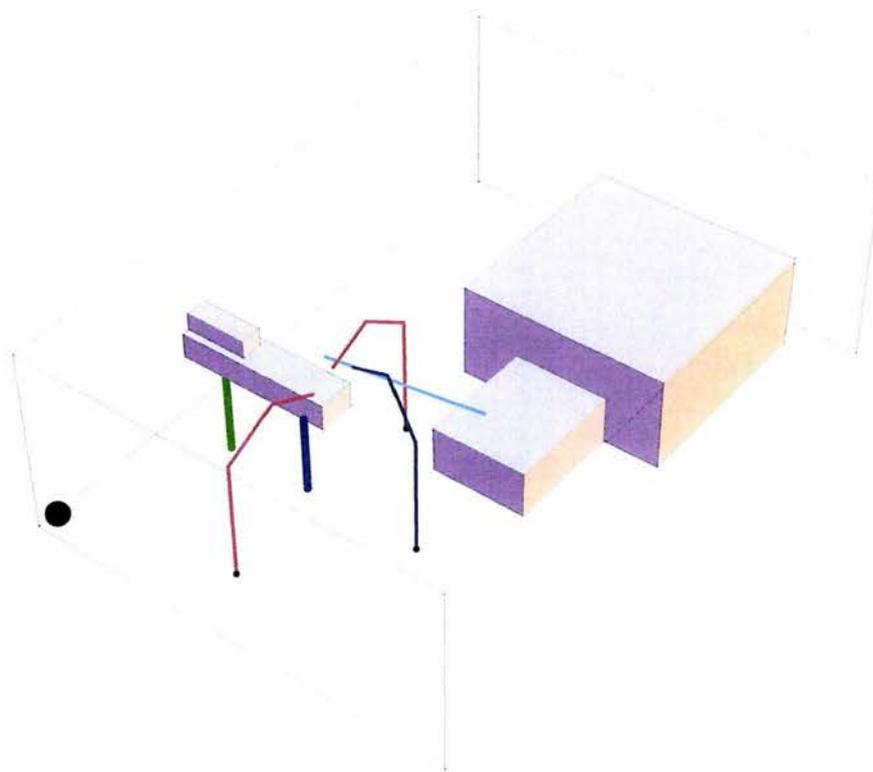


Figura 5.12 Robot R_5 durante el recorrido de transporte.

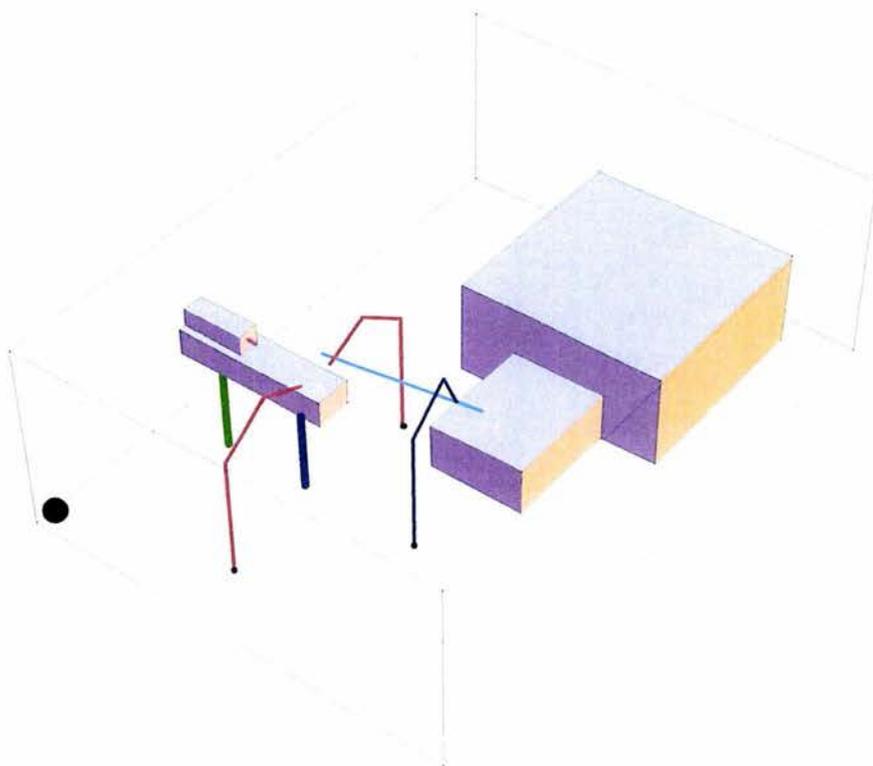


Figura 5.13 Robot R_3 y R_4 en la posición de "home" y R_5 al final del recorrido.

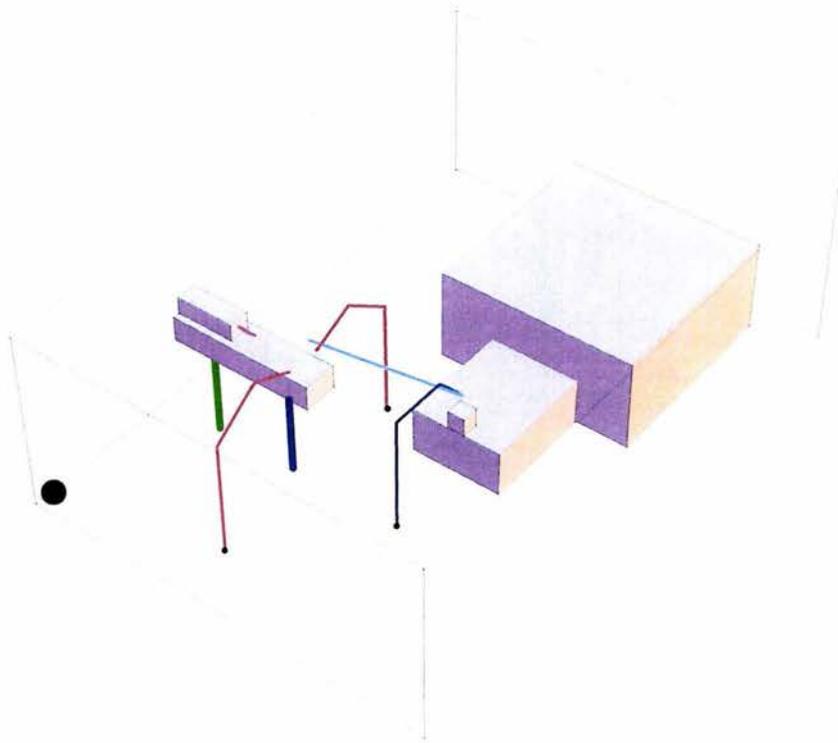


Figura 5.14 Robot R_5 colocando la pieza de trabajo sobre la banda transportadora B_2 .

