

Lejías. 8

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE
UNA CORTADORA AUTOMATICA
DE TUBOS

TESIS QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
PRESENTA

Luis Agustín Alvarez Icaza Longoria

México D.F.

1981



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

1. INTRODUCCION	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Solución tradicional	5
1.4. Nueva solución	5
1.5. Comparacion entre las soluciones tradicional y propuesta	6
2. OBJETIVOS	8
3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES	9
4. DESARROLLO	15
4.1. Identificación de variables	15
4.2. Estudio analítico de una junta	26
4.3. Consideraciones de diseño	48
4.4. Secuencia de cálculo de las variables	63
4.5. Esquema de control	65
4.6. Algoritmo para el control del proceso de habilitado	68
4.7. Simulación	70
4.8. Control	77
5. REFERENCIAS	81

- ANEXO A. MOTORES DE PASOS
- ANEXO B. DISEÑO MECANICO
- ANEXO C. DISEÑO ELECTRICO
- ANEXO D. PROGRAMA DE SIMULACION
- ANEXO E. PROGRAMA DE CONTROL
- ANEXO F. PROCESO DE CORTE DE METALES CON SOPLETE
DE OXIDACETILENO
- ANEXO G. INSTRUCTIVO DE OPERACION.

1. INTRODUCCION

1.1 Antecedentes

El acelerado desarrollo de las computadoras digitales en los últimos años ha facilitado la construcción de automatismos capaces de efectuar operaciones complejas con precisión y rapidez. Los elementos electrónicos -- que sincronizan y coordinan los movimientos de los mecanismos están desplazando a los elementos mecánicos que tradicionalmente desempeñan ese papel.

Este proyecto se realizó por el interés de la coordinación de automatización del Instituto de Ingeniería en obtener experiencia directa de los -- problemas del diseño y construcción de mecanismos controlados directamente por computadora digital.

Para esta experiencia directa, se fijó como meta identificar un problema externo al grupo de investigación, que tuviera aplicación práctica inmediata y que ofreciera posibilidades de desarrollos novedosos. Se encontró -- que uno de los principales problemas que se presenta en la construcción de

En estructuras tubulares de acero de gran tamaño es unir correctamente dos o más de sus elementos.

Para la unión de dos tubos en estructuras es necesario efectuar un corte en uno de ellos. A esta operación se le conoce como habilitado.

El corte que se realiza depende de diversos factores como el ángulo de la unión, los diámetros de los tubos a unir, la excentricidad de los ejes, etc. El habilitado se efectúa normalmente a mano.

Después de los desarrollos analíticos, el estudio de la tecnología disponible y la existencia de componentes en el mercado, se diseñó y construyó una máquina cortadora de tubos controlada por una computadora digital.

1.2 Planteamiento del Problema.

La construcción de la cortadora de tubos resuelve el problema del habilitado o corte de un tubo que ha de unirse a otros durante la fabricación de estructuras.

Las juntas que puede habilitar son de las formas mostradas en la Fig. 1.1. Para lograr cualquiera de ellas es necesario efectuar un corte en el tubo de diámetro menor (elemento secundario o riostra) de tal forma que al soldarse con el tubo de diámetro mayor (elemento primario) cumpla con los requerimientos de una unión que son:

- Ángulo de la unión.
- Excentricidad de los ejes de los tubos.

El corte en el elemento secundario genera sobre su superficie un perfil que

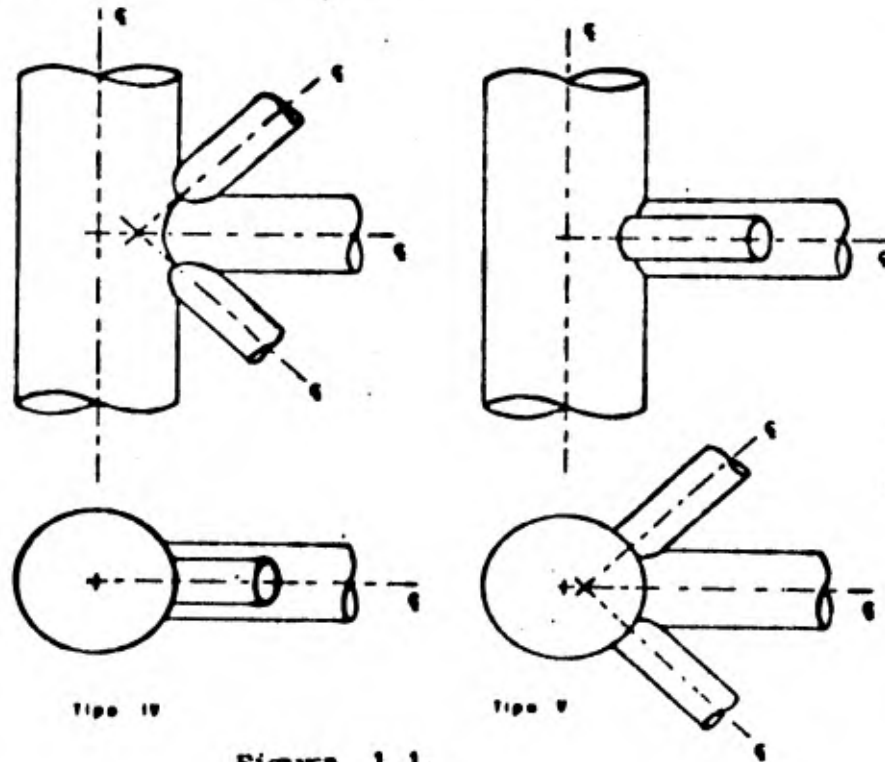
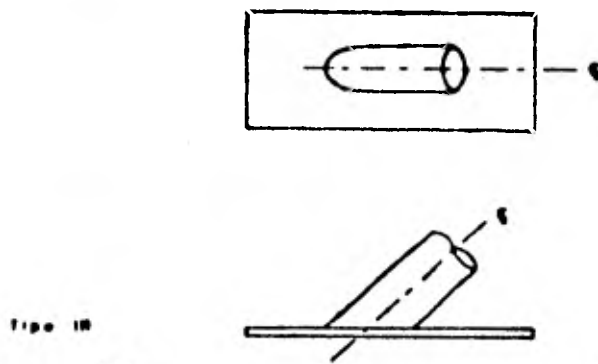
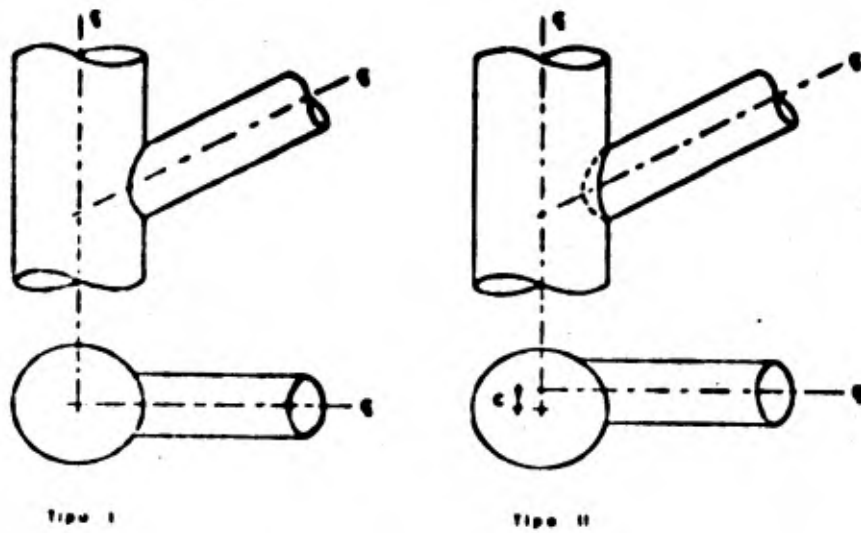


Figura 1.1.

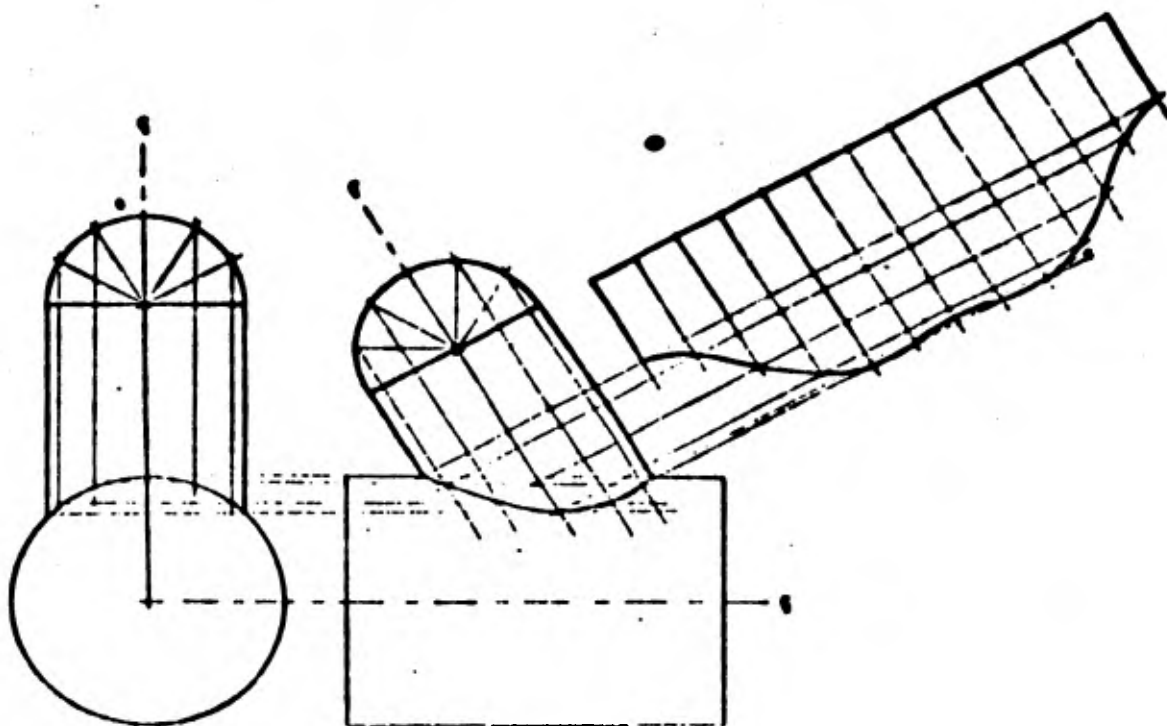


Figura 1.2. Método para generar la plantilla en la solución tradicional.

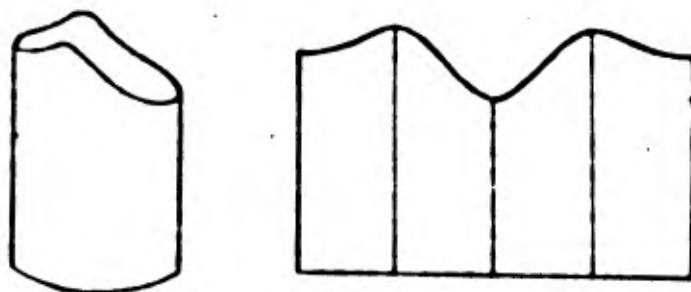


Figura 1.3. Aspecto y desarrollo de un tubo habilitado.

debe permitirle mantener contacto con el elemento primario en todos los puntos de la unión. El problema del habilitado queda resuelto si además de existir ese contacto se cumple con los requerimientos de la unión.

Para facilitar la operación de soldado de la junta, que se realiza después del habilitado, es conveniente biselar el borde del perfil para permitir el depósito adecuado de soldadura.

1.3 Solución Tradicional.

En la mayoría de los países y en particular en el nuestro, el habilitado de los tubos para las juntas se realiza de acuerdo con el siguiente procedimiento: Se genera por métodos gráficos una plantilla, a escala natural, del desarrollo del perfil deseado. Se calca la plantilla sobre la superficie del tubo para que posteriormente un operador que emplea un soplete de corte manual efectúe el corte siguiendo la marca dejada por el calcado. Finalmente se bisela el borde del tubo (ver figura 1.2.) .

Cuando se deben realizar varias uniones semejantes, el corte se efectúa sobre un tubo de diámetro mayor al requerido. Este tubo habilitado se utiliza posteriormente como guía para un mecanismo pantógrafo sobre el que se monta el soplete de corte. De esta forma se cortan los tubos con mayor velocidad que cuando el operador sostiene directamente el soplete.

1.4 Nueva Solución.

El mecanismo que se propone deberá habilitar los tubos para las uniones, en forma automática empleando para ello la menor cantidad de información posible y requiriendo mínima intervención humana.

La cortadura de tubos que se construyó produce movimientos relativos entre el soplete y el tubo. Estos movimientos son de desplazamiento en la dirección del eje del tubo y de giro.

La máquina proporciona además movimientos angular a la punta del soplete - para producir el bisel del borde del tubo. Para lograr controlar el proceso de habilitado, se hizo un estudio analítico de la junta para determinar los parámetros de control que permiten generar cualquier perfil de corte.

Con base en los resultados del estudio analítico se diseñó y construyó un mecanismo digital controlado con una minicomputadora (PDP-11/40) del laboratorio de Automatización del Instituto de Ingeniería.

Se consideró más conveniente usar una minicomputadora en la etapa de diseño y pruebas iniciales porque proporciona mayor flexibilidad para la depuración del diseño. En el futuro se entregará al mecanismo una microcomputadora especializada en las tareas del sistema de corte con el fin de lograr un automatismo compacto y portátil.

1.5 Comparación entre las Soluciones Tradicional y Propuesta.

El procedimiento actual para habilitar tubos es lento y no permite alcanzar altas velocidades de producción, aún en los casos de cortes repetitivos que se realizan con ayuda de un pantógrafo. La generación de las plantillas y el corte del tubo, requieren la participación de personal altamente especializado, y por lo tanto, muy escaso.

La calidad y precisión de los cortes depende directamente de la calidad de la plantilla generada normalmente y de la habilidad del operador del soplete de corte. En general es difícil lograr cortes de calidad uniforme.

En el sistema de corte automático una computadora controla la operación del habilitado. El operador sólo tendrá que colocar el tubo proporcionar algunos datos a través de un teclado convencional y supervisar la operación concreta del mecanismo, eliminándose así la necesidad de personal altamente especializado.

Las altas velocidades de cálculo que alcanza la computadora permitirán reducir la duración del proceso en forma notable y garantizar mayor precisión y uniformidad de la calidad de los cortes.

Resumiendo, las ventajas del esquema construido sobre el tradicional son:

- Menor duración del proceso.
- Bajo costo del proceso.
- Mayor precisión del corte.
- Repetibilidad del corte.
- Uniformidad de la calidad.
- Facilidad de operación.

2. OBJETIVOS

Los objetivos del proyecto, de acuerdo con lo expuesto en el capítulo 1 fueron:

- a) Adquirir experiencia en el proceso de diseño y construcción de automatismos.
- b) Diseñar un automatismo controlado directamente mediante computadora digital.
- c) Construir el prototipo de una cortadora de tubos.
- d) Controlar el prototipo de la cortadora de tubos con una mini computadora.
- e) Efectuar pruebas sobre el prototipo para concluir sobre su funcionalidad.

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se construyó el prototipo de una cortadora que pueda habilitar tubos de 5 a 50 cm. de diámetro para usarse en uniones de más de 30°. La máquina construida funciona controlando mediante una computadora digital el valor de cuatro variables que son:

- Posición angular del tubo
- Posición lineal del soplete
- Angulo de biselado
- Presión del oxígeno de corte

En cualquier instante el soplete se encuentra apuntando hacia un punto del perfil, determinado por el tipo de unión para lo que habilita el tubo, con el ángulo de bisel adecuado y la presión del oxígeno de corte requerida. Además se controla una válvula que impide el paso del oxígeno de corte hacia la flama oxiacetilénica hasta que la superficie del tubo alcance la temperatura de ignición y se pueda iniciar el corte.

El control del sistema se efectúa en malla abierta utilizando motores de pasos como actuadores (ver anexo A) y está basado en el estudio de las relaciones funcionales que deben existir entre las distintas variables que intervienen en el problema del habilitado.

El procedimiento de control se separó en dos etapas a la que se llamó de simulación y de control.

En la etapa de simulación, a partir de los datos de la unión y de las relaciones funcionales mencionadas, se genera una tabla de los tiempos en que deben enviarse señales a cada actuador. Como los cálculos que se efectúan en esta etapa son complejos no es posible operar en tiempo real; por ello primero debe generarse una tabla de tiempo que se almacena temporalmente. En la etapa de control, se envían a los actuadores las señales generales en la de simulación. El procedimiento consiste en generar con un reloj de tiempo real señales de interrupción con una frecuencia alta (1 KHz) y verificar en cada interrupción si es tiempo de enviar una señal a algún actuador.

El desarrollo de las relaciones funcionales así como el del sistema de control se muestra con detalle en el capítulo 4.

Se diseñaron y construyeron diversos dispositivos para integrar el sistema de corte, en las figuras 3.1, 3.2, 3.3. se muestran representaciones del aspecto final del mecanismo (las especificaciones del diseño se muestran en el anexo B).

Las conclusiones obtenidas a partir del diseño y construcción del prototipo de la cortadora de tubos se pueden expresar en dos categorías:

- Recomendaciones sobre el diseño del mecanismo.
- Recomendaciones sobre el control del sistema.

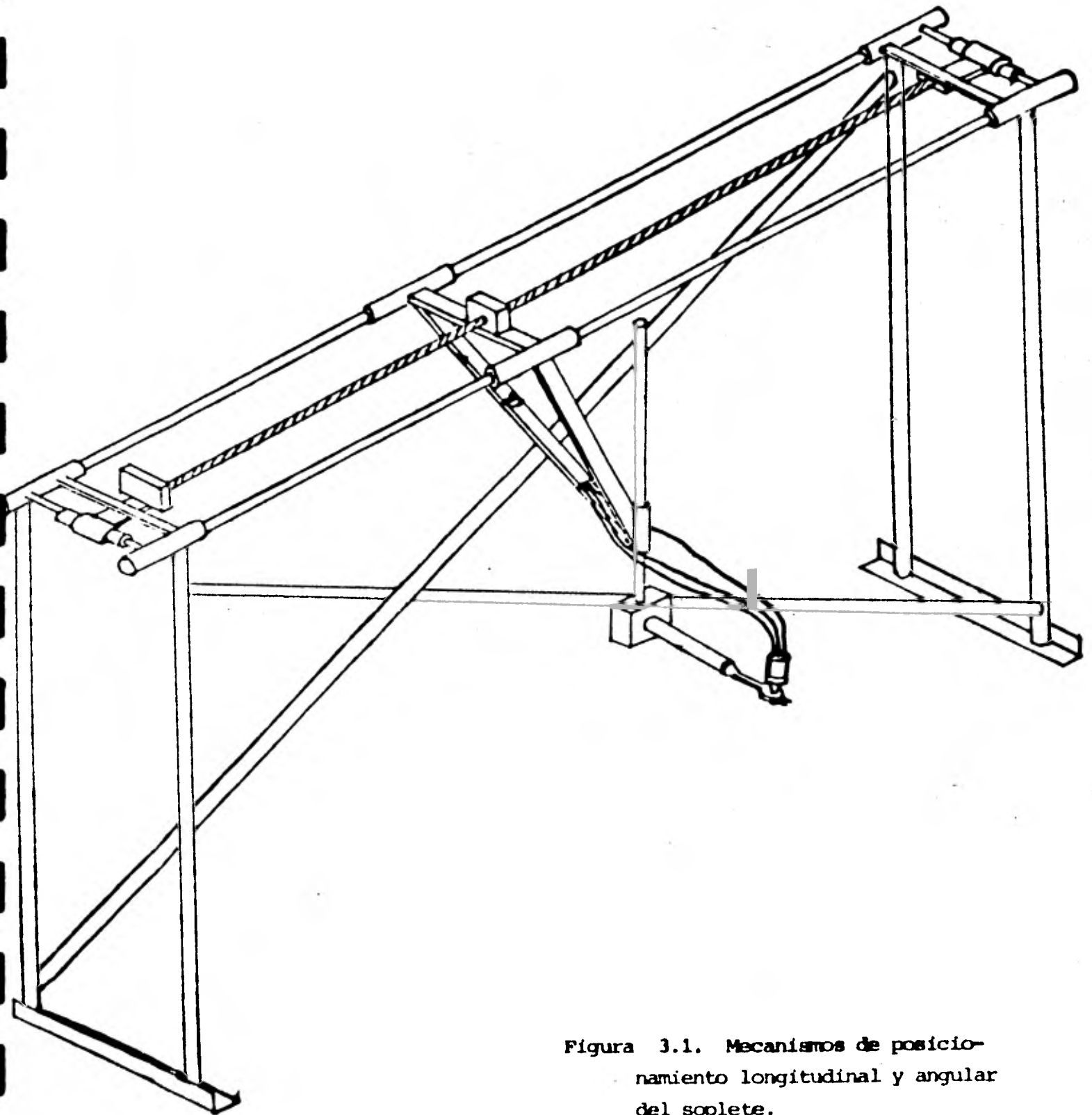


Figura 3.1. Mecanismos de posicionamiento longitudinal y angular del soplete.

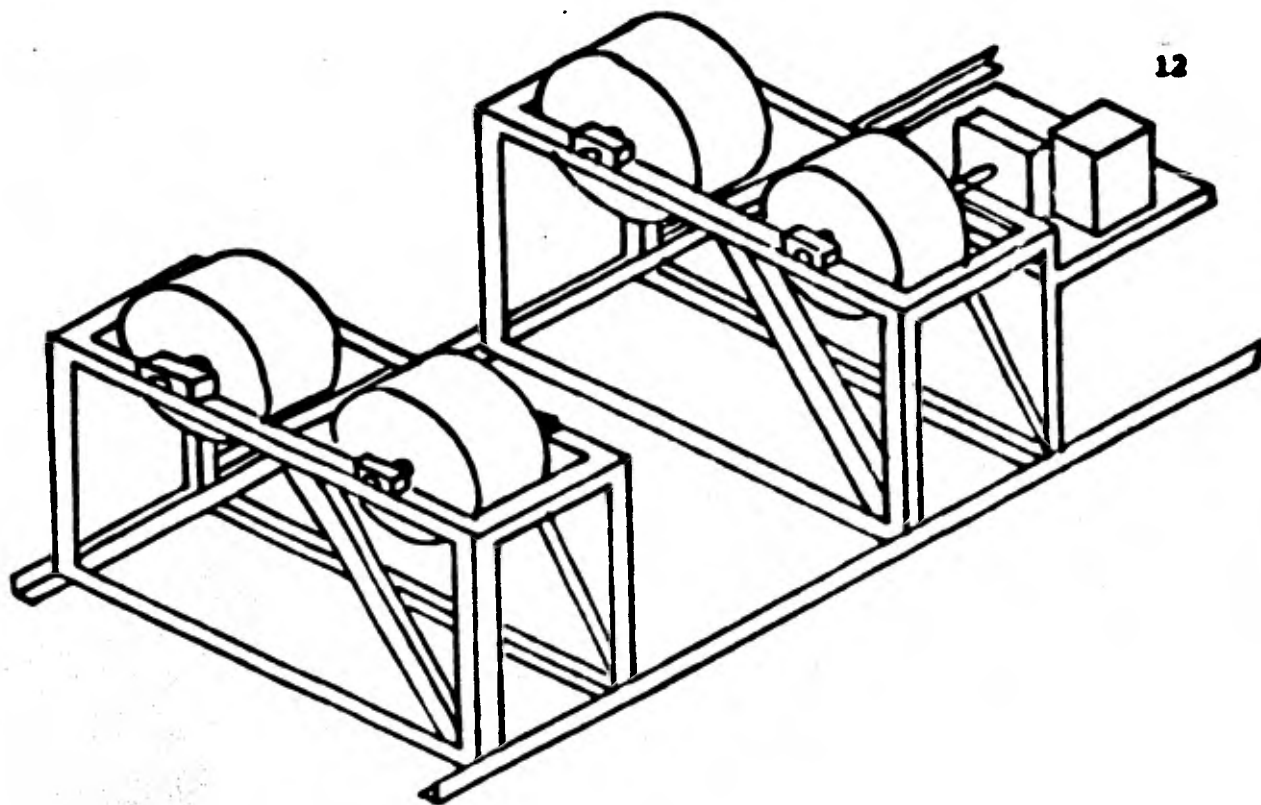


Figura 3.2. Mecanismo para posicionar angularmente el tubo.

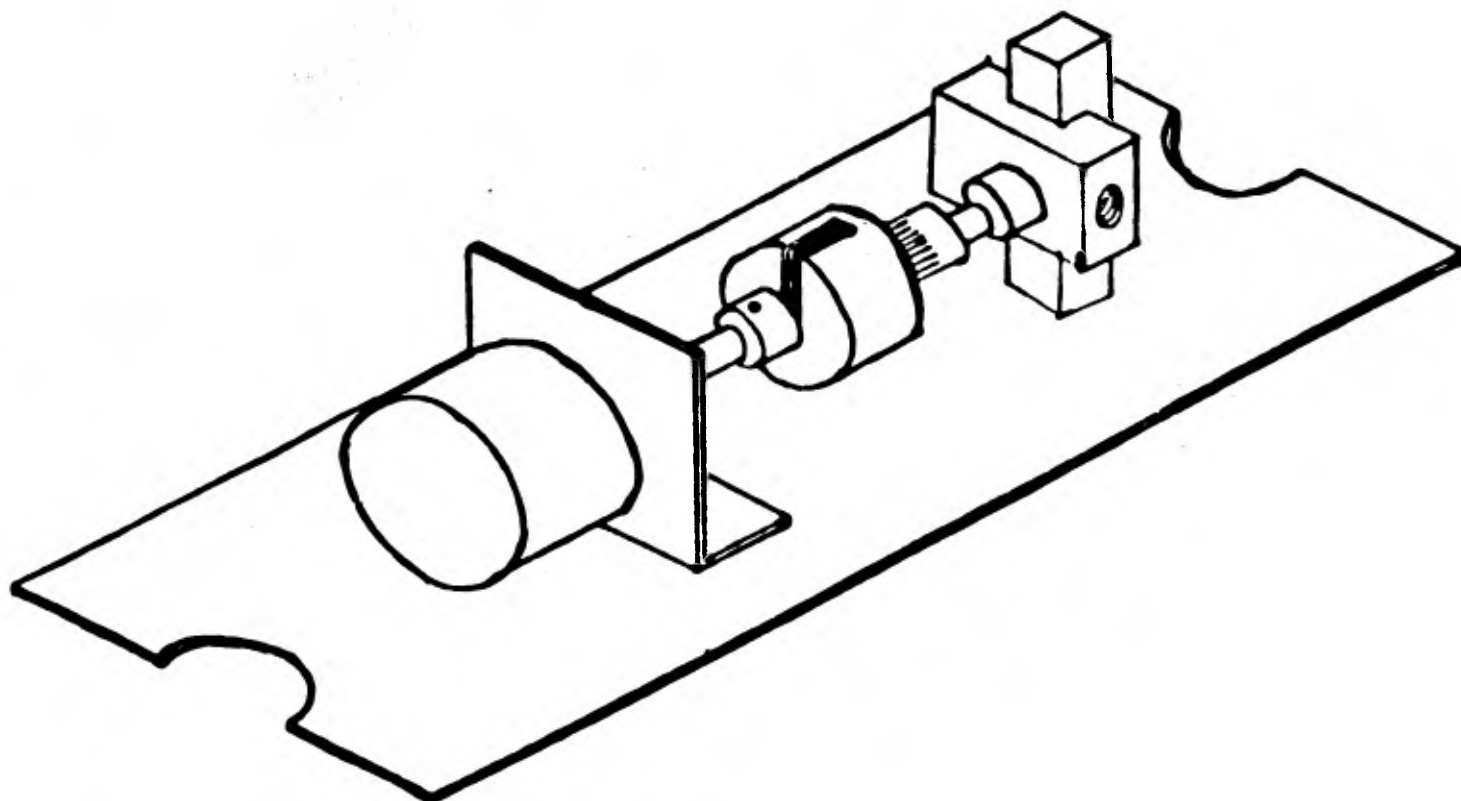


Figura 3.3. Mecanismo regulador de presión.

Con respecto a las recomendaciones sobre el diseño del mecanismo se puede mencionar la necesidad de algunos cambios que mejorarían el funcionamiento y funcionalidad de la máquina como son:

- Utilizar rodamientos lineales en las corredoras longitudinales del carro del soplete para disminuir la fricción.
- Cambiar la tuerca de bronce del carro longitudinal del soplete por una tuerca con rodamientos.
- Evitar las vibraciones en la punta del soplete cambiando el diseño del mecanismo de biselado. Las modificaciones mínimas que se sugiere efectuar son las inclusiones de un amortiguador en el motor y la de una reducción de velocidad acoplada a la flecha del motor que controla el ángulo de bisel.
- Incluir un sistema de guías que facilite el alineamiento de los tres juegos de rodillos para soporte del tubo.

Las recomendaciones para mejorar el control del sistema son:

- Cambiar la minicomputadora DIGITAL PDP-11/40 por una microcomputadora que estaría situada en el gabinete que contiene los controladores de los motores.
- Utilizar detectores de posición en los motores para verificar que los desplazamientos reales de sus flechas correspondan a los ordenados, es decir, adoptan un esquema de malla cerrada que continúe utilizando motores de pasos como actuadores del sistema.

Si bien es cierto que la sugerencia de emplear malla cerrada contradice la decisión de emplear malla abierta, también lo es que a partir de las pruebas del aparato construido y del mejor conocimiento de la forma de operar los motores de pasos, se determinó la conveniencia de seguir dicho cambio para proporcionar más seguridad en la operación del mecanismo.

Estas recomendaciones tienen por objeto mejorar el diseño del aparato, no obstante que con el diseño actual funcionó satisfactoriamente durante las pruebas.

4. DESARROLLO

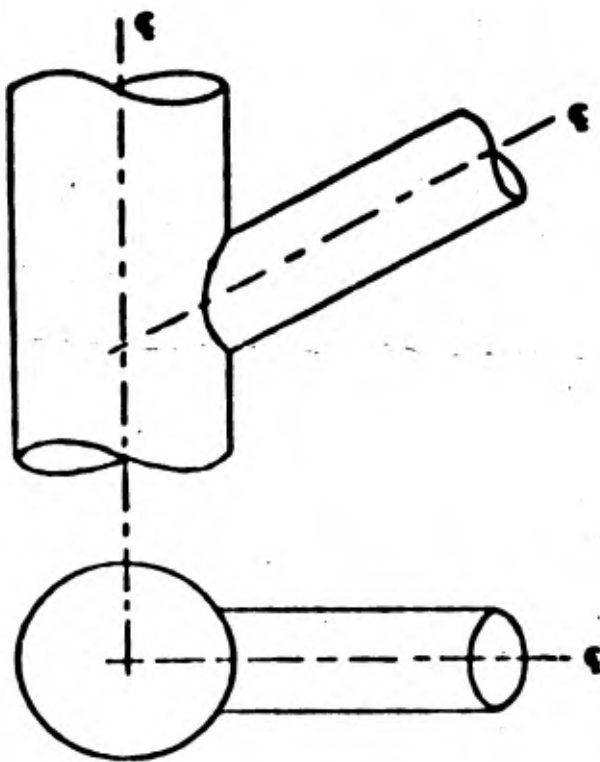
4.1 Identificación de Variables

En el primer capítulo se explicó someramente el concepto de junta de tubos, se ampliará ahora dicho concepto para facilitar el entendimiento de los desarrollos subsecuentes.

Se llama junta a la unión de dos o más tubos. Se reconocen distintos tipos de ellas:

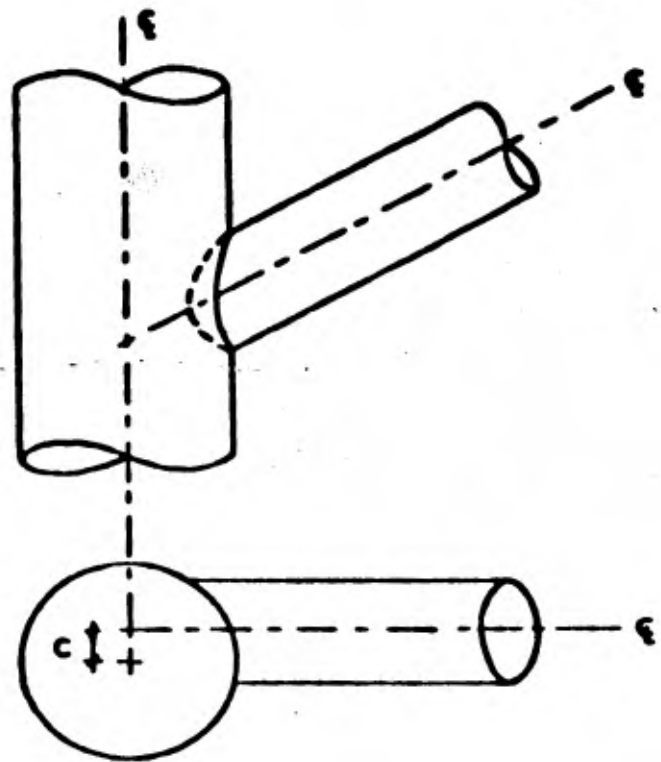
- I.- Junta de dos tubos sin excentricidad de ejes (Figura 4.1.1).
- II.- Junta de dos tubos con excentricidad de sus ejes (Figura - 4.1.2).
- III.- Junta de un tubo con un elemento plano (Figura 4.1.3).
- IV, V.- Nudos, esto es, juntas de más de dos tubos (Figura 4.1.4 y Figura 4.1.5).

En una junta, (Figura 4.1.6) se llama riostra o elemento secundario al tubo de diámetro menor (o igual) que se unirá al tubo de diámetro mayor (o igual), el que a su vez se denomina elemento primario. Se aclara que el corte se realiza únicamente en el elemento secundario pues la unión es exclusivamente estructural (no hay circulación de fluidos).



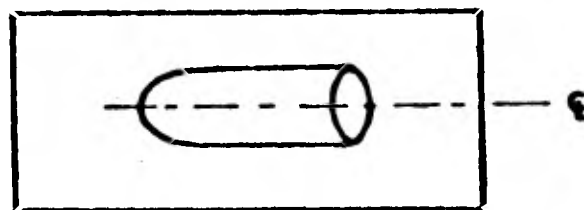
Tipo I

Figura 4.1.1.



Tipo II

Figura 4.1.2.



Tipo III

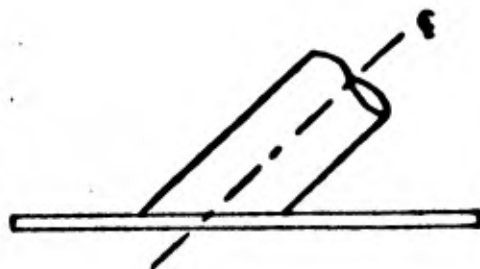
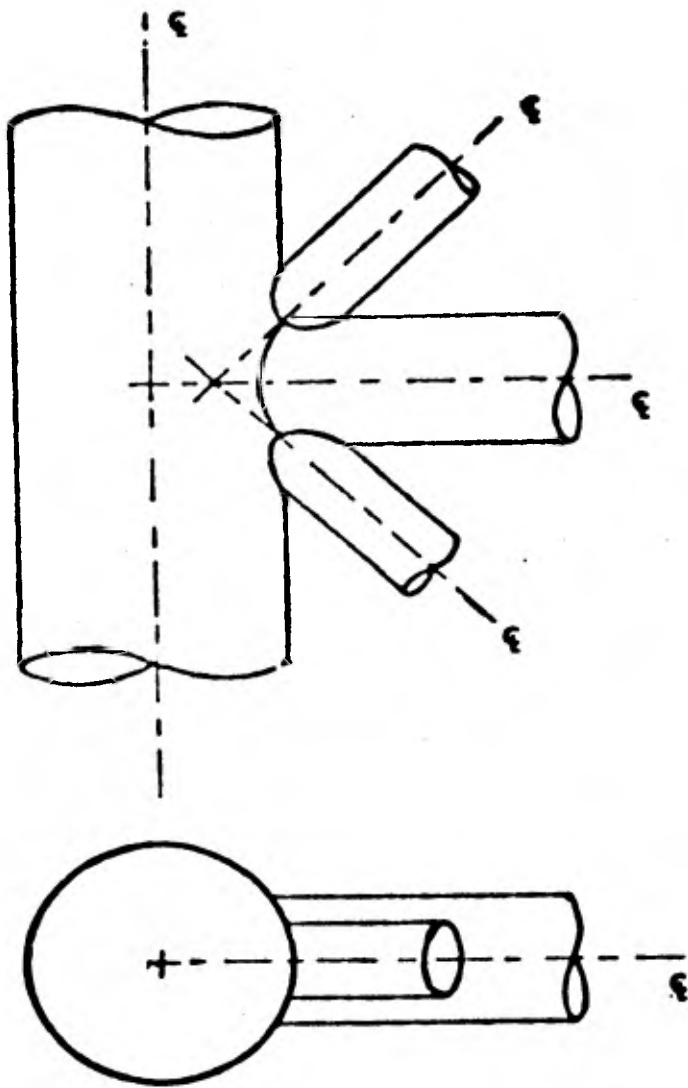
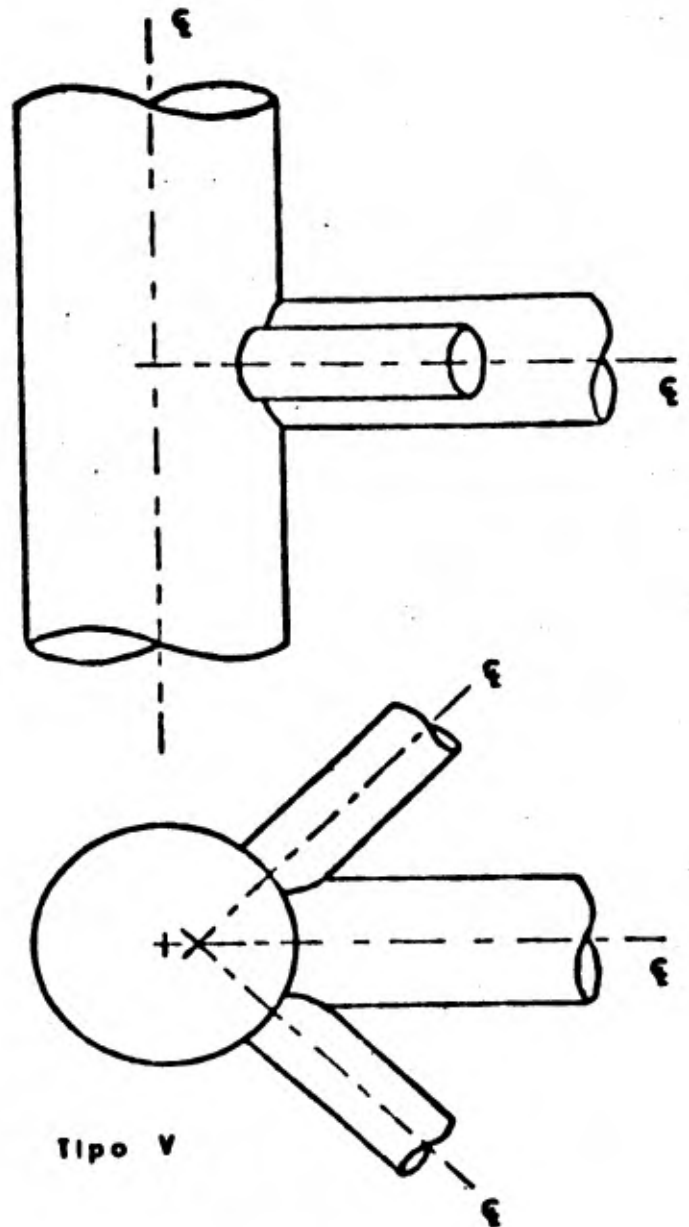


Figura 4.1.3.