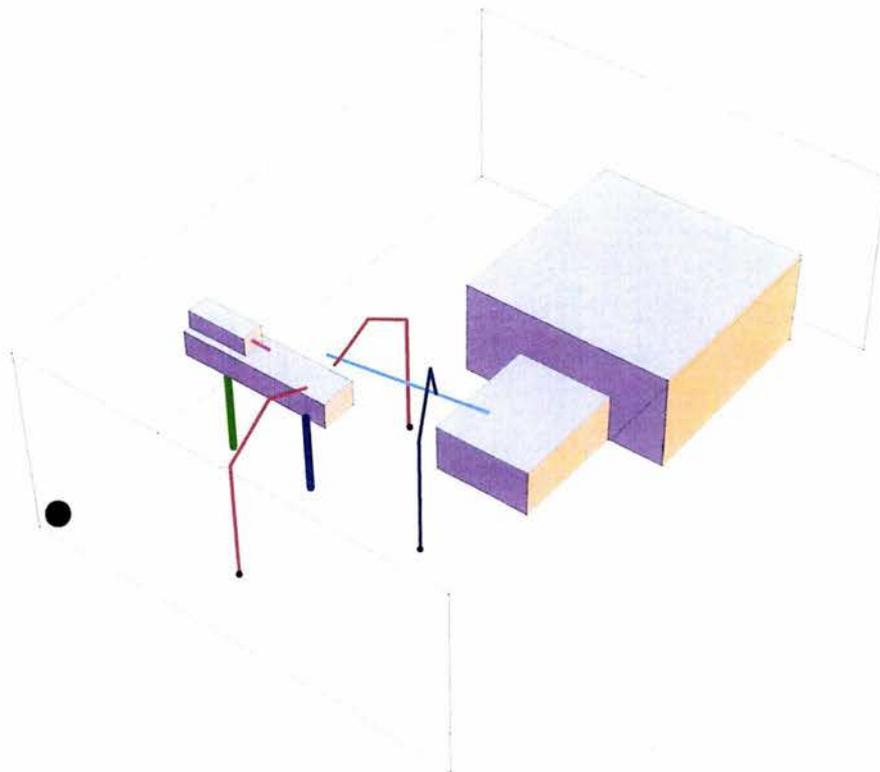


Figura 5.15 Robot R_5 de regreso a la posición de inicio.

Conclusiones

En este trabajo de tesis fueron cumplidos los objetivos siguientes:

- Se analizó la flexibilidad de un módulo de producción bajo cambios en el diseño del producto y el volumen de producción.
- Se utiliza el método del vórtice para sincronizar localmente el módulo de producción.
- Fue usado el método del CBOR para representar el proceso de sincronización global del módulo.
- Se presentaron las salidas graficas de simulación del proceso.

En este trabajo de tesis se analizó un módulo de producción con el propósito de conocer su flexibilidad, el proceso de sincronización local y global, así como su simulación computacional. Los resultados obtenidos se resumen en los puntos siguientes:

- La flexibilidad, de acuerdo con la escala descrita en el capítulo 3, fue del tipo C, o sea máxima.
- El método del vórtice es funcional si existe una diferencia operativa (es decir, que permite distribuir los tiempos sin implicar que las máquinas operen los límites permisibles de operación) entre el TpU y el tiempo fijo máximo.
- El CBOR es un esquema operacional que permite representar el sistema de control de las líneas de producción en forma sencilla. Es decir, se puede construir el diagrama escalera bajo interpretación del CBOR, el cual se programa en un PLC.
- La simulación computacional de sistemas de manufactura permite modelar diversos problemas cambiando datos y parámetros de los proceso y operaciones.

Futuros trabajos por desarrollar derivados de esta tesis son:

- Sincronización local y global de sistemas productivos no seriales.
- Análisis de flexibilidad de sistemas de manufactura reales.
- Análisis de trayectorias.
- Diseño proposicional del sistema de control de procesos en líneas de producción altamente flexibles.