Tipo IV

Figura 4.1.4.



Tipo V

Figura 4.1.5.

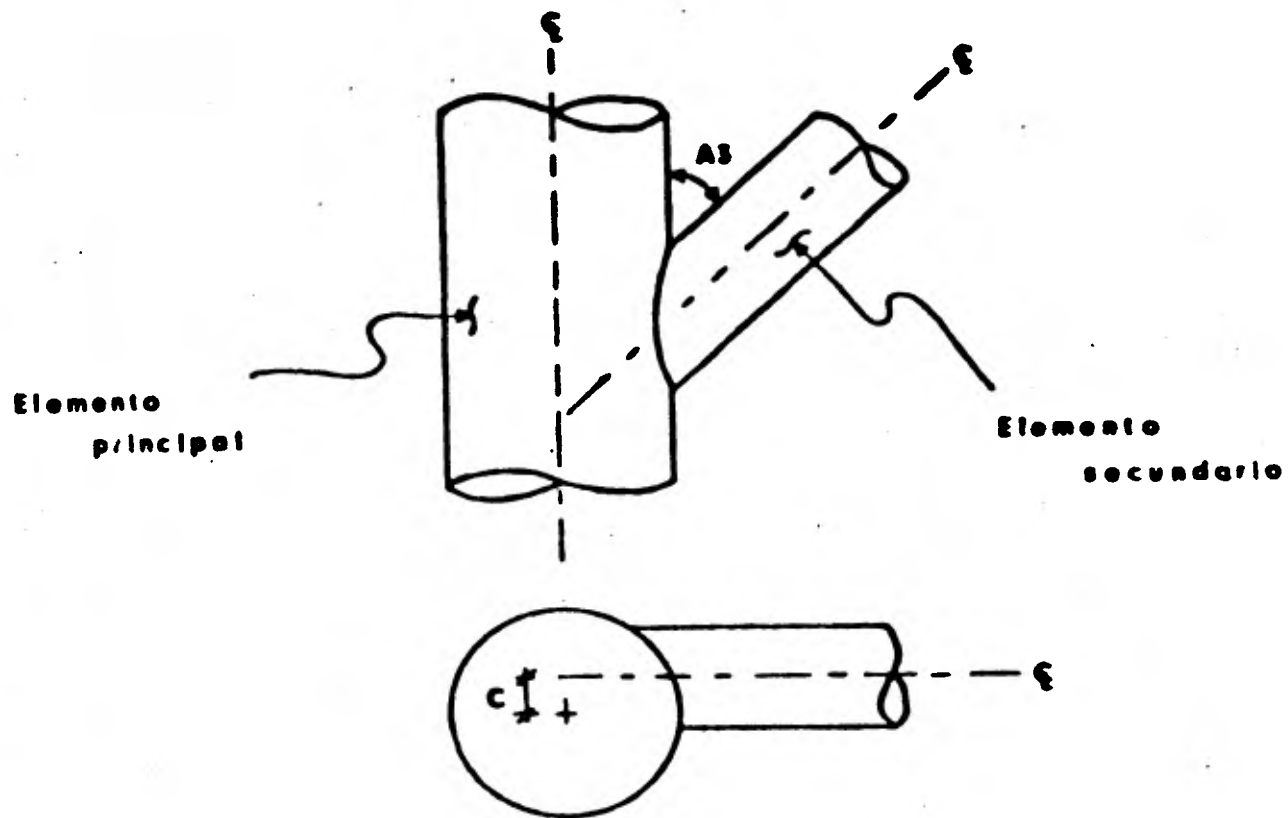


Figura 4.1.6.

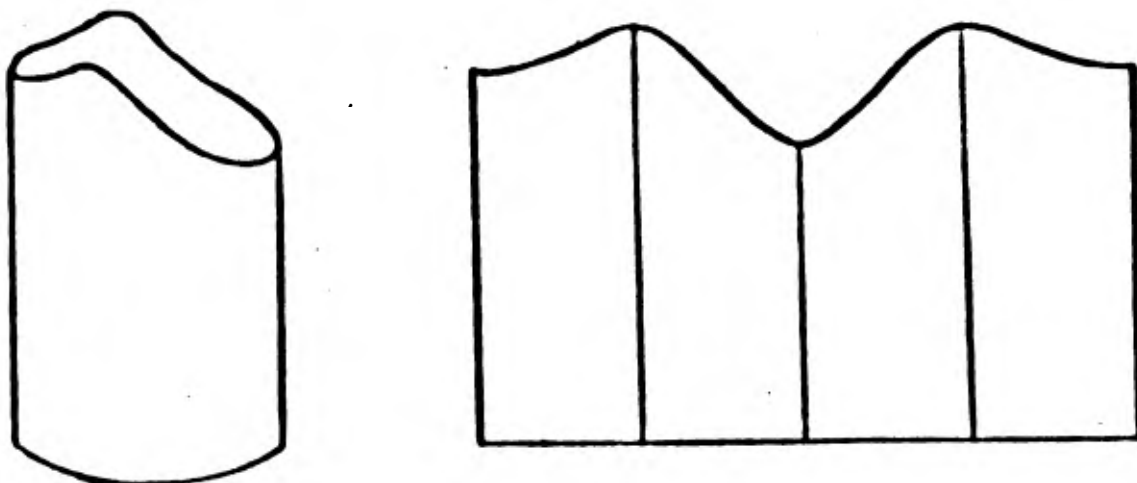


Figura 4.1.7.

Se conoce como **habilitado o corte de un tubo** al proceso de preparación de la ríostra de una junta. Las juntas deben cumplir con los requisitos de ángulo de unión (A3) y de **excentricidad** (C, ver Figura 4.1.6) los radios de tubos son parámetros que intervienen y afectan la forma de una junta.

Dado que la unión de los tubos se realiza por soldadura, es recomendable biselar los bordes del tubo para facilitar su depósito. La forma de este bisel depende también de los requisitos de la unión.

Se denomina **perfil** al desarrollo de un tubo habilitado. En la Figura 4.1.7 se muestra el aspecto de un tubo habilitado y el de su desarrollo.

Se llama **posición longitudinal del soplete (x)** a la posición de un punto del perfil en la dirección del eje del tubo respecto a una referencia fija.

Se conoce como **posición angular de un punto del perfil del tubo** al ángulo formado por el radio en dicho punto del perfil y el del radio en un punto de referencia. Se le denomina como **A1**.

El bisel del borde origina otra variable: el **ángulo del bisel (A2)**. En la Figura 4.1.8 se muestra el corte de un tubo biselado; el ángulo de bisel se define como el ángulo formado entre una normal al tubo y el plano tangente al bisel del borde del tubo para cualquier punto del perfil.

•
Cuando se emplea **soplete de llama oxiacetilénica** en el habilitado, la velocidad de corte depende del espesor efectivo de corte (E, Figura 4.1.9), la variación del ángulo de bisel causa variaciones en el espesor efectivo de -

corte y por lo tanto en la velocidad de corte. La presión de los gases que componen la flama (oxígeno y acetileno) es función del espesor efectivo de corte. Como se demostrará posteriormente el gas cuya presión es importante controlar es el oxígeno. Se denota con P_O la presión de dicho gas.

En resumen, dado un espesor efectivo de corte, existen una velocidad de corte y una presión del oxígeno de corte únicos.

Existen además de las variables descritas otras que intervienen en la descripción del proceso de corte, como son: la temperatura de la superficie del tubo, la de precalentamiento, la de flama, etc., pero que no se tomarán en cuenta en forma explícita.

A continuación se da una lista con su definición y símbolo de los términos que se emplean.

4.1.1 Términos relacionados con el Funcionamiento del Sistema de Corte Automático (Figura 4.1.8).

- * Posición Angular del Tubo (A1)

Es la posición angular que con respecto a un cero de referencia, tiene el tubo al girar sobre su eje longitudinal de simetría.

- * Posición Angular del Soplete o Angulo de Biselado (A2)

Es la posición angular que con respecto a una normal a la superficie del tubo, guarda el soplete al moverse angularmente. (El soplete se mueve lineal y angularmente en un plano que contiene su eje longitudinal).

• **Posición Lineal del Soplete (x)**

Es la distancia que existe entre el soplete y un cero de referencia.

Velocidad Angular del tubo (\dot{A})

Es la derivada de la posición angular del tubo con respecto al tiempo.

Velocidad Lineal del Soplete (\dot{x})

Es la derivada de la posición lineal del soplete con respecto al tiempo.

Distancia de Giro (D)

Es la distancia que hay entre la superficie interior del tubo y el centro de giro del soplete.

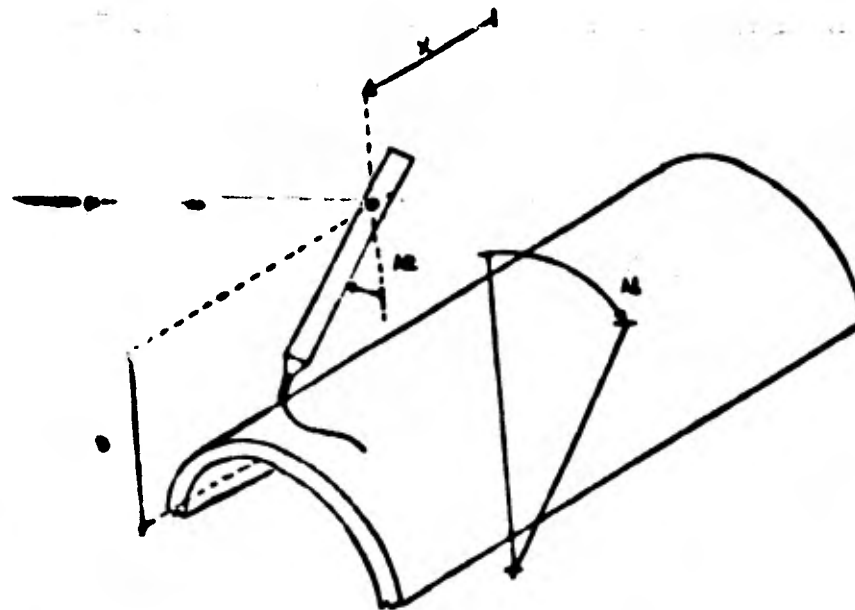


Figura 4.1.8.

4.1.2 Términos relacionados con las Características de la Junta (Figura 4.1.6)

Tubo o Elemento Principal.

Es el elemento que no tiene que cortarse o habilitarse para realizar la junta, es decir, es el elemento al cual se une el elemento habilitado.

Tubo o Elemento Secundario (Riostre).

Es el elemento que tiene que cortarse o, habilitarse para realizar la junta, es decir, es el elemento que se une al elemento no habilitado.

Diámetro Mayor (D1).

Es el diámetro exterior del tubo principal.

Radio Mayor (R1)

Es el radio exterior del tubo principal.

Diámetro Menor (D2)

Es el diámetro interior del tubo secundario. $D2 \leq D1$.

Radio Menor (R2)

Es el radio interior del tubo secundario. $R2 \leq R1$

Angulo de Unión (A3)

Es el ángulo formado por las proyecciones de los ejes de simetría de los elementos estructurales, sobre un plano paralelo a ellos.

Excentricidad (c)

Es la distancia que existe entre los ejes de simetría de los elementos estructurales.

4.1.3 Términos relacionados con las Especificaciones para la Soldadura de las Juntas (Figura 4.1.9).

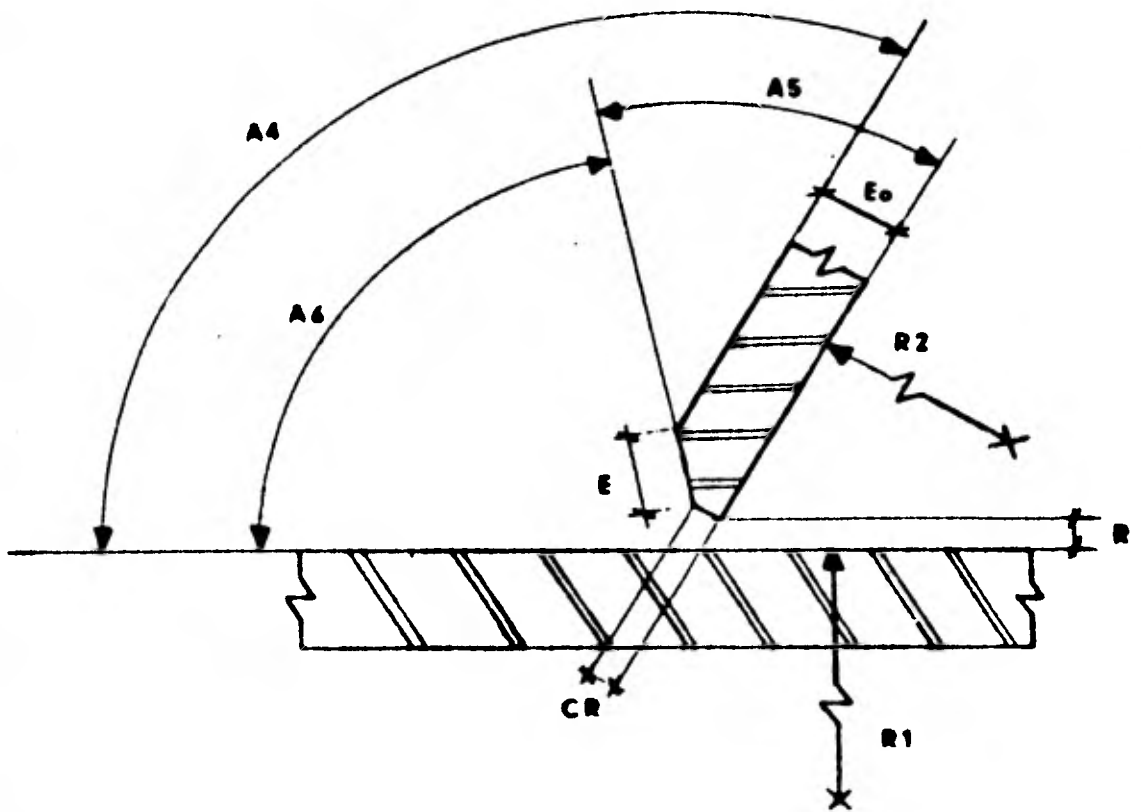


Figure 4.1.9.

• **Angulo Diedro Local (A4)**

Es el formado por los planos tangentes a los elementos estructurales, en un punto cualquiera de la unión.

Angulo de Bisel (A5)

Está formado por los planos tangentes a la superficie interior del tubo secundario y a la superficie generada por el corte del bisel, en un punto cualquiera de la unión. (Nótese que $A2 + A5 = 90^\circ$).

Angulo de Depósito de Soldadura (A6)

Este ángulo se forma con los planos tangentes a la superficie exterior del tubo principal y a la superficie generada por el corte del bisel, en un punto cualquiera de la unión. (Nótese que $A6 + A5 = A4$).

Raiz (R)

Es la distancia que debe haber entre los tubos antes de ser soldados, para garantizar una completa penetración de la soldadura.

Cara de Raiz (CR)

Es la porción del espesor de la pared del tubo, no afectada por el biselado.

Espesor de Corte (E)

Es el espesor de material que debe cortarse en un punto del perfil para el habilitado del tubo.

4.1.4 Términos Relacionados con el Proceso de Corte de Metales con Soplete de Oxiacetileno.

- * Presión de Oxígeno (PO)

Es la presión del oxígeno a la entrada del soplete.

Presión de Acetileno (PA)

Es la presión del acetileno a la entrada del soplete.

- * Velocidad de Corte (V)

Es la velocidad lineal a la que se debe mover el soplete para realizar el corte.

Los términos marcados con un asterisco (*) representan el conjunto de variables que es necesario controlar para efectuar un habilitado.

En el apéndice F se describe el proceso de corte de metales con soplete de oxiacetileno.

4.2 Estudio Analítico de una Junta

El objeto de este inciso es plantear y analizar las relaciones funcionales existentes entre las variables y parámetros del sistema, para establecer la forma y las funciones que determinarán su control.

Básicamente son cinco las funciones que determinan el control del sistema: dos se refieren a los movimientos del soplete, una al movimiento del tubo, una a la presión del oxígeno y una a la operación de la válvula para el oxígeno de corte.

4.2.1 Movimiento Angular del Soplete.

Para determinar la función que permita controlar el movimiento angular del soplete, es necesario encontrar primero la relación entre el ángulo diedro local como una función de la posición angular del tubo, es decir, la relación funcional $A_4 = f_1(A_1)$. En la Figura 4.2.1 se ilustra el hecho de que el vector normal a un plano que es tangente a un cilindro, es paralelo al vector determinado por el radio del mismo.

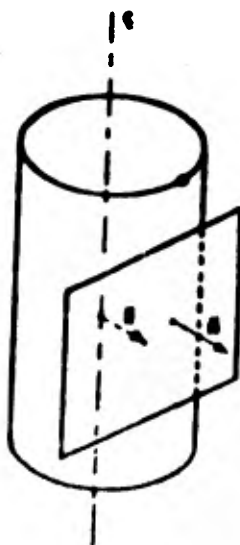


Figura 4.2.1.

De la definición de ángulo diedro local se concluye que queda determinado por el ángulo entre los vectores formados con los radios de los tubos, en un punto cualquiera de la junta, por lo que el problema de encontrar la función $A_4 = f_1(A_1)$, se reduce entonces a determinar en coordenadas cartesianas XYZ los vectores $\overline{R_1}$ y $\overline{R_2}$ en cualquier punto de la junta, para calcular el ángulo entre ellos.

En la Figura 4.2.2 se presenta una junta referida a dos conjuntos de coordenadas XYZ y X'YZ'. Estas últimas se obtienen girando el plano XZ alrededor del eje Y un ángulo A_3 con respecto al eje X.

- a) El vector $\overline{R_2}$ (formado con el radio del tubo secundario o riostra), está determinado por el segmento dirigido $\overline{P_2P'}$ que está contenido en un plano paralelo al plano X'Y, por lo que la coordenada Z' del punto P_2' es igual a la del punto P' (ver figura 4.2.2). Las coordenadas X' y Y de los puntos, pueden determinarse como funciones de R2 y del ángulo A1 (ver figura 4.2.3 específicamente).

$$P_2' = (0, 0, -Z')$$

$$P' = (R_2 \cos A_1, R_2 \sin A_1, -Z')$$

Con los puntos P_2' y P' definidos en las coordenadas X'YZ', pueden definirse en coordenadas XYZ por medio de una transformación (ver figura 4.2.4) así:

$$P_2 = (Z' \sin \overline{A_3}, 0, -Z' \cos \overline{A_3})$$

$$P = (R_2 \cos A_1 \cos \overline{A_3} + Z' \sin \overline{A_3}, R_2 \sin A_1, R_2 \cos A_1 \sin \overline{A_3} - Z' \cos \overline{A_3})$$

Definidos los puntos por las coordenadas XYZ, se calcula el vector $\overline{R_2}$, resultando:

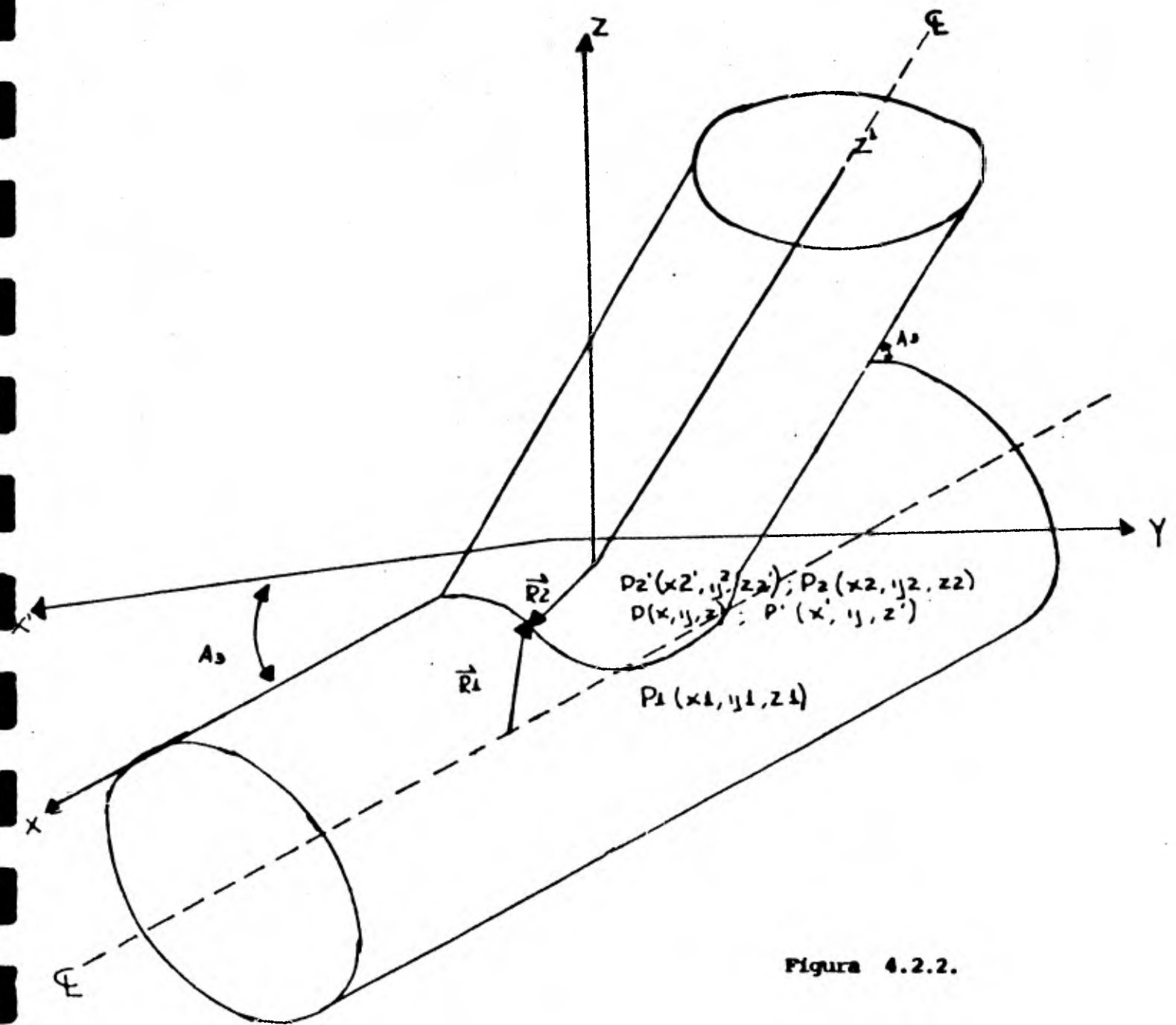


Figura 4.2.2.

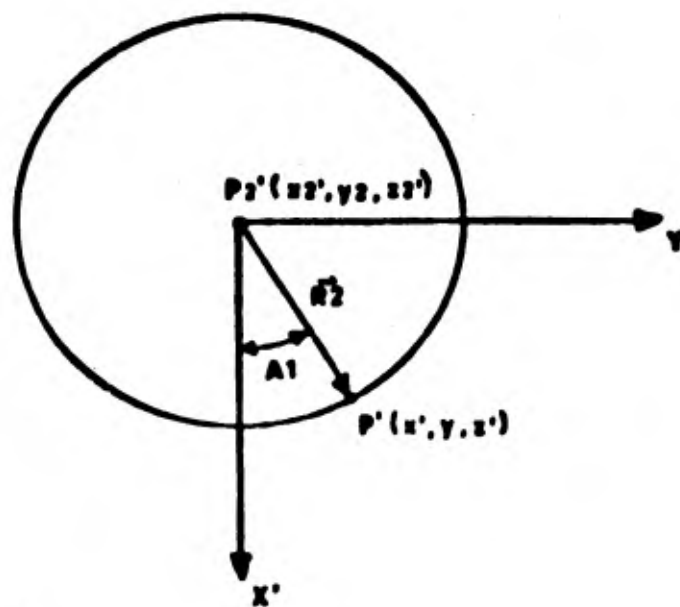
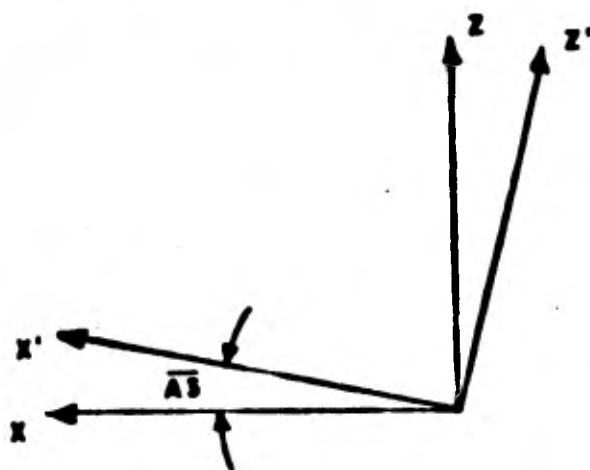
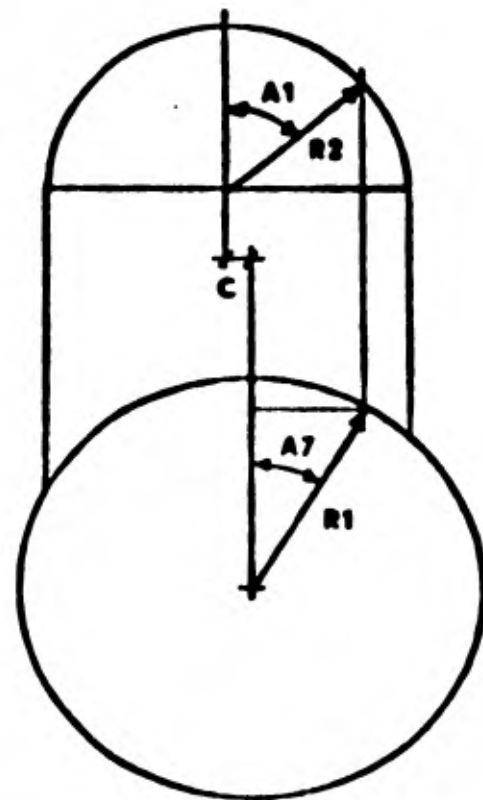
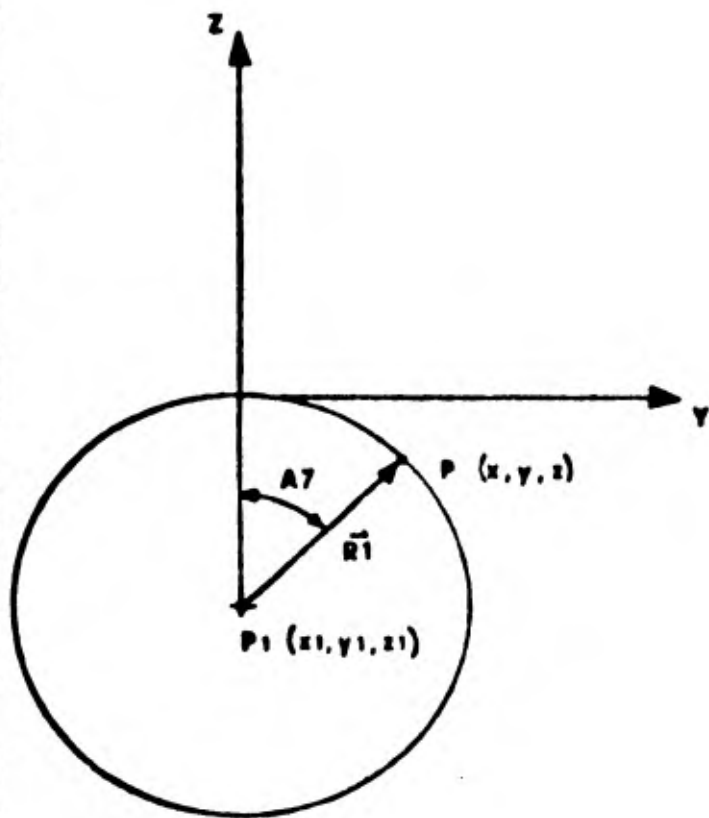


Figura 4.2.3.



$$\begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos A_3 & -\text{Sen } A_3 \\ \text{Sen } A_3 & \cos A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ z' \end{bmatrix}$$

Figura 4.2.4.



$$A7 = \text{Sen}^{-1} \left(\frac{R2 \text{ Sen } A1 - C}{R1} \right)$$

Figura 4.2.5.

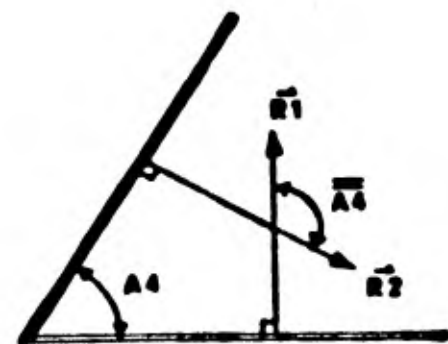
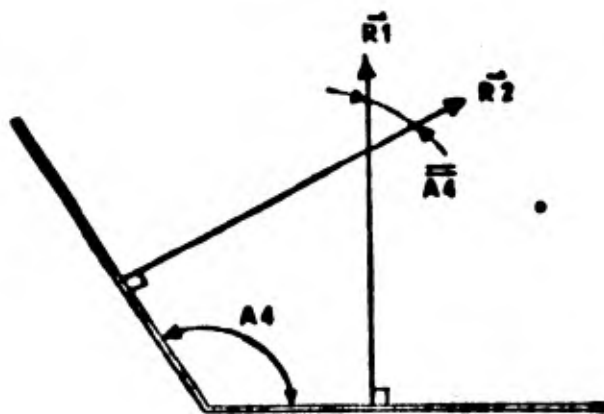


Figura 4.2.6.

$$\overline{RZ} = \overline{PZP} = R2 \cos A1 \cos A3 \hat{i} + R2 \sin A1 \hat{j} + R2 \cos A1 \sin A3 \hat{k}$$

donde \hat{i} , \hat{j} , \hat{k} = vectores unitarios alojados en los ejes X, Y y Z respectivamente.

- b) El vector \overline{RI} (formado con el radio del tubo primario) está determinado por el segmento dirigido \overline{PIP} . Este vector está contenido en un plano paralelo al plano YZ, por lo que la coordenada X del punto P1 es igual a la del punto P (ver figura 4.2.2). Las coordenadas ZY de los puntos pueden determinarse fácilmente en función de R1, R2, C y el ángulo A1 — (ver figura 4.2.5), quedando finalmente definidos como:

$$P1 = (X, 0, -R1)$$

$$P = (X, R1 \sin A7, -R1 + R1 \cos A7)$$

Con los puntos definidos en las coordenadas XYZ se calcula el vector \overline{RI} , resultando:

$$\overline{RI} = \overline{PIP} = 0 \hat{i} + R1 \sin A7 \hat{j} + R1 \cos A7 \hat{k}$$

De donde, como se puede ver en la (figura 4.2.6), el ángulo diedro local queda determinado por:

$$A4 = 180^\circ - \overline{A4}$$

$$A4 = f1(A1) = 180^\circ - \cos^{-1} (\sin A7 \sin A1 + \cos A7 \cdot \cos A1 \sin A3)$$

Determinada la función $A4 = f1(A1)$, se determina la función $A2 = f2(A4)$, que expresa la posición angular del soplete como una función del ángulo diedro local. El procedimiento se basa en la función discreta $A5 = f(A4)$, tabla 4.2.1 la cual se muestra a continuación:

M (grados)	$A5 = f(M)$ (grados)
135 & 180	90
90 & 135	$M - 45$
30 & 90	$\frac{1}{2} M$

TABLA 4.2.1

En el inciso 4.1 se mencionó que los ángulos $A2$ y $A5$ son complementarios, - es decir que $A2 + A5 = 90^\circ$, por lo que:

$$A2 = 90^\circ - A5 \therefore A2 = f2(M) = 90^\circ - f(M).$$

En la tabla 4.2.2 se presenta la función discreta $A2 = f2(M)$.

M (grados)	$A2 = f2(M)$ (grados)
135 & 180	0
90 & 135	$135 - M$
30 & 90	$90 - \frac{1}{2} M$

TABLA 4.2.2

De estas dos funciones $M = f1(A1)$ y $A2 = f2(M)$, se establece una función que permite conocer la posición angular del soplete como una función de la posición angular del tubo, la cual permitirá controlar el movimiento angular del soplete, ésto es:

$$M = f1(A1)$$

$$A2 = f2(M)$$

$$\therefore A2 = f2(f1(A1)) = F1(A1)$$

4.2.2 Movimiento Lineal del Soplete

Para controlar el movimiento lineal del soplete, es necesario establecer su posición lineal como función de la posición angular del tubo, es decir, establecer la función $X = F_2(A_1)$.

La función deberá cubrir todos los casos que se presenten en el habilitado de los tres tipos de juntas o uniones, mencionados en el inciso 4.1, que son:

Tipo I: De dos tubos con ejes de simetría que se intersecan.

Tipo II: De dos tubos con ejes de simetría que no se intersecan.

Tipo III: De un tubo con una placa plana.

Los casos derivados del habilitado de juntas de los tipos IV y V, quedarán cubiertos por aplicaciones simultáneas de esta misma función, es decir, que para habilitar un elemento de un nudo, basta considerar conjuntamente sus uniones con los demás elementos del nudo. Esto se ilustra a continuación:

Supóngase que se quiere habilitar el tubo marcado con la letra B en la (figura 4.2.7).

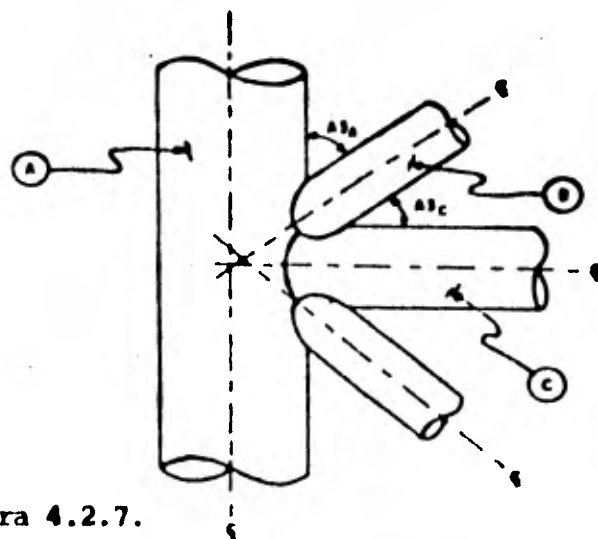


Figura 4.2.7.

Si consideramos su unión con el tubo A, obtendremos un perfil de corte o —
plantilla, como el mostrado en la (figura 4.2.8).

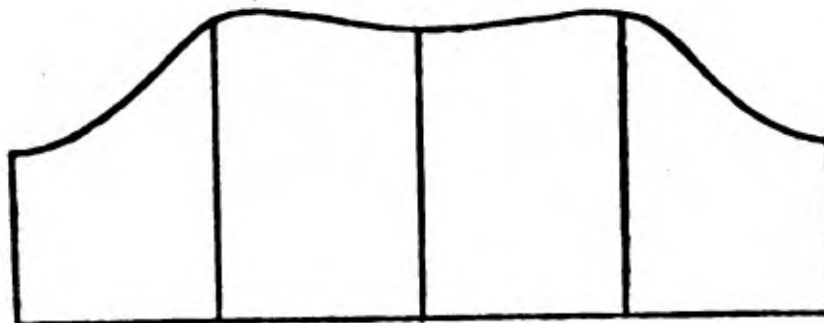


Figura 4.2.8.

Si consideramos ahora su unión con el tubo C, obtendremos la plantilla mos-
trada en la (figura 4.2.9).

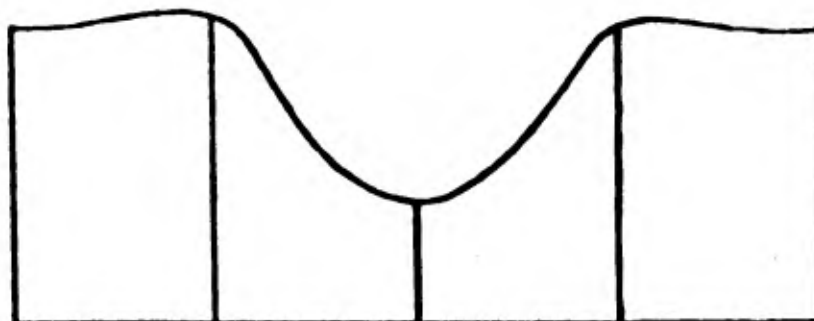


Figura 4.2.9.

Considerar conjuntamente estas dos uniones equivale a superponer las dos —
plantillas y tomar en cuenta únicamente las zonas que predominan.

En la (figura 4.2.10) se ilustra la plantilla resultante en este caso.