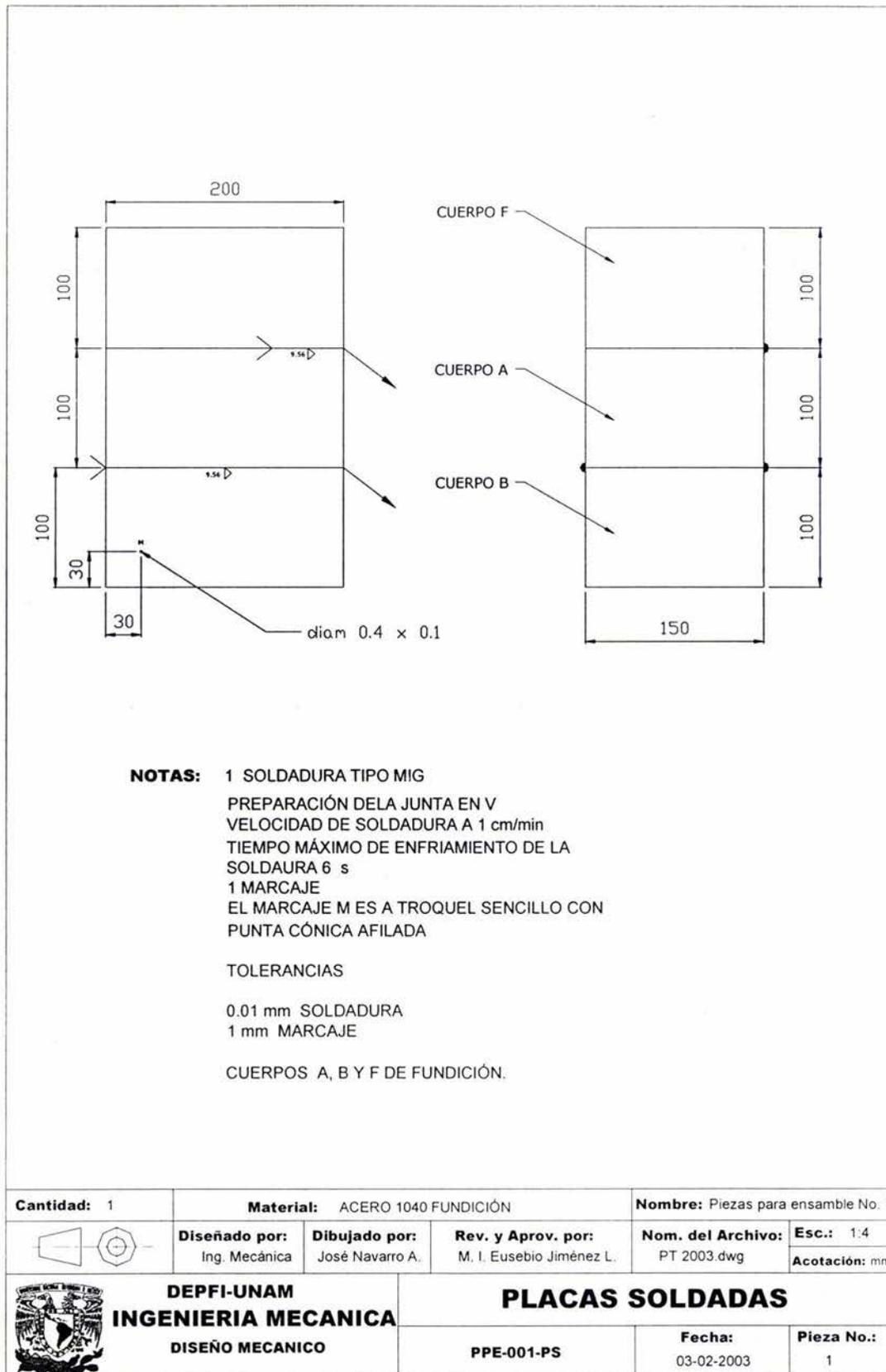
Referencias

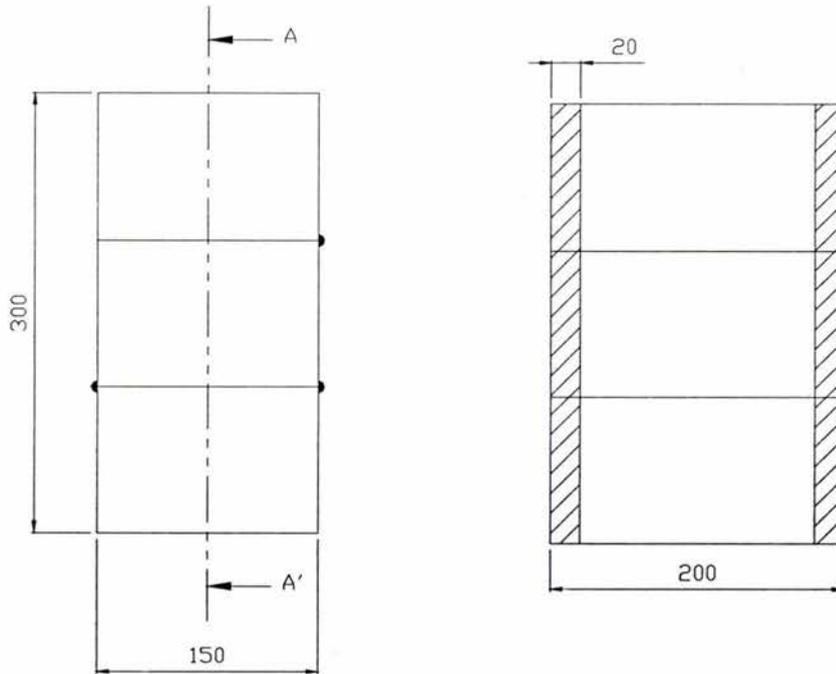
- [1] Jaime Alberto Bermúdez, et all, Diseño, construcción e implementación de un Sistema de Manufactura Flexible, UNIVERSIDAD EAFIT.
- [2] Rojas L. Algunas consideraciones sobre la planeación táctica y operacional. México. 2000 (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica). UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [3] Jiménez E., Reyes A., González J., Mercado F., Pérez A., García T. Control de una línea de producción usando un código binario de procesos. SOMIM 2002, Monterrey. México.
- [4] Jiménez E., Reyes A., Tapia E., Peón R., Galindo F., Pérez A. Distribución de sensores sobre una línea de producción serial y sincronización usando el método del vórtice. SOMIM 2002, Monterrey. México.
- [5] INFORME LA SALLE
- [6] Jiménez E., Reyes A., García D., González J., Mercado F., Hito O. Planeación operacional de sistemas de manufactura: diseño del sistema de control de un proceso productivo tipo serial. Informe interno de investigación DEPMI-SME-MME-DMEC-MAV-01-2003. UNAM –ITESCA.(En edición).
- [7] Jiménez E. Simulación de un proceso de manufactura con obstáculo en la línea de producción. México. 1998. (Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica).UNAM, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, Sección Mecánica.
- [8] Jiménez, E., Reyes, L., Marín, L., Villar, G. Corona, J., Álvarez, J. Representación de un proceso de maquinado usando una matriz de primitivas. SOMIM. 2001 Celaya Gto. México.
- [9] S. Chang ; C. Yang ; H. Cheng ; C. Sheu, Manufacturing flexibility and business strategy: An empirical study of small and medium sized firms, international journal of production economics, Volume: 83 Number: 1 Page: 13 – 26, Publisher: Elsevier Science 2003.
- [10] E. Gal-Or, Flexible manufacturing systems and the internal structure of the firm; international journal of industrial organization; Volume: 20 Number: 8 Page:1061 – 1096; Elsevier Science 2003.

- [11] R. Caprihan ; S. Kumar ; S. Wadhwa; Fuzzy systems for control of flexible machines operating under information delays; international journal of production research; Taylor and Francis Ltd 2003.
- [12] M. Rajasekharan ; B. A. Peters ; T. Yang; A genetic algorithm for facility layout design in flexible manufacturing systems; international journal of production research Volume: 36 Number: 1 Page: 95 – 110; Taylor and Francis Ltd, 2003.
- [13] Chin-Yin Huang ; Shimon Y. Nof: Formation of autonomous agent networks for manufacturing systems; international journal of production research Volume: 38 Number: 3 Page: 607 – 624; Taylor and Francis Ltd, 2003.
- [14] R.M. Franza ; C. Gaimon; Flexibility and Pricing Decisions for High-Volume Products with Short Life Cycles; international journal of flexible manufacturing system; Volume:10 Number: 1 Page: 43 – 71; Kluwer Academic Publishers, 2003.
- [15] H.F. Lee ; K.E. Stecke; Production planning for flexible flow systems with limited machine flexibility; IIE Transactions; Volume: 30 Number: 7 Page: 669 – 684; Kluwer Academic Publishers; 2003.
- [16] Emine Persentili ; Sema E. Alptekin; Product flexibility in selecting manufacturing planning and control strategy; international journal of production research Volume: 38 Number: 9 Page: 2011 – 2021; Taylor and Francis Ltd, 2003.
- [17] L. Marín. Las Ecuaciones de Volúmenes Modificadas. Tesis de grado de Maestría en Ingeniería Mecánica. DEPMI-UNAM. (2000).
- [18] Jiménez E., Reyes L., Torres D., Ruelas J., Danzos A. "Sistematización del álgebra de Boole en el conjunto binario". Informe interno de investigación DEPMI-SME-MME-DMEC-MAV-01-2001. UNAM –ITESCA, ISBN 968-36-9840-9.
- [19] John W. Gray. Mastering Mathematica, Programming Methods and Applications. 1994. Academic Press Inc. New. York.

Apéndice A

Planos de fabricación de la pieza de trabajo





Corte A-A' de la pieza

Cantidad: 1	Material: ACERO 1040 FUNDICIÓN	Nombre: Piezas para ensamble No. 1		
	Diseñado por: Ing. Mecánica	Dibujado por: José Navarro A.	Rev. y Aprov. por: M. I. Eusebio Jiménez L.	Nom. del Archivo: PT 2003.dwg
		PLACAS SOLDADAS		
DEPI-UNAM INGENIERIA MECANICA DISEÑO MECANICO		PPE-001-PS	Fecha: 11-02-2003	Pieza No.: 1

Apéndice B

Modelación cinemática de un manipulador espacial tipo RRR

Se presenta en este apéndice, la modelación cinemática de un robot de tres grados de libertad, el movimiento del robot (R_{puma}) es en el espacio \mathbb{R}^3 , la estructura de R_{puma} mostrado en la figura B.1, corresponde a los primeros tres eslabones del robot industrial PUMA. Dicho modelo fue desarrollado en [7].

El problema consiste en construir las ecuaciones que gobiernan la cinemática de la cadena mostrada en la figura B.1, el extremo final del tercer eslabón, está obligado, en este caso, a seguir una trayectoria descrita en el espacio \mathbb{R}^3 .

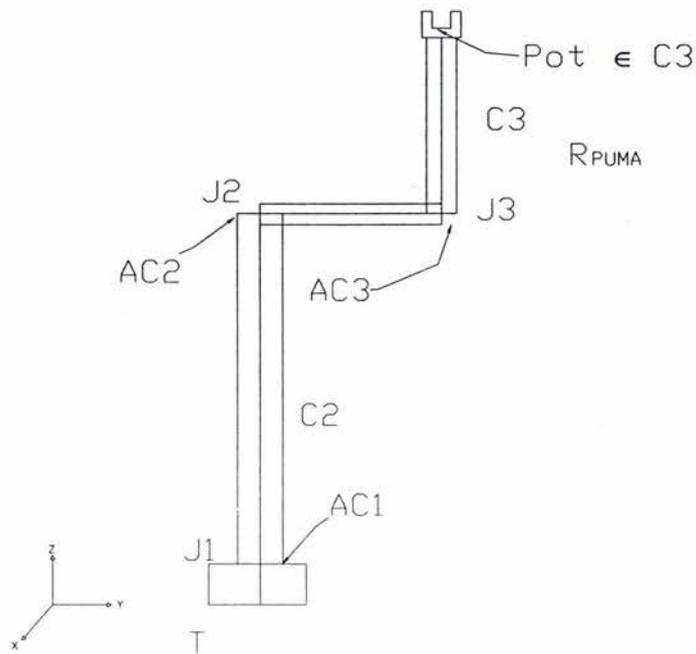


Figura B.1 Configuración del robot R_{PUMA}

Considérese el multicuerpo mostrado en B.1, obsérvese que R_{puma} puede ser representado por:

$$R_{puma} = C_1 \cup C_2 \cup C_3 \quad (B.1)$$

Las juntas que conectan a los cuerpos que componen al robot se representan, por las intersecciones siguientes:

$$\begin{aligned} J_1 &= C_1 \cap T & (B.2) \\ J_2 &= C_1 \cap C_2 \\ J_3 &= C_1 \cap C_3 \end{aligned}$$

Sobre la junta J_1 mostrada en B.1, se define un sistema cartesiano inercial, también sobre el eje de C_1 se define un sistema local y sobre el eje de la junta J_2 se define el sistema de referencia del cuerpo C_2 , también en el eje del cuerpo C_3 como se muestra en la figura B.2, sobre las juntas J_1 , J_2 y J_3 se encuentran los actuadores AC_1 , AC_2 , y AC_3 según se muestra en B.1. Las longitudes de los cuerpos C_1 , C_2 y C_3 serán L_1 , L_2 y L_3 .

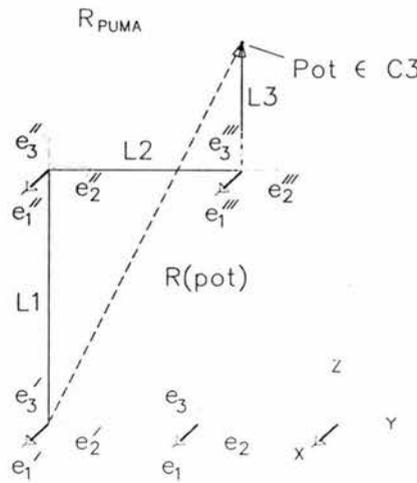


Figura B.2 Configuración no deformada R_{PUMA}

Los vectores de posición que unen el centro de la junta J_1 con la junta J_2 , el centro de la junta J_2 con la junta J_3 y J_3 con el punto $p_{ot} \in C_3$ mostrado en la figura B.2, están definidos con respecto a las bases locales. Esto es,

$$L_1 = l_1 \underline{e}_3', \quad L_2 = l_2 \underline{e}_2'', \quad L_3 = l_3 \underline{e}_3''' \quad (B.3)$$

El vector $R(p_{ot}) \in \mathbb{R}^3$ mostrado en B.2, es representado a través de la siguiente ecuación:

$$\underline{R}(\underline{p}_{ot}) = \underline{L}_1 + \underline{L}_2 + \underline{L}_3 \quad (\text{B.4})$$

B.1 Caracterización del robot R_{PUMA} en la configuración no deformada

Considérese que el multicuerpo R_{PUMA} ocupa la posición mostrada en la figura B.2. Entonces, el vector de posición de $\underline{p}_{ot} \in C_3$ está dado por:

$$\underline{R}(\underline{p}_{ot}) = l_1 \underline{e}_3' + l_2 \underline{e}_2'' + l_3 \underline{e}_3''' \quad (\text{B.5})$$

Las rotaciones asociadas al robot R_{PUMA} en la configuración no deformada pueden expresarse, en el caso de Cuaterniones unitarios por [7]:

$$\underline{e}_3' = \rho(\underline{p}, \underline{e}_1) \equiv \underline{p} * \underline{e}_3 * \bar{\underline{p}} \quad (\text{B.6})$$

$$\underline{e}_2'' = \rho(\underline{q}, \rho(\underline{p}, \underline{e}_2)) \equiv (\underline{q} * \underline{p}) * \underline{e}_2 * (\overline{\underline{q} * \underline{p}})$$

$$\underline{e}_3''' = \rho(\underline{r}, \rho(\underline{q}, \rho(\underline{p}, \underline{e}_3))) \equiv (\underline{r} * \underline{q} * \underline{p}) * \underline{e}_3 * (\overline{\underline{r} * \underline{q} * \underline{p}})$$

En base con la ecuación (B.6), la expresión (B.5) puede ser escrita de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \underline{R}(\underline{p}_{ot}) = & l_1 \{ \underline{p} * \underline{e}_3 * \bar{\underline{p}} \} + l_2 \{ (\underline{q} * \underline{p}) * \underline{e}_2 * (\overline{\underline{q} * \underline{p}}) \} + \\ & + l_3 \{ (\underline{r} * \underline{q} * \underline{p}) * \underline{e}_3 * (\overline{\underline{r} * \underline{q} * \underline{p}}) \}. \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

También considerando las normas unitarias de los Cuaterniones. Esto es,

$$\| \underline{p} \| = \| \underline{q} \| = \| \underline{r} \| = 1. \quad (\text{B.8})$$

se obtienen las ecuaciones que gobiernan la configuración no deformada del multicuerpo R_{PUMA} .

Los componentes de los Cuaterniones asociados $\underline{p}, \underline{q}, \underline{r} \in \mathcal{R}^4$ son definidos de la manera siguiente:

$$\begin{array}{llll}
p \in \mathfrak{R}^4 & p=(p_o, \underline{p}_v) & p_o \in \mathfrak{R} & p_o = \pm \text{Cos} \frac{\theta_1}{2} \\
& & \underline{p}_v \in \mathfrak{R}^3 & \underline{p}_v = \pm \text{Sin} \frac{\theta_1}{2} \underline{e}'_3, \\
q \in \mathfrak{R}^4 & q=(q_o, \underline{q}_v) & q_o \in \mathfrak{R} & q_o = \pm \text{Cos} \frac{\theta_2}{2} \\
& & \underline{q}_v \in \mathfrak{R}^3 & \underline{q}_v = \pm \text{Sin} \frac{\theta_2}{2} \underline{e}''_1, \\
r \in \mathfrak{R}^4 & r=(r_o, \underline{r}_v) & r_o \in \mathfrak{R} & r_o = \pm \text{Cos} \frac{\theta_3}{2} \\
& & \underline{r}_v \in \mathfrak{R}^3 & \underline{r}_v = \pm \text{Sin} \frac{\theta_3}{2} \underline{e}'''_1.
\end{array} \tag{B.9}$$

B.1.1 Planteamiento de los problemas cinemáticos directo e inverso

En esta parte se definen los problemas cinemático directo y el problema cinemático inverso de la posición mostrada en la figura B.2, la cual es la configuración no deformada del multicuerpo R_{PUMA} . Considérese entonces el siguiente problema:

Problema cinemático directo

“Dados $p=(p_o, 0, 0, p_3)$, $q=(q_o, q_1, 0, 0)$, $r=(r_o, r_1, 0, 0)$ con $\|p\| = \|q\| = \|r\| = 1$, $l_1 \in \mathfrak{R}^+$, $l_2 \in \mathfrak{R}^+$ y $l_3 \in \mathfrak{R}^+$, encuentre $R(p_{ot}) \in \mathfrak{R}^3$ tal que la ecuación (B.7) sea satisfecha.”