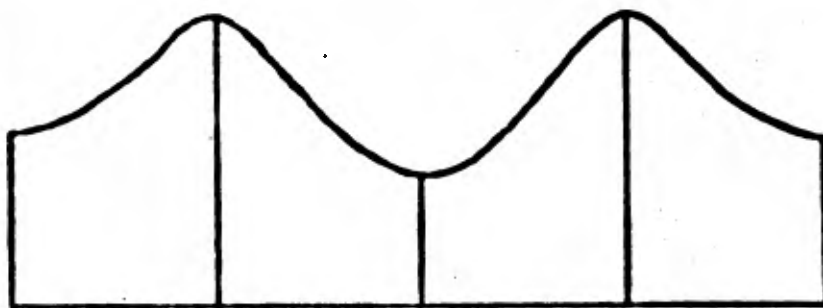


Figura 4.2.10.

Para establecer la función F_2 , se determinarán las funciones específicas para cada uno de los tres tipos de unión mencionadas anteriormente.

En el análisis de estas funciones se hará frecuentemente referencia al método gráfico para obtener plantillas, mencionado en el inciso 1.2.

Se empezará analizando la función de posición lineal del soplete en las juntas tipo I.

De la (figura 4.2.11) se obtiene:

$$A_7 = \text{Sen}^{-1} \frac{R_2 \text{ Sen } A_1}{R_1}$$

$$S_1 = R_1 - R_1 \text{ Cos } A_7 = R_1 (1 - \text{Cos } A_7)$$

$$S_2 = \frac{S_1}{\text{Sen } A_3} = \frac{R_1 (1 - \text{Cos } A_7)}{\text{Sen } A_3}$$

$$S_3 = R_2 - R_2 \text{ Cos } A_1 = R_2 (1 - \text{Cos } A_1)$$

$$S_4 = \frac{S_3}{\text{Tan } A_3} = \frac{R_2 (1 - \text{Cos } A_1)}{\text{Tan } A_3}$$

y la función buscada es:

$$X = g_1(A_1) = S_2 + S_4 = \frac{R_1 (1 - \text{Cos } A_7)}{\text{Sen } A_3} + \frac{R_2 (1 - \text{Cos } A_1)}{\text{Tan } A_3}$$

$$X = g_1(A_1) = \frac{R_1 (1 - \text{Cos} (\text{Sen}^{-1} (\frac{R_2 \text{ Sen } A_1}{R_1})))}{\text{Sen } A_3} + \frac{R_2 (1 - \text{Cos } A_1)}{\text{Tan } A_3}$$

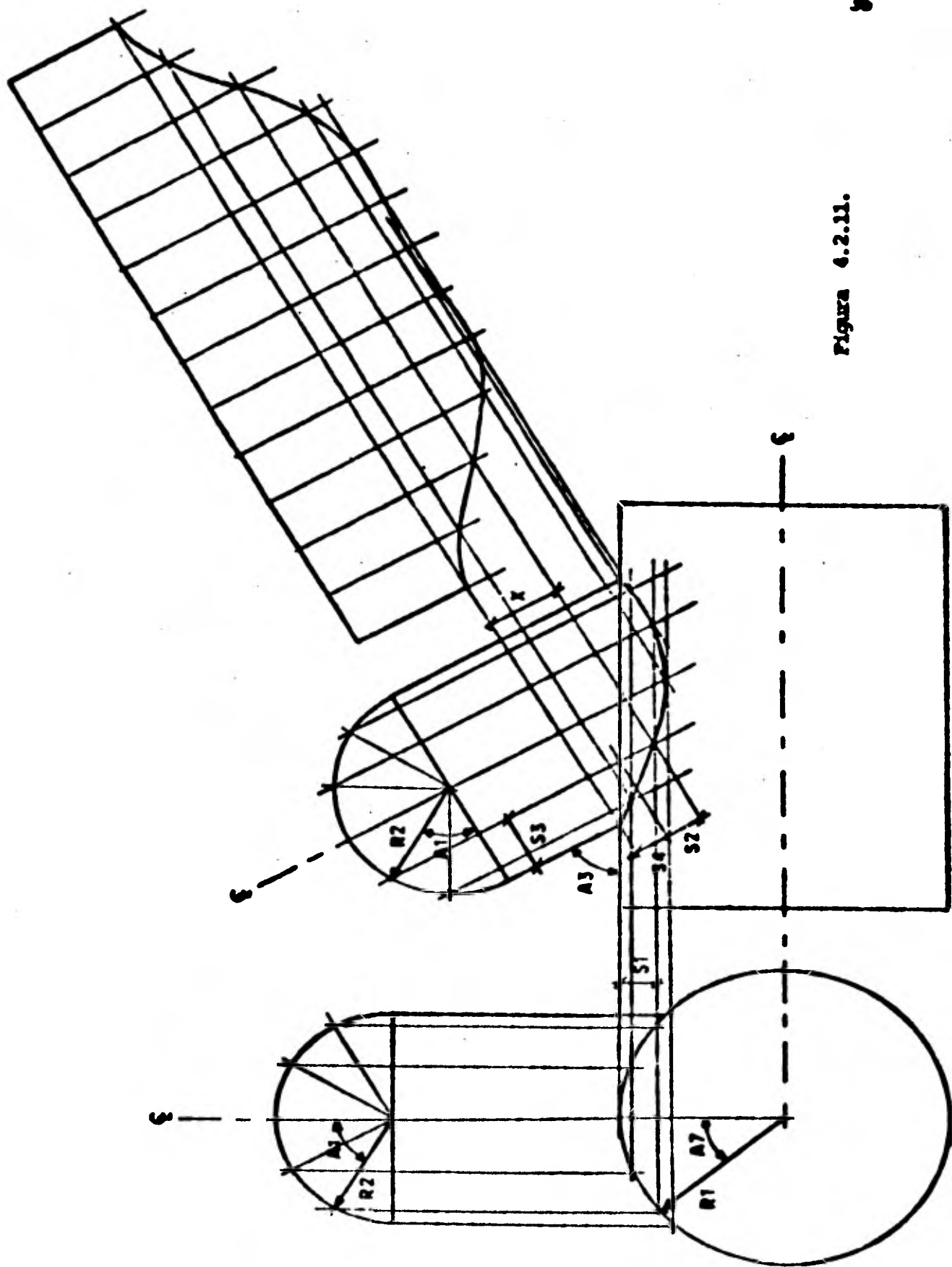


Figura 4.2.11.

donde:

R_1 , R_2 y A_3 , son constantes y A_1 es variable con el tiempo.

Para la función de desplazamiento lineal del soplete en las juntas tipo II, se obtiene de la (figura 4.2.12) lo siguiente:

$$A_7 = \text{Sen}^{-1} \frac{R_2 \text{ Sen } A_1 - C}{R_1}$$

$$S_1 = R_1 - R_1 \text{ Cos } A_7 = R_1 (1 - \text{Cos } A_7)$$

$$S_2 = \frac{S_1}{\text{Sen } A_3} = \frac{R_1 (1 - \text{Cos } A_7)}{\text{Sen } A_3}$$

$$S_3 = R_2 - R_2 \text{ Cos } A_1 = R_2 (1 - \text{Cos } A_1)$$

$$S_4 = \frac{S_3}{\text{Tan } A_3} = \frac{R_2 (1 - \text{Cos } A_1)}{\text{Tan } A_3}$$

y la función buscada es:

$$X = g_2(A_1) = S_2 + S_4 = \frac{R_1 (1 - \text{Cos } A_7)}{\text{Sen } A_3} + \frac{R_2 (1 - \text{Cos } A_1)}{\text{Tan } A_3}$$

$$X = g_2(A_1) = \frac{R_1 (1 - \text{Cos} (\text{Sen}^{-1} (\frac{R_2 \text{ Sen } A_1 - C}{R_1})))}{\text{Sen } A_3} + \frac{R_2 (1 - \text{Cos } A_1)}{\text{Tan } A_3}$$

donde:

R_1 , R_2 ; A_3 y C son constantes y A_1 es variable con el tiempo.

Finalmente para la función de posición lineal del soplete en las juntas tipo III, se obtiene de la (figura 4.2.13 lo siguiente):

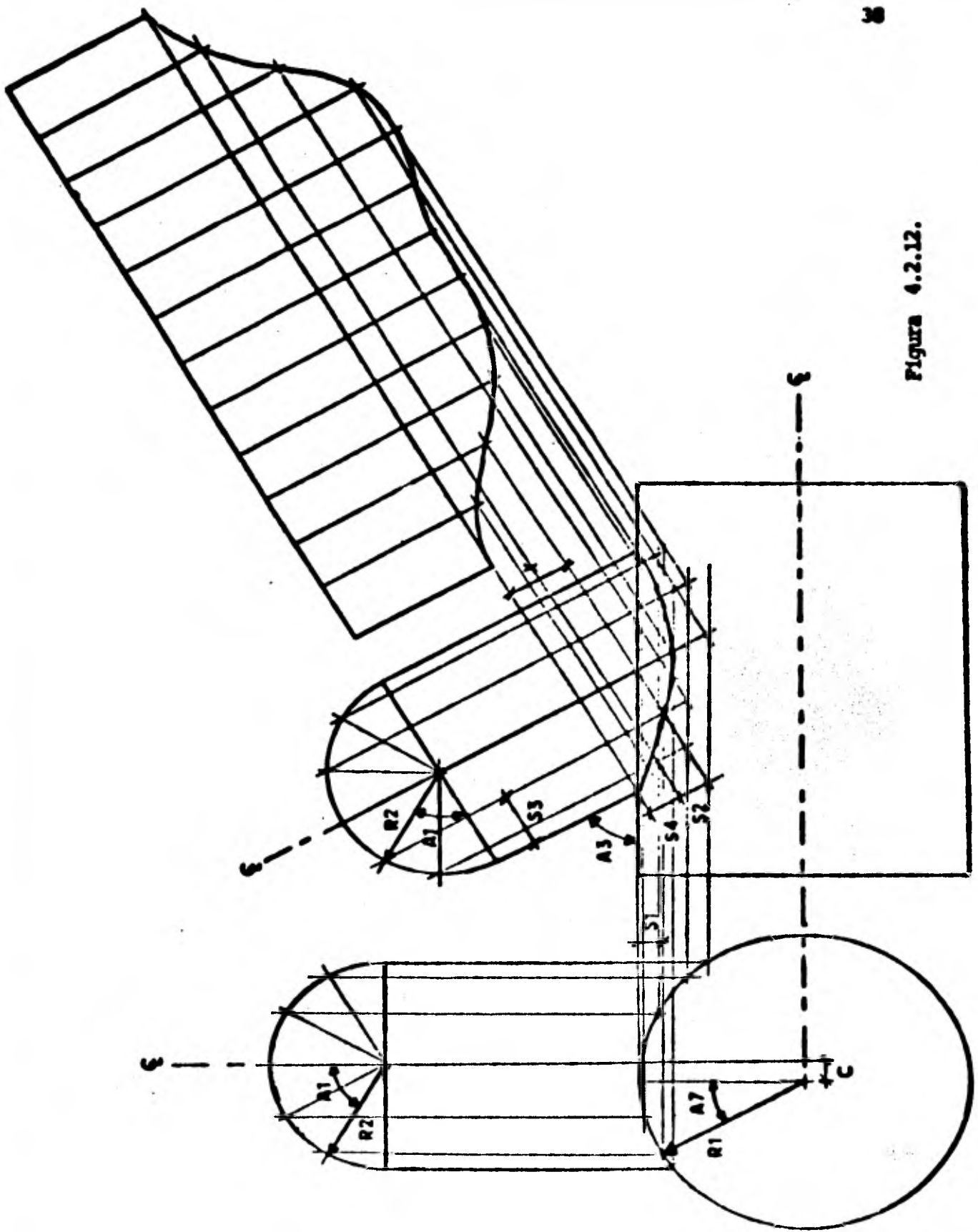


Figura 4.2.12.

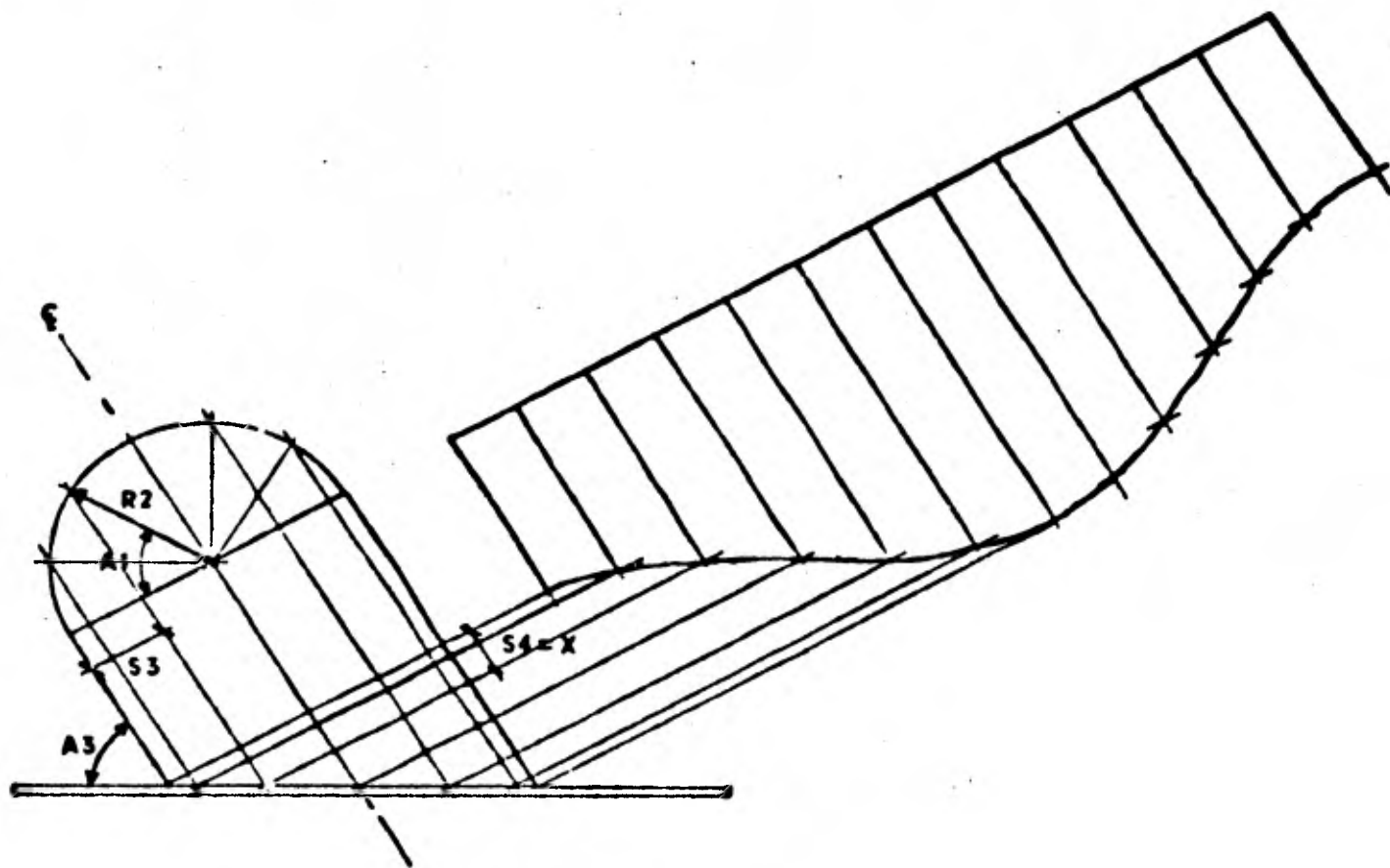


Figura 4.2.13.

$$S3 = R2 - R2 \cos A1 = R2 (1 - \cos A1)$$

$$S4 = \frac{S3}{\tan A3} = \frac{R2(1 - \cos A1)}{\tan A3}$$

de donde la función buscada es:

$$X = g3 (A1) = S4 = \frac{R2(1 - \cos A1)}{\tan A3}$$

donde:

$R2$ y $A3$ son constantes y $A1$ es variable con el tiempo.

Estas tres funciones $X = g1(A1)$, $X = g2 (A1)$ y $X = g3 (A1)$ son consistentes, ya que si en la función $X = g2 (A1)$ hacemos $C = 0$ obtendremos la función $X = g1 (A1)$ y si hacemos $R1 \rightarrow \infty$ obtenemos la función $X = g3(A1)$.

$$\text{La función } X = f3(A1) = \begin{cases} g1(A1) ; & \text{para juntas tipo I} \\ g2(A1) ; & \text{para juntas tipo II} \\ g3(A1) ; & \text{para juntas tipo III} \end{cases}$$

Como el centro de giro del soplete no puede estar en la punta del mismo, y tampoco coincidir con el borde interior del tubo, los movimientos angulares del soplete generan un error en la posición longitudinal del soplete que debe corregirse. En la figura 4.2.14 se ilustra la corrección en el desplazamiento lineal motivada por este giro.

El desplazamiento para compensar el efecto del giro, es función de la posición angular del soplete (ángulo de biselado), y está determinado por:

$$S = f4(A2) = D \tan A2$$

donde como ya se analizó, $A2 = f1(A1)$.

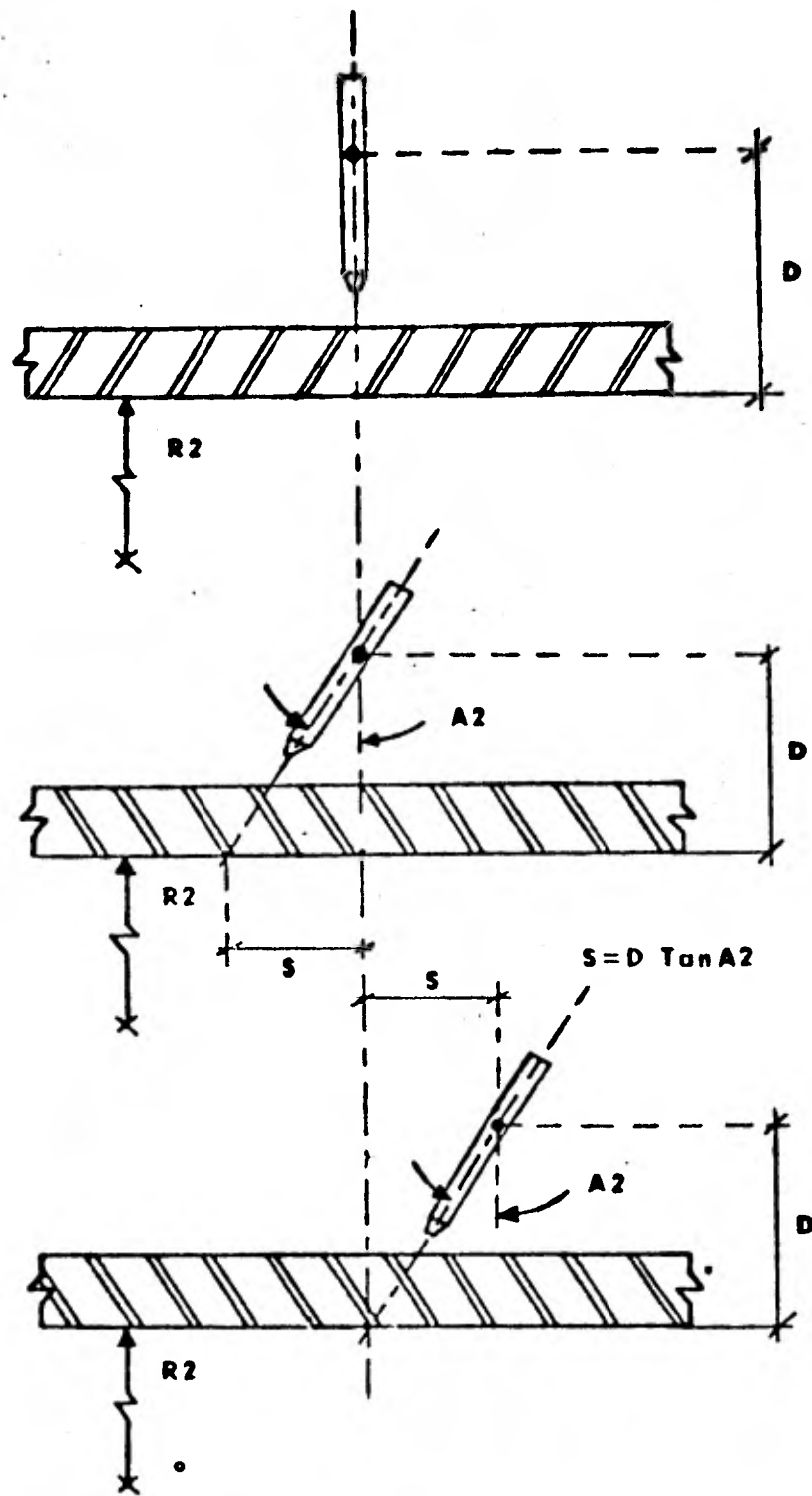


Figura 4.2.14.

ESPEJOR DE CORTE (mm)	VELOCIDAD DE CORTE (mm/mín.)
6.5	560
13.0	485
25.0	425
51.0	320
76.0	245
102.0	170
152.0	120

TABLA 4.2.3

La velocidad de traslación del soplete y la velocidad tangencial en la periferia interior del tubo, son las componentes rectangulares de la velocidad de corte, es decir:

$$\underline{\dot{V}} = \dot{X} \hat{i} + R2 \dot{A}_1 \hat{j}$$

Como la posición lineal del soplete es una función de la posición angular del tubo, la velocidad de traslación del soplete será una función de la posición angular del tubo y de su velocidad de rotación, es decir:

$$X = F2(A1) + \dot{X} = F2'(A1, \dot{A}_1)$$

La función $\dot{X} = F2'(A1, \dot{A}_1)$ se obtiene de:

$$\dot{X} = \frac{dx}{dt} = \frac{dx}{dA1} \frac{dA1}{dt} = \frac{dx}{dA1} \dot{A}_1$$

en donde derivando $X = g2(A1)$ (que es el caso más general de $X = f3(A1)$) - con respecto a $A1$, se tiene:

$$\frac{dx}{dA1} = \frac{R2 \cos A1 (R2 \sin A1 - C)}{\sin A3 \sqrt{R1^2 - (R2 \sin A1 - C)^2}} + \frac{R2 \sin A1}{\tan A3}$$

$$\therefore \dot{x} = F_2'(A_1, \dot{A}_1) = \frac{dx}{dA_1} \dot{A}_1$$

Si se denomina M a la derivada $\frac{dx}{dA_1}$, se tendrá que:

$$\dot{x} = F_2'(M, \dot{A}_1) = M\dot{A}_1$$

en donde $M = F_7(A_1)$.

Sustituyendo este valor de x en la ecuación vectorial de la velocidad de corte, se obtiene:

$$V = M A_1 \hat{i} + R_2 A_1 \hat{j}$$

de donde, la magnitud de la velocidad de corte estará dada por:

$$V = \sqrt{M^2 A_1^2 + R_2^2 A_1^2} = \sqrt{M^2 + R_2^2} A_1$$

y la magnitud de la velocidad de rotación del tubo será entonces:

$$A_1 = f_8(V, M) = \frac{V}{\sqrt{M^2 + R_2^2}}$$

que es precisamente la función $A_1 = F_3(A_1)$, ya que tanto V como M son funciones de A_1 .

Por lo tanto, la posición lineal deloplete, está dada por la diferencia -
 $X - S$, que como función del ángulo A_1 es:

$$X = F_2(A_1) = F_3(A_1) - F_4(F_1(A_1))$$

4.2.3 Movimiento Angular del Tubo.

Este movimiento se rige por la velocidad de corte, la cual varía en función del espesor de corte que a su vez depende del ángulo de biselado.

Por lo tanto, antes de empezar el análisis del movimiento del tubo, es necesario determinar las funciones $E = f_5(A_2)$ y $V = f_6(E)$.

La primera se determina fácilmente observando la figura 4.2.15.

$$E = \frac{E_0 - CR}{\text{Sen } A_5}$$

pero, como se acordó del anexo F, $CR = 0$ y $A_5 = 90^\circ - A_2$, por lo que:

$$E = f_5(A_2) = \frac{E_0}{\text{Cos } A_2}$$

La función $V = f_6(E)$ se determinó mediante una regresión exponencial realizada con los datos que se muestran en la tabla 4.2.3, dando como resultado:

$$V = f_6(E) = 560.41 \text{ Exp } (-0.0107E)$$

Esta regresión tiene un coeficiente de correlación de 0.9883.

Con estas dos funciones se determinará la función $A_1 = F_3(A_1)$.

El control del movimiento del tubo se logra corrigiendo su velocidad y su posición, a intervalos constantes de tiempo, es decir, que partiendo de una posición y velocidad iniciales en un tiempo inicial t_0 , se calcula su posición

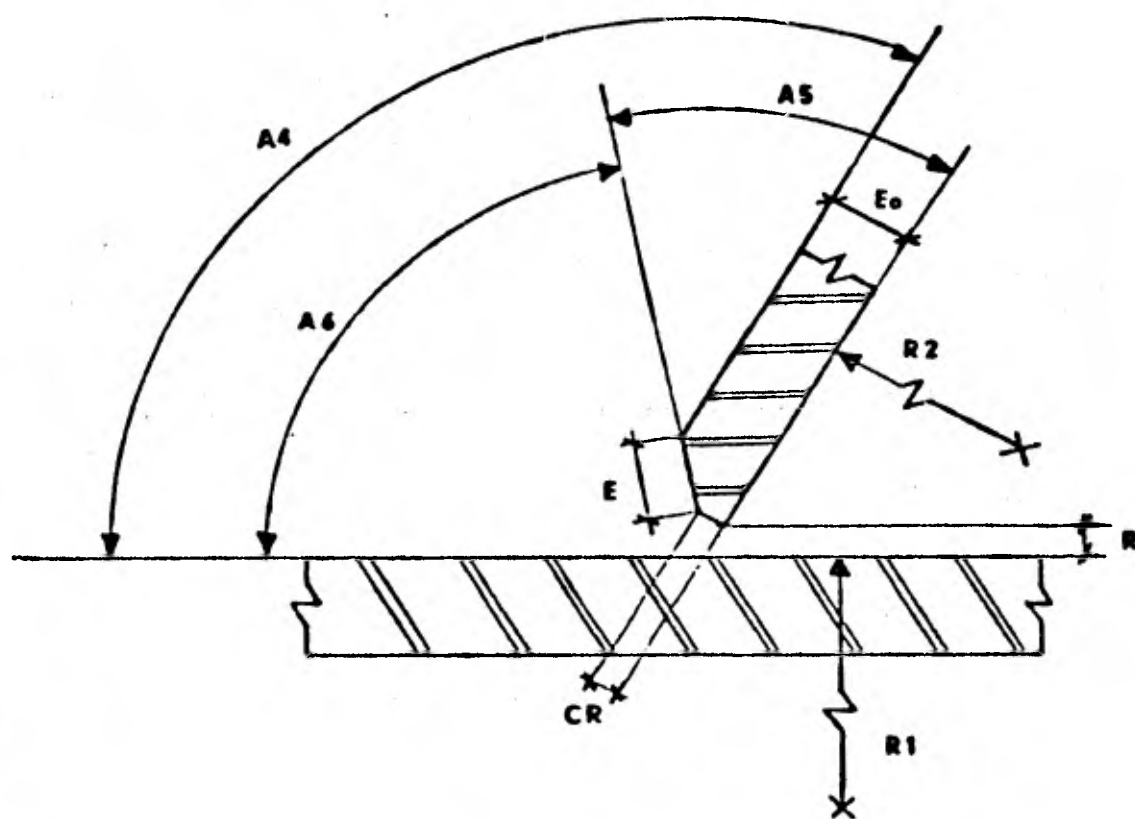


Figura 4.2.15.

en un tiempo posterior t_1 considerando la velocidad constante durante el intervalo $t_1 - t_0$.

El control descrito es aproximado y su precisión depende del tamaño de los intervalos de tiempo a los que se corrige la velocidad y la posición del tubo, sin embargo, en el caso del sistema aquí propuesto la precisión es suficiente pues la distancia recorrida en el intervalo al que se corrige la velocidad es muy pequeña en comparación con la distancia total de corte.

4.2.3 Presión del Oxígeno

Al variar el ángulo de bisel, y por ende el espesor de corte, en función de la posición angular del tubo y para poder realizar el corte se hace necesario variar la presión del oxígeno a la entrada del soplete. Pudiera pensarse que variando tan sólo la velocidad de corte al variar el ángulo de bisel, es posible efectuar el corte, sin embargo en el caso más general esto no es suficiente.

La función para controlar esta presión, está determinada por la relación entre ésta y el espesor de corte, es decir, $PO = f_9(E)$.

Para establecerla, se hizo una regresión lineal con los valores que aparecen en la tabla 4.2.4, resultando:

$$PO = f_9(E) = 0.0271 E + 1.9364$$

ESPEJOR DE CORTE (mm)	PRESION DEL OXIGENO (Kg/cm ²)
6.5	1.8
13.0	2.1
25.0	2.8
51.0	3.5
76.0	4.2
102.0	5.0
152.0	5.7

TABLA 4.2.4.

Esta regresión tiene un coeficiente de correlación de 0.9644.

4.3 Consideraciones de Diseño

4.3.1 Sistema Mecánico

El criterio empleado en el diseño de las componentes mecánicas del sistema - buscaba lograr elementos sencillos, precisos y adecuados a la escala del prototipo. Se pretendió que la cortadora de tubos manejase tubos de 5 a 50 cm. de diámetro y con ángulos de unión hasta 30°.

Los factores que se consideraron fueron:

- Funcionalidad
- Simplicidad
- Precisión
- Facilidad de Construcción
- Costo
- Integración al resto del sistema

Las figuras 4.3.1, 2, 3 y 4 muestran el aspecto final de las distintas componentes del mecanismo elegido. A continuación se exponen las principales -

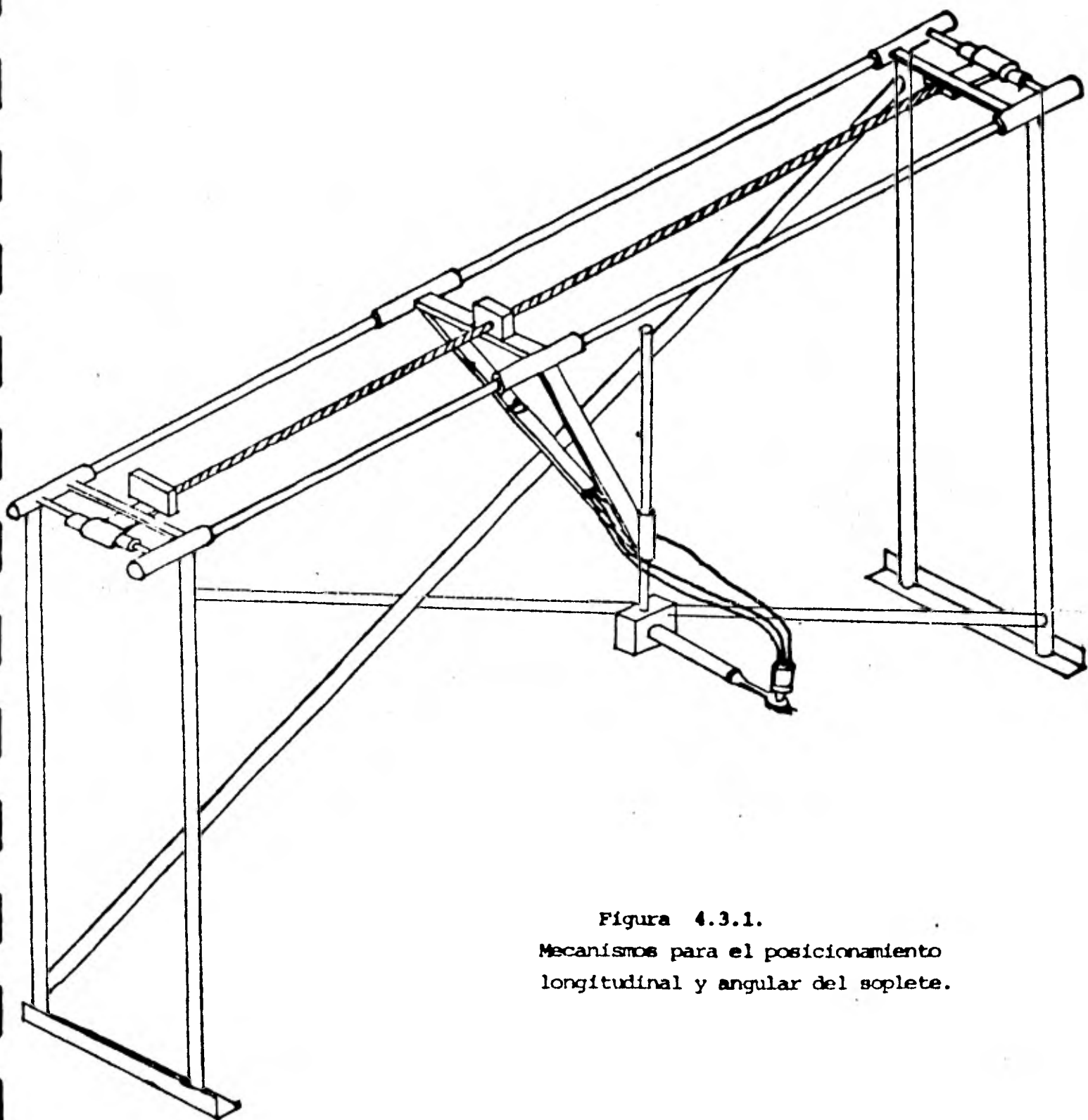


Figura 4.3.1.
Mecanismos para el posicionamiento
longitudinal y angular del soplete.

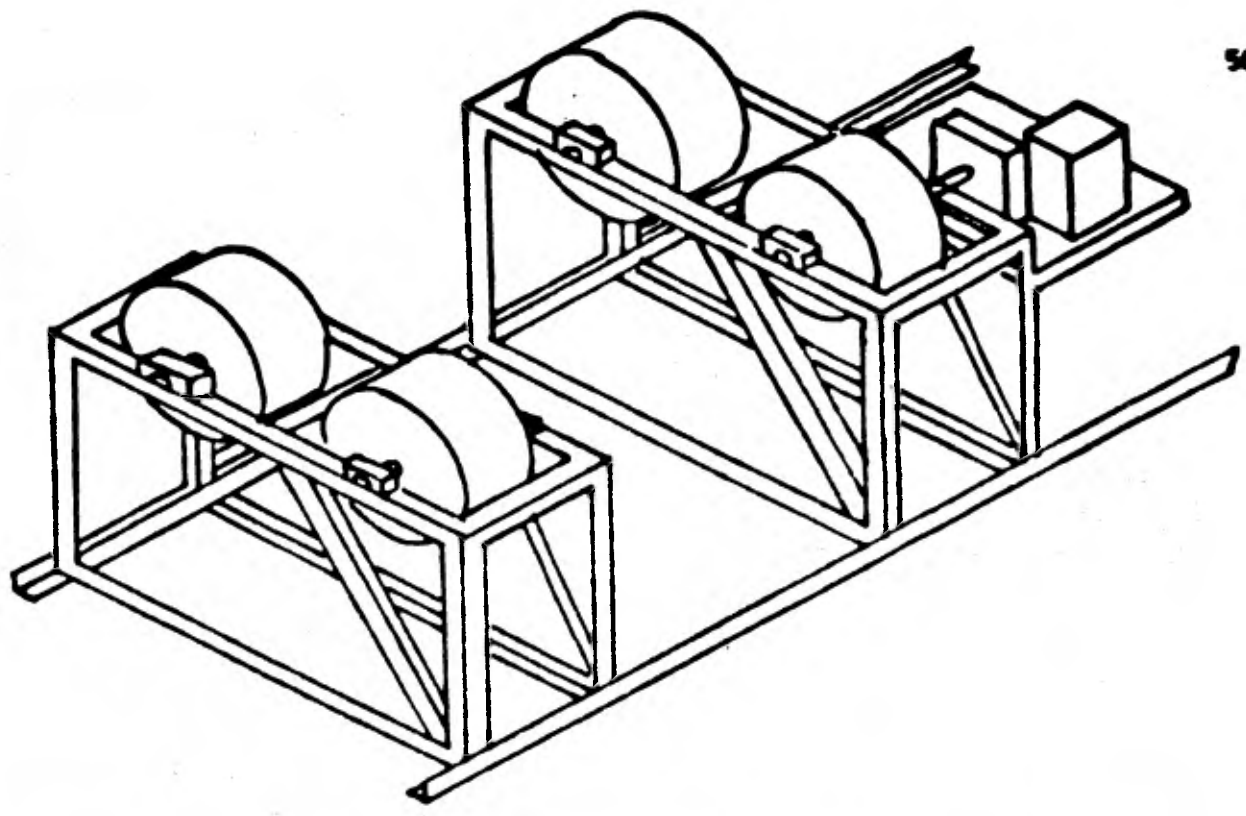


Figura 4.3.2. Mecanismo para posicionar angularmente el tubo.