Problema cinemático inverso

Se presenta ahora en esta parte, el problema inverso de la cinemática de cuerpos rígidos para el multicuerpo en estudio. Esto es,

“Dado $R(p_{ot}) \in \mathfrak{R}^3$, $l_1 \in \mathfrak{R}^+$, $l_2 \in \mathfrak{R}^+$ y $l_3 \in \mathfrak{R}^+$, encuentre $p=(p_o, 0, 0, p_3)$, $q=(q_o, q_1, 0, 0)$, $r=(r_o, r_1, 0, 0)$, tal que la ecuación (B.7) sea satisfecha y

$$p_o^2 + p_3^2 = 1$$

$$q_0^2 + q_1^2 = 1$$

$$r_0^2 + r_1^2 = 1$$

El problema de la cinemática inversa genera 6 ecuaciones algebraicas no lineales con 6 incógnitas del tipo polinomial.

B.2 Análisis de la configuración deformada de R_{PUMA}

En esta parte se supone que el robot (R_{PUMA}) ha sido movido de su posición inicial (configuración no deformada) a través de accionamientos de los actuadores AC_1 , AC_2 y AC_3 (ver figura B.1). El problema ahora, consiste en determinar el lugar geométrico que ocupa el extremo final del multicuerpo en estudio. La configuración así obtenida es llamada la configuración deformada.

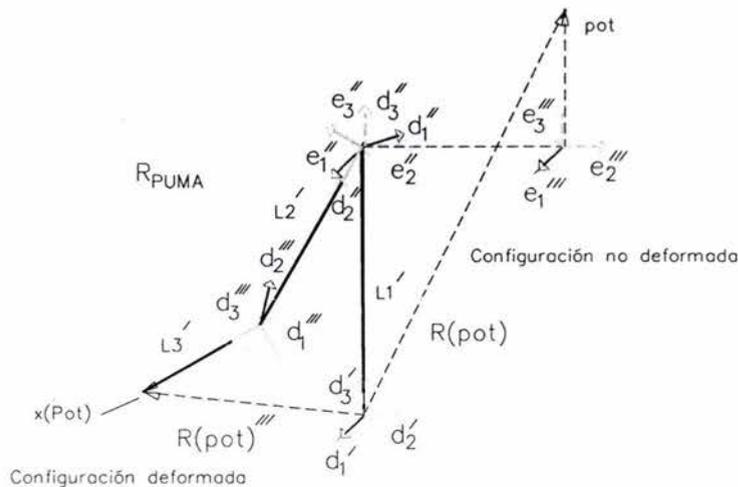


Figura B.3 Configuración deformada R_{PUMA}

Obsérvese que el vector de posición $R(pot)''''$ correspondiente a la configuración deformada que caracteriza el lugar geométrico $x(pot)$, puede ser expresado de la forma siguiente:

$$R(pot)'''' = L_1' + L_2' + L_3' \tag{B.10}$$

Los vectores de posición \underline{L}'_1 , \underline{L}'_2 y \underline{L}'_3 , también pueden ser escritos en términos de las bases locales, esto es, $\underline{L}'_1 = l_1 \underline{d}'_3$, $\underline{L}'_2 = l_2 \underline{d}''_2$ y $\underline{L}'_3 = l_3 \underline{d}'''_3$. Las bases \underline{d}'_3 , \underline{d}''_2 y \underline{d}'''_3 son las bases móviles deformadas. En términos de Cuaterniones las bases deformadas se expresan de la forma siguiente:

$$\underline{d}'_3 = \rho(P, \underline{e}'_3) \equiv P * p * \underline{e}_3 * \overline{P * p} \quad (B.11)$$

$$\underline{d}''_2 = \rho(Q, \rho(P, \underline{e}''_2)) \equiv Q * P * q * p * \underline{e}_2 * (\overline{Q * P * q * p})$$

$$\underline{d}'''_3 = \rho(R, \rho(P, \underline{e}'''_3)) \equiv R * Q * P * r * q * p * \underline{e}_3 * (\overline{R * Q * P * r * q * p}).$$

En base a las expresiones (B.11) el vector de posición $\underline{R}(p_{ot})''' \in \mathfrak{R}^3$ puede ser representado de la forma siguiente:

$$\begin{aligned} \underline{R}(p_{ot})''' = l_1 \{ P * p * \underline{e}_3 * \overline{P * p} \} + l_2 \{ Q * P * q * p * \underline{e}_2 * (\overline{Q * P * q * p}) \} + \\ + l_3 \{ R * Q * P * r * q * p * \underline{e}_3 * (\overline{R * Q * P * r * q * p}) \} \end{aligned} \quad (B.12)$$

También considerando las normas unitarias de las Cuaterniones $P, Q, R \in \mathfrak{R}^4$. Esto es,

$$\| P \| = \| Q \| = \| R \| = 1. \quad (B.13)$$

se obtienen las ecuaciones que gobiernan la configuración deformada del multicuerpo en estudio.

Los componentes de los Cuaterniones $P, Q, R \in \mathfrak{R}^4$ son:

$$P \in \mathfrak{R}^4 \quad P = (P_o, \underline{P}_v) \quad P_o \in \mathfrak{R} \quad P_o = \pm \text{Cos} \frac{\alpha_1}{2} \quad (B.14)$$

$$\underline{P}_v \in \mathfrak{R}^3 \quad \underline{P}_v = \pm \text{Sin} \frac{\alpha_1}{2} \underline{d}'_3,$$

$$Q \in \mathfrak{R}^4 \quad Q = (Q_o, \underline{Q}_v) \quad Q_o \in \mathfrak{R} \quad Q_o = \pm \text{Cos} \frac{\alpha_2}{2}$$

$$\begin{array}{l}
 R \in \mathfrak{R}^4 \quad R = (R_0, \underline{R}_V) \\
 \underline{Q}_V \in \mathfrak{R}^3 \quad \underline{Q}_V = \pm \text{Sin} \frac{\alpha_2}{2} \underline{d}_1'' \\
 R_0 \in \mathfrak{R} \quad R_0 = \pm \text{Cos} \frac{\alpha_3}{2} \\
 \underline{R}_V \in \mathfrak{R}^3 \quad \underline{R}_V = \pm \text{Sin} \frac{\alpha_3}{2} \underline{d}_1'''
 \end{array}$$

Ahora se procederá a plantear el problema cinemático inverso en la configuración deformada.

Problema cinemático inverso en la configuración deformada

“Dado $\underline{R}(\underline{p}_{ot})''' \in \mathfrak{R}^3$, $\underline{p}=(p_0,0,0,p_3)$, $\underline{q}=(q_0,q_1,0,0)$, $\underline{r}=(r_0,r_1,0,0)$ con $\|\underline{p}\|=\|\underline{q}\|=\|\underline{r}\|=1$, $l_1 \in \mathfrak{R}^+$, $l_2 \in \mathfrak{R}^+$ y $l_3 \in \mathfrak{R}^+$, encuentre $\underline{P}=(P_0,0,0,P_3)$, $\underline{Q}=(Q_0,Q_1,0,0)$ $\underline{R}=(R_0,R_1,0,0)$ tal que la expresión (B.12) sea satisfecha y

$$P_0^2 + P_3^2 = 1$$

$$Q_0^2 + Q_1^2 = 1$$

$$R_0^2 + R_1^2 = 1$$

El problema de la cinemática inversa en la posición deformada genera 6 ecuaciones algebraicas no lineales con 6 incógnitas del tipo polinomial.

Apéndice C

<p>ClearAll[F0,F3,G0,G1,H0,H1,f0,f3,g0,g1,h0,h1,l0,l3,m0,m1,n0,n1,o0,o3, p0,p1,q0,q1,v1,v2,v3,e1,e2,e3,F,G,H,f,g,h,l,m,n,o,p,q, e11,e21,e31,e21,e22,e32,e31,e32,e33, a11,a21,a31,a21,a22,a32,a31,a32,a33, u11,u21,u31,u21,u22,u32,u31,u32,u33]</p> <p>Mpq[P_,Q_]:=P[[1]] Q[[1]]-P[[2]] Q[[2]]-P[[3]] Q[[3]]- P[[4]] Q[[4]],P[[1]] Q[[2]]+P[[2]] Q[[1]]+P[[3]] Q[[4]]- P[[4]] Q[[3]],P[[1]] Q[[3]]-P[[2]] Q[[4]]+P[[3]] Q[[1]]+ P[[4]] Q[[2]],P[[1]] Q[[4]]+P[[2]] Q[[3]]-P[[3]] Q[[2]]+ P[[4]] Q[[1]]];</p> <p>Conj[P_]:=P[[1]],-P[[2]],-P[[3]],-P[[4]]];</p> <p>Ropq[P_,Q_]:=Mpq[P,Mpq[Q,Conj[P]]];</p> <p>e1={0,1,0,0};e2={0,0,1,0};e3={0,0,0,1}; v1=90 Degree;v2=0 Degree;v3=-90 Degree;</p> <p>F0=Cos[v1/2]/N;F1=0;F2=0;F3=Sin[v1/2]/N; G0=Cos[v2/2]/N;G1=Sin[v2/2]/N;G2=0;G3=0; H0=Cos[v3/2]/N;H1=Sin[v3/2]/N;H2=0;H3=0;</p> <p>F={F0,0,0,F3}; G={G0,G1,0,0}; H={H0,H1,0,0}; f={f0,0,0,f3}; g={g0,g1,0,0}; h={h0,h1,0,0}; l={l0,0,0,l3}; m={m0,m1,0,0}; n={n0,n1,0,0}; o={o0,0,0,o3}; p={p0,p1,0,0}; q={q0,q1,0,0};</p> <p>d1=10;d2=5;d3=4;</p> <p>k1=Mpq[f,F];k2=Mpq[g,G];k3=Mpq[h,H]; e11=Ropq[k1,e1]; e21=Ropq[k1,e2]; e31=Ropq[k1,e3]; b1=d1*e31;</p> <p>k4=Mpq[k1,k2]; e22=Ropq[k4,e2]; b2=d2*e22;</p> <p>k5=Mpq[k4,k3]; e23=Ropq[k5,e2]; b3=d3*e23;</p> <p>k6=Mpq[l,F];k7=Mpq[m,G];k8=Mpq[n,H];</p>	<p>Limpieza de variables</p> <p>Operación de multiplicación de cuaterniones</p> <p>Conjugado de un quaternion</p> <p>Función de rotación entre quaterniones</p> <p>Base inercial Ángulos de la configuración no deformada para los tres robots</p> <p>Quaterniones de la configuración no deformada para los tres robots</p> <p>Quaterniones de la configuración deformada para los tres robots</p> <p>Dimensionamiento de los eslabones para los tres robots</p> <p>Bases locales no deformadas para los tres robots</p>
--	--

<pre> ClearAll[Sol,Vec,f0,f3,g0,g1,h0,h1] For[i=0,i<=14,i++, t=i; x=(1.5/14)*t+13.75; y=11.68; z=11.28; Sol[i]=FindRoot[{rp[[2]]==x,rp[[3]]==y,rp[[4]]==z,f0^2+f 3^2==1, g0^2+g1^2==1,h0^2+h1^2==1},{f0,0.9},{g0,0.9},{h0,0. 9}, {f3,-0.2},{g1,0.1},{h1,0.1},MaxIterations- >40]; Vec[i]={f0,g0,h0,f3,g1,h1}/.Sol[i]; </pre>	<p>Solución de la cinemática inversa</p> <p>Robot 1 Sigue trayectoria de soldadura</p>
<pre> ClearAll[Solo,Veco,f0,f3,g0,g1,h0,h1] For[i=0,i<=4,i++, t=i; x=(-0.42/4)*t+15.25; y=11.68; z=11.61; Solo[i]=FindRoot[{rp[[2]]==x,rp[[3]]==y,rp[[4]]==z,f0^2 +f3^2==1, g0^2+g1^2==1,h0^2+h1^2==1},{f0,0.9},{g0,0.9},{h0,0. 9}, {f3,-0.2},{g1,0.1},{h1,0.1},MaxIterations- >40]; Veco[i]={f0,g0,h0,f3,g1,h1}/.Solo[i]; </pre>	<p>Solución de la cinemática inversa</p> <p>Robot 1 Sigue trayectoria de soldadura</p>
<pre> ClearAll[Sola,Veca,f0,f3,g0,g1,h0,h1] x=14.83; y=11.03; z=11.61; Sola=FindRoot[{rp[[2]]==x,rp[[3]]==y,rp[[4]]==z,f0^2+f 3^2==1, g0^2+g1^2==1,h0^2+h1^2==1},{f0,0.9},{g0,0.9},{h0,0. 9}, {f3,-0.2},{g1,0.1},{h1,0.1},MaxIterations- >40]; Veca={f0,g0,h0,f3,g1,h1}/.Sola; </pre>	<p>Solución de la cinemática inversa</p> <p>Robot 1 Sigue trayectoria de soldadura</p>
<pre> ClearAll[Solla,Vecca,f0,f3,g0,g1,h0,h1] For[i=0,i<=4,i++, t=i; x=(-1.08/4)*t+14.83; y=11.03; z=11.28; Solla[i]=FindRoot[{rp[[2]]==x,rp[[3]]==y,rp[[4]]==z,f0^2 +f3^2==1, </pre>	<p>Solución de la cinemática inversa</p> <p>Robot 1 Sigue trayectoria de soldadura</p>

```

g0^2+g1^2==1,h0^2+h1^2==1},{f0,0.9},{g0,0.9},{h0,0.9},
      {f3,-0.2},{g1,0.1},{h1,0.1},MaxIterations-
>40];
Vecca[i]={f0,g0,h0,f3,g1,h1}/.Solla[i];

```

ClearAll[Res2,Vec2,f0,f3,g0,g1,h0,h1]

```

x=15.25;
y=11.03;
z=11.28;
Res2=FindRoot[{rp[[2]]==x,rp[[3]]==y,rp[[4]]==z,f0^2+f
3^2==1,

```

```

g0^2+g1^2==1,h0^2+h1^2==1},{f0,0.9},{g0,0.9},{h0,0.9},
      {f3,-0.2},{g1,0.1},{h1,0.1},MaxIterations-
>30];
Vec2={f0,g0,h0,f3,g1,h1}/.Res2;

```

ClearAll[Col,Bec,f0,f3,g0,g1,h0,h1]

```

For[i=0,i<=6,i++,
t=i;
x=(-1.5/6)*t+15.25;
y=11.03;
z=11.28;
Col[i]=FindRoot[{rp[[2]]==x,rp[[3]]==y,rp[[4]]==z,f0^2+f
3^2==1,

```

```

g0^2+g1^2==1,h0^2+h1^2==1},{f0,0.9},{g0,0.9},{h0,0.9},
      {f3,-0.2},{g1,0.1},{h1,0.1},MaxIterations-
>30];
Bec[i]={f0,g0,h0,f3,g1,h1}/.Col[i];