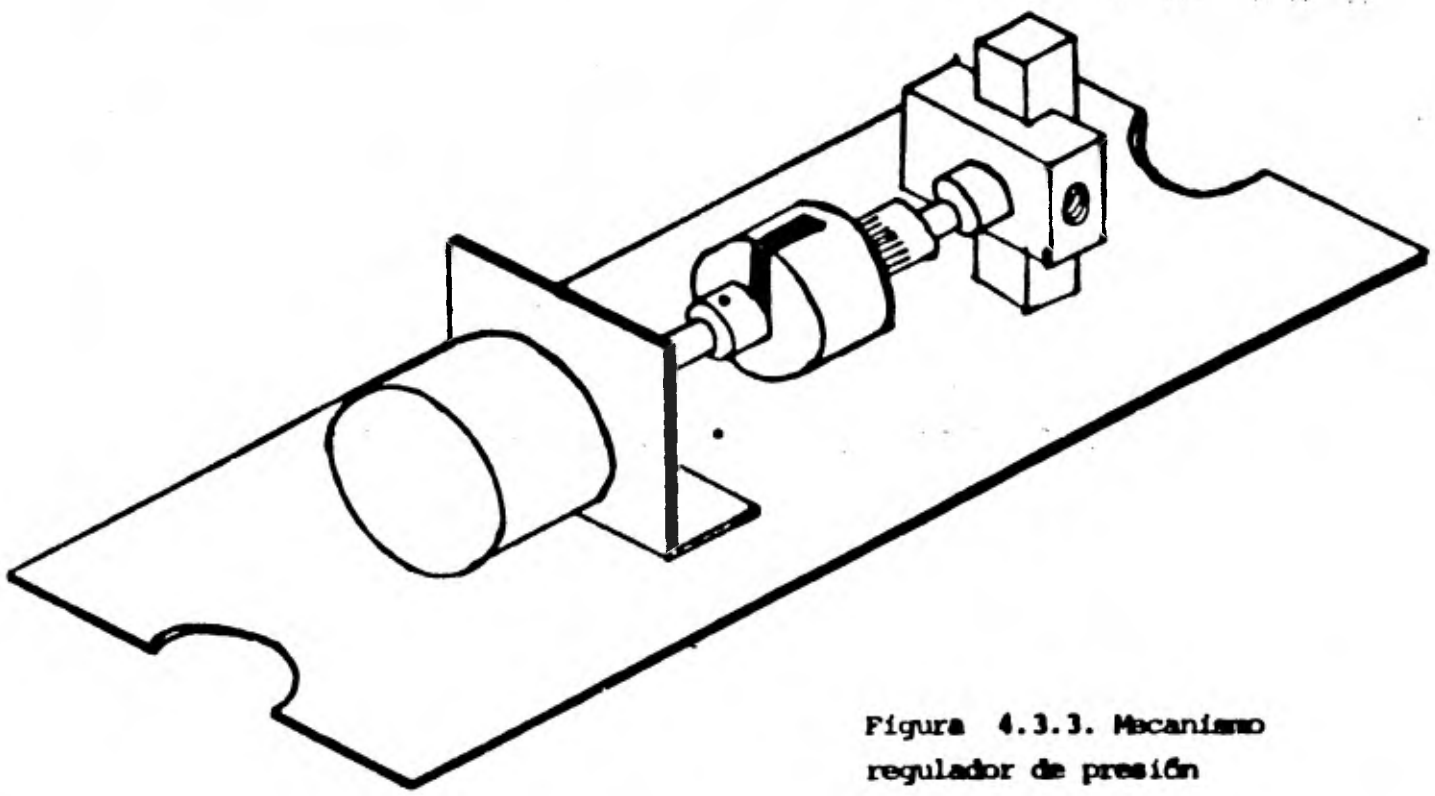


Figura 4.3.3. Mecanismo regulador de presión

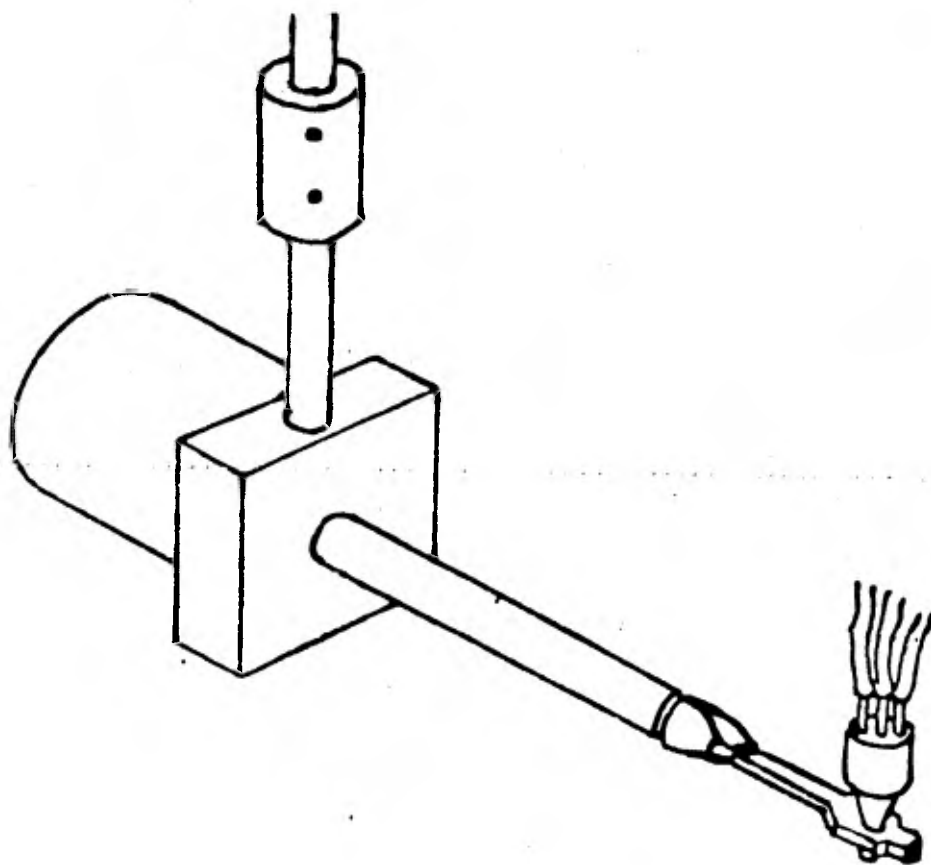


Figura 4.3.4. Mecanismo de biselado(detalle).

consideraciones en el diseño de la cortadora de tubos. El detalle del diseño elegido se muestra en el anexo B.

Para el diseño de la estructura de posicionamiento longitudinal del soplete se tomaron, además de los mencionados anteriormente los siguientes factores:

- Velocidad de Operación
- Potencia requerida
- Alineamiento
- Vibraciones
- Peso

Por existir diferencias hasta de un orden de magnitud en los diámetros de los tubos a cortar (de 5 a 50 cm.) se consideró que el mecanismo de posicionamiento longitudinal del soplete no utilizaría al tubo como punto de apoyo.

El uso de un tornillo sinfín como elemento transmisor de potencia fué común - a las alternativas desarrolladas (figura 4.3.5) pues permite movimientos precisos y reduce el par que debe entregar el motor (y con ello su costo). Con el paso elegido (tornillo cuerda de listón 5 hilos por pulgada) la velocidad del motor no excedía la máxima que son capaces de proporcionar los controladores económicos de los motores (en este caso 1000 pasos/seg.).

De las distintas estructuras analizadas (figura 4.3.5) se eligió la de la figura 4.3.1. Las razones de dicha elección fueron:

- El maquinado de las guías cilíndricas es más sencillo y barato que el maquinado de elementos planos del tipo viga, placa, solera, etc.
- Las guías cilíndricas pueden ser huecas, lo que disminuye el peso de la estructura.

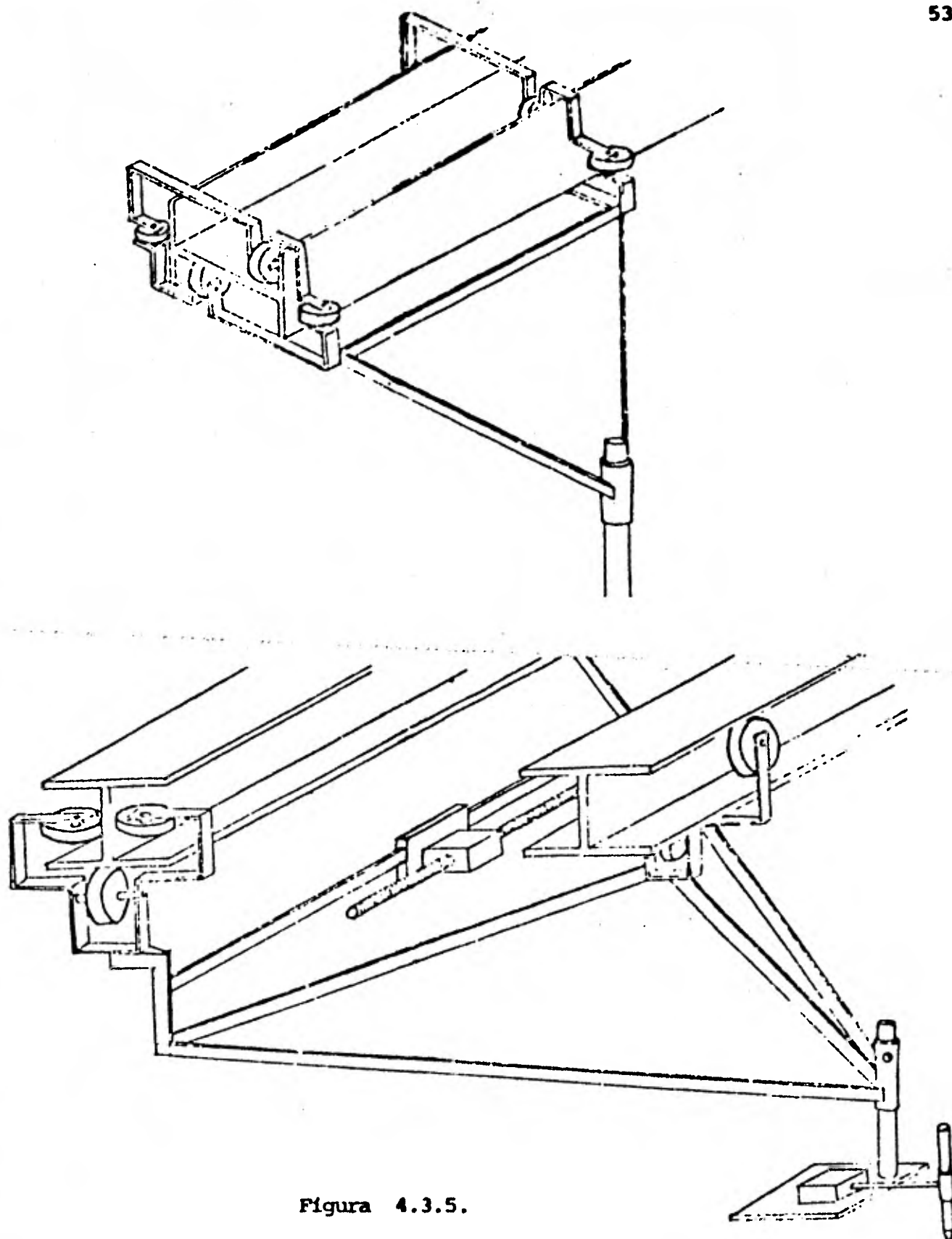


Figura 4.3.5.

- Los acoplamientos con el carro del soplete ofrecen la misma ventaja en lo que a maquinado se refiere.
- Es autoalineable.
- Presenta juego mecánico reducido.

Según la forma en que giran el tubo las soluciones para el sistema de posicionamiento angular del tubo se agrupan en dos:

- Mecanismos de giro directo.
- Mecanismos de giro indirecto.

El giro directo del tubo garantiza mayor precisión en la posición angular del tubo, pero implica la construcción de mecanismos de sujeción muy complicados, además de que deben construirse rodillos de soporte para los tubos, que disminuyan la carga del mecanismo de sujeción (figura 4.3.6).

El segundo tipo de sistemas giran al tubo por contacto del mecanismo de soporte con su superficie. Se pueden presentar problemas de deslizamiento o de deformación de los elementos rotadores o rodillos. Dentro de este segundo tipo se distingue a los sistemas que agrupan varios pares de rodillos (figura 4.3.7) y los que se forman de varias unidades independientes de parejas de rodillos, algunas de ellas motrices (figura 4.3.2.).

Se eligió un sistema de giro indirecto compuesto de tres pares de rodillos independientes (uno de ellos motriz) que deben alinearse mediante guías claras en el piso. Su elección se basó en que ofrecía:

- Fácil transportabilidad.
- Posibilidad de cortar tramos de tubos de muy distintas longitudes.

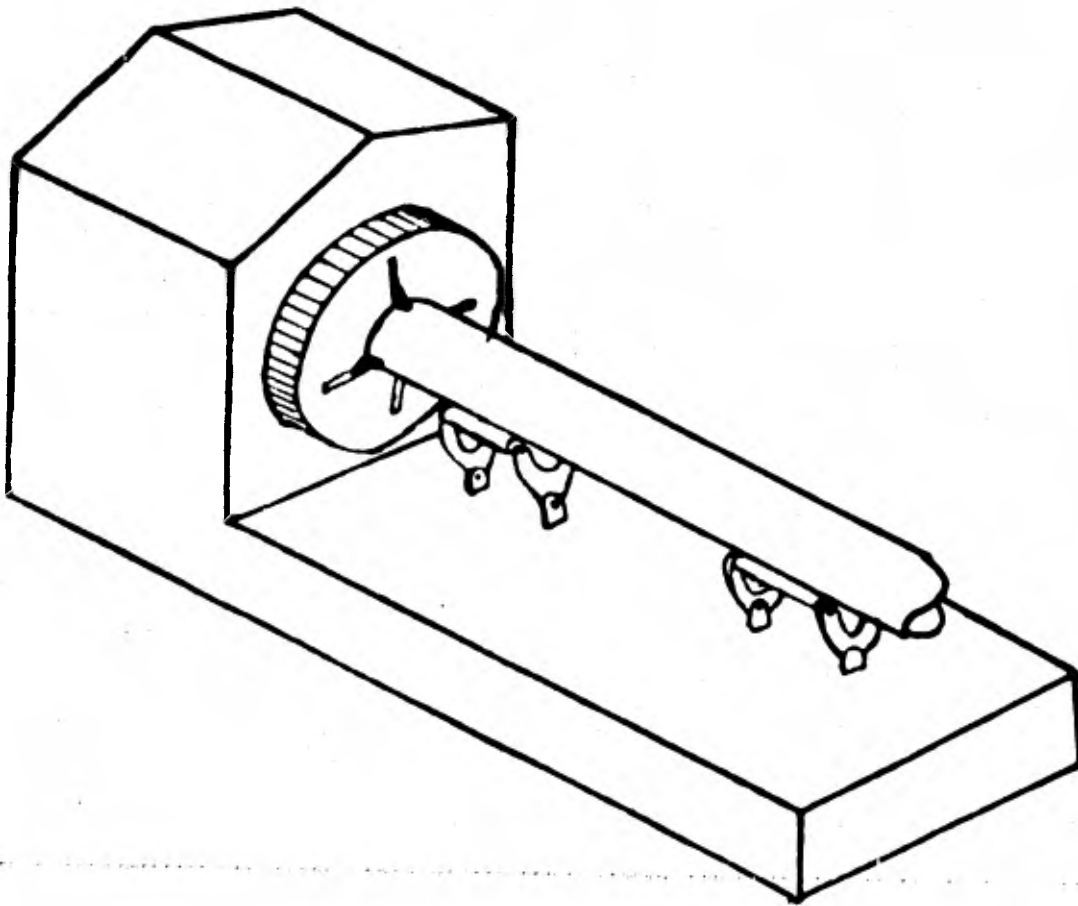


Figura 4.3.6.

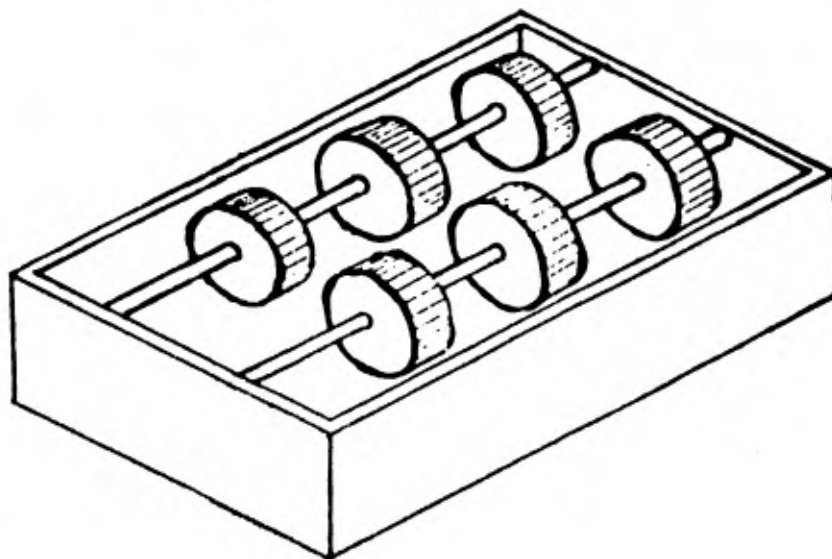


Figura 4.3.7.

Se utiliza reductor de velocidad entre el motor y el rodillo motorizado para amplificar el par entregado por el motor y producir movimientos continuos en el motor de pasos al aumentar su velocidad de operación. Se efectuaron las mismas consideraciones en lo que a velocidad se refiere que en el caso del mecanismo de posicionamiento longitudinal del soplete.

El juego propio del tipo de reductor empleado (sinfin-corona) no es importante pues la rotación del tubo es unidireccional y el efecto del juego se presenta cuando hay cambio de sentido del movimiento.

El diseño del mecanismo de biselado se condicionó al del sistema de posicionamiento longitudinal del soplete. Esto se debe a que el mecanismo de biselado tiene que moverse junto con el soplete cuando éste se desplaza en la dirección longitudinal.

La función de este mecanismo es inclinar la punta del soplete para producir en cada punto del perfil de corte el bisel adecuado.

Como ya se hizo notar en el inciso 4.2., si sólo se permite rotación en el soplete, el único caso en que no se genera error en la posiciones longitudinal y vertical del soplete, es cuando el centro de giro de éste se encuentra en la punta del mismo y ésta se ubique sobre la cara interior del tubo a cortar. El error correspondiente a la posición longitudinal del soplete se corrige en la etapa de simulación, mientras que el error en la posición vertical se trata de minimizar haciendo que la distancia del centro de giro del soplete al borde exterior del tubo sea pequeña.

Para la masa que debe mover el motor de pasos de este mecanismo se modificó el soplete (fig. 4.3.8) con el fin de que la única parte que se girase fue se su punta y no la sección de válvulas que se colocó sobre el carro móvil de la estructura de posicionamiento longitudinal del soplete.

Se acopló el mecanismo de biselado directamente a un motor de pasos, sin em plear reductor de velocidad, pues el par aplicado por el motor es suficiente para mover la punta del soplete y las mangueras. Esta solución provocó vibraci ones indeseables en el funcionamiento del aparato. En el capítulo 3 se man cionaron las recomendaciones para solucionar este problema.

El soporte para la punta del soplete se diseñó para sujetarla cerca del borde inferior y minimizar así el error vertical, como ya se comentó. Se utilizó cobre para evitar problemas de calentamiento.

Para lograr el precalentamiento necesario antes del inicio del corte se colocó un solenoide que controla el paso del oxígeno de corte de tal forma que éste no es inyectado mientras no haya pasado el tiempo suficiente para que la superficie del tubo alcance al temperatura de ignición.

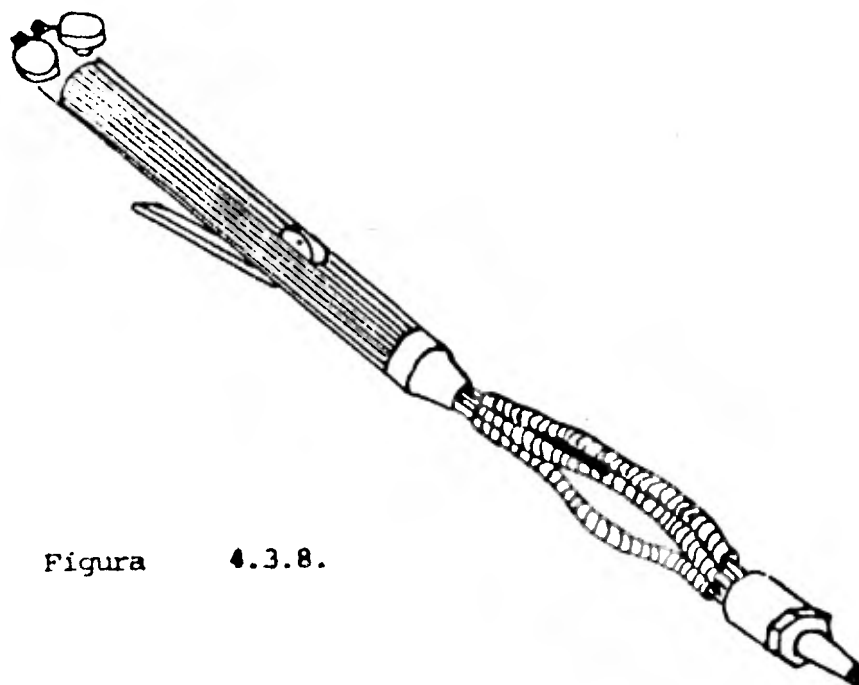


Figura 4.3.8.

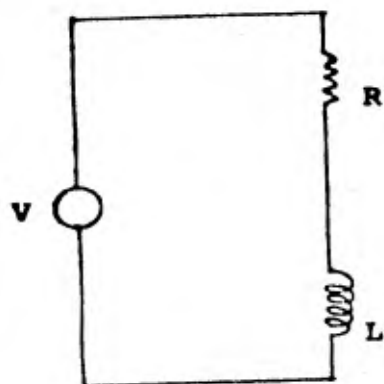
El mecanismo que regula la presión del oxígeno de corte es de malla abierta como el resto del sistema. Su diseño se basó en la calibración de una válvula reguladora de presión para la que se encontró la variación de la presión de salida contra la posición del vástago de la válvula, dada una presión de alimentación constante. Se encontraron las regiones en que era posible linealizar el comportamiento de la válvula eligiéndose aquella en que se podía obtener una gama de presiones de salida semejante a la que se requiere para los distintos cortes a efectuar.

El motor de pasos utilizado se acopló directamente con el vástago de la válvula. No se utilizó reductor de velocidad en este caso por dos razones. La primera fue que el par proporcionado por el motor era suficiente para mover el vástago directamente. La otra que la región de operación de la válvula con un comportamiento aproximadamente lineal de la posición angular del vástago contra la caída de presión a través de la válvula correspondía a dos revoluciones completas del vástago. Si se considera que la resolución del motor es de 200 pasos/rev, existían 400 presiones de salida diferentes, que se consideraron suficientes para fines de control de la presión del oxígeno de corte.

4.3.2 Sistema Eléctrico

El sistema eléctrico de la cortadora de tubos es el equipo que proporciona potencia para la operación de los distintos actuadores y se compone de los circuitos de potencia de los motores de pasos y del circuito de control del estado del oxígeno de corte.

El circuito de alimentación de los motores es esencialmente un circuito R/L (figura 4.3.9). Cuando se requiere aumentar la velocidad de operación del motor se debe aumentar la resistencia del circuito para que la constante de tiempo disminuya. Como la corriente de estado estable se de-



V=voltaje de alimentación
 R=resistencia del circuito
 L=inductancia del circuito

Figura 4.3.9.

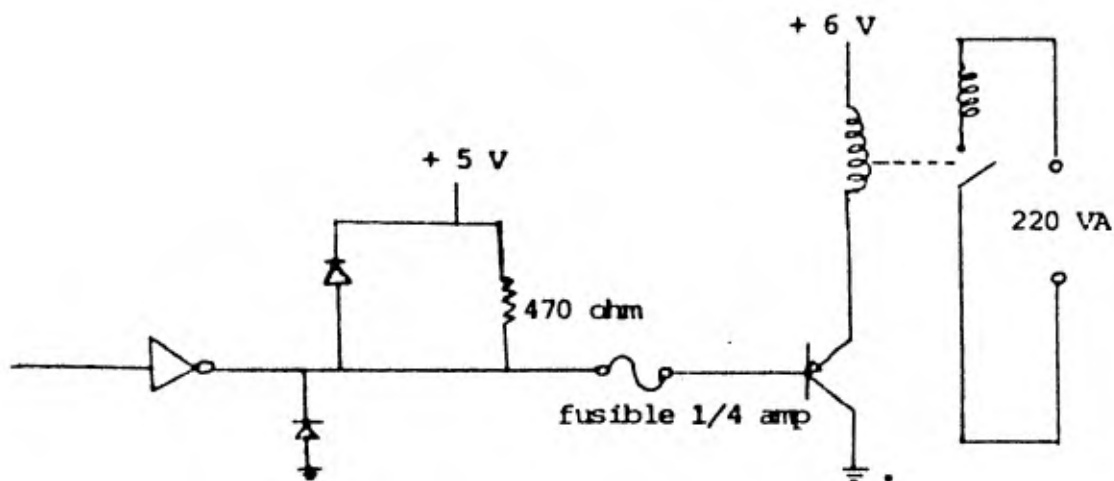


Figura 4.3.10.

be mantener constante se necesita variar el voltaje de alimentación de tal forma que los aumentos de la resistencia del circuito no produzcan disminución en la corriente del mismo. Se encontró para cada motor el valor de la resistencia en serie que se incluiría así como el voltaje de la fuente de alimentación, constante.

Se diseñaron las fuentes de potencia de los motores cumpliendo con los requerimientos de los motores de pasos y de sus controladores. En el anexo A se analizan con detalle los motores de pasos y sus controladores. Como las velocidades de operación de los motores de pasos no coinciden con aquellas para las que se diseñaron las fuentes sugeridas por los fabricantes, las fuentes empleadas tienen valores distintos.

El circuito de control del oxígeno de corte se muestra en la (figura 4.3.10). Consta de un relevador controlado por la computadora, previa etapa de amplificación de la señal, cuya función es abrir o cerrar el paso de corriente al solenoide permitiendo o no el flujo del oxígeno de corte. La señal para el relevador se genera en el programa de simulación con una variable de control adicional. La etapa de amplificación se alimenta de las fuentes de los motores de pasos mientras que el solenoide lo hace de una toma de corriente alterna a 220 Volts.

Para mover los motores sin intervención de la computadora en maniobras de posicionamiento inicial, lubricación, cambio de tubo, etc., se incluyó un tablero con una serie de interruptores y potenciómetros que permiten el movimiento de uno o varios motores simultáneamente. En la (figura 4.3.11)

GENERAL

SI NO

CARRO
SOPLETE
MOTOR 1

SI NO

BISEL
SOPLETE
MOTOR 2

SI NO

PRESION
OXIGENO

SI NO

RODILLOS
TUBO
MOTOR 4

SI NO

SOLENOIDE

SI NO

OSCILADOR

(OPRIMA)

PASO
SIMPLE

SI NO

PASO
SIMPLE

SI NO

OSCILADOR

(OPRIMA)

DIRECCION
IZQ. DER.

NO

DIRECCION
IZQ. DER.

DIRECCION
IZQ. DER.

DIRECCION
IZQ. DER.

NO

VELOCIDAD

- +

OPRIMA

OPRIMA

VELOCIDAD

- +

 INSTITUTO
DE
INGENIERIA

Figura 4.3.11.

se muestra una reproducción del panel de control del gabinete que contiene los controladores de los motores.

En el anexo C se presentan los cálculos de las resistencias de los circuitos de alimentación de los motores, el diseño de las fuentes de potencia así como el del tablero de control.

4.3.3 Sistema Electrónico

Los elementos electrónicos del sistema son:

- La computadora
- Los controladores de los motores de pasos.

La computadora que se emplea es una DIGITAL PDP - 11/40 con 64 K bytes de memoria central. Los pulsos a los motores se envían a través de un acoplador en paralelo que maneja hasta 16 señales (16 bits). El control del tiempo se efectúa utilizando un reloj programable independiente del procesador que puede generar señales de interrupción con distintas frecuencias. Estas últimas limitan la máxima velocidad con que se pueden enviar pulsos, por lo que no deben ocurrir con una frecuencia mayor que la máxima con que se pueden controlar los motores (1 Khz).

De las distintas clases de controladores de motores de pasos disponibles en el mercado se eligió el más sencillo. La velocidad máxima de operación de los motores es menor de 700 pasos/seg. por lo que el empleo de controladores más elaborados (más rápido) resultaba innecesario. En el anexo

C se describen las características del puerto de salida de la computadora y en el anexo A se describen algunos tipos de controladores.

4.4 Secuencia de Cálculo de las Variables

Dado que existen relaciones funcionales entre las diversas variables de control, conviene establecer una secuencia de computación que facilite el cálculo numérico de las muestras.

Coincidiendo en términos generales con la secuencia que se usó para los desarrollos analíticos, se adoptó el orden que se muestra en la (figura 4.4.1)

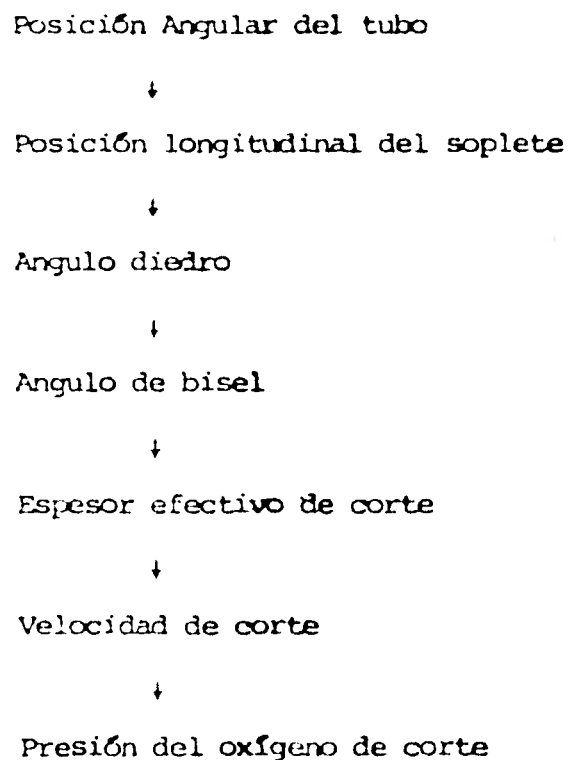


FIGURA 4.4.1

SECUENCIA DE CALCULO DE LAS VARIABLES

Con este ordenamiento es posible obtener el valor de cualquiera de las variables del sistema, definidas en 4.1 conociendo el valor de la posición angular de cualquier punto de la junta.

Las cuatro variables que controlan el habilitado del tubo son:

- Posición Angular del tubo.
- Posición Longitudinal del soplete.
- Angulo de bisel.
- Presión del oxígeno de corte.

A estas variables se les denominará variables de control del sistema y su secuencia de cálculo, está dada por la (figura 4.4.2).

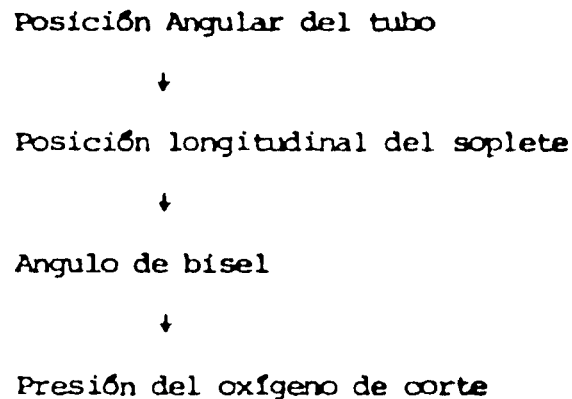


FIGURA 4.4.2

SECUENCIA DE CALCULO DE LAS VARIABLES DE CONTROL

4.5 Esquema de Control

Los esquemas de control se agrupan en:

- Esquemas de control de malla cerrada
(con realimentación).
- Esquemas de control de malla abierta
(sin realimentación).

En los esquemas de control de malla abierta las órdenes o señales de control se generan como una función del tiempo. Una vez enviada una señal a un actuador no hay forma de conocer si ésta fué o no ejecutada correctamente. El valor de una variable de salida en el resultado de la ejecución correcta de una serie de comandos. De esta forma la confiabilidad de estos sistemas de pende directamente de las características de los actuadores empleados.

Por otra parte en los esquemas de control de malla cerrada la señal que debe enviarse se calcula con base en el valor de la variable de salida. Esto

significa que hay una verificación de la ejecución de las señales enviadas. En estos esquemas la precisión del valor de la salida depende, para valores altos de realimentación, menos de las características del actuador que para esquemas de malla abierta.

Adoptar cualquiera de los esquemas mencionados está condicionado, entre otros factores a:

- Costo
- Precisión
- Simplicidad
- Eficacia

4.5.1 Consideraciones en la elección del esquema de control.

Ya se mencionaron los factores que condicionan la elección de un esquema de control determinado. Dado que la computadora que se emplearía sería la misma para los dos esquemas la elección de éste dependió únicamente del resto de los elementos del sistema.

Considerando el costo, para precisiones semejantes no demasiado grandes, el esquema de control de malla abierta ofrecía ventajas con respecto al de malla cerrada porque el costo de éste se veía afectado por el empleo de transductores, sensores, convertidores, etc. Se menciona como ejemplo que un elemento sensor/transductor para el control de presión se cotizaba aproximadamente - en \$50,000.00 mientras que un dispositivo para el control de presión en malla

abierta se construyó por menos de \$5,000.00. Con respecto a la eficacia en precisión el esquema de control de malla cerrada es superior al de malla -- abierta, debido a la mayor seguridad en la correcta ejecución de los comandos de control.

La decisión se basó, entonces, en la posibilidad de lograr un esquema de control en malla abierta que manteniendo la ventaja en el costo, ofreciese características aceptables en cuanto a precisión y eficacia se refiere; se optó por utilizar como actuadores del sistema motores de pasos porque ofrecen las siguientes ventajas:

- Se acoplan fácilmente a las computadoras digitales.
- No poseen error acumulativo de posicionamiento.
- Son confiables si se operan a velocidades reducidas (aproximadamente 1000 pasos/seg.).

En el anexo A se describe con amplitud el funcionamiento de estos motores.

El orden que es posible establecer entre las variables de control del sistema permite conocer el valor de los variables del sistema para cualquier junta en todos los puntos de ésta. Con esto se cumple con una de las condiciones necesarias para la adopción de un esquema de control de malla abierta.

Con base en lo anterior, se eligió un esquema de control de malla abierta - que emplea como actuadores motores de pasos. El dimensionamiento y el manejo de estos dispositivos, desde una computadora digital, fué una de las principales tareas del proyecto.

4.6 Algoritmo para el Control del Proceso de Habilitado.

El algoritmo para la solución del problema del habilitado o corte de los tubos se basa en que es posible conocer el valor de todas las variables a partir de una de ellas.

El diagrama de bloques del algoritmo se muestra en la (figura 4.6.1).

Por la naturaleza del problema la solución se realiza en dos grandes etapas:

- Simulación
- Control

En la simulación se parte de las relaciones funcionales entre las variables del sistema para encontrar las señales que deben enviarse a los actuadores. Dichas señales, equidistantes en el tiempo, se guardan temporalmente en un archivo.

Durante la etapa de control se envían las señales generadas en la simulación cuidando guardar la sincronía entre todas ellas y el tiempo en que se envían

a los actuadores. Esta etapa debe ocurrir necesariamente en tiempo real - pues es necesario mantener una velocidad de corte determinada.

Las dos etapas son necesarias por la complejidad de los cálculos que se efectúan durante la simulación que no permite generar las señales en línea con su envío.

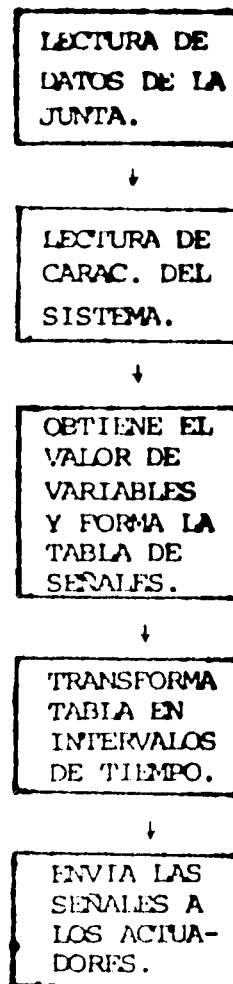


Figura 4.6.1. Algoritmo para el control del proceso de habilitado.

4.7 Simulación

Se definen como señales los pulsos eléctricos que permiten el funcionamiento de los motores de pasos. La ejecución de una señal en uno de estos motores produce (como se describe con amplitud en el anexo A un movimiento angular constante al que se llama resolución).

En esta etapa se calculan las señales que cada actuador requiere para habilitar el tubo. Se parte de una posición angular inicial y un intervalo de tiempo Δt . Se obtiene el valor de las variables del sistema con base en las relaciones del inciso 4.2. A partir del espesor efectivo de corte se calcula la velocidad de corte que determina el avance de la posición angular en el Δt dado. Con esta misma posición angular se repite el proceso hasta que se completa una revolución completa del tubo. Comparando el valor de las variables del sistema en un intervalo de tiempo con el que guardaban en el intervalo anterior es posible obtener el número de señales que se debe enviar a cada actuador en función de su resolución.

El diagrama de bloques de la simulación se muestra en la figura 4.7.1

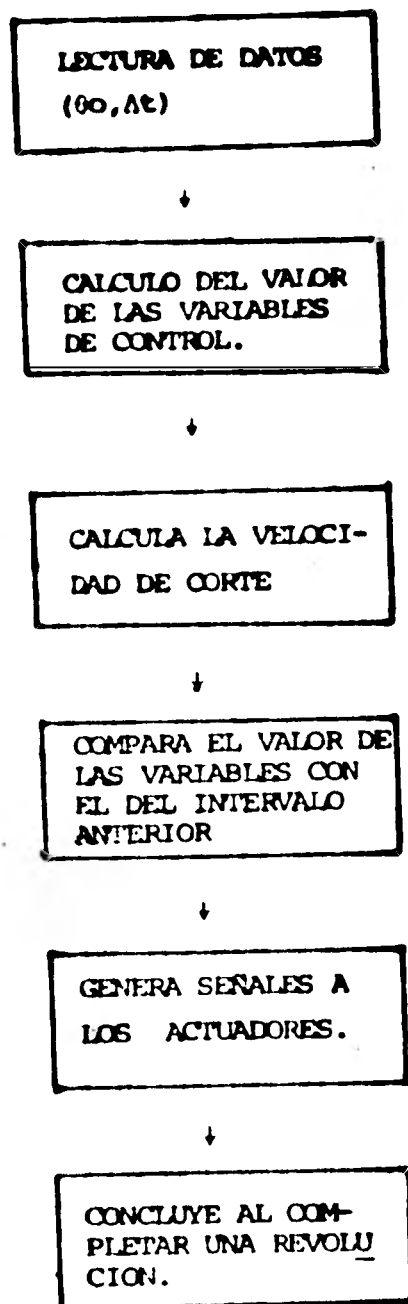


FIGURA 4.7.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA SIMULACION

Los datos que se requieren para realizar la simulación son las caracterís-
ticas de la junta, a saber:

- Diámetro del elemento primario (D1).
- Diámetro del elemento secundario (D2).
- Excentricidad de los ejes (C).
- Angulo de la unión (A3).
- Espesor nominal de la riostra (E0).
- Intervalo de tiempo para la simulación (Δt).
- Distancia entre la punta del soplete (D) y el interior del tubo.

Como salida de la simulación se obtiene una lista del número de pulsos que es necesario enviar a cada actuador en cada intervalo de tiempo Δt , es decir $(N_i, \Delta t_i)$ para $i = 1, 2, \dots, M$.

Resulta claro que al discretizar el corte, en intervalos de tiempo se pierde precisión, generándose un error de posición. Por un lado se tiene que el perfil de un tubo habilitado del tipo de la (figura 4.7.2) se aproxima mediante otro como el de la (figura 4.7.3). Las rectas que unen los puntos P_i y P_{i+1} no pasan por todos los puntos intermedios del perfil continuo. Por otro lado la precisión de los actuadores añade un error adicional que es igual al valor absoluto de su resolución.

La forma de conocer las señales que es necesario enviar a un actuador es:

Δt Intervalo de simulación.

\bar{X}_i Vector de variables en el tiempo i .

\bar{X}_{i+1} Vector de variables en el tiempo $i+1$, posición teórica en el tiempo $i+1$.

- $\bar{\Delta}x$ Vector de incrementos de las variables de estado en el tiempo Δt .
- \bar{r} Vector de resoluciones de los actuadores.
- N Vector del número de señales que se debe enviar a los actuadores en el tiempo Δt .
- X_{i+1} Vector de variables de estado que considera la resolución de los actuadores, posición real en el tiempo $i+1$.
- Vector de variables en el tiempo $i+1$ que incluye el error de posicionamiento debido a los movimientos discretos del motor de pasos.

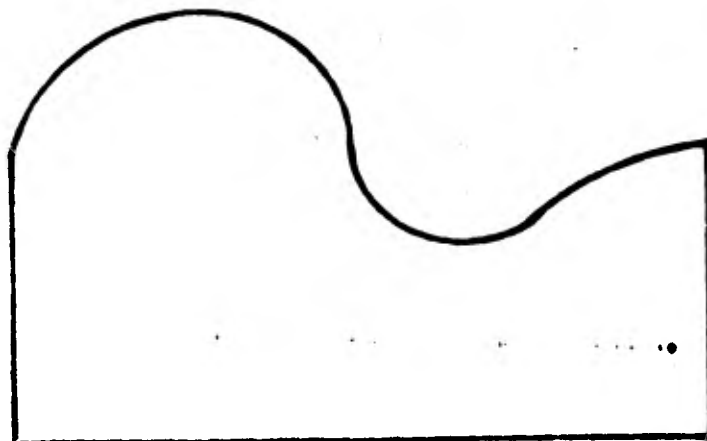


Figura 4.7.2.

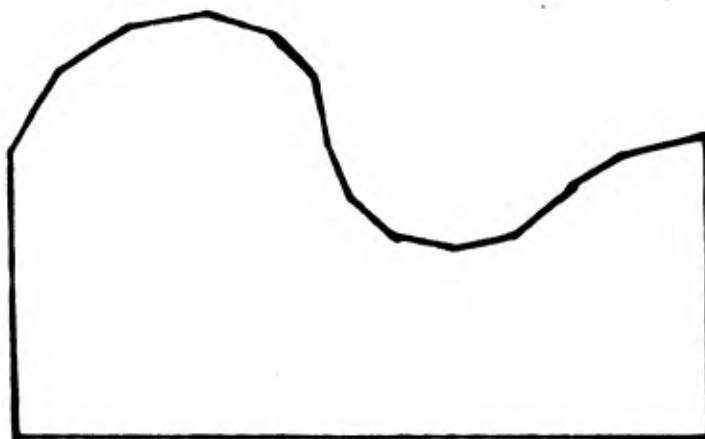


Figura 4.7.3.

Se tiene que:

$$\bar{\Delta x} = X_{i+1} - X_i$$

$$N = \frac{\bar{\Delta x}}{\bar{F}}$$

$$X'_{i+1} = X_i + N \bar{F}$$

El número de pulsos N que se envía a un actuador en un intervalo de tiempo Δt es un número entero (positivo o negativo), por lo que el error máximo \bar{e}_{MAX} entre X_{i+1} y X'_{i+1} es:

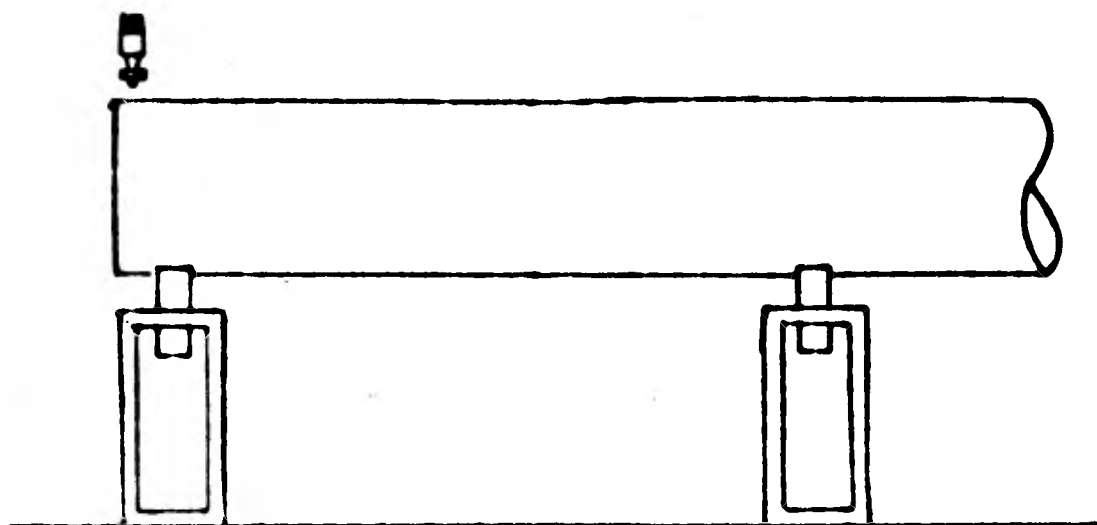
$$\bar{e}_{MAX} = |X'_{i+1} - X_{i+1}| = \bar{F}$$

La interpretación del signo de N_i indica el sentido en que debe moverse el i -ésimo actuador.

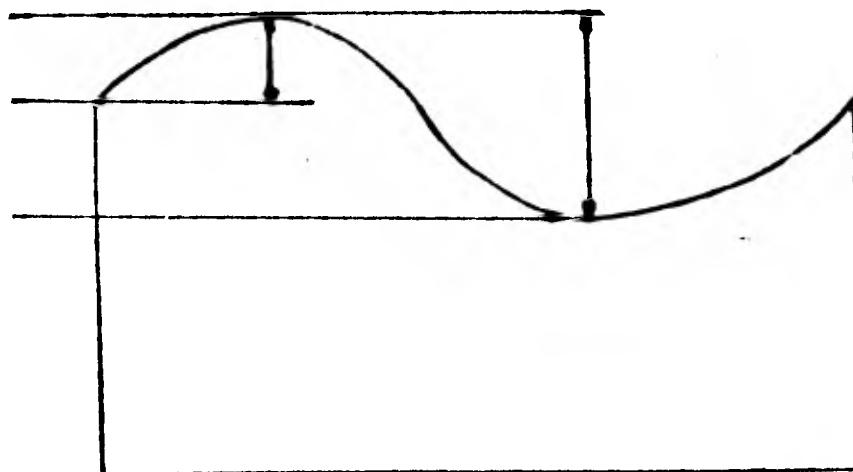
Quando se reduce el intervalo de simulación Δt es posible disminuir el error por aproximación, mientras que el error debido a la resolución de los actuadores permanece constante.

Uno de los objetivos del diseño era obtener una máquina de operación sencilla. Con base en lo anterior se incluyó en la simulación una rutina de posicionamiento inicial que garantizase que el tubo por habilitar sería cortado con un desperdicio mínimo, a la vez que proporcionase al operador de la máquina una secuencia de operación única, independiente del tipo de corte y del tamaño del tubo.

La rutina de inicialización se comienza cuando el operador coloca el tubo sobre los rodillos y posiciona el soplete según lo muestra la (figura 4.7.4)



De acuerdo con el perfil mostrado en la (figura 4.7.5) el punto A corresponde a un punto de desplazamiento máximo en X, mientras que el B corresponde al desplazamiento del soplete en la posición angular de referencia. Como resulta claro hay que desplazar el soplete de B hacia A una distancia Δx .



Como parte de la rutina de inicialización es necesario además colocar el soplete con la inclinación que determine el bisel en la posición angular de referencia, así como precalentar la superficie del tubo antes de iniciar el corte.

Durante la simulación se verifica también que el desplazamiento del soplete, indicado como A_1 en la (figura 4.7.5) sea menor que la carrera disponible en la máquina para el desplazamiento longitudinal del soplete, pues de no cumplirse esta condición el corte no puede efectuarse.

4.8 Control

Se conoce como etapa de control aquella en que se envían a los actuadores las señales generadas durante la simulación. Como se menciona en el — anexo A, los motores de pasos deben recibir pulsos eléctricos como señales para operar. Por cada pulso recibido y para frecuencias bajas de pulsos, el rotor se desplaza angularmente una magnitud constante a la que se ha — llamado resolución.

La principal tarea en la etapa de control es convertir la tabla (N_i, A_i) $i = 1 \dots\dots$ que se produce en la simulación en el conjunto de pulsos — que deben recibir los motores.

Sea N_i el número de señales que deben enviarse en el intervalo de tiempo — t_i , donde $i = 1, 2, 3, \dots$. La frecuencia de aparición de las señales en — el intervalo i -ésimo y el período correspondiente están dados, respectivamente, por:

...

$$f_i = \frac{N_i}{\Delta t_i} \quad \text{y} \quad T_i = \frac{\Delta t_i}{N_i} \quad (4.8.1)$$

Para fines de control se define un intervalo de control (Δt_c) como el período con el que se verificará la necesidad de enviar un pulso. De esta manera, si n = número de veces que se verificará la ocurrencia de un pulso en el intervalo Δt_i y k = número de pulsos que se ha enviado en Δt_i , se requiere cumplir la condición.

$$n \Delta t_c > k t_i \quad (4.8.2)$$

Para $n = 1, 2, \dots, \Delta t_i / \Delta t_c$ y $k = 0, 1, 2, \dots, N_i$. Si la desigualdad (4.8.2) se cumple se envía el pulso y se incrementa k y n haciendo

$$k = k + 1 \quad \text{y} \quad n = n + 1$$

Si no se cumple la desigualdad solo se incrementa n , esto es :

$$n = n + 1$$

Quando el valor de $k = N_i$ ó $n = \Delta t_i / \Delta t_c$ se incrementa 1 en la unidad, pasando al siguiente intervalo de simulación. El error máximo en el tiempo de aparición de un pulso está dado por el intervalo de control (típicamente 1 ms.), que debe ser un submúltiplo entero del intervalo de simulación Δt_i para evitar pérdida de información cuando se pasa de un intervalo de simulación a otro. El valor Δt_c debe cumplir además con la condición.

$$\Delta t_c < T_{i \min} \quad (4.8.3)$$

para garantizar que la desigualdad (4.8.2) se cumplirá N_i veces aún en el caso de $N_{i \max}$.

En la (figura 4.8.1) se muestra un diagrama de bloques del algoritmo de control.

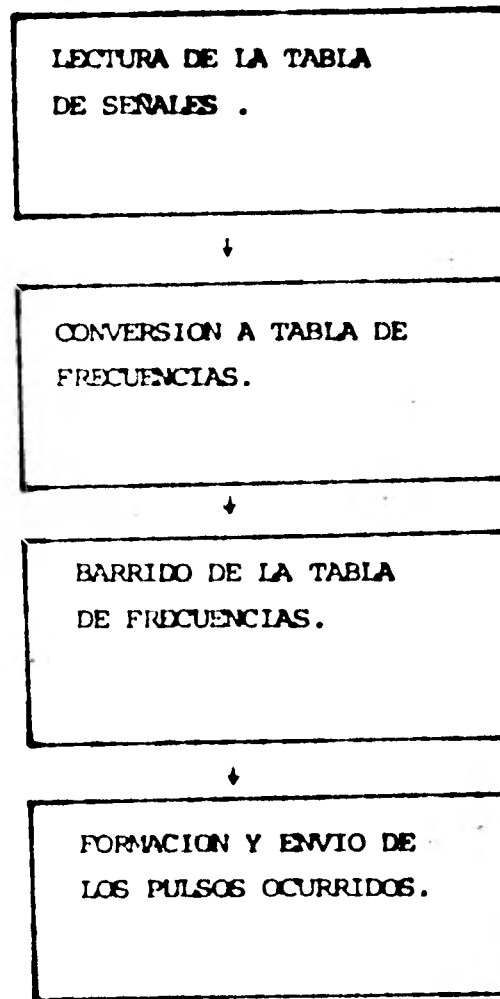


FIGURA 4.8.1. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL DEL SISTEMA

La generación de la señal de barrido o interrupción (que se produce con una frecuencia $1/\Delta t_c$) es ajena al procesador de la computadora, por lo que no depende de las operaciones que éste efectúa entre cada interrupción.

Debido a lo anterior es importante garantizar que todos los cálculos que se efectúan entre interrupciones puedan concluir. A fin de minimizar el tiempo de ejecución de dichas operaciones la mayor parte de las rutinas de la etapa de control se codificaron en lenguaje ensamblador. Cuando las interrupciones ocurren con tal frecuencia que las rutinas de control no han concluido el programa de computadora avisa de la imposibilidad de efectuar correctamente el corte e interrumpe su ejecución.

En el anexo E se presenta un detalle el programa de computadora empleado en la etapa de control.

5. REFERENCIAS

1. Kuo, Benjamin C. **AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS.** Prentice-Hall, Inc., E.U.A. 1975.
2. Kuo, Benjamin C. **INCREMENTAL MOTION CONTROL.** SRL Publishing Company. E.U.A. 1979.
3. Kuo, Benjamin C. **THEORY AND APPLICATIONS OF STEP MOTORS.** West Publishing Company. E.U.A. 1974
4. Dovalf Ramos, Francisco Manuel. **DISEÑO FUNCIONAL DE UNA CORTADORA DE TUBOS.** Tesis Profesional, Facultad de Ingenierfa UNAM. 1980.
5. American Welding Society, Inc. **STRUCTURAL WELDING CODE.** AWS D.1.1. Rev 1-77 E.U.A. 1977
6. W.J. Patton. **THE SCIENCE AND PRACTICE OF WELDING.** Prentice-Hall, Inc. E.U.A. 1967.
7. A.C. Leenhouts and C.S. Wilson. **TORQUE CONTROL OF PM STEP MOTORS IN HIGH PERFORMANCE APPLICATIONS.** The Superior Electric Company. E.U.A. 1979.
8. A.C. Leenhouts. **STEPPING MOTORS IN INDUSTRIAL MOTION CONTROL.** The Superior Electric Company. E.U.A. 1980. Proceedings JACC 1980.
9. R. Gauthier, L.D. Mieker, C.K. Taft. **STEPPING MOTOR DYNAMICS AND THE PHASE PLANE.** Proceeding JACC 1980. E.U.A. 1980.
10. F.M. Di Nuzzo. **DEVELOPMENT OF PREPROGRAMMED SEQUENCES FOR STEPPING MOTORS.** Proceedings JACC 1980. E.U.A. 1980.
11. T.J. Harned. **AN UNIQUE MEASUREMENT SYSTEM FOR EXPERIMENTAL PHASE PLANE GENERATION.** Proceedings JACC 1980. E.U.A. 1980.
12. P.S. Dietz. **USING MATHEMATICAL MODEL TO DETERMINE THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF VARIOUS STEPPING MOTORS DRIVE SCHEME** Proceedings JACC 1980. E.U.A. 1980.

13. J.L. Marisa. DINAMICA. Editorial Reverté S.A. España. 1980.
14. V.M. Faires. DESIGN OF MACHINE ELEMENTS, fourth edition. The Mac Millan Company, New York. E.U.A. 1969.
15. Kimball y Barr. CONSTRUCCION DE ELEMENTOS DE MAQUINAS. Ed. Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana. México. 1947.
16. Digital Equipment Corporation. DR11-K INTERFACE USER'S GUIDE AND MAINTENANCE MANUAL. Digital Equipment Corporation. E.U.A. 1975.

ANEXO A

MOTORES DE PASOS

A.1 Descripción

Los motores de pasos son dispositivos electromagnéticos cuya característica fundamental es que proporcionan desplazamientos angulares discretos. Sus orígenes se remontan a la tercera década de este siglo, pues si bien algunos de los tipos que hoy se usan ya existían para entonces, no se empleaban como motores de pasos. El principal obstáculo para su desarrollo estribaba en la imposibilidad de alcanzar altas velocidades y en el alto costo de los equipos necesarios para controlarlos. Los acelerados avances de la electrónica en los últimos años han propiciado el empleo intensificado de los motores de paso en aplicaciones cada día más diversas.

Las ventajas que ofrecen los sistemas con motores de paso sobre los sistemas convencionales de corriente directa y alterna son:

- Los motores de pasos son dispositivos de movimiento discreto inherentemente porque tienen mayor compatibilidad con los sistemas modernos de control digital.
- El error de posicionamiento no es acumulativo.
- Se pueden emplear en sistemas de control de malla abierta con lo que se evitan problemas asociados a la realimentación como estabilidad, etc.
- Es más sencillo diseñar sistemas de control con motores de pasos para velocidades de operación bajas.

Existen diversos tipos de motores de pasos, pero los de uso más común son:

- Motores de solenoide y trinquete.
- Motores de movimiento armónico.
- Motores de reluctancia variable.
- Motores híbridos.
- Motores electrohidráulicos.

Aún cuando sus formas de operación pueden ser muy distintas , las señales de entrada que producen los desplazamientos angulares discretos son normalmente trenes de pulsos. El motor debe desplazarse entonces, tantos pasos como pulsos tenga el tren que recibe.

A.2 TIPOS DE MOTORES DE PASOS

A.2.1 Motor de solenoide y trinqueta

El motor de solenoide y trinqueta, como su nombre lo indica, posee solenoides para producir los movimientos discreto y un trinquete para detener el rotor en una posición determinada. En la figura A.1 se muestra un diagrama de este tipo de motor.

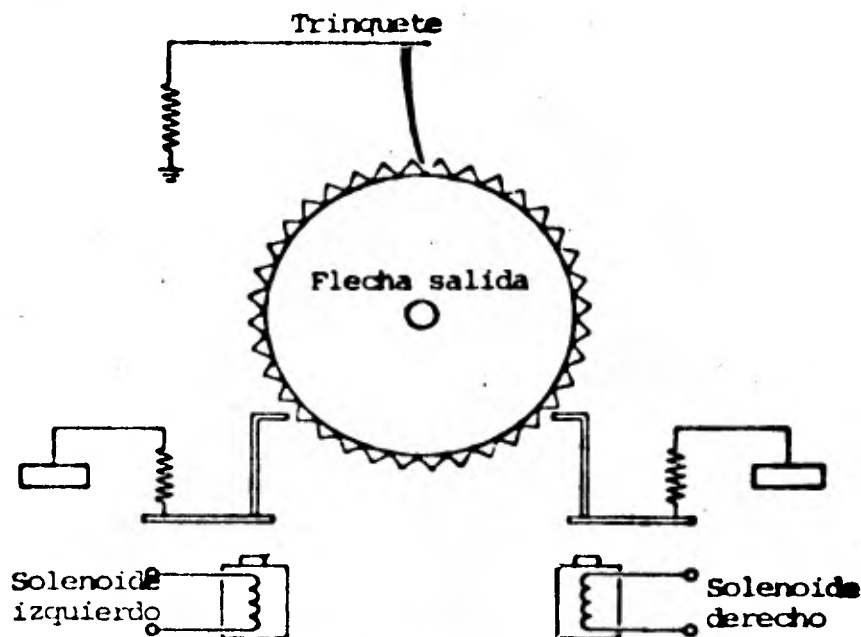


Figura A.1.

El principal atractivo de estos motores es su bajo costo a fabricación, sin embargo, existen limitaciones físicas en su construcción y en la velocidad de respuesta de los solenoides que les impiden alcanzar altas velocidades de operación. Presentan problemas de desgaste mecánico por el continuo roce y golpeteo de las partes que lo componen. No son adecuados, para proporcionar altas potencias.

A.2.2 Motores de Movimiento Armónico

El motor de movimiento armónico consta de un estator circular internamente dentado, de un rotor flexible ovalado, externamente dentado y de un conjunto de polos magnéticos distribuidos sobre el estator. En la Figura A.2 se muestra un esquema de este motor.

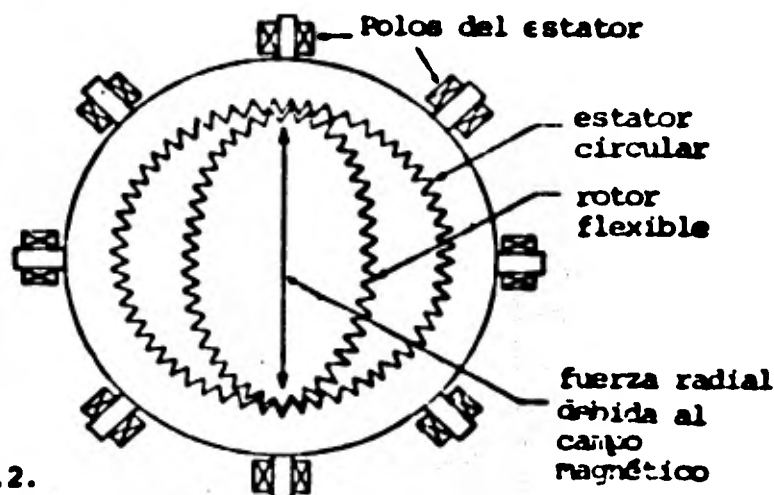


Figura A.2.

La rotación del rotor del motor se produce cuando el campo magnético completa una revolución. El rotor flexible rota entonces en la dirección contraria una distancia igual a la diferencia entre el perímetro del estator y el del rotor.

Las mayores ventajas de este tipo de motores son que alcanzan revoluciones muy altas (hasta 2000 pasos/revolución), pueden operar a altas velocidades (6000 pasos/segundos) y tienen velocidad de respuesta alta. Su empleo se restringe por las bajas velocidades de la flecha del motor y por la necesidad de un mantenimiento constante.

A.2.3 Motores de Reluctancia Variable

Este tipo de motor de pasos es muy popular por su construcción sencilla y gran robustez. Existen dos tipos de motores de reluctancia variable que

son el de arreglo simple y el de arreglo múltiple. En ambos casos pueden ser de tres o más fases distintas. Los principales elementos de estos motores son un rotor dentado sin excitación y un estator dentado con embobinado. El número de dientes en el rotor y en estator varía según el tipo de motor y según la magnitud del desplazamiento angular que proporciona por cada paso (magnitud que se conoce como resolución).

En la Figura A.3 se muestra un diagrama de un motor de arreglo múltiple y de tres fases. Tanto el rotor como el estator tienen 12 dientes; los dientes de las tres secciones del rotor están alineados, mientras que los de las secciones del estator se encuentran defasados uno con respecto al otro un tercio del ángulo entre diente y diente.

El rotor gira cuando se conmuta adecuadamente la energización de los embobinados. Tómese por caso la situación de la figura y supóngase que se energiza la fase (A). Los dientes del rotor se alinearán con los de la fase (A) del estator buscando la posición de menor reluctancia. Si se desconecta la fase (A) y se conecta la (B), el rotor girará hasta alinear sus dientes con los de la fase (B). La secuencia se completa energizando la fase (C) y desenergizando la (B). Para continuar con el movimiento se debe repetir la secuencia (A, B, y C) tantas veces como sea necesario. Si la secuencia se invirtiese (C, B, y A) el movimiento cambiaría de dirección. Como resulta claro del esquema los motores de paso de reluctancia variable requieren de al menos tres fases para ser direccionables.

El funcionamiento de los motores de arreglo simple es similar, excepto que existe una sola sección del rotor y del estator. El número de dientes del estator que magnetiza cada fase es igual al cociente del número total de

A.6.

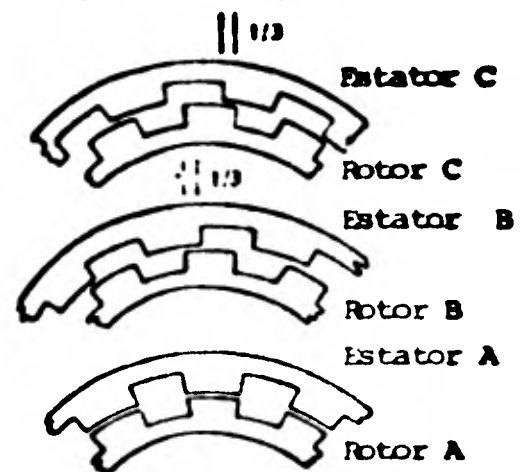
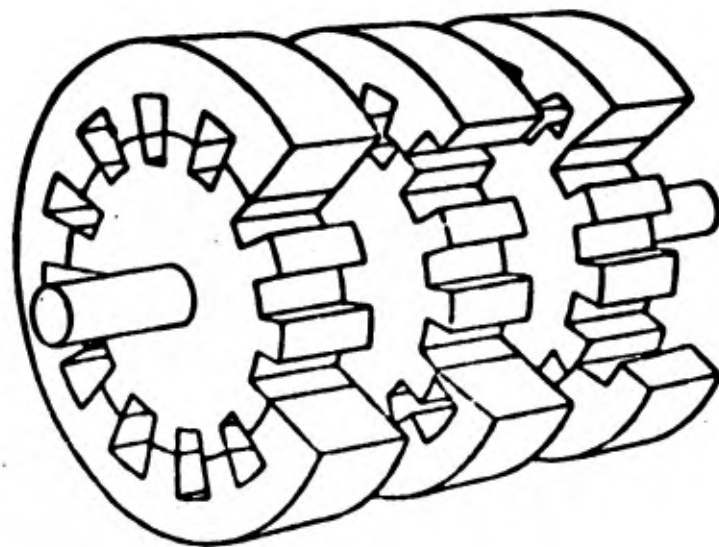


Figura A.3.

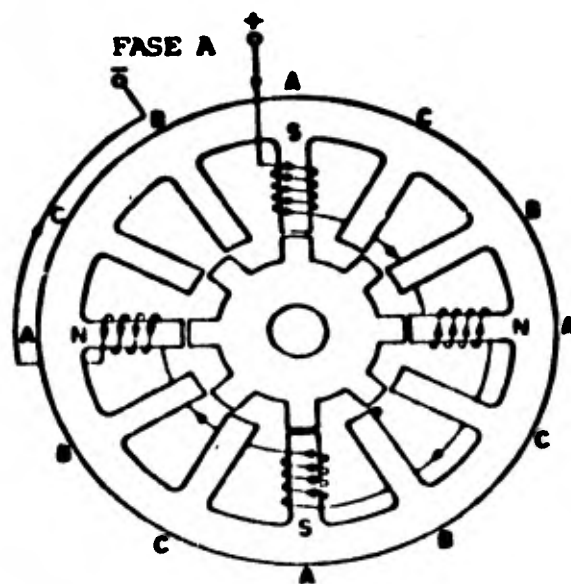


Figura A.4.

dientes entre el número de fases y debe ser un número entero (Figura A.4).

La principal ventaja de estos motores es que pueden operarse a altas velocidades (hasta 15000 pasos/segundo) y su mayor desventaja es que presentan problemas de oscilación y sobretiro. Estos motores tienden a desaparecer por la baja potencia que pueden proporcionar y están siendo sustituidos por motores híbridos que describiremos más adelante.

A.2.4 Motores Híbridos.

Estos motores fueron diseñados originalmente para funcionar como motores síncronos de baja velocidad, y por eso también se les conoce con el nombre de motores síncronos de inducción. Es posible operar estos motores como motores de pasos aplicando pulsos a los embobinados. El nombre de motores híbridos se debe a que combinan los principios de funcionamiento de distintos tipos de motores de pasos.

El motor consta de un rotor y un estator dentados divididos en dos secciones. En el rotor las dos secciones están separadas por un imán permanente en forma de disco que polariza magnéticamente cada una de las secciones. En la figura A.5 se muestra los esquemas de las vistas axial'y seccional de un motor híbrido en ellas se puede notar que el número de dientes del rotor y del estator no coincide y que las dos secciones del rotor están defasadas, una con respecto a la otra, la mitad del paso angular entre los dientes del rotor.

Para explicar su funcionamiento considérese la Figura A.6 que muestra un motor de dos fases con ocho dientes en el estator y dos en el rotor por cada -

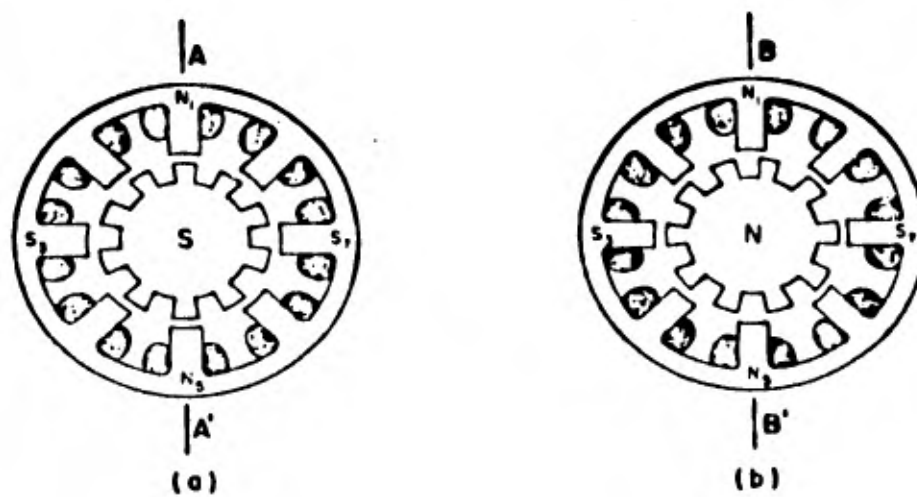
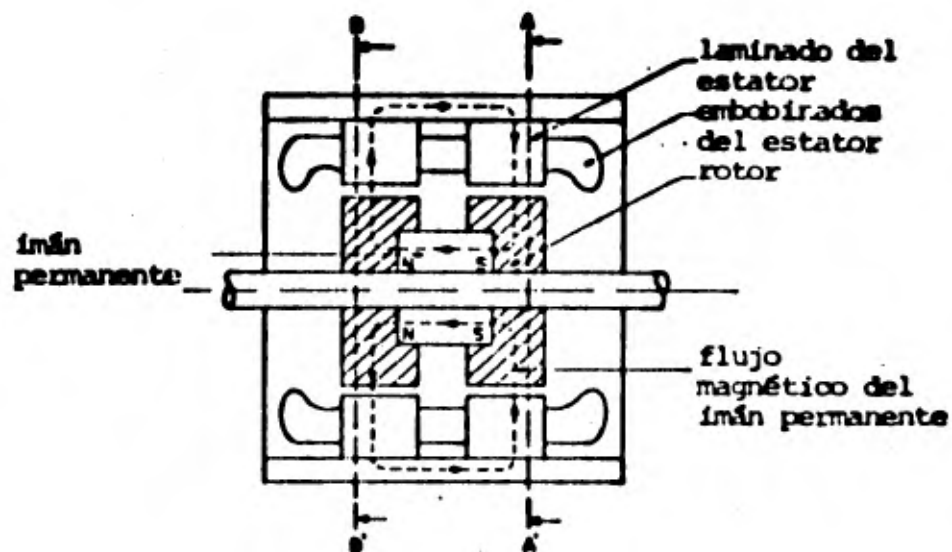


Figura A.5. Vistas axial y seccional de un motor de pasos híbrido.

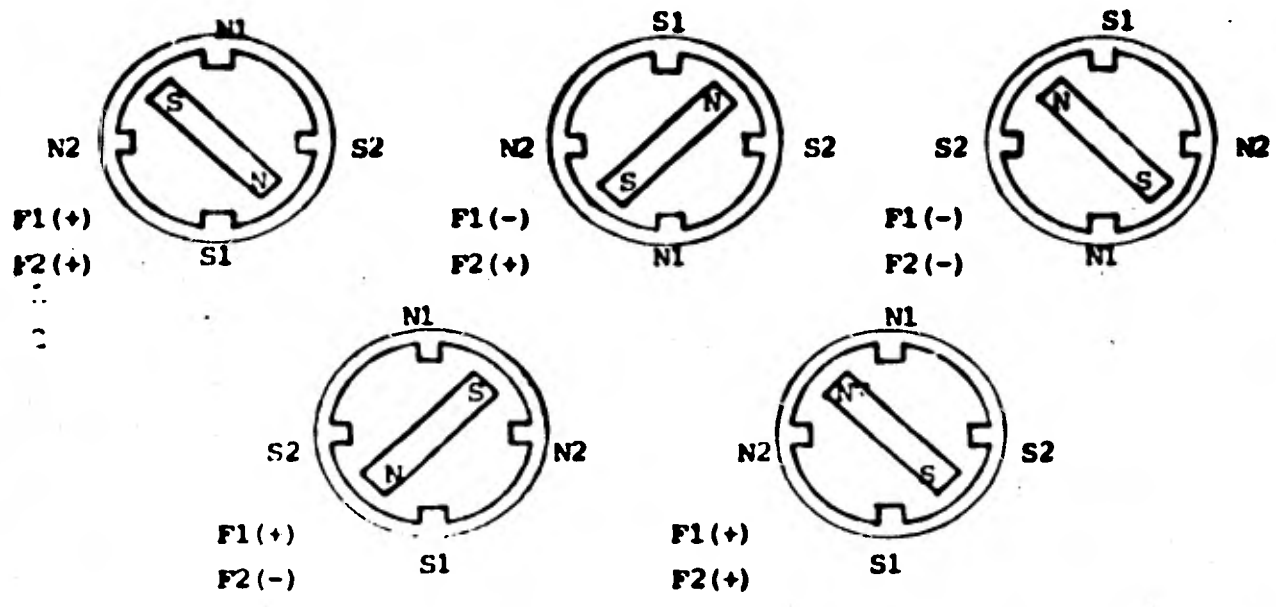


Figura A.6.

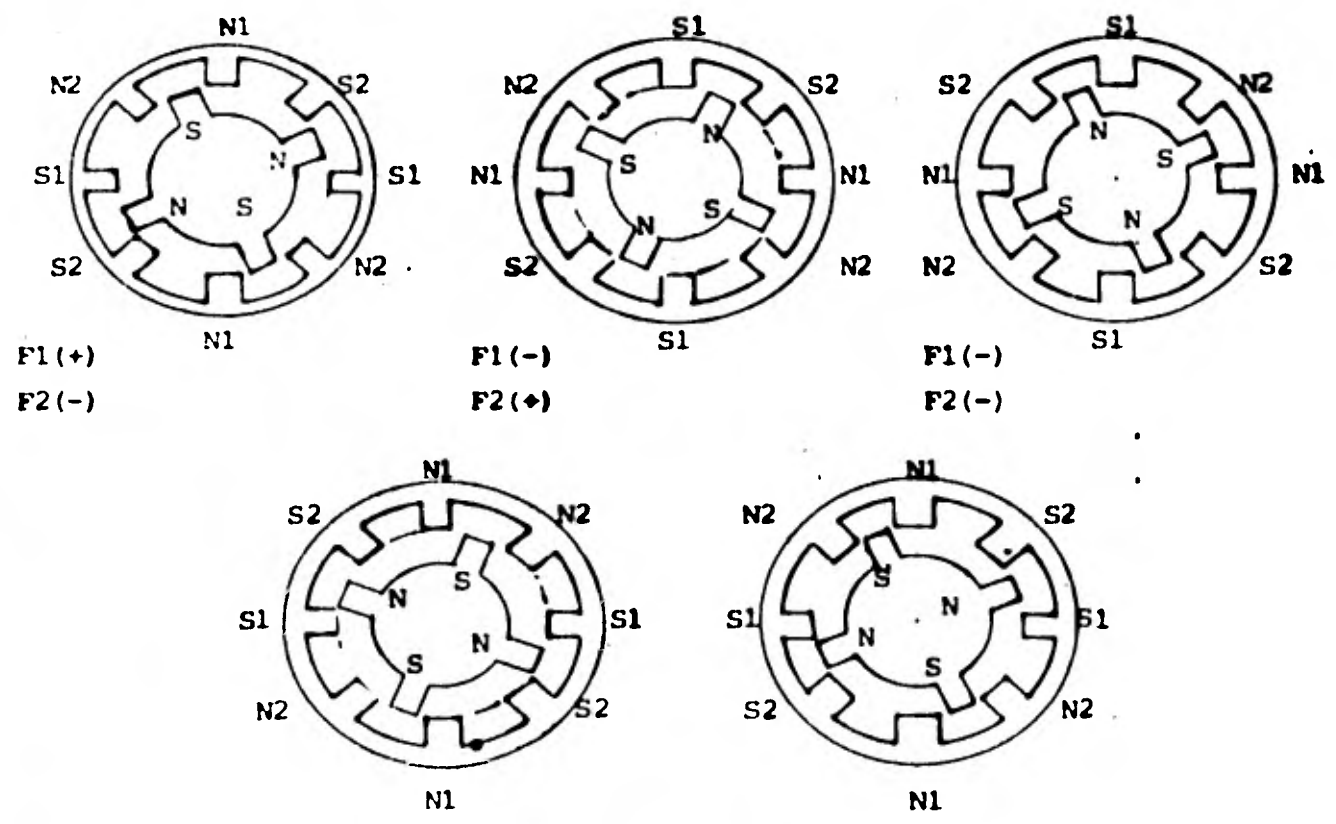


Figura A.7.

sección. La figura contiene los esquemas de cuatro posiciones consecutivas del motor de pasos que se logran invirtiéndose la polaridad de los embobinados de las fases 1 y 2 en forma alternada. El número de pasos que el motor da en una revolución completa se obtiene mediante la expresión.

$$N = \frac{N_e - N_r}{N_e - N_r}$$

donde N_e = número de dientes del estator, N_r = número de dientes del rotor - en ambas secciones y N = número de pasos por reducción, en este caso:

$$N = \frac{8 \times 4}{8 - 4} = \frac{32}{4} = 8$$

En la Figura A.7 se muestra el diagrama del movimiento de otro motor de pasos sólo que éste es de cuatro pasos por revolución, cuando se quiere mover el motor en la dirección contraria se requiere invertir a partir de un estado inicial la secuencia de cambio de polaridad en los embobinados.