```

ClearAll[Rss1,Vcc1,l0,l3,m0,m1,n0,n1]

```

x=13.75;
y=14.03;
z=11.28;
Rss1=FindRoot[{rs[[2]]==x,rs[[3]]==y,rs[[4]]==z,l0^2+l
3^2==1,

```

```

m0^2+m1^2==1,n0^2+n1^2==1},{l0,0.9},{m0,0.9},{n0,0.9},
      {l3,-0.2},{m1,0.1},{n1,0.1},MaxIterations-
>30];
Vcc1={l0,m0,n0,l3,m1,n1}/.Rss1;

```

Solución de la cinemática inversa

Robot 1
Sigue trayectoria de soldadura

Solución de la cinemática inversa

Robot 2
Sigue trayectoria de soldadura

Solución de la cinemática inversa

Robot 2
Sigue trayectoria de soldadura

<pre> ClearAll[Soo,Vcc,l0,l3,m0,m1,n0,n1] For[i=0,i<=14,i++, t=i; x=(1.5/14)*t+13.75; y=13.37; z=11.28; Soo[i]=FindRoot[{rs[[2]]==x,rs[[3]]==y,rs[[4]]==z,l0^2+l3^2==1, m0^2+m1^2==1,n0^2+n1^2==1},{l0,0.9},{m0,0.9},{n0,0.9}, {l3,-0.2},{m1,0.1},{n1,0.1},MaxIterations->40]; Vcc[i]={l0,m0,n0,l3,m1,n1}/.Soo[i]; </pre>	<p>Solución de la cinemática inversa</p> <p>Robot 2 Sigue trayectoria de soldadura</p>
<pre> ClearAll[Rss2,Vcc2,l0,l3,m0,m1,n0,n1] x=15.25; y=13.37; z=11.28; Rss2=FindRoot[{rs[[2]]==x,rs[[3]]==y,rs[[4]]==z,l0^2+l3^2==1, m0^2+m1^2==1,n0^2+n1^2==1},{l0,0.9},{m0,0.9},{n0,0.9}, {l3,-0.2},{m1,0.1},{n1,0.1},MaxIterations->30]; Vcc2={l0,m0,n0,l3,m1,n1}/.Rss2; </pre>	<p>Solución de la cinemática inversa</p> <p>Robot 2 Sigue trayectoria de soldadura</p>
<pre> ClearAll[Coo,Bcc,l0,l3,m0,m1,n0,n1] For[i=0,i<=6,i++, t=i; x=(-1.5/6)*t+15.25; y=14.03; z=11.28; Coo[i]=FindRoot[{rs[[2]]==x,rs[[3]]==y,rs[[4]]==z,l0^2+l3^2==1, m0^2+m1^2==1,n0^2+n1^2==1},{l0,0.9},{m0,0.9},{n0,0.9}, {l3,-0.2},{m1,0.1},{n1,0.1},MaxIterations->30]; Bcc[i]={l0,m0,n0,l3,m1,n1}/.Coo[i]; </pre>	<p>Solución de la cinemática inversa</p> <p>Robot 3 Sigue trayectoria de soldadura</p>
<pre> ClearAll[Koo,Ucc,o0,o3,p0,p1,q0,q1] For[i=0,i<=6,i++, t=i; x=(7.53/6)*t+14.50; y=(7.7/6)*t+12.53; z=(-6.53/6)*t+13.53; Koo[i]=FindRoot[{rn[[2]]==x,rn[[3]]==y,rn[[4]]==z,o0^2+o3^2==1, p0^2+p1^2==1,q0^2+q1^2==1},{o0,0.8},{p0,0.8},{q0,0.8}, {o3,-0.2},{p1,0.15},{q1,0.3},MaxIterations->40]; Ucc[i]={o0,o3,p0,p1,q0,q1}/.Koo[i]; </pre>	<p>Solución de la cinemática inversa</p> <p>Robot 3 Sigue trayectoria de soldadura</p>

```

>40];
Ucc[i]={o0,p0,q0,o3,p1,q1}/.Koo[i]];

AA={13.75,3.26,0};BB={13.75,21.79,0};CC={22.03,12.53,0};

DD={13.75,11.03,11.28};EE={13.75,11.68,11.28};
FF={15.25,11.68,11.28};GG={15.25,11.68,11.61};
OO={14.83,11.68,11.61};PP={14.83,11.03,11.61};
QQ={14.83,11.03,11.28};

HH={13.75,14.03,11.28};II={13.75,13.37,11.28};
JJ={15.25,13.37,11.28};KK={15.25,14.03,11.28};

LL={14.50,12.53,13.53};MM={22.03,20.23,7};

A1={rppp[[2]],rppp[[3]],rppp[[4]]};
A2={rpp[[2]],rpp[[3]],rpp[[4]]};
A3={rp[[2]],rp[[3]],rp[[4]]};

B1={rsss[[2]],rsss[[3]],rsss[[4]]};
B2={rss[[2]],rss[[3]],rss[[4]]};
B3={rs[[2]],rs[[3]],rs[[4]]};
C1={rnnn[[2]],rnnn[[3]],rnnn[[4]]};
C2={rnn[[2]],rnn[[3]],rnn[[4]]};
C3={rn[[2]],rn[[3]],rn[[4]]};

NN=Graphics3D[{
  {PointSize[0.03],Point[{0,0,0}],{PointSize[0.008],Point[AA]},
  {PointSize[0.008],Point[BB]},{PointSize[0.008],Point[CC]},

  {AbsoluteThickness[1.5],RGBColor[1,1,0],Line[{{DD,EE,FF,GG,OO,PP,QQ,DD}}]},
  {AbsoluteThickness[1.5],RGBColor[0,1,0],Line[{{HH,II,JJ,KK,HH}}]},
  {RGBColor[0,1,1],Line[{{LL,MM}}]}
}];

Mesa2=Graphics3D[Cuboid[{15.25,14.03,8.53},{2.75,11.03,10.55}]];
Linea1=Graphics3D[{AbsoluteThickness[7],RGBColor[0,1,0],
  [{{5.11,12.53,10.55},{5.11,12.53,0}}]}];
Linea2=Graphics3D[{AbsoluteThickness[7],RGBColor[0,0,1],
  [{{12.25,12.53,10.55},{12.25,12.53,0}}]}];
Almacén2=Graphics3D[Cuboid[{30.59,46.70,0},{13.35