La relación del número de dientes del rotor al estator está dado por:

$$N_r = m N_e \pm p$$

donde m = cualquier número entero positivo y p = número de polos (dientes) por fase (para los casos mostrados en la Figura A.6 y A.7. m vale 1 en ambos - casos y p 4 y 2 respectivamente)

En la práctica los embobinados de este tipo de motores se usan bipartidos - para lograr que el movimiento se produzca únicamente con interrupciones de corriente en los embobinados y no con su inversión. De esta manera se elimina la necesidad de una fuente bipolar, no sin menoscabo del par total que entrega el motor, que se reduce a poco más de la mitad del valor original.

El principal problema de estos motores es que su potencia está limitada por el tamaño de los imanes permanentes que emplean. (los motores más grandes de este tipo pueden entregar hasta un HP). Su velocidad de operación es alta (10000 pasos/segundo), que si bien es menor que la que alcanzan los motores de reluctancia variable, no ha impedido que su uso difunda rápidamente y sean los motores de pasos más empleados en la actualidad.

A.2.5 Motores de Pasos Electrohidráulicos.

Este tipo de motor se desarrolló para resolver los problemas de potencia de los motores de pasos descritos anteriormente. Se construyó acoplando un motor de pasos convencional con uno hidráulico que actúa como amplificador del par entregado por el primero. En la Figura A.8 se muestra un diagrama de bloques de este motor.

Utilizan motores hidráulicos de tipo axial y de desplazamiento fijo. El gasto de aceite requerido es por tanto, proporcional a la velocidad del motor. Como desventaja de estos motores se puede mencionar la necesidad de contar con el equipo para operar el motor hidráulico costoso y de difícil mantenimiento.

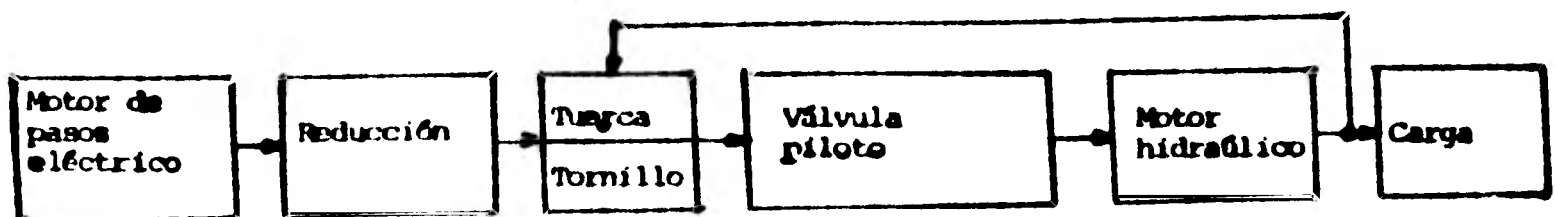


Figura A.8.

A.3 Modelo para la simulación del comportamiento dinámico de un motor de pasos.

A.3.1 Modelo eléctrico de un motor de pasos

Los motores usados son motores de pasos híbridos con dos bobinas bipartidas que equivalen a cuatro fases. Desde el punto de vista eléctrico pueden representarse mediante el esquema que se muestra en la figura A.3.1. El modelo que se desarrollará se puede generalizar con facilidad para otras configuraciones.

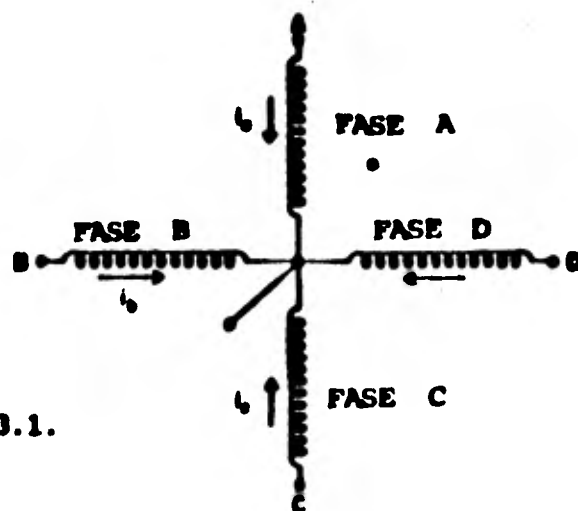


Figura A.3.1.

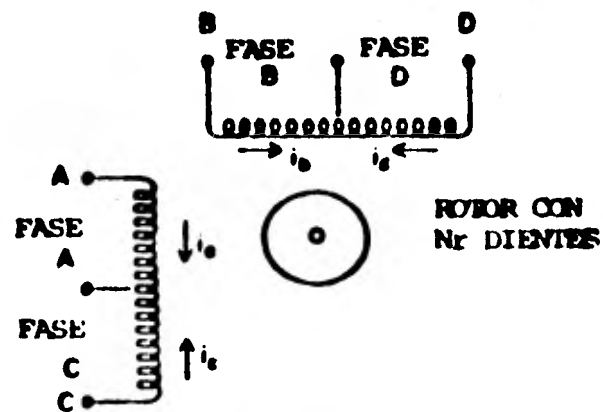
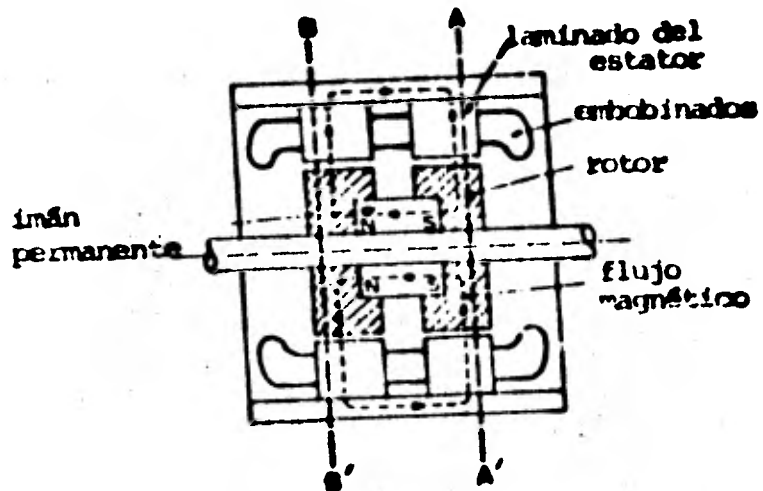


Figura A.3.2.

El modelo comúnmente aceptado (Ref. 2) se basa en las siguientes hipótesis:

- H.1 La permeancia del estator varía senoidalmente con la posición del rotor.
- H.2 Las corrientes parásitas y los efectos de histéresis son despreciables.
- H.3 El embobinado de cada fase está senoidalmente distribuido en la periferia del estator.

Considérese la figura A.3.2 que muestra el esquema de un motor de pasos. Como ya se explicó en la descripción de los motores híbridos las dos secciones del rotor están defasadas entre sí la mitad del paso angular entre los dientes del rotor.

Llámesse θ_{sk} a la posición angular de k-ésimo diente de un estator con N_e dientes; entonces,

$$\theta_{sk} = 2\pi k/N_e \quad (\text{rad}) \quad (\text{A.3.1})$$

donde $k=0,1,2,\dots,N_e-1$. Por la hipótesis H.1 la permeancia para el k-ésimo diente del estator en las secciones A y B será

$$\begin{aligned} P_{kA} &= P_f + P_v \cos N_R (\theta - \theta_{Sk}) \\ P_{kB} &= P_f - P_v \cos N_R (\theta - \theta_{Sk}) \end{aligned} \quad (\text{A.3.2})$$

donde N_R = número de dientes en el rotor; θ = posición angular -

del rotor; P_g y P_v = constantes.

Como la distribución de los embobinados se supuso senoidal (suposición poco realista) el número de vueltas que acoplan el k -ésimo diente del estator con los embobinados de las cuatro fases es:

$$\begin{aligned} N_{kA} &= N_p \cos (p\theta_{Sk}) \\ N_{kB} &= N_p \cos (p\theta_{Sk} - \pi/2) \\ N_{kC} &= N_p \cos (p\theta_{Sk} - \pi) \\ N_{kS} &= N_p \cos (p\theta_{Sk} - 3/2\pi) \end{aligned} \quad (A.3.3)$$

donde N_p = número de vueltas efectivas por polo y p = número de polos - por fase.

La ecuación de voltajes para una fase del motor es:

$$V_R = i_R R_R + \frac{d\lambda_k}{dt} \quad (A.3.4)$$

donde V_R = voltaje aplicado a la fase k ; i_R = corriente en la fase k ; λ_k = acoplamiento magnético de la fase R ; para $k = a, b, c, d$.

Los acoplamientos magnéticos (λ) tienen componentes debidas a cada una de las fases y al imán permanente del rotor, es decir:

$$\lambda_k = \lambda_{ka} + \lambda_{kb} + \lambda_{kc} + \lambda_{kd} + \lambda_{kf} \quad (A.3.5)$$

donde λ_{kj} = acoplamiento magnético de la k -ésima fase debido a la

corriente en la j -ésima fase, $j = a, b, c, d$; λ_{kf} = acoplamiento magnético de la k -ésima fase debido al imán permanente.

En la figura A.3.1 se muestra que las fases a y c componen un embobinado bifilar y las fases b y d el otro. Debido al arreglo de los embobinados existe un 100% de acoplamiento tanto entre las fases a y c, como entre las fases b y d, aunque los efectos de las corrientes son opuestos magnéticamente. Los embobinados a y c están en cuadratura con los embobinados b y d por lo que no existe flujo magnético común entre ellos.

Las consideraciones anteriores se resumen como:

$$\begin{array}{ll}
 \lambda_{ab} = \lambda_{ba} = 0 & \lambda_{ac} = -\lambda_{cc} \\
 \lambda_{bc} = \lambda_{cb} = 0 & \lambda_{ca} = -\lambda_{aa} \\
 \lambda_{ad} = \lambda_{da} = 0 & \lambda_{bd} = -\lambda_{dd} \\
 \lambda_{cd} = \lambda_{dc} = 0 & \lambda_{db} = -\lambda_{bb}
 \end{array}
 \quad (A.3.6) \qquad (A.3.7)$$

Si se sustituyen las ecuaciones A.3.6 y A.3.7 en la A.3.4 se tiene:

$$\begin{array}{l}
 V_a = R_a i_a + \frac{d}{dt} (\lambda_{aa} - \lambda_{cc} + \lambda_{af}) \\
 V_b = R_b i_b + \frac{d}{dt} (\lambda_{bb} - \lambda_{dd} + \lambda_{bf}) \\
 V_c = R_c i_c + \frac{d}{dt} (\lambda_{cc} - \lambda_{aa} + \lambda_{cf}) \\
 V_d = R_d i_d + \frac{d}{dt} (\lambda_{dd} - \lambda_{bb} + \lambda_{df})
 \end{array}
 \quad (A.3.8)$$

La fuerza magneto-motriz en el k-ésimo diente de las secciones A y B del estator está dada por:

$$F_{kA} = F_f + N_{ka} i_a + N_{kb} i_b + N_{kc} i_c + N_{kd} i_d \quad (A.3.9)$$

$$F_{kB} = -F_f + N_{ka} i_a + N_{kb} i_b + N_{kc} i_c + N_{kd} i_d$$

donde F_f = fuerza magneto-motriz desarrollada por el imán permanente. Entonces el flujo magnético a través del k-ésimo diente del estator de ambas secciones es:

$$\phi_k = F_{kA} P_{kA} + F_{kB} P_{kB} \quad k = 0, 1, 2 \dots Ne - 1$$

$$(A.3.10)$$

y el acoplamiento magnético para la fase a es de A.3.7

$$\lambda_a = \sum_{k=0}^{Ne-1} N_{ka} \phi_k = \sum_{k=0}^{Ne-1} N_p \phi_k \cos(p\theta S_k) \quad (A.3.11)$$

Sustituyendo A.3.1 y A.3.2 en A.3.9 y A.3.10 y sustituyendo A.3.1 y A.3.2 en A.3.11 se tiene:

$$\lambda_a = \sum_{k=0}^{Ne-1} 2N_p^2 P_f \cos\left(\frac{2pk\pi}{Ne}\right) \left[i_a \cos\left(\frac{2pk\pi}{Ne}\right) + i_c \cos\left(\frac{2pk\pi}{Ne} - \frac{\pi}{2}\right) + i_c \cos\left(\frac{2pk\pi}{Ne} - \pi\right) + i_d \cos\left(\frac{2pk\pi}{Ne} - \frac{3\pi}{2}\right) \right] + \sum_{k=0}^{Ne-1} 2N_p P_f F_f \cos\left(\frac{2pk\pi}{Ne}\right) \cos N_r \left[\theta - \frac{Zk\pi}{Ne} \right] \quad (A.3.12)$$

Empleando identidades trigonométricas A.3.12 finalmente queda:

$$\lambda_a = N_p^2 P_f N_e (i_a - i_c) + N_p P_v P_f N_e \cos N_r \theta$$

Similantemente:

$$\lambda_b = N_p^2 P_f N_e (i_b - i_d) + N_p P_v P_f N_e \cos N_r \theta$$

$$\lambda_c = N_p^2 P_f N_e (i_c - i_a) - N_p P_v P_f N_e \sin N_r \theta$$

(A.3.13)

$$\lambda_d = N_p^2 P_f N_e (i_d - i_b) - N_p P_v P_f N_e \sin N_r \theta$$

De las expresiones A.3.13 se definen la autoinductancia y la inductancia mutua, respectivamente, como:

$$L_{kk} = L_{ll} = N_p^2 N_e P_f$$

$$L_{kj} = 0 \quad \text{para } k = a, b, c, d \\ j \neq k$$

(A.3.14)

La importancia del resultado marcado en la ecuación A.3.14 es que la inductancia en los motores de pasos de imán permanente no depende de la posición del rotor θ .

El acoplamiento magnético debido al imán permanente se puede expresar como:

$$\lambda_{af} = K_a (i_{ac}) \cos N_r \theta$$

$$\lambda_{bf} = K_b (i_{ba}) \cos (N_r \theta - \pi/2)$$

(A.3.15)

$$\lambda_{cf} = K_c (i_{ca}) \cos (N_r \theta - \pi)$$

$$\lambda_{df} = K_d (i_{db}) \cos (N_r \theta - \frac{3}{2} \pi)$$

donde $k_j(i_l)$ = coeficientes que dependen de la permeancia del número de vueltas y de la corriente en las fases j y l y de la densidad de flujo del imán -

De las ecuaciones A.3.8 y A.3.7 y empleando los acoplamientos magnéticos como variables de estado, el modelo del comportamiento de un motor de pasos es:

$$\frac{d\lambda_a}{dt} = \frac{1}{2} [V_a - V_c] + \frac{R}{2} (i_a - i_c) \quad (\text{A.3.16})$$

$$\frac{d\lambda_b}{dt} = \frac{1}{2} [V_b - V_d] + \frac{R}{2} (i_b - i_d)$$

para $k = k_a = k_b = k_c = k_d$

De las ecuaciones A.3.13 y A.3.14 en A.3.16 se tiene:

$$\frac{d\lambda_a}{dt} = \frac{1}{2} [V_a - V_c] - \frac{R}{2L_1} \lambda_a + \frac{R}{2L_1} k_a (\lambda_a) \cos Nr\theta \quad (\text{A.3.17})$$

$$\frac{d\lambda_b}{dt} = \frac{1}{2} [V_b - V_d] - \frac{R}{2L_1} \lambda_b + \frac{R}{2L_1} k_b (\lambda_b) \cos (Nr\theta - \pi/2)$$

A partir de la solución de las ecuaciones, es posible expresar la corriente por cada uno de los enbobinados. Así de A.3.17, A.3.8, A.3.13 y A.3.14 - se tiene:

$$i_a = \frac{1}{2R} [V_a + V_c] + \frac{\lambda_a}{2L_1} - \frac{1}{2L_1} k_a (i_a) \cos Nr\theta$$

$$i_b = \frac{1}{2R} [V_b + V_d] + \frac{\lambda_b}{2L_1} - \frac{1}{2L_1} k_b (i_b) \cos (Nr\theta - \pi/2) \quad (\text{A.3.18})$$

$$i_c = \frac{1}{2R} [V_a + V_c] + \frac{\lambda_a}{2L_1} + \frac{1}{2L_1} k_a (i_a) \cos Nr\theta$$

$$i_d = \frac{1}{2R} [V_b + V_d] + \frac{\lambda_b}{2L_1} + \frac{1}{2L_1} k_b (i_b) \cos (Nr\theta - \pi/2)$$

La variación de la energía W almacenada en el sistema a través de una fase está dada por:

$$dW = \sum_j i_j d\lambda_j - T_e d\theta \quad (\text{A.3.19})$$

$$j = a, b, c, d$$

donde T_e = par efectivo en el sistema.

Integrando la expresión anterior bajo la consideración de que las fases se energizan cuando θ alcanza su posición final se tiene:

$$W = \int \sum_j i_j d\lambda_j \quad (\text{A.3.20})$$

$$j = a, b, c, d$$

La coenergía por definición es:

$$W^* = \int \sum_j \lambda_j di_j \quad (\text{A.3.21})$$

La coenergía total, se obtiene aplicando esta última expresión a las ecuaciones A.3.13. Se hace notar que el controlador energiza simultáneamente dos fases de embobinados bifilares distintos, es decir, las combinaciones ab, ad, bc y cd.

$$W_a^* = (K \cos N\theta) i_a$$

$$W_b^* = (K \cos N\theta) i_b$$

$$W_c^* = (k \sin N\theta) i_c$$

$$W_d^* = (K \sin N\theta) i_d$$

$$(\text{A.3.22})$$

$$W^* = W_a^* + W_b^* + W_c^* + W_d^*$$

$$(\text{A.3.23})$$

El par disponible está dado por:

$$T = \frac{\delta w^e}{\delta \theta} \quad (\text{A.3.24})$$

El par disponible para cada fase se obtiene de A.3.24 con A.3.23:

$$\begin{aligned} T_a &= (Nr_k \text{ Sen } Nr\theta) i_a \\ T_b &= (Nr_k \text{ Sen } Nr\theta) i_b \\ T_c &= -(Nr_k \text{ Cos } Nr\theta) i_c \\ T_d &= -(Nr_k \text{ Cos } Nr\theta) i_d \end{aligned} \quad (\text{A.3.25})$$

Como ya se mencionó sólo se energizan simultáneamente dos fases, por lo que la suma de los pasos disponibles debido a las fases energizadas es: siempre de la forma

$$T = k \text{ Sen } (Nr - \pi/2 k) \quad (\text{A.3.26})$$

donde $k = 1, 2, \dots$ se incrementa cada vez que se energiza una nueva pareja de embobinados (por ejemplo pasar de ab a ad).

El número de dientes del rotor se puede obtener como:

$$Nr = \frac{2\pi}{NR} \quad (\text{A.3.27})$$

donde $N =$ número de fases y $R =$ resolución del motor (rad/paso).

A.3.2) Par proporcionado por el motor.

El par producido al energizar una sola fase es aproximadamente de forma -
senoidal (figura A.3.3)

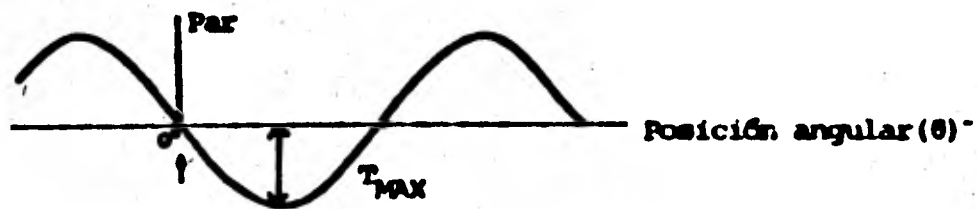


Figura A.3.3.

Esto es, la relación entre el par y la posición angular θ puede representar se por:

$$T = - K T_{\max} \text{Sen} \left[\frac{2\pi}{NR} \theta \right] \quad (\text{A.3.28})$$

donde T = par proporcionado por una fase del motor.

θ = posición angular del motor (rad)

N = Número de fases

R = Resolución del motor (rad/paso)

T_{\max} = par máximo que puede proporcionar el motor.

K = relación de la corriente actual a la nominal.

Si se considera el conjunto motor-controlador y éste cuenta con dos puertos de entrada de pulsos: uno, SR para avanzar un paso y otro CSR para retroceder un paso, entonces la expresión para el par está dada por:

$$T = - K T_M \text{ Sen } 2 \left(\frac{2\pi}{NR} (\theta - 1R) \right) \quad (\text{A.3.29})$$

en donde $i = \text{NSR} - \text{NCSR}$

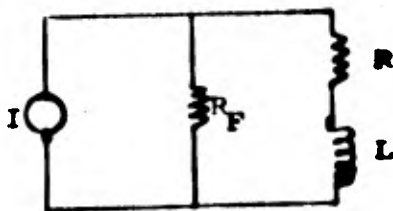
NSR es el número de pulsos enviados al puerto SR desde el punto inicial.

NCSR es el número de pulsos enviados al puerto CSR.

A.3.3.) Transitorio eléctrico en las fases del motor.

Los embobinados de los motores de pasos pueden energizarse utilizando fuentes de corriente δ (fuentes)de voltaje.

Considérese el esquema de una fase del motor de pasos que se muestra en la (figura A.3.4) en donde se ha supuesto que el embobinado se energiza con una fuente de corriente.



donde: L - inductancia del motor.

R - resistencia total del embobinado, cables, etc.

I - valor de la fuente de corriente.

R_F - resistencia interna de la fuente.

Figura A.3.4.

Como se puede demostrar la corriente en la inductancia está determinada por la ecuación:

$$i_c = I \left(\frac{R_F}{R + R_F} \right) \left(1 - e^{-\frac{R + R_F}{L} t} \right) \quad (\text{A.3.30})$$

Si $R_F \gg R$ y $R_F \rightarrow \infty$ la ecuación (A.3.30) se convierte en:

$$i_c = I \quad (\text{A.3.31})$$

puesto que

$$\frac{R_F}{R+R_F} \rightarrow 1$$

$$\text{y} \quad \tau = \frac{L}{R+R_F} \rightarrow 0$$

donde τ = constante de tiempo del circuito

De lo anterior se concluye que cuando se usa fuente de corriente para energizar los bobinados los transitorios de la corriente en el circuito puede despreciarse cuando R_F es muy grande.

Quando se utiliza fuente de voltaje el diagrama de la figura A.3.5 representa el circuito de una fase del motor de pasos

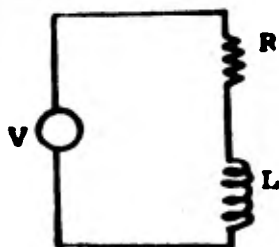


Figura A.3.5.

donde : V - Valor de la fuente de voltaje

L - Inductancia del motor.

R - Resistencia total de los bobinados, cables, fuente, etc.

La corriente en la inductancia está dada por:

$$i_c = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-R/Lt} \right) \quad (\text{A.3.32})$$

Como ocurre en los motores comerciales el valor de R es pequeño y los efectos de la constante de tiempo del circuito no son despreciables, pero varían según sea el tipo de controlador empleado, éstos se discutirán más adelante.

A.3.4) Modelo dinámico de un motor de pasos

El comportamiento dinámico de un motor con una carga inercial y con pérdidas viscosas y de rozamiento, de acuerdo con la 2a. ley de Newton, cumple con la ecuación

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} = T_T - T_f \frac{\dot{\theta}}{|\dot{\theta}|} \quad (\text{A.3.33})$$

donde J = inercia del motor y carga; B = amortiguamiento viscoso del sistema (fricción viscosa); T_T = par total proporcionado por el motor; T_f = pérdidas por fricción de Coulomb.

De (A.3.29) y (A.3.33) se tiene:

$$J\ddot{\theta} + B\dot{\theta} - KT_M \text{Sen} \left[\frac{2\pi}{NR} (\theta - 1R) \right] + T_f \frac{\dot{\theta}}{|\dot{\theta}|} = 0 \quad (\text{A.3.34})$$

Tanto las pérdidas por fricción (T_f), como el amortiguamiento viscoso (B) - se deberán únicamente a efectos mecánicos.

En variables de estado sin considerar los transitorios eléctricos

$$\frac{d\theta}{dt} = w \quad (\text{A.3.35})$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{B}{J} w - \frac{T_f}{J} \text{sign } w + \frac{KT_M}{J} \text{Sen} \left[50 \theta - k \frac{\pi}{2} \right]$$

w = velocidad angular

en cada instante de transición $k = k + 1$

o $k = k - 1$

según sea el caso para adelante o para atrás

$$\text{sign } a = \begin{cases} 1 & \text{si } a > 0 \\ 0 & \text{si } a = 0 \\ -1 & \text{si } a < 0 \end{cases}$$

A.3.5) Formas de operación de un motor de pasos

Como se mencionó en la descripción de los motores de pasos, una de sus mayores ventajas es que pueden operarse como un sistema de malla abierta. Para lograr cierto comportamiento, sin embargo, debe resolverse el problema de generación de las señales de control (pulsos) para mover un motor de pasos.

Existen diversas técnicas para producir la secuencia de tiempos con que deben de enviarse los pulsos al motor, se mencionarán algunas a continua-ción.

Estas técnicas resuelven problemas distintos, unas de ellas sirven para solucionar el de mover un motor con desplazamiento fijo en un tiempo mínimo otras sirven para resolver el problema de hacer que el motor de pasos siga una trayectoria con velocidades especificadas como función del tiempo.

Para resolver el problema de tiempo mínimo, comunmente se considera el movimiento del motor uniformemente acelerado y se generan los tiempos con base a una interpolación lineal, es decir,

Sea :

$$a(t) = k$$

$$w(t) = kt + w_0$$

(A.3.36)

$$\theta(t) = \frac{kt^2}{2} + w_0t + \theta_0$$

donde a = aceleración angular, w = velocidad angular, w_0 = velocidad inicial, θ_0 = desplazamiento inicial, k = corriente

Si se solucionan las ecuaciones (A.3.36) para valores de $\theta = R, 2R, 3R, \dots$ se encuentran los tiempos en que es necesario enviar cada pulso. Esta técnica sólo es adecuada a bajas velocidades de operación, cuando el comportamiento del rotor es similar al mostrado en la (figura A.3.6) los puntos 1, 2 y 3 corresponden a puntos en los que se envía un pulso al motor. Si se

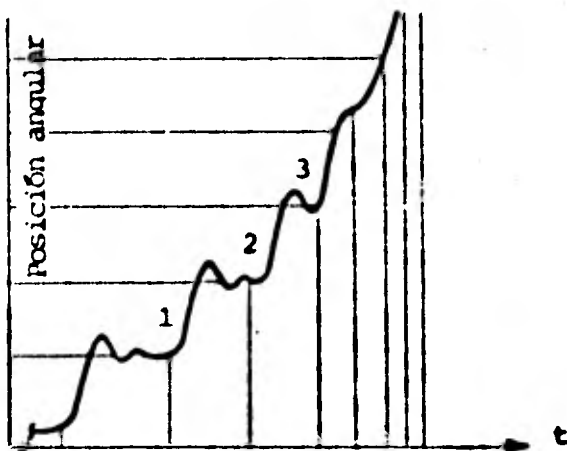


Figura A.3.6.

consideran las curvas de ángulo par (figura A.3.7) el par disponible para esta forma de operación está marcada con la línea oscura. Los puntos 1, 2, y 3 corresponden a los de la figura A.3.6 para valores de $\theta = R, 2R, 3R$.

Al aumentar la velocidad el rotor del motor no llega a un estado de "casi reposo" entre paso y paso (puntos 1, 2, 3), es entonces que la curva del desplazamiento versus tiempo tiene una representación como la que muestra la figura A.3.8. Los tiempos de conmutación de la corriente en los entobinados no coincidirán con los que se obtienen de las ecuaciones (A.3.36).

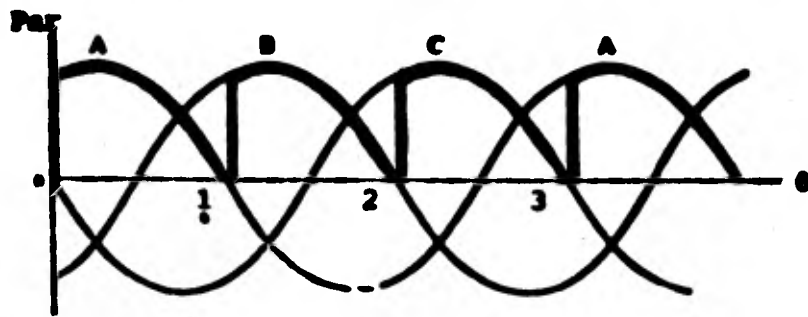


Figura A.3.7.

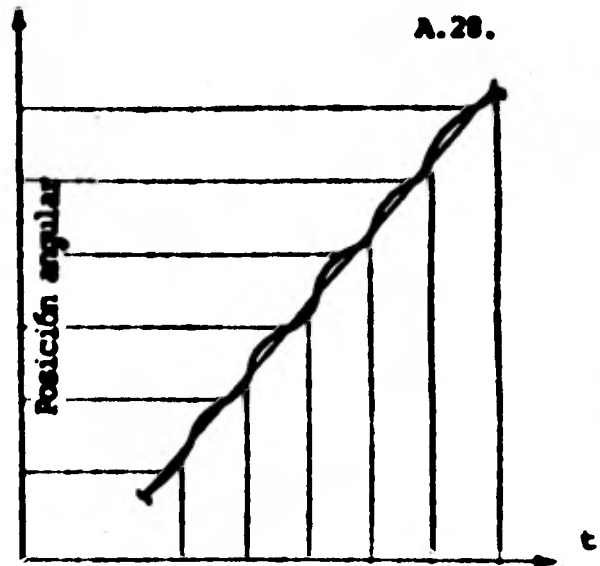


Figura A.3.8.

Cuando se quiere operar eficientemente un motor de pasos a altas velocidades existen dos criterios fundamentales. El primero consiste en cumplir con la ecuación.

$$T(t) = J(t) \ddot{\theta}(t) \quad (\text{A.3.37})$$

donde T = par, J = inercia del sistema, $\ddot{\theta}$ = acumulación angular.

Discretizando la ecuación (A.3.37) se puede considerar un par promedio (\bar{T}) para un cierto desplazamiento angular. En la figura A.3.9 se muestran cuatro valores de \bar{T} para un mismo desplazamiento angular. Resulta claro que controlando la posición

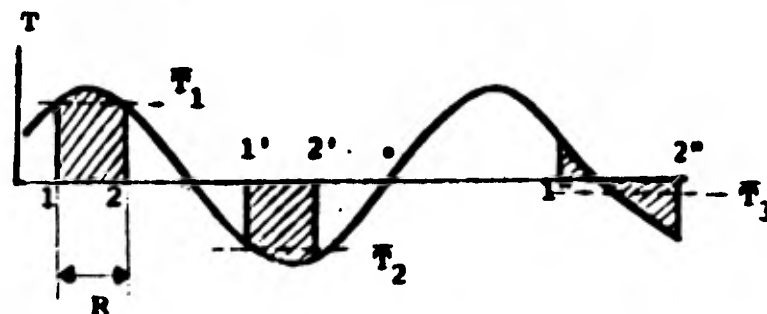


Figura A.3.9.

relativa de los puntos 1^i y 2^i para $i = 1, 2, 3, \dots$ es posible mantener el

valor de \bar{T} de tal forma que satisfaga la ecuación (A.3.37) para una inercia y una aceleración angular dadas en un cierto intervalo de tiempo Δt cualquiera. De la ecuación (A.3.28) el par promedio se puede encontrar como:

$$\bar{T} = \frac{T_{\max}}{\Delta\theta} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \text{Sen } \theta \, d\theta = \frac{T_{\max}}{\Delta\theta} (\text{Cos } \theta_2 - \text{Cos } \theta_1) \quad (\text{A.3.38})$$

donde θ está en grados eléctricos.

El otro criterio que se emplea consiste en cumplir con la condición

$$|\hat{V}(t_0) - V(t_0)| < \epsilon \quad \forall 0 \leq t_0 \leq t_f \quad (\text{A.3.39})$$

donde $\hat{V}(t_0)$ = velocidad del motor en el tiempo t_0 , $V(t_0)$ = velocidad deseada en el motor en el tiempo t_0 , ϵ = tolerancia o error admisible, t_f = tiempo final. Verificando la desigualdad (A.3.39) en cualquier instante t_0 se

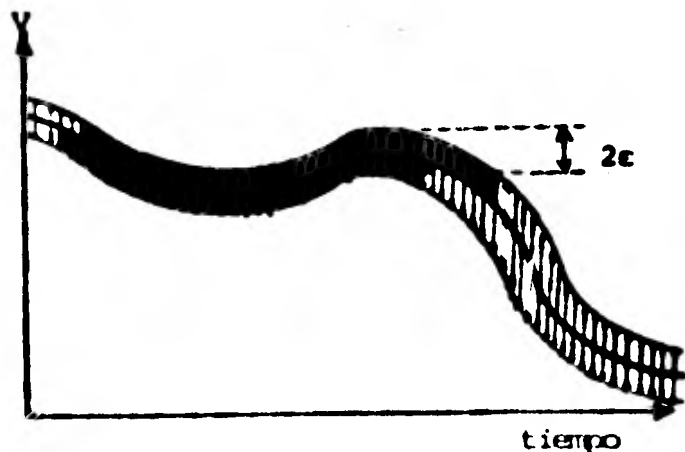


Figura A.3.10.

puede determinar si el valor absoluto del par debe aumentar o disminuir según sea el valor absoluto de la velocidad deseada ($V(t)$) se puede expresar como la curva de la figura A.3.10 la zona sombreada de la misma indica la máxima desviación admitida en la velocidad en cualquier instante.

Para cada caso es necesario verificar que el esquema de control planteado produce un sistema estable, es decir:

$$E : (\hat{V}(t_0) - V(t_0)) - K (\hat{\theta}(t_0) - \theta(t_0)) \quad (A.3.40)$$

donde E = error, θ $\hat{\theta}$ = posiciones angulares real y deseada respectivamente.

A.4) Controladores de los motores de pasos

La función de los controladores de los motores de pasos es convertir los trenes de pulsos en secuencias ordenadas de interrupciones o inversiones de corriente en los embobinados de los motores. La figura A.4.1 muestra el diagrama de bloques de un controlador típico.

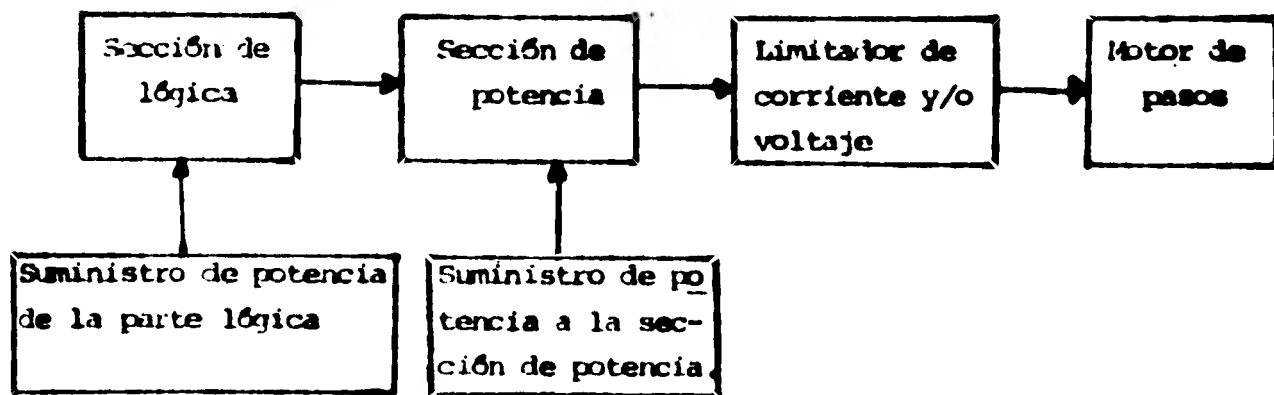


FIGURA A. 4. 1

En la sección de lógica se convierten los pulsos a señales que se dirigen

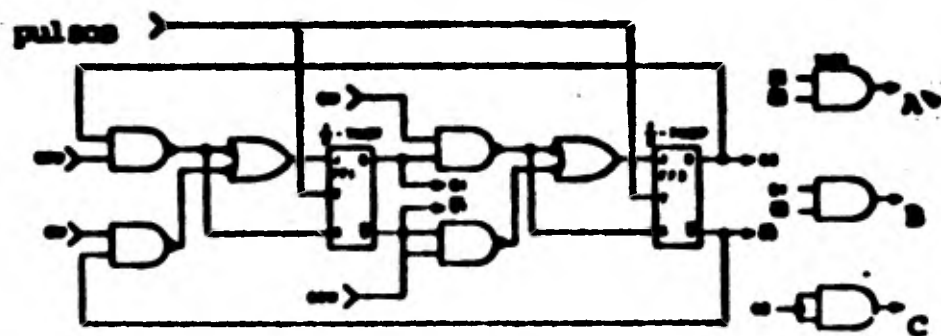


Figura A.4.2.

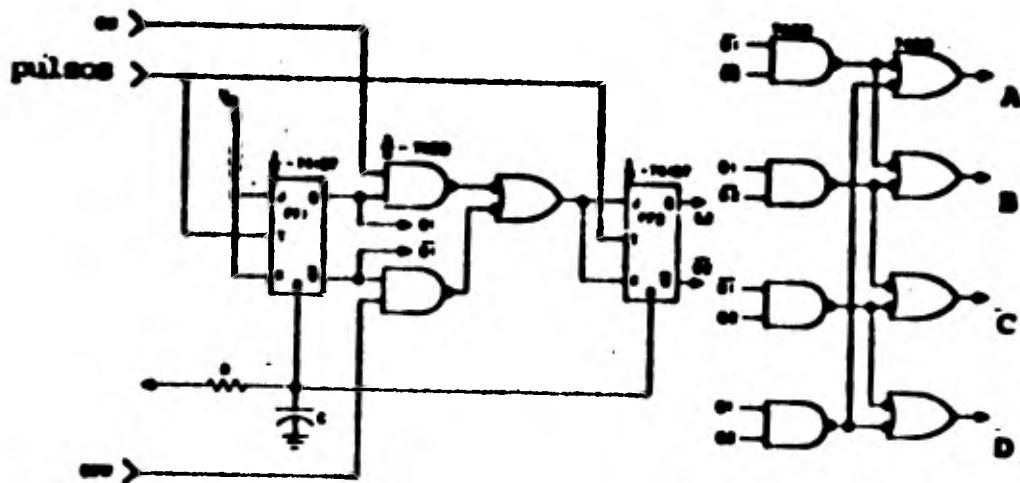


Figura A.4.3.