```

Datos de los componentes, mesa, trayectorias y puntos de interés

Graficación de los componentes, mesa, trayectorias y puntos de interés

```

,29.32,8]];
Mesa6=Graphics3D[Cuboid[{18.09,19.48,0},{25.97,29
.32,4}]];

ClearAll[A,j,i]
j = 0;

For[i=0,i<=6,i++,
f0=Vec1[[1]];f3=Vec1[[4]];g0=Vec1[[2]];g1=Vec1[[5]];h
0=Vec1[[3]];h1=Vec1[[6]];
l0=Vcc1[[1]];l3=Vcc1[[4]];m0=Vcc1[[2]];m1=Vcc1[[5]];n
0=Vcc1[[3]];n1=Vcc1[[6]];
o0=Ucc0[[1]];o3=Ucc0[[4]];p0=Ucc0[[2]];
p1=Ucc0[[5]];q0=Ucc0[[3]];q1=Ucc0[[6]];
Piston2=Graphics3D[{{Cuboid[{2.75,11.64,10.55},{7.7
5,13.41,12}]}},
{AbsoluteThickness[3],RGBColor[1,0,1],
Line[{{7.75,12.53,11.28},{9.25+i*0.75,12.53,11.28}}]}]
;
Pieza=Graphics3D[Cuboid[{9.25+i*0.75,11.78,10.55},
{10.75+i*0.75,13.28,12.03}]];

Show[Almacén2,Mesa6,Mesa2,Linea1,Linea2,Piston
2,Pieza,NN,A[j++]]=Graphics3D[
{ RGBColor[1,0,0],Line[{AA,A1,A2,A3}] },
{ RGBColor[1,0,0],Line[{BB,B1,B2,B3}] },
{ RGBColor[0,0,1],Line[{CC,C1,C2,C3}] } ],
PlotRange->{{-1,35},{-1,50},{-1,15}},ViewPoint->{-
2.107,-2.257,1.384} ];

For[i=7,i<=21,i++,
f0=Vec[i-7][[1]];f3=Vec[i-7][[4]];g0=Vec[i-7][[2]];
g1=Vec[i-7][[5]];h0=Vec[i-7][[3]];h1=Vec[i-7][[6]];
l0=Vcc[i-7][[1]];l3=Vcc[i-7][[4]];m0=Vcc[i-7][[2]];
m1=Vcc[i-7][[5]];n0=Vcc[i-7][[3]];n1=Vcc[i-7][[6]];
o0=Ucc0[[1]];o3=Ucc0[[4]];p0=Ucc0[[2]];
p1=Ucc0[[5]];q0=Ucc0[[3]];q1=Ucc0[[6]];
If[i<=10,Piston2=Graphics3D[{{Cuboid[{2.75,11.64,10.
55},{7.75,13.41,12}]}},
{AbsoluteThickness[3],RGBColor[1,0,1],
[{{7.75,12.53,11.28},{13.75-(i-
6)*1.125,12.53,11.28}}]}],Piston2];

Show[Almacén2,Mesa6,Mesa2,Linea1,Linea2,Piston
2,Pieza,NN,A[j++]]=Graphics3D[
{ RGBColor[1,0,0],Line[{AA,A1,A2,A3}] },
{ RGBColor[1,0,0],Line[{BB,B1,B2,B3}] },
{ RGBColor[0,0,1],Line[{CC,C1,C2,C3}] } ],
PlotRange->{{-1,35},{-1,50},{-1,15}},ViewPoint->{-
2.107,-2.257,1.384} ];

For[i=22,i<=22,i++,
f0=Vec0[[1]];f3=Vec0[[4]];g0=Vec0[[2]];
g1=Vec0[[5]];h0=Vec0[[3]];h1=Vec0[[6]];
l0=Vcc2[[1]];l3=Vcc2[[4]];m0=Vcc2[[2]];m1=Vcc2[[5]];n

```

Movimiento del actuador

Movimientos de los robots 1 y 2

Movimientos de los robots 1 y 2

```

0=Vcc2[[3]];n1=Vcc2[[6]];
o0=Ucc0[[1]];o3=Ucc0[[4]];p0=Ucc0[[2]];
p1=Ucc0[[5]];q0=Ucc0[[3]];q1=Ucc0[[6]];

Show[Almacén2,Mesa6,Mesa2,Linea1,Linea2,Piston
2,Pieza,NN,A[j++]]=Graphics3D[{
{ RGBColor[1,0,0],Line[{AA,A1,A2,A3} ]},
{ RGBColor[1,0,0],Line[{BB,B1,B2,B3} ]},
{ RGBColor[0,0,1],Line[{CC,C1,C2,C3} ] } }],
PlotRange->{{-1,35},{-1,50},{-1,15}},ViewPoint->{-
2.107,-2.257,1.384} ]];

For[i=23,i<=27,i++,
If[i<=26,
f0=Vec0[i-22]{{1}};f3=Vec0[i-22]{{4}};g0=Vec0[i-22]{{2}};
g1=Vec0[i-22]{{5}};h0=Vec0[i-22]{{3}};h1=Vec0[i-
22]{{6}},

f0=Veca[[1]];f3=Veca[[4]];g0=Veca[[2]];
g1=Veca[[5]];h0=Veca[[3]];h1=Veca[[6] ]];
l0=Bcc[i-22]{{1}};l3=Bcc[i-22]{{4}};m0=Bcc[i-22]{{2}};
m1=Bcc[i-22]{{5}};n0=Bcc[i-22]{{3}};n1=Bcc[i-22]{{6}};
o0=Ucc0[[1]];o3=Ucc0[[4]];p0=Ucc0[[2]];
p1=Ucc0[[5]];q0=Ucc0[[3]];q1=Ucc0[[6]];

Show[Almacén2,Mesa6,Mesa2,Linea1,Linea2,Piston
2,Pieza,NN,A[j++]]=Graphics3D[{
{ RGBColor[1,0,0],Line[{AA,A1,A2,A3} ]},
{ RGBColor[1,0,0],Line[{BB,B1,B2,B3} ]},
{ RGBColor[0,0,1],Line[{CC,C1,C2,C3} ] } }],
PlotRange->{{-1,35},{-1,50},{-1,15}},ViewPoint->{-
2.107,-2.257,1.384} ]];

For[i=27,i<=39,i++,
If[i<=31,
f0=Vecca[i-27]{{1}};f3=Vecca[i-27]{{4}};g0=Vecca[i-
27]{{2}};
g1=Vecca[i-27]{{5}};h0=Vecca[i-27]{{3}};h1=Vecca[i-
27]{{6}},
f0=Vec1[[1]];f3=Vec1[[4]];g0=Vec1[[2]];g1=Vec1[[5]];h
0=Vec1[[3]];h1=Vec1[[6] ]];
l0=Vcc1[[1]];l3=Vcc1[[4]];m0=Vcc1[[2]];m1=Vcc1[[5]];n
0=Vcc1[[3]];n1=Vcc1[[6]];

If[i<=33,
o0=Ucc[i-27]{{1}};o3=Ucc[i-27]{{4}};p0=Ucc[i-27]{{2}};
p1=Ucc[i-27]{{5}};q0=Ucc[i-27]{{3}};q1=Ucc[i-27]{{6}};
Piston2=Graphics3D[{{Cuboid[{2.75,11.64,10.55},{7.7
5,13.41,12}]}},
{AbsoluteThickness[3],RGBColor[1,0,1],
Line[{{7.75,12.53,11.28},{9.25+(i-
33)*0.75,12.53,11.28}}]}];
Pieza=Graphics3D[

```

Movimientos de los robots 1 y 2

Movimiento del robot 3

```

Cuboid[{9.25+(i-33)*0.75,11.78,10.55},{10.75+(i-
33)*0.75,13.28,12.03}],
o0=Ucc[39-i][[1]];o3=Ucc[39-i][[4]];p0=Ucc[39-i][[2]];
p1=Ucc[39-i][[5]];q0=Ucc[39-i][[3]];q1=Ucc[39-i][[6]];
If[i==33,Pieza2=Graphics3D[Cuboid[{21.28,19.48,4},{
22.78,20.98,5.5}],
Pieza2=Graphics3D[Point[{0,0,0}]];
Show[Almacén2,Mesa6,Mesa2,Linea1,Linea2,Piston
2,Pieza2,NN,A[j++]]=Graphics3D[
{ RGBColor[1,0,0],Line[{AA,A1,A2,A3}] },
{ RGBColor[1,0,0],Line[{BB,B1,B2,B3}] },
{ RGBColor[0,0,1],Line[{CC,C1,C2,C3}] } }],
PlotRange->{{-1,35},{-1,50},{-1,15}},ViewPoint->{-
2.107,-2.257,1.384}];

```