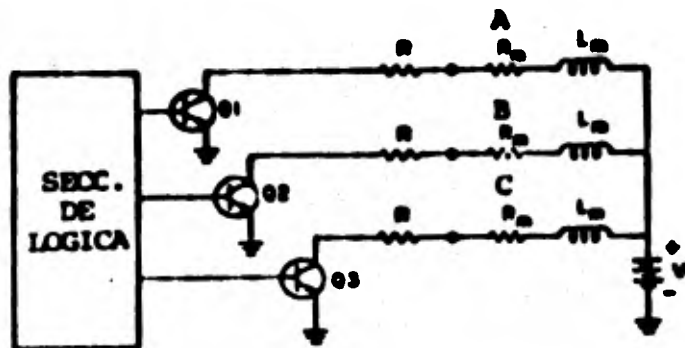


Figura A.4.4.

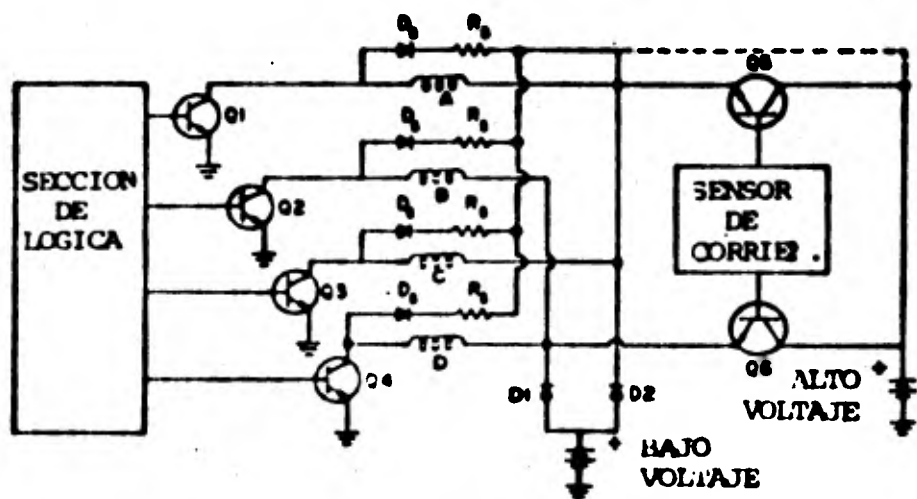


Figura A.4.5.

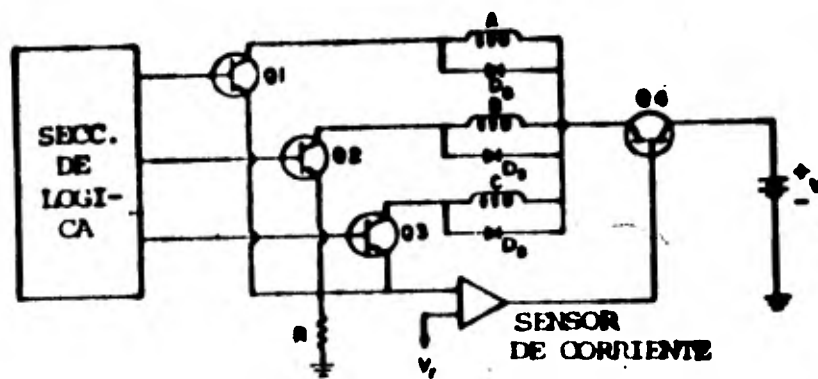


Figura A.4.6.

a los interruptores (normalmente transistores) de la sección de potencia - que se ocupa de regular el paso de corriente hacia los enbobinados de los motores.

Las figuras A.4.2 y A.4.3 contienen los esquemas de las secciones lógicas para motores bidireccionales de tres y cuatro fases.

Con respecto a la sección de potencia, que se conoce comúnmente como controlador, existen diversos tipos de arreglos, los más usados son:

- Controlador de resistencia en serie (Fig. A.4.4)
- Controlador de doble voltaje (Fig. A.4.5)
- Controlador con corte de voltaje (Fig. A.4.6)

El controlador de resistencia en serie incluye una resistencia en serie con el enbobinado del motor a la ecuación que describe el comportamiento de una fase energizada sin tomar en cuenta los efectos de la fuerza contra electromotriz es.

$$V = V_0 \left(1 - e^{-\frac{R_M + R_c}{L} t} \right) \quad (\text{A.3.33})$$

la constante de tiempo del sistema es

$$\tau = \frac{L}{R + R_M} \quad (\text{A.3.34})$$

de donde resulta claro que al aumentar R disminuye la constante de tiempo del sistema y puede aumentar la velocidad máxima del motor.

El inconveniente de este arreglo es que para mantener la corriente en el valor nominal es necesario aumentar el voltaje de alimentación V_0 en proporción casi directa a R (los valores de R_M normalmente son despreciables comparados a los de R por lo que la potencia disipada (P))

$$P = \frac{V_0^2}{R} \quad (A.3.35)$$

crece con el cuadrado de V_0 , sin embargo es el controlador más barato de los disponibles en el mercado.

El controlador de doble voltaje emplea una fuente de voltaje alto y otra de voltaje bajo. Cuando se energiza una fase se conectan ambas fuentes hasta que la corriente alcanza el valor nominal. Entonces se desconecta la fuente de voltaje alto, dejándose la otra que se calcula de acuerdo con los requerimientos nominales del motor. Este esquema es mucho más eficiente que el anterior y permite alcanzar velocidades altas ($\approx 6,000$ pasos/segundo) sin un aumento notable en el consumo de energía, aunque es más costoso.

El controlador de corte de voltaje tiene únicamente una fuente de alto voltaje. Existe un sensor que desconecta la fuente cuando el valor de la corriente excede en un cierto margen al de la nominal y vuelve a conectarla cuando el valor de la corriente está un cierto margen por debajo del de la nominal. Este esquema es el que permite alcanzar velocidades más altas ($\approx 10,000$ pasos/segundo) pero es el de costo más elevado.

La elección de alguno de los tipos de controladores mencionados está condicionada a la velocidad mínima a que deba operarse el motor y a la potencia de ésta pues, por ejemplo, resulta antieconómico utilizar un controlador de resistencia en serie para potencias altas y velocidades medias.

Para este proyecto se eligieron controladores de resistencia en serie pues las potencias eran bajas así como las velocidades de operación (menos de 800 pasos/seg).

DISEÑO MECÁNICO

B.1. Cálculo de los motores.

B.1.1. Estructura móvil.

Resolviendo la segunda Ley de Newton para el sistema que mueve el carro longitudinal del soplete se tiene:

$$T = (EJ) \alpha + T_f \quad (B.1.)$$

donde T=par requerido; EJ=inercia equivalente de las componentes; α =aceleración angular; T_f =fricción en el sistema.

La inercia de los componentes, reflejada en la flecha del motor, está formada por la inercia del carro móvil, la inercia del tornillo y la inercia del rotor, es decir:

$$J = J_c + J_t + J_r \quad (B.2)$$

La inercia del tornillo está dada por la siguiente expresión:

$$J_t = \frac{1}{2} m r_t^2 = \frac{1}{32} \rho D_t^4 l \quad (B.3)$$

donde m=masa del tornillo; r_t =radio del tornillo; D_t =diámetro del mismo; ρ =densidad del material del tornillo; l=longitud del tornillo.

Para este caso:

$$\rho = 7800 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

$$D = 0.0254 \text{ (m)}$$

$$l = 1.3 \text{ (m)}$$

$$J_t = \frac{1}{32} (7800) (0.0254)^4 (1.3) = 1.31 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$$

Según el catálogo de Superior Electric Company la inercia del rotor del motor es $J_r = 0.42 \text{ (lb-in}^2\text{)}$, es decir:

$$J_r = 2 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$$

La inercia del carro móvil que se refleja en la flecha del motor es:

$$J_c = m (r_c)^2 (1/p^2) (1/2\pi r_c)^2 = \frac{m}{(2\pi p)^2} \quad (\text{B.4})$$

donde m =masa del carro móvil; p =paso del tornillo

Para este caso:

$$m=25 \text{ (kg)}$$

$$p=196.8 \text{ (hilos/m)}$$

$$J_c = \frac{25}{(196.8)^2 (2\pi)^2} = 1.6 \times 10^{-5} \text{ kg m}^2$$

La fricción T_f se obtiene de:

$$T_f = F \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\eta} \quad (\text{B.5})$$

donde η =eficiencia del tornillo y F =fuerza de fricción dada a su vez por

$$F = \mu (mg) \quad (\text{B.6})$$

donde μ =coeficiente de fricción entre las correderas y el carro móvil y g =aceleración de la gravedad.

Para este caso:

$$\mu=0.2$$

$$\eta=0.5$$

$$g=9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

$$F = (0.2) (25) (9.81) = 49 \text{ N}$$

$$T_f = 49 \frac{1}{2\pi(196.8)} \frac{1}{0.5} = 0.079 \text{ Nm}$$

La aceleración angular se calcula considerando que la velocidad del soplete varía de 35 cm/min (velocidad máxima de corte) al reposo en 1 seg.

$$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \quad (\text{B.7})$$

$$\Delta\omega = 35 \text{ (cm/min)} = 7.21 \text{ (rad/s)}$$

$$\Delta t = 1 \text{ (s)}$$

$$\alpha = 7.21 \text{ rad/s}^2$$

Substituyendo lo anterior en (B.1):

$$T = (1.31 \times 10^{-4} + 1.6 \times 10^{-5} + 2 \times 10^{-4}) (7.21) + 0.0759 = 0.082 \text{ N m}$$

Considerando en este caso un factor de seguridad de 2

$$T_M = 0.16 \text{ N m}$$

B.1.2. Rodillos para el giro del tubo.

Procediendo análogamente al caso anterior, se debe cumplir con la expresión (B.1). La inercia total en este caso está dada por la inercia del tubo, de los rodillos de soporte, de la reducción de velocidad y del motor. Los cálculos se realizarán considerando un tubo de 50 cm de diámetro y 400 kg de peso.

La inercia del tubo que se refleja en el motor es:

$$J_t = \frac{m}{2} (r_i^2 + r_e^2) \frac{1}{R^2} \quad (\text{B.8})$$

donde m =masa del tubo; r_i =radio interior del tubo; r_e =radio exterior del tubo; R =relación de reducción.

Para este caso:

$$m = 400 \text{ (kg)}$$

$$r_i = 0.25 \text{ (m)}$$

$$r_e = 0.24 \text{ (m)}$$

$$R = 20$$

$$J_t = \frac{1}{2} (0.25^2 + 0.24^2) \frac{1}{20^2} = 0.060 \text{ kg m}^2$$

La inercia de los seis rodillos de soporte es:

$$J_r = 6 \left(\frac{1}{2} m r_r^2 + \frac{1}{20^2} \right) \quad (\text{B.9})$$

donde m = masa de los rodillos y r_r = radio de los mismos.

Para este caso $m = 2.30$ (kg) y $r_r = 0.075$ (m); por lo que

$$J_r = 6 \left(\frac{1}{2} (2.3) (0.075)^2 + \frac{1}{20^2} \right) = 1 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$$

Del catálogo de Superior Electric Co. la inercia del rotor es $J_r = 1 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$

La inercia del engrane de la reducción de velocidad está dada por la ecuación (B.3), donde para este caso $m = 0.500$ (kg) y $r_e = 0.03$ (m), por lo que:

$$J_{\text{red}} = \frac{1}{2} (0.5) (0.03)^2 = 2.25 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$$

La fricción T_f se calcula a partir de:

$$T_f = F r_r \frac{1}{R} \quad (\text{B.10})$$

donde F = fuerza de fricción (definida en B.6). Si para este caso se considera $\mu = 0.01$ pues no hay deslizamiento, entonces:

$$T_f = (0.01) (9.81) (400) (0.075) \left(\frac{1}{10} \right) = 0.29 \text{ N m}$$

La aceleración angular se obtiene a partir de la misma consideración que en el caso anterior.

$$\Delta \omega = 0.35 \text{ (m/mín)} = 1.55 \text{ (rad/s)}$$

$$\Delta t = 1 \text{ (s)}$$

$$\alpha = 1.55 \text{ rad/s}^2$$

Substituyendo lo anterior en la expresión (B.1.) finalmente queda:

$$T = ((1 + 2.25) \times 10^{-4} + 0.06) 1.55 + 0.29 = 0.38 \text{ N m}$$

Considerando un factor de seguridad igual con dos se tiene:

$$T_M = 0.76 \text{ N m}$$

B.1.3. Motor para el dispositivo de biselado.

En este caso se utiliza de nuevo la expresión B.1., pero se le debe añadir un término que representa el efecto de la fuerza de gravedad sobre la punta del soplete. A este término se le denominará G.

La inercia del sistema se considerará compuesta solo por la de la punta del soplete y la del rotor del motor. El efecto de las mangueras que conducen los gases será considerado en el término G.

La inercia de la punta del soplete está dada por:

$$J_s = \frac{1}{3} m_s l_s^2 \quad (\text{B.11})$$

donde m_s = masa de la punta del soplete y l_s = longitud de la misma. En este caso se tomará $m_s = 0.3 \text{ (kg)}$ y $l_s = 0.08 \text{ (m)}$, por lo que:

$$J_s = \frac{1}{3} (0.3) (0.08)^2 = 6.4 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$$

La inercia del rotor del motor del catálogo de Superior Electric Co. es $J_r = 1 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$.

La aceleración angular se calcula suponiendo un desplazamiento de 75° en un segundo, es decir,

$$\alpha = \frac{\Delta\theta}{\Delta t^2} (2) \quad (\text{B.12})$$

para este caso $\Delta\theta = 1.3 \text{ rad}$ y $\Delta t = 1 \text{ s}$ por lo que:

$$\alpha = (2) (1.3) = 2.6 \text{ rad/s}^2$$

La fricción se considerará nula pues todo el mecanismo está soportado

sobre baleros.

El término G se calcula suponiendo que la punta del soplete tiene un ángulo de 75° con respecto a la vertical y está dado por:

$$G = m_c g \sin \theta l \quad (B.13)$$

donde m_c = masa del soplete y las mangueras; θ = posición angular del soplete y l = brazo de palanca equivalente. Para este caso se considera que $m_c = 0.8$ (kg), $\theta = 75^\circ$ y $l = 0.10$ (m):

$$G = (0.8) (9.81) (\sin 75^\circ) (0.10) = 0.758 \text{ N m}$$

Substituyendo los cálculos anteriores en la expresión para el par:

$$T = ((6.4+1) \times 10^{-4}) 2.6 + 0.758 = 0.759$$

Si se toma un factor de seguridad igual con 1.3:

$$T_M = 0.98 \text{ N m}$$

B.1.4. Motor para el mecanismo regulador de presión.

En forma similar a los casos anteriores en este caso la inercia del sistema se compone con la inercia del rotor y con la inercia de la válvula.

Del catálogo del fabricante $J_r = 1 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$. La inercia de la válvula está dada por la ecuación B.3. tomando en este caso $m = 0.08$ (kg) y $r_c = 0.009$ (m), por lo que:

$$J_v = \frac{1}{2} (0.080) (0.009)^2 = 2.3 \times 10^{-6} \text{ kg m}^2$$

La aceleración angular se obtiene de la expresión B.12. considerando un desplazamiento de una revolución del vástago de la válvula en un segundo, por lo que $\Delta\theta = 2\pi$ y $\Delta t = 1$ (s), entonces:

$$\alpha = 2 (2\pi) = 12.56 \text{ rad/s}^2$$

La fricción se considera igual con:

$$T_F = 0.0375 \text{ N m}$$

Substituyendo lo anterior el par total que debe proporcionar el motor es:

$$T = (2.36 \times 10^{-6} + 1 \times 10^{-4}) 12.56 + 0.0375 = 0.040 \text{ N m}$$

Si el factor de seguridad vale dos:

$$T_M = 0.080 \text{ N m}$$

B.2. Consideraciones en la elección de los motores.

Al consultar el catálogo del fabricante se encontró que los motores que más se acercaban a los que se calcularon tenían un precio mayor que motores de más capacidad. Por esta razón se optó por adquirir estos últimos motores.

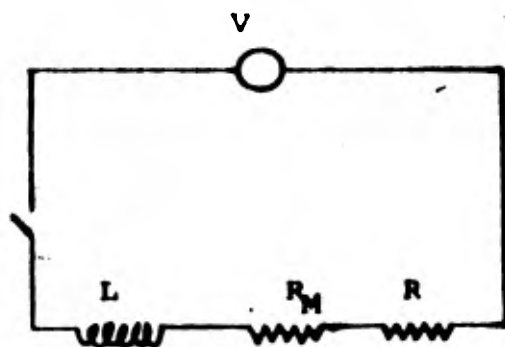
Se adquirieron tres motores que entregan un par máximo de 1 N m y otro más con capacidad de entregar hasta 2 N m.

DISEÑO ELECTRICO.

C.1. Cálculo de las fuentes de poder para los motores de pasos.

El procedimiento para el cálculo de las fuentes de poder de los motores de pasos de la cortadora de tubos se basa por un lado en las características de los motores empleados y por el otro en las velocidades máximas requeridas durante el funcionamiento de éstos.

Los controladores empleados son de resistencia en serie (ver anexo A), por lo que la máxima velocidad de conmutación en la corriente de los embobinados depende de la constante de tiempo del circuito R/L que forma cada fase del motor y cuyo diagrama se muestra en la figura C.1. Los valores de la fuente de voltaje y de la resistencia en serie se eligen de tal forma que permiten que la corriente en estado estable alcance su valor nominal y que la velocidad de respuesta del circuito permita movimientos de los motores a las velocidades máximas requeridas.



V=valor de la fuente de voltaje
 R_M =resistencia del embobinado del motor
 R = resistencia en serie
 L = inductancia del embobinado del motor

Figura C.1.

La corriente en el circuito de la figura C.1., al cerrarse el interruptor, está dada por:

$$i = \frac{V}{R + R_M} \left(1 - \exp \left(- \frac{R + R_M}{L} t \right) \right) \quad (C.1)$$

por lo que la constante de tiempo del circuito es:

$$\tau = \frac{L}{R + R_M} \quad (C.2)$$

Si se impone como condición que a la máxima velocidad a que debe moverse el motor el tiempo para cada pulso sea igual a cinco veces la constante de tiempo del circuito, se tiene que:

$$R = 5 \omega L - R_M \quad (C.3)$$

donde ω = velocidad máxima del motor en pasos/s.

El voltaje de la fuente se encuentra después de ajustar el valor de la resistencia R a uno disponible comercialmente como:

$$V = (R^* + R_M) i_n \quad (C.4)$$

A continuación se obtienen los valores de las resistencias en serie y de las fuentes de voltaje para cada uno de los motores del sistema. Los valores de L y R_M se obtuvieron de los datos que proporciona el fabricante de los motores de pasos y los de ω considerando los casos críticos de operación de cada uno de los mecanismos.

C.1.1. Motor para el posicionamiento longitudinal del soplete.

$$R_M = 0.36 \text{ ohm}$$

$$L = 1.67 \text{ mH}$$

$$i_n = 4.7 \text{ amp}$$

$$\omega = 70 \text{ (cm/min)} = 459 \text{ (pasos/s)}$$

$$R = (5) (0.00167) (459) - 0.36 = 3.5 \text{ ohm}$$

$$R^* = 5 \text{ ohm}$$

$$V = (5 + 0.36) 4.7 = 25.2 \text{ volt}$$

C.1.2. Motor para girar el tubo.

$$R_M = 0.55 \text{ ohm}$$

$$L = 2.76 \text{ mH}$$

$$i_n = 4.6 \text{ amp}$$

$$w = 70 (\text{cm}/\text{min}) = 97 (\text{pasos}/\text{s})$$

$$R = (5) (0.00276) (97) - 0.55 = 0.78 \text{ ohm}$$

$$R^* = 1 \text{ ohm}$$

$$V = (1 + 0.55) 4.6 = 7.1 \text{ volt}$$

C.1.3. Motor para el mecanismo de biselado.

$$R_M = 0.36 \text{ ohm}$$

$$L = 1.67 \text{ mH}$$

$$i_n = 4.7 \text{ amp}$$

$$w = 75 (^\circ/\text{s}) = 42 \text{ pasos/s}$$

$$R = (5) (0.00167) (42) - 0.36 = -0.01 \text{ ohm}$$

$$R^* = 0 \text{ ohm (no requiere resistencia)}$$

$$V = (0.36) 4.7 = 1.69 \text{ volt}$$

C.1.4. Motor para el mecanismo regulador de presión.

$$R_M = 0.36 \text{ ohm}$$

$$L = 1.67 \text{ mH}$$

$$i_n = 4.7 \text{ amp}$$

$$w = 200 \text{ pasos/s}$$

$$R = (5)(0.00167)(200) - 0.36 = 1.31 \text{ ohm}$$

$$R^* = 1 \text{ ohm}$$

$$V = (1 + 0.36) 4.7 = 6.39 \text{ volt}$$

C.2. Diseño de las fuentes de poder.

A continuación se muestran los diagramas de los diseños de las fuentes, Se introdujeron algunos cambios con respecto a los valores calculados debido a problemas con los elementos necesarios para la construcción de las mismas.

C.3. Acoplador en paralelo con la computadora (DR11-K)

Este acoplador, de propósito general, permite la transferencia en paralelo de hasta 16 señales. Para la operación de la cortadora de tubos se utilizan 8 de estas señales distribuidas como sigue:

- Salida 0 - carro móvil del soplete, dirección derecha
- Salida 1 - carro móvil del soplete, dirección izquierda
- Salida 2 - mecanismo de biselado, dirección derecha
- Salida 3 - mecanismo de biselado, dirección izquierda
- Salida 4 - regulador de presión, dirección derecha
- Salida 5 - regulador de presión, dirección izquierda
- Salida 6 - rodillos de giro del tubo, dirección derecha
- Salida 7 - solenoide del soplete de corte

Es necesario además enviar una señal de referencia para los voltajes.

El acoplador funciona con lógica negada, con las siguientes características:

Nivel lógico 1 = 0 volt

Nivel lógico 0 = +4 volt

La corriente nominal de salida es 5 ma y existen fusibles para cada señal que se abren cuando la corriente excede los 250 ma en alguno de ellos.

Los pulsos eléctricos que requieren los controladores de los motores para hacerlos funcionar se forman por cambios programados en los niveles lógicos de cada puerto.

A continuación se muestra un diagrama del circuito de salida de un puerto de salida.

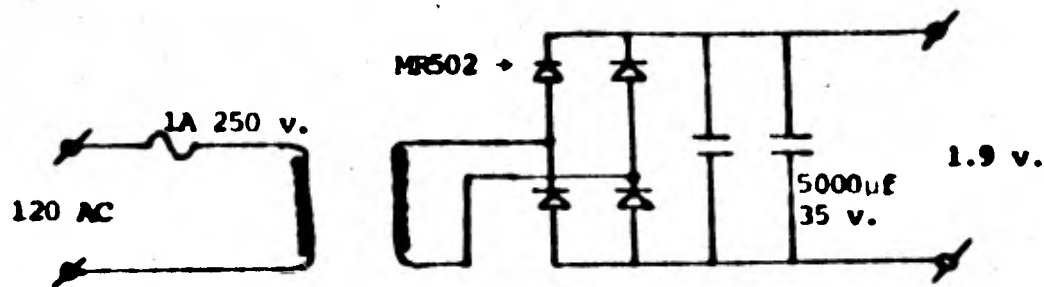


Diagrama de la fuente de poder para el mecanismo de biselado.

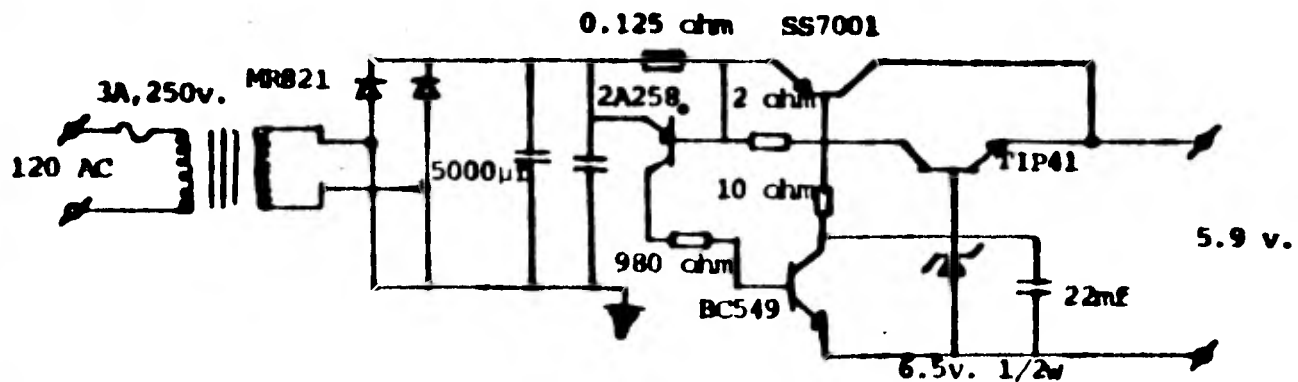
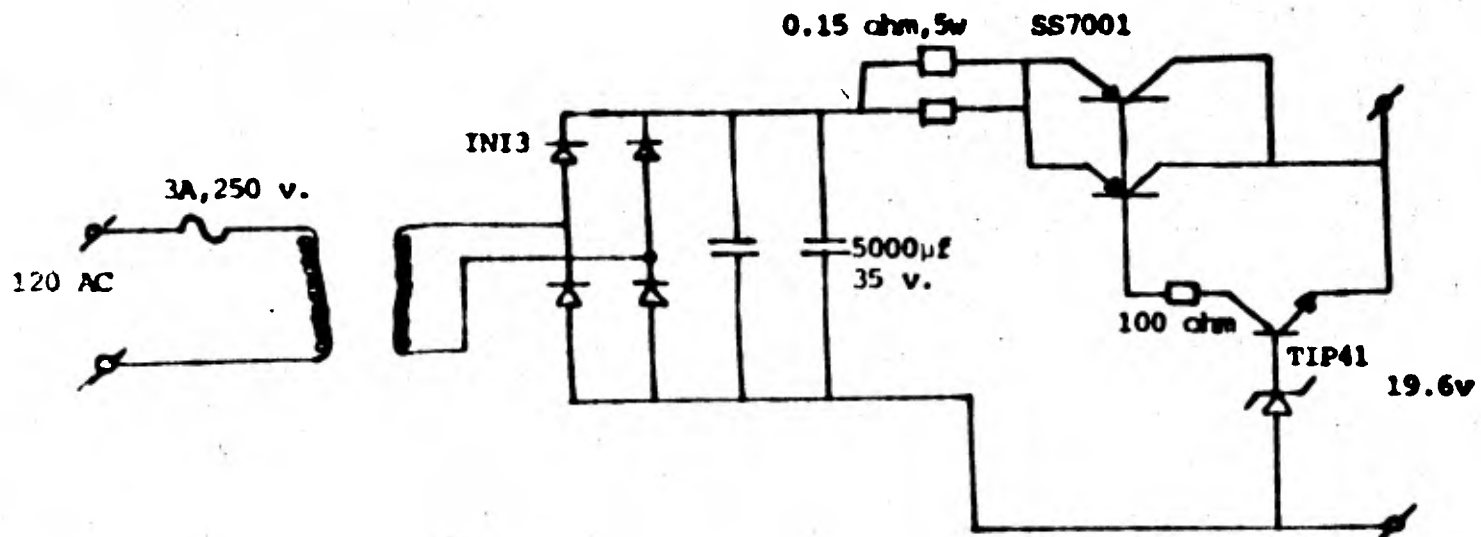


Diagrama de las fuentes de los mecanismos regulador de presión y para posicionamiento angular del tubo.

C.6.



Fuente de poder para el mecanismo de posicionamiento longitudinal del soplete

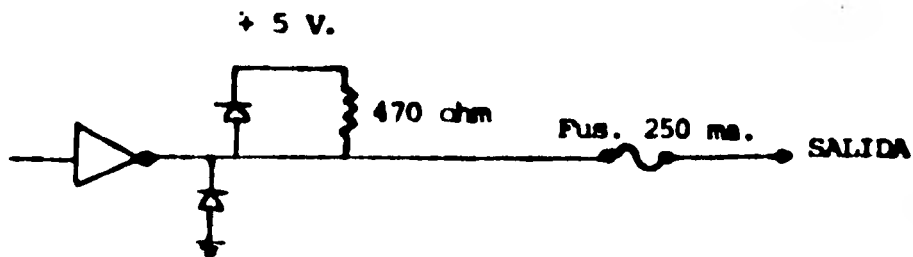


Diagrama del puerto de salida de la computadora.

ANEXO D**PROGRAMA DE SIMULACION**

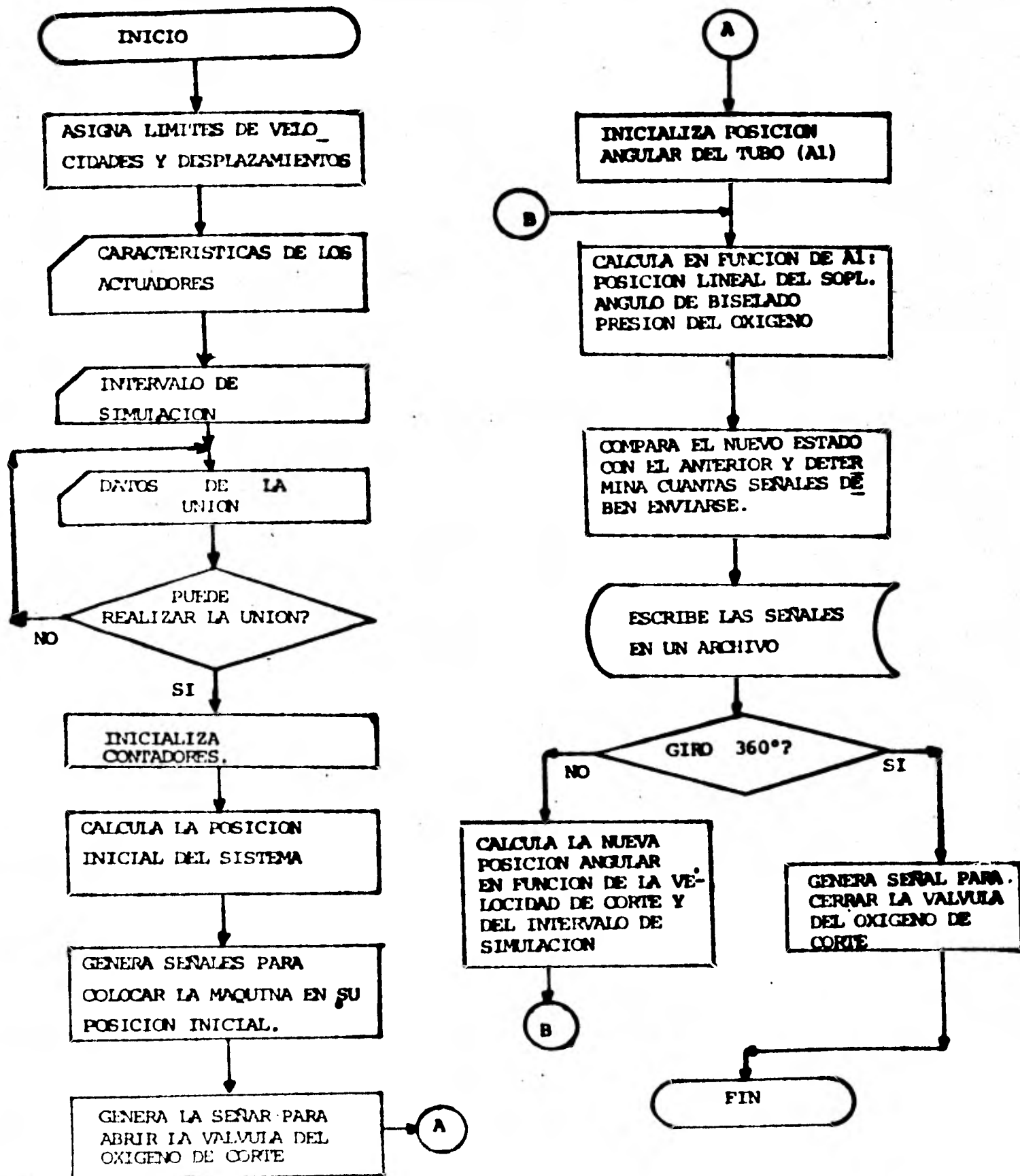
El programa de simulación tiene como tarea producir una tabla de las señales que deben enviarse a cada actuador versus el tiempo en que deben ocurrir.

Para hacer esto el tiempo total de duración del corte se divide en intervalos de tiempo constantes a los que se denomina intervalos de simulación, en contrándose el número de señales que debe enviarse a los actuadores en cada uno de esos intervalos.

Las señales se generan a partir de las relaciones funcionales que existen - entre las distintas variables y de las características físicas de los actuadores.

El diagrama de flujo del programa de simulación es:

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA DE SIMULACION



Variables Utilizadas en el Programa de Simulación

(en orden de aparición):

X - Vector de señales para la posición longitudinal.

Y - Vector de señales para el ángulo de biselado.

W - Vector de señales para la presión del oxígeno de corte.

Z - Vector de señales para la posición angular del tubo.

AMAXP - Número máximo de señales para el activador de la presión en un intervalo de simulación.

AMAXDE - Similar a **AMAXP** pero para la posición lineal del soplete.

AMAXB - Similar a **AMAXP** pero para el ángulo de biselado.

AMAXBI - Similar a **AMAXP** para el ángulo de biselado durante la iniciali
zación.

TININ - Tiempo de precalentamiento.

AK1 - Resolución del actuador del ángulo de biselado.

AK2 - Resolución del actuador de la presión del oxígeno.

AK3 - Resolución del actuador de la posición lineal del soplete.

AK4 - Resolución del actuador de la posición angular del tubo.

ALTURA - Distancia del centro de giro del soplete al borde interior del tubo.

TIEMPO - Intervalo de simulación.

R1 - Radio de la riostra.

R2 - Radio del elemento primario.

EXC - Excentricidad de la unión.

FI - Ángulo de la unión.

ESP - Espesor de pared el tubo.

PRESO - Presión del oxígeno en el intervalo de simulación anterior.

GAMAO - Angulo de biselado en el intervalo de simulación anterior.

TETAO - Posición angular del tubo en el intervalo de simulación anterior.

DESPO - Posición longitudinal del soplete en el intervalo de simulación anterior.

DELTA - Angulo diedro.

I0 a I9 - Indicadores.

D1 a D3 - Variables para inicializar la posición longitudinal del soplete.

GAMA - Angulo de biselado en el intervalo corriente.

ESPI - Espesor de corte en el intervalo corriente.

PRESI - Presión del oxígeno de corte en el intervalo corriente.

DESP - Posición longitudinal del soplete en el intervalo corriente.

AO - Variable intermedia.

TETA - Posición angular del tubo en el intervalo corriente.

AM - Variable intermedia.

VELOI - Velocidad de corte en el intervalo corriente.

OMEGI - Velocidad angular de corte en el intervalo corriente.

T - Tiempo acumulado.

ANOAZ - Variables intermedias.

A1 - Variable intermedia.

Subrutinas y funciones utilizadas en el programa de simulación

ESPRES - Función para calcular el espesor efectivo de corte.

PRES - Función para calcular la presión del oxígeno de corte.

VELOC - Función para calcular la velocidad de corte.

OMEGA - Función para calcular la velocidad angular de corte.

ANA - Subrutina para calcular la derivada de la posición lineal del soplete con respecto a la posición angular del tubo.

BISEL - Subrutina que calcula el ángulo diedro.

GVBI - Subrutina que calcula el ángulo de biselado.

DEMPI - Subrutina que calcula la posición longitudinal del soplete.

AVANCE - Subrutina para la inicialización.

A continuación se anexa un listado del programa de simulación.

PROGRAMA PARA SIMULAR LAS ACCIONES
DE CONTROL DE LA CORTADORA DE TUBOS
OCTUBRE 1979(LA.MD)
19-1.

PROGRAMA PARA SIMULAR LAS ACCIONES
DE CONTROL DE LA CORTADORA DE TUBOS

OCTUBRE 1979(LA.MD)

ESPRES(A1,A2)=A2/COS(A1)

FUNCION QUE ENCUENTRA EL ESPESOR REAL DE CORTE

PRES(A1)=0.027132*A1+1.9364

FUNCION QUE HALLA LA PRESION DE CORTE

VELOC(A1)=(-2.9901*A1+513.2956)/60.0

FUNCION QUE ENCUENTRA LA VELOCIDAD DE CORTE

OMEGA(A1,A2,A3)=A3/SORT(A1**2+A2**2)

FUNCION QUE CALCULA LA VELOCIDAD ANGULAR DEL TUBO

BESTOT=1300.0

AMAXP=30.0

AMAXDE=400.0

AMAXB=30.0

AMAXB1=0.0

TININ=6.5

DECLARA PARAMETROS PARA CONTROL

TYPE 10

ACCEPT 20.N

TOMA REFERENCIA DE LA CORRIDA

TYPE 30

ACCEPT 40,AK1,AK2,AK3,AK4

AK1=AK1/100.0*3.14159

AK3=AK3/100.0*3.14159

TOMA LOS DATOS DE LAS CARACTERISTICAS DE LOS ACTUADORES

TYPE 50

ACCEPT 60,ALTURA,TIEMPO

ALTURA=ALTURA*10.0

LEE LOS DATOS DEL INCREMENTO DE TIEMPO Y LA ALTURA DEL SOPLETE

300 TYPE 70

ACCEPT 80,R1,R2,EXC

R1=R1*10.0/2.0

R2=R2*10.0/2.0

EXC=EXC*10.0

IF(EXC .GT. (R2-R1))GO TO 300

OBTIENE LAS MEDIDAS DE LOS TUBOS Y LA ENCENTRICIDAD EN LA UNION

TYPE 90

ACCEPT 110. FI. ESP
FI-FI/100.0=3.14159

TOVA EL VALOR DEL ANGULO DE UNION Y DEL ESPESOR NOMINAL DEL TUBO

RAIZ=ESP/4.0
IF (RAIZ.GE.1.507) RAIZ=1.507
ALTURA=ALTURA-RAIZ

CORRIGE LA ALTURA DEL SOPLETE POR LA RAIZ DEL BISELADO

AK3=AK3/R1
R1=R1-ESP
PRESO=PRES(6.35)
GAMA=0.0
GAMA0=0.0
TETA0=0.0
CALL DESPI(TETA0, DESPO, GAMA0, R1, R2, FI, EXC, ALTURA)
CALL BISEL(TETA0, DELTA, R1, R2, FI)
CALL GAMMA(DELTA, GAMA0)

INICIALIZA LOS VALORES DE ALGUNAS VARIABLES

CALL DESPI(0.0, D1, 0.0, R1, R2, FI, EXC, ALTURA)
D2=D1
D3=D1

DO 99 I0=1.720
T4=3.14159*10/360.0
CALL DESPI(T4, D4, 0.0, R1, R2, FI, EXC, ALTURA)
IF (D4.LT.D2) D2=D4
IF (D4.GT.D3) D3=D4

99 CONTINUE

IF((DESTOT-25.0) .LT. ABS(D3-D2)) GO TO 300

I7=(D3-D1)/ABS(D3-D1)
I6=ABS(D3-D1)/AK4 + 300
I8=AK4*DE*TIEMPO
I6=I6/I8
I7=I7*I8*(-1)

DO 100 I0=1.16
X(I0)=0.0
Y(I0)=I7
Z(I0)=0.0

100 CONTINUE
X(I0)=0.0
X(I0)=(ACOS(ABS(D3-D1)/AK4)+300-I8*(I0-1))*I7/I8
Y(I0)=0.0
Z(I0)=0.0

COLOCA EL CARRO LONGITUDINAL EN LA POSICION QUE CORRESPONDE DE
ACUERDO AL MAXIMO DESPLAZAMIENTO, SEGUN SEA EL CASO

I0=I0+1
IF (I0.GE.10) GO TO 10+I0+1
IF (I0.GE.10) GO TO 10+I0+1
IF (I0.GE.10) GO TO 10+I0+1
I1=ABS(D3-D1)/AK4
I2=ABS(D3-D1)/AK4
I2=ABS(D3-D1)/AK4

DO 200 I0=1.12+I6-11

```

      IF (ABS(PRESI-PRESO).GE.AK2) W(10)=(PRESI-PRESO)/
      ABS(PRESI-PRESO)*INT(ABS(PRESI-PRESO)/AK2)
      IF (ABS(W(10)).GE.AMAXP*TIEMPO) W(10)=MAXP*TIEMPO
      IF (ABS(W(10))>W(10))
      IF (ABS(W(10)).GE.AMAXP*TIEMPO) PRESI=PRESO+W(10)*AK2
      IF (ABS(PRESI-PRESO).GE.AK2) PRESO=PRESO+W(10)*AK2

```

200 CONTINUE

```

400 Y(10)=15*13
      GAMA=GAMA+AK1*15*13
      CALL DESP(TETA0,DESP,GAMA,R1,R2,FI,EMC,ALTURA)
      X(10)=0.0
      IF (ABS(DESP-DESP0).GE.AK4) X(10)=(DESP-DESP0)/ABS(DESP-DESP0)
      INT(ABS(DESP-DESP0)/AK4)
      IF (ABS(DESP-DESP0).GE.AK4) DESP0=DESP0+AK4*X(10)

```

C
C

Z(10)=0.0

```

      ESP1=ESPPE(GAMA,ESP)
      PRESI=PRES(PRESI)
      W(10)=0.0
      IF (ABS(PRESI-PRESO).GE.AK2) W(10)=(PRESI-PRESO)/ABS(PRESI-PRESO)
      INT(ABS(PRESI-PRESO)/AK2)
      IF (ABS(W(10)).GE.AMAXP*TIEMPO) W(10)=MAXP*TIEMPO
      IF (ABS(W(10))>W(10))
      IF (ABS(W(10)).GE.AMAXP*TIEMPO) PRESI=PRESO+W(10)*AK2
      IF (ABS(PRESI-PRESO).GE.AK2) PRESO=PRESO+W(10)*AK2
      I0=I0+1

```

C
C
C

GENERA LA CORRECCION POR PRESION Y POR POSICION DEBIDO AL BISEL INICIAL

```

      GAMAB=GAMA
      AB=TIEMPO*(I2)
      I3=TININ/TIEMPO
      IF (AB.GE.TININ) I3=I0-1
      IF (AB.LT.TININ) I3=I0+I3-I2-2
      IF (AB.LT.TININ) CALL ARRANQUE(I0,I3)
      TETA=TETA0
      I1=I3+1

```

C
C
C

SI EL TIEMPO DE PRECALENTAMIENTO HA SIDO MENOR QUE 6.5 SEGUNDOS, CONTINUA EN PRECALENTAMIENTO HASTA QUE HA LLEGADO A ESE PUNTO

```

500 CALL AMA(TETA,AM,R1,R2,FI,EMC)
      CALL BISEL(TETA,DELTA,R1,R2,FI)
      CALL GAMA(DELTA,GAMA)

```

C
C

```

      Y(11)=0.0
      IF (ABS(GAMA-GAMAB).GE.AK1) Y(11)=(GAMA-GAMAB)/ABS(GAMA-GAMAB)
      INT(ABS(GAMA-GAMAB)/AK1)
      IF (ABS(Y(11)).GE.AMAXB*TIEMPO) Y(11)=MAXB*TIEMPO*Y(11)
      IF (ABS(Y(11))>Y(11))
      IF (ABS(Y(11)).GE.AMAXB*TIEMPO) GAMA=GAMAB+Y(11)*AK1
      IF (ABS(GAMA-GAMAB).GE.AK1) GAMAB=GAMAB+AK1*Y(11)

```

C
C
C

OBTIENE LA CANTIDAD DE PULSOS QUE DEBE MOVERSE EL ACTUADOR DEL ANGULO DE BISEL

```

      ESP1=ESPPE(GAMA,ESP)
      DBCC1=DBCC(ESP1)

```



```

C
C
C
W(11)=0.0
IF (ABS(PRESI-PRESO).GE.AK2) W(11)=(PRESI-PRESO)/ABS(PRESI-PRESO)
  AINT(ABS(PRESI-PRESO)/AK2)
IF (ABS(PRESI-PRESO).GE.AK2) PRESO-PRESO+W(11)*AK2
C
C
C
OBTIENE LOS PULSOS PARA LA REGULACION DE LA PRESION
Z(11)=0.0
IF ((TETA-TETA0).GE.AK3) Z(11)=AINT((TETA-TETA0)/AK3)
IF ((TETA-TETA0).GE.AK3) TETA0=TETA0+AK3*Z(11)
C
C
C
OBTIENE CUANTOS PULSOS DEBE MOVERSE EL MOTOR QUE GIRA EL TUBO
CALL DESP1(TETA, DESP, GAMA, R1, R2, FI, EXC, ALTURA)
X(11)=0.0
IF (ABS(DESPO-DESPO).GE.AK4) X(11)=(DESPO-DESPO)/ABS(DESPO-DESPO)
  AINT(ABS(DESPO-DESPO)/AK4)
IF (ABS(X(11)).GE.AK4*(DE+TIEMPO)) TYPE 130, DESP, DESPO, GAMA, GAMA0
IF (ABS(DESPO-DESPO).GE.AK4) DESPO=DESPO+AK4*X(11)
C
C
C
CALCULA LOS PULSOS PARA EL MOVIMIENTO LONGITUDINAL DEL SOPLETE
VELO1=VELOC(ESP1)
OMEG1=OMEGA(R1, VELO1)
TETA=TETA+OMEG1*TIEMPO
C
C
C
CALCULA EL DESPLAZAMIENTO ANGULAR CON BASE EN LA VELOCIDAD DE COPTE
II=II+1
IF (TETA.LT.2.0*3.14159) GO TO 500
C
C
C
VERIFICA SI VA DIO UNA REVOLUCION COMPLETA EL TUBO
DO 600 I5=II, (I0+II-2)
  I4=I0+II-I5-1
  W(I5)=-W(I4)
  X(I5)=-X(I4)
  Y(I5)=-Y(I4)
  Z(I5)=-Z(I4)
600 CONTINUE
C
C
C
Z(I5)=0
X(I5)=0
Y(I5)=0
W(I5)=0
C
C
C
REPITE EL CICLO DE INICIALIZACION, PERO DE MANERA INVERSA
PARA DEJAR LA MAQUINA EN LA POSICION INICIAL
TYPE 120, N
C
C
C
DO 700 I0=1, 15
  T=I0*TIEMPO
  WRITE(2, I0) T, Z(I0), X(I0), Y(I0), W(I0)
700 CONTINUE
TYPE 130, 15
C
C
C
Escribe en disco la tabla de resultados e imprime una señal para
señalar que la corrida concluyó
10 ESCRIBIR COPRIDA NUMERO(12) : 1, 15
20 ESCRIBIR(12)
30 ESCRIBIR ANTIOP FULL, ORA, GAMA, GAMA0, EXC, FI, R1, R2, ALTURA, FULL,
  (I1, I2) : 1, 15
40 ESCRIBIR(12)
50 ESCRIBIR ANTIOP INDEPENDENT, FULL, FI, I1, I2 : 1, 15
60 ESCRIBIR(12)
70 ESCRIBIR ANTIOP INDEPENDENT, FULL, FI, I1, I2 : 1, 15

```

D.9.

```

100 FORMALIZACION DE...
110 FORMALIZACION DE...
120 FORMALIZACION DE...
130 FORMALIZACION DE...
140 FORMALIZACION DE...
150 FORMALIZACION DE...

```

SECCION DE FUENTES

```

ENDFILE 2
STOP
END

```

FIN DEL PROGRAMA FUENTE

SUBROUTINE ANA(TETA,AM,R1,R2,FI,EXC)

```

IF(COS(TETA).EQ.0.) GO TO 10
AM = R2**2 - (R1*SIN(TETA) - EXC)**2
AN1 = R1 * COS(TETA) + (R1 * SIN(TETA) - EXC) / SIN(FI)
AN1 = AN1 / SORT(AM)

```

```

AN2 = R1 * SIN(TETA) * COS(FI) / SIN(FI)

```

```

AM = AN1 - AN2

```

10 CONTINUE

```

RETURN
END

```

CALCULA LA DERIVADA DE LA POSICION LINEAL CON RESPECTO A LA POSICION ANGULAR DADA ESTA

SUBROUTINE BISEL(TETA,DELTA,R1,R2,FI)

```

IF(R1.EQ.R2 .AND. TETA.EQ. 3.14159/2.) A1=0.00001
IF(A1.EQ.0.00001) GO TO 10

```

```

BETA = ATAN(R1/R2*SIN(TETA)/SORT(1.0 - ((R1/R2*SIN(TETA))**2)))

```

```

A1 = SIN(TETA)*SIN(BETA)*COS(BETA)*COS(TETA)*COS(FI)

```

```

IF(A1.EQ.0.) A1 = 3.14159/2.0

```

```

IF(A1.GE.1.0) GO TO 10

```

```

A1 = ATAN(SORT(1. - A1**2)/A1)

```

```

IF(A1.LT.0.) A1 = 3.14159 + A1

```

10 DELTA = 3.14159 - A1

```

RETURN
END

```

EN ESTE SUBROUTINA SE CALCULA EL VALOR DEL ANGULO DIDRO

SUBROUTINE GAMA(DELTA,GAMA)

```

IF(DELTA .GE. 3./4.*3.14159) GAMMA = 0.0
IF(DELTA .LT. 3./4.*3.14159 .AND. DELTA .GE. 3.14159/2.)
  GAMMA = 3./4.*3.14159 - DELTA
IF(DELTA .LT. 3.14159/2. .AND. DELTA .GE. 3.14159/6.)
  GAMMA = 3.14159/2. - DELTA/2.
IF(DELTA .LT. 3.14159/6.0) TYPE 10
10 FORMAT(' ERROR EN EL ANGULO DE BISEL ' , //)

```

```

RETURN
END

```

```

ENCUENTRA EL VALOR DEL ANGULO DE BISEL CON BASE EN EL VALOR
DEL ANGULO DIEDRO

```

```

SUBROUTINE DESP(TETA, DESP, GAMMA, R1, R2, FI, EXC, M)

```

```

A1 = (R1*SIN(TETA)-EXC)/R2
IF(A1.EQ.1.0) A1=3.14159/2.0
IF(A1.EQ.3.14159/2.0) GO TO 10
A1 = ATAN(A1/SQRT(1.-A1**2))

```

```

10 A1 = R2*(1.-COS(A1))/SIN(FI)+R1*(1.+COS(TETA))*COS(FI)/SIN(FI)
DESP = A1 - M*SIN(GAMMA)/COS(GAMMA)
RETURN
END

```

```

CALCULA LA POSICION DEL SOPLETE INCLUYENDO LA CORRECCION
POR EL ANGULO DE BISEL

```

```

SUBROUTINE ARRAQUE(12, 13)

```

```

INTEGER X,Y,W,Z
COMMON /BD/ X(1000), Y(1000), W(1000), Z(1000)

```

```

DO 10 10=12, 13
  X(10)=0.0
  Y(10)=0.0
  W(10)=0.0
  Z(10)=0.0

```

```

10 CONTINUE
RETURN

```

```

COMO EL TIEMPO DE INICIALIZACION FUE MENOR QUE 6.5 SEG CONTINUA
REPRESENTANDO HASTA LLEGAR A ESE TIEMPO

```

```

END

```

ANEXO E

PROGRAMA DE CONTROL

El programa de control, constituido en realidad por varios de ellos, tiene por objeto enviar a los actuadores las señales indicadas por la tabla que se produce durante la simulación. Esta tabla contiene el número de señales que debe enviarse a un actuador en un intervalo de tiempo determinado (conocido como intervalo de simulación). Las señales son distribuidas uniformemente en el tiempo para cada uno de los intervalos de simulación que componen la mencionada tabla y se envían en forma de pulsos eléctricos a los actuadores (motores de pasos).

Algunos de los programas se elaboraron en FORTRAN y el resto en lenguaje ensamblador. Esto obedece a que la velocidad de la máquina al ejecutar programas en FORTRAN es mucho menor que al hacer lo propio con una rutina en ensamblador y no permite la ejecución de las rutinas en línea con el envío de señales.

A continuación se incluye una breve descripción de cada uno de los programas empleados.

Programa principal (CONF.LAI)

Durante la ejecución de este programa se lee la tabla de señales vs tiempo y se la convierte en otra que contiene los periodos entre las señales de cada actuador para cada intervalo de simulación. Posteriormente se llama al programa que arranca el reloj de tiempo real y al concluir la ejecución al que lo para.

Cuando la rutina que se ejecuta durante las interrupciones que produce el reloj programable concluye, el control regresa a este programa.

Programa de arranque del reloj programable (ACTIVA)

Este programa arranca el reloj programable mandando como parámetro la frecuencia con que el reloj producirá interrupciones y la dirección de la memoria en donde se localiza la rutina que debe ejecutarse en cada interrupción.

Programa de paro del reloj programable (DEACTU)

La ejecución de este programa causa la interrupción lógica del funcionamiento del reloj programable de tiempo real.

Programa de servicio a la interrupción (INTRTN)

Este programa salva el estado del procesador y manda ejecutar la rutina para el envío de señales. Al concluir ésta restituye el estado del procesador. Verifica que la ejecución de las rutinas correspondiente a la ejecución anterior concluyó antes de la nueva interrupción.

Programa de envío de señales (TAREA)

Llamado por INTRTN este programa forma los pulsos eléctricos para cada actuador y los envía por el acoplador en paralelo de la computadora. La decisión de enviar o no un pulso se toma con base -

a la comparación entre el tiempo transcurrido y aquél en que se debe enviar se algún pulso.

Cuando el primero es mayor se envía el pulso y se incrementa el contador de tiempo, de lo contrario únicamente se incrementa el contador de tiempo. Adicionalmente se verifica el momento en que ha transcurrido un tiempo igual al intervalo de simulación para actualizar los apuntadores en el programa cuando esto ocurra.

Programa para verificar la conclusión de la rutina de control

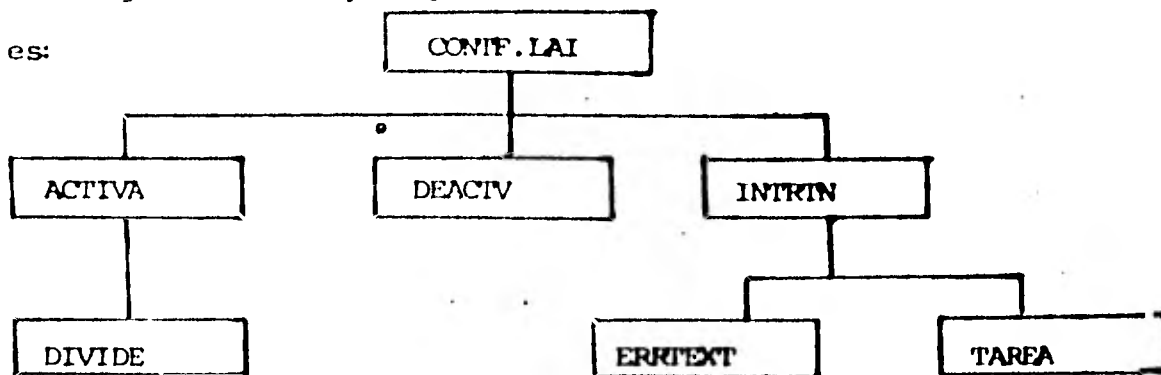
(ERREXT)

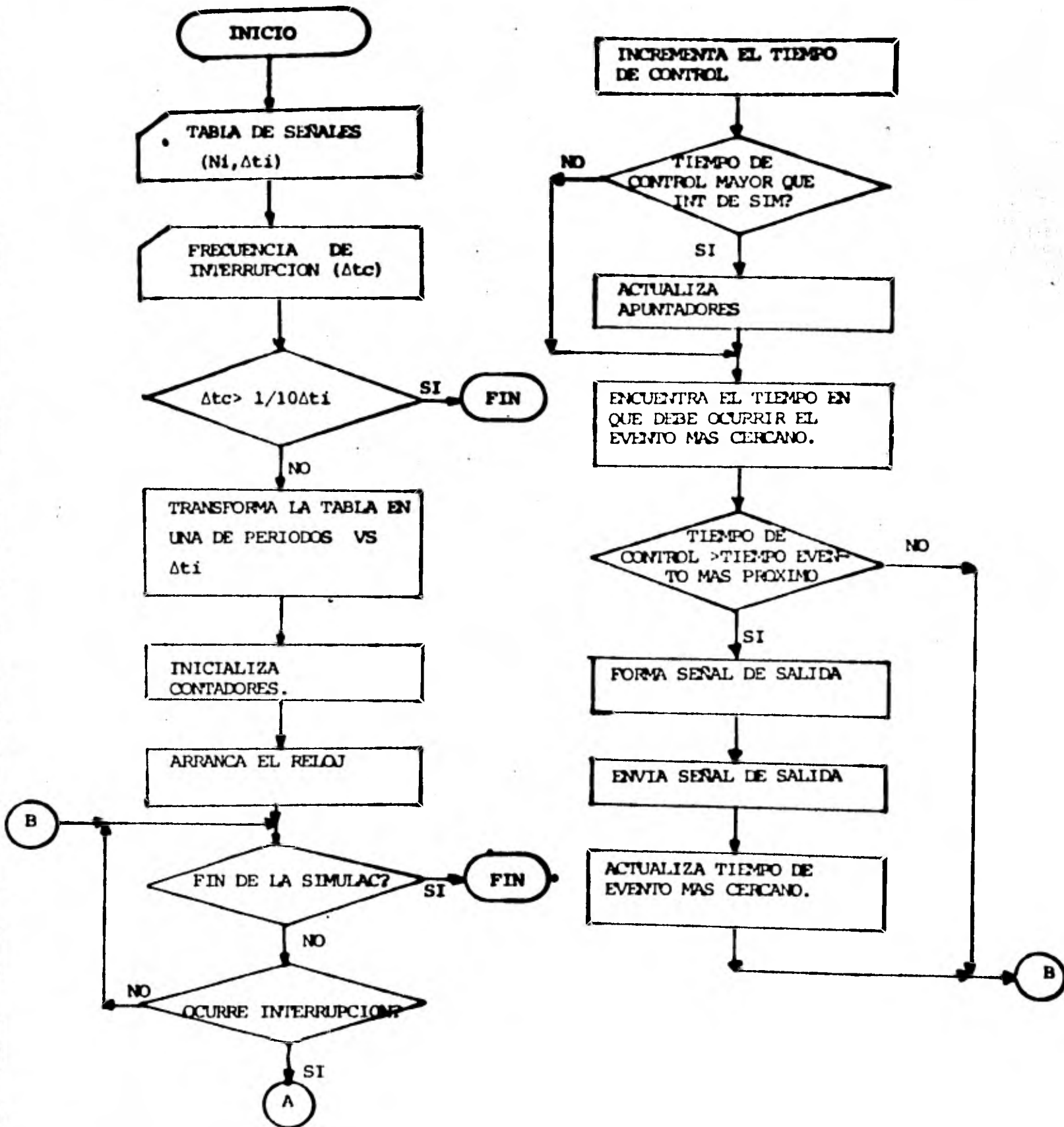
Este programa, llamado desde el programa INTRTN, verifica que la interrupción corriente ocurra después de haber concluido completamente la ejecución de las rutinas correspondiente a la interrupción anterior. Si ésto no ocurre la ejecución del programa se suspende.

Programa para dividir dos número enteros binarios (DIVIDE)

Se utiliza cuando se desea que el reloj provoque interrupciones con una frecuencia menor que 1 Khz. Es llamado desde el programa ACTIVA.

El diagrama de bloques que recibe la interrelación entre estos programas es:





PROGRAMA PARA REALIZAR LAS ACCIONES DE
CONTROL DE LA CANTIDAD DE TURBO.

(LALIL 80)

EXTERNAL TAREA1

COMMON /B1/ N(7,1000), M(7,1000), IPALB(7),L(1000)
COMMON /B2/ IREG,ITSIM,ICORR,ICOND,IEP,NEP,IMP,NPI

DECLARA EL ARCHIVO QUE CONTIENE LOS PULSOS

CALL ASSIGN (2,'PULSOS.DAT')
DEFINE FILE 2(1000,7,U,15)
19=1

PIDE EL NUMERO DE REGISTROS DEL ARCHIVO(MAXIMO MIL)
Y EL FACTOR DE AMPLIFICACION

TYPE 18
ACCEPT 20,NUMREG
TYPE 30
ACCEPT 70,FA

CALCULA EN INTERVALO DE SIMULACION (EN DIEZMILISEGUNDOS)
Y LO CORRIGE POR EL FACTOR DE AMPLIFICACION

READ(2'1)T,I,J,K,L1
TSIM=T

READ(2'2)T,I,J,K,L1
TSIM=T-TSIM

ITSIM=TSIM*10000*FA
IREG=0

REALIZA LA LECTURA DEL ARCHIVO Y GUARDA EN EL LUGAR
CORRESPONDIENTE EL VALOR DE LOS INCREMENTOS DE TIEMPO
ENTRE LAS SEÑALES DE UN ACTUADOR DADO ESTE Y DADO
UN REGISTRO DETERMINADO

DO 200 10=1,NUMREG
READ(2'10)T,I,J,K,L1
DO 100 11=1,7
N(11,10)=ITSIM*2

100 CONTINUE
L(10)=128
IF(1.EQ.0) L(10)=0

IF(1.NE.0) N(7,10)=ITSIM/I

IF(J.GT.0) N(1,10)=ITSIM/J
IF(J.LT.0) N(2,10)=IABS(ITSIM/J)

IF(K.GT.0) N(3,10)=ITSIM/K
IF(K.LT.0) N(4,10)=IABS(ITSIM/K)

IF(L1.GT.0) N(5,10)=ITSIM/L1
IF(L1.LT.0) N(6,10)=IABS(ITSIM/L1)

200 CONTINUE

DO 300 10=1,NUMREG


```

          DO 300 11=1.7
              M(11,10)=N(11,10)
300  CONTINUE
C
      DO 400 10=1.7
          IPALBI(10)=2**((10-1)
400  CONTINUE
C
      PIDE EL TIEMPO DE BARRIDO
C
      TYPE 40
      ACCEPT 20,ICON
C
      ICOND=ICON*10
      ICONA=ITSIM
C
      SI EL TIEMPO DE BARRIDO ES MAYOR QUE LA DECIMA PARTE DEL TIEMPO DE
      SIMULACION ABORTA
C
      IF((ICON*100) .GE. ITSIM) TYPE 50
      IF((ICON*100) .GE. ITSIM) CALL EXIT
      NUMREG=NUMREG+2-2
      IREG--2
      IAP--14
C
      ACTIVA EL RELOJ DE CONTROL
C
      CALL ACTIVA(ICON,TAREA1)
C
      VERIFICA SI EL REGISTRO BAJO CONTROL NO ES EL ULTIMO
C
500  CONTINUE
C
      IF(IREG.LT.NUMREG) GO TO 500
C
      CUANDO LO ANTERIOR NO SE CUMPLE DESACTIVA EL RELOJ
C
      CALL DEACTV
      TYPE 60
C
10  FORMAT(///, ' NUMERO DE REGISTROS(13) : ',///)
20  FORMAT(13)
30  FORMAT(///, ' FACTOR DE AMPLIFICACION(F4.1) : ',///)
40  FORMAT(///, ' TIEMPO DE BARRIDO(MS)(13) : ',///)
50  FORMAT(///, ' TIEMPO DE BARRIDO MIL. CORRIDA APORTADA',///)
60  FORMAT(///, ' CORRIDA CONCLUIDA !!!',///)
70  FORMAT(F4.1)
C
      ENDFILE 2
      CALL EXIT
C
.....
C
      END
C
      SUBROUTINE TAREA1
      CALL TAREA1
      RETURN
      END

```

SUBROUTINA DE PRUEBA QUE LLAMA A UN PROGRAMA QUE
 HACE UNA TAREA, Y ADEMÁS ACTIVA EL RELOJ AL INTERVALO
 DADO COMO PARAMETRO EN MILLISEGUNDOS.

SI EL INTERVALO ES MENOR A 100 MILLISEGUNDOS, LA
 CUENTA DE RELOJ ES EXACTA.

SI EL INTERVALO ES MAYOR QUE 100 MS. , LA CUENTA DE RELOJ
 ES APROXIMADA.

.CSECT ACT1A
 .GLOBL DIVIDE,DIRTAB,DAWD,INTRPTN
 .MACALL ..V2...REGDEF..PRINT
 ..V2..
 .REGDEF

CONSTANTES.

LIMITE = 500.
 FINO = 100.
 KHZ = 10
 HZ = 12
 DIEZ = 10.
 MODO = 400
 START = 1
 INTERNA = 100
 CLKSEC = 344
 INTRPSW = 0
 CLKSTS = 170404
 CLKPST = 170406

```

:
:
INICIO: MOV   R0, -(SP)
        MOV   R1, -(SP)
        MOV   R2, -(SP)
        CMP   @2(R5), *LIMITE
        BGT   ERROR
        CMP   @2(R5), *FINO
        BGT   BURDA
        BIS   @1(R2), *CLKSTS           : FRECUENCIA DE RELOJ 1 KHZ.
        MOV   @2(R5), R0
        BR   SIGUE
BURDA:  BIS   @1(R2), *CLKSTS           : FRECUENCIA DE RELOJ 100 HRZ.
        MOV   @1(R2), R1
        CLR   R1
        MOV   @2(R5), R0
        JBR   PC, DIVIDE
SIGUE:  NEG   R0
        CLR   DAWD
        MOV   R0, @CLKPST
        BIS   @MODO, *INTSTS           : MODO DE INTERRUPT.
        MOV   @MODO, *DIEZ
        MOV   @DIEZ, *INTSTS           : DIFERENCIA DE FUTURA DE RELOJ.
        MOV   @INTSTS, *INTSTS+2
        BIS   @INTERNA, *CLKSTS       : HABILITA INTERRUPTON.
        BR   SALIDA
ERROR:  MOV   @LIMITE, *LAD
        CLR   @CLKPST
SALIDA: MOV   @R2, *R2
        MOV   @R1, *R1
        MOV   @R0, *R0
        BIS   @START, *CLKSTS         : APPANCA RELOJ.
        BR   FINE
    
```

```

.COPY
.CLOBL DIVIDE
.PHOLD .REGDEF
.PHOLDDEF
.PAGE
.TITLE SUBROUTINA DE DIVISION.

```

```

DESCRIP: SUBROUTINA QUE DIVIDE DOS
          NUMEROS ENTEROS BINARIOS.
REQUIRE: DIVIDENDO EN R1 Y R0.
          DIVISOR EN R2 Y R3.
          LA BANDERA DE SIGNIFICATIVO EN R1.
          CONTIENE EN R0.
          RESTA EN R1.
          NUMERO DEL REGISTRO DE ALTEFA.
          ERROR CERO R2+0.

```

```

DIVIDE: MOV    R3, -(SP)      :SALVA CONTENIDO DE REGISTROS.
        MOV    R5, -(SP)
        CLR    R5
        TST   R2           :PON BANDEPA SEGUN SIGNO DEL COCIENTE.
        BPL   R5           :RESULTANTE.
        NEG   R2
        INC   R5
15:     TST   R1
        BPL   LOOP
        NEG   R0
        BCC   25
        NEG   R1           :NIEGA APROPIADAMENTE EL DIVIDENDO.
        BR    35
25:     COM   R1           :OTRO CASO DE NEGACION.
35:     DEC   R5
LOOP:   MOV    R0, R3      :R0 ← R3
        ASL   R0
        ROL   R1
        CMP   R2, R1      :VERIFICA OVERFLOW.
        BLE   35          :SI HUBO OVERFLOW, PON BANDEPA.
15:     ASL   R0           :TOMA EL SIGUIENTE ELEMENTO DIVISIBLE.
        ROL   R1
        CMP   R2, R1      :EXISTE DIVISIBILIDAD?
        BGT   25          :NO, VUELVE A ITERAR.
        SUB   R2, R1      :EVALUA RESIDUO.
        INC   R0          :PON COCIENTE.
25:     SOB   R3, 15
        TST   R5
        BEQ   45
        NEG   R0
        BR    45
35:     CLR   R1
45:     MOV   R1, (SP)+, R5 :RESTAURA REGISTROS.
        MOV   R1, (SP)+, R3
        RTS   PC
        .END   DIVIDE

```

RUTINA DE SERVICIO A LA INTERFACCION PROGRAMADA POR EL
RELAY. INICIALIZADO POR LA SUBROUTINA "ACTIVO".

.CSECT INTPTM
.LABEL DIRDIR.BAND,REACTV,ERREXT
.PCHLL ...RECDLF...PRINT
...V2...
.REGDEF

CONSTANTES.

BESABL = 717
CLNSTS = 170404

RUTINA: MOV R0.-(SP)
MOV R1.-(SP)
MOV R2.-(SP)
MOV R3.-(SP)
MOV R4.-(SP)
MOV R5.-(SP)
TST BAND
BNE IS
MOV @-1,BAND : REALIZA UNA SUBROUTINA DE TAREA.
JSR PC,@DIRTAR
CLR BAND
MOV (SP)+,R5
MOV (SP)+,R4
MOV (SP)+,R3
MOV (SP)+,R2
MOV (SP)+,R1
MOV (SP)+,R0
RTI

@BESABL,@CLNSTS
MOV (SP)+,R5
MOV (SP)+,R4
MOV (SP)+,R3
MOV (SP)+,R2
MOV (SP)+,R1
MOV (SP)+,R0
MOV @ERREXT,(SP) : VE A SUBROUTINA DE SALIDA.
RTI

```

:
:
:
SUBROUTINA QUE DESACTIVA LA INTERRUPCION PROVOCADA POR
EL RELOJ.
:
:
:
.CSECT DEACTV
.PCALL .REGDEF
.REGDEF
:
:
DIRECCION.
:
:
DESABL = 717
CLKSTS = 170484
:
:
BEGIN: BIC      @DESABL,@CLKSTS
      RTS      PC
:
:
.CSECT ERREXT
.PCALL ..V2....PRINT..EXIT
..V2..
:
ERR:  .PRINT @MESSAGE
      .EXIT
:
:
MESSAGE: .ASCIZ  /* INTERRUPCION MUY RAPIDA */
        .EVEN

```

SUBROUTINA QUE TOMA CONTROL DURANTE LA INTERUPCION DEL
RELUJ.

.CSECT TAREA

.GLOBL W
.GLOBL M
.GLOBL IPALBI
.GLOBL L
.GLOBL IREG
.GLOBL ITSIM
.GLOBL ICONA
.GLOBL ICOND
.GLOBL IEP
.GLOBL NEP
.GLOBL IAP
.GLOBL NPI
.MCALL ..V2....REGDEF..PRINT
..V2..
.REGDEF

BRKDB = 167774

INI: ADD ICOND, ICONA
CMP ICONA, ITSIM
BLE 38
CLR ICONA
ADD @2, IREG
ADD @16, IAP
MOV IAP, R0
JSR PC, BUSCA
39: MOV IAP, R0
MOV IREG, R4
CMP ICONA, IEP
BLT 48
MOV L(R4), R2
MOV NPI, R3
ADD IPALBI(R3), R2
MOV R2, @BRKDB
NOP
MOV L(R4), @BRKDB
MOV NEP, R2
ADD M(R2), N(R2)
MOV IAP, R0
JSR PC, BUSCA
48: RTS PC

SUBROUTINA BUSCA.

BUSCA: MOV N(R0), IEP
MOV BA, NEP

```
CLR      NP1
MOV      02.R1
18: ADD   02.R0
CMP      016.R1
BEQ      39
CMP      IEP.N(R0)
BLE      28
MOV      R0.NEP
MOV      N(R0).IEP
20: MOV   R1.NP1
ADD      02.R1
BR       19
:
30: RTS   PC
:
ASTER:   .ASCIZ  /
        .EVEN
```

COMMON B1.

.CSECT B1

.GLOBL N
.GLOBL M
.GLOBL IPALB1
.GLOBL L

3
N: .BLKW 15530
M: .BLKW 15530
IPALB1: .BLKW 7
L: .BLKW 1750

COMMON B2.

.CSECT B2

.GLOBL IREG
.GLOBL ITSIM
.GLOBL ICAND
.GLOBL IFOND
.GLOBL IEP
.GLOBL NEP
.GLOBL IEP
.GLOBL NP1

REG: .BLKW 1
SIM: .BLKW 1
CAND: .BLKW 1
FOND: .BLKW 1
IEP: .BLKW 1
NEP: .BLKW 1
NP1: .BLKW 1

ANEXO F

PROCESO DE CORTE DE METALES CON SOPLETE DE OXIACETILENO.

La principal función de un soplete de oxiacetileno es mezclar, - en proporciones aleucadas, oxígeno y acetileno, provenientes de tanques de almacenamiento, que actúan como comburente y combustible, respectivamente, al inflamarse la mezcla. La flama producida se conoce como flama de calentamiento y alcanza temperaturas del orden de 3000°C.

Cuando se trata de un soplete que sirve para el corte de metales debe tener capacidad, adicionalmente, de lanzar un chorro de oxígeno a través de la flama. En los sopletes manuales este chorro es lanzado al accionar un gatillo localizado en el mango del soplete.

Existen dos etapas necesarias para realizar el corte de un metal con soplete. La primera se conoce como etapa de precalentamiento, en ella la flama de calentamiento se apunta hacia el lugar en que se desea iniciar el corte, permaneciendo en ese sitio el tiempo necesario para que la temperatura del metal en ese punto alcance lo que se denomina temperatura de ignición (que no es lo mismo que temperatura de fusión) que para el fierro corresponde - aproximadamente a la temperatura del rojo amarillento (950°).

La segunda parte del proceso consiste en permitir la inyección - del chorro de oxígeno a presión que debe reaccionar químicamente

con el metal caliente produciendo óxido de fierro Fe_3O_4 (magnetita).

La producción de la magnetita es el resultado de la combustión del fierro en presencia de oxígeno. Este proceso genera calor que permite la fusión del óxido de fierro, que es expulsado bajo la acción del chorro de oxígeno y el precalentamiento simultáneo de la siguiente zona por cortar el precalentamiento. El movimiento del soplete a una velocidad determinada (velocidad de corte) produce el corte del metal de forma continua.

Dependiendo del espesor de la placa de metal que se quiera cortar, se selecciona la presión del oxígeno, la presión del acetileno y la velocidad de corte.

En la tabla F.1 se presenta la relación que existe entre estos parámetros (Ref. 7).

Espesor de corte mm	Presión del acetileno Kg/cm ²	Presión del oxígeno Kg/cm ²	Velocidad de corte mm/min
6.5	0.14	1.8	510 a 610
13.0	0.14	2.1	460 a 510
25.0	0.14	2.8	410 a 440
51.0	0.14	3.5	310 a 330
76.0	0.14	4.2	230 a 260
102.0	0.28	5.0	160 a 180
152.0	0.28	5.7	110 a 130

Tabla F1 Condiciones para el corte de metales con soplete de oxiacetileno. (Ref.7)

En esta table se puede apreciar que para un intervalo considerable de espesores de corte, la presión del acetileno permanece constante, mientras que la del oxígeno varía notablemente. También se puede apreciar que para cada espesor de placa, la velocidad de corte puede variar entre un valor mínimo y un valor máximo, siendo este último un valor crítico, ya que si se sobrepasa, puede presentarse un "salto", es decir, puede llegarse a una porción de la placa en donde su temperatura no haya alcanzado el punto de ignición y por lo tanto no se realice el corte. Por otra parte, si no se alcanza el valor mínimo especificado para la velocidad de corte, se propicia un mayor consumo de oxígeno y acetileno, y un acabado de menor calidad.

Durante el corte con soplete de un tubo que actuará como elemento estructural debe producirse en el borde del mismo el bisel y la cara de raíz. Tanto el ángulo de bisel como la magnitud de la cara de raíz están normalizados por la American Welding Society (AWS) cuyas normas se resumen en la figura F.1

El detalle "D" de la figura F.1 no es necesario para las uniones que se considerarán que tendrán siempre ángulos de unión mayores de 30° por lo que pueden ser habilitadas según las consideraciones del detalle "C".

La cara de raíz se puede hacer igual a cero según lo muestran los detalles A, B y C lo que permite simplificar la producción del bisel.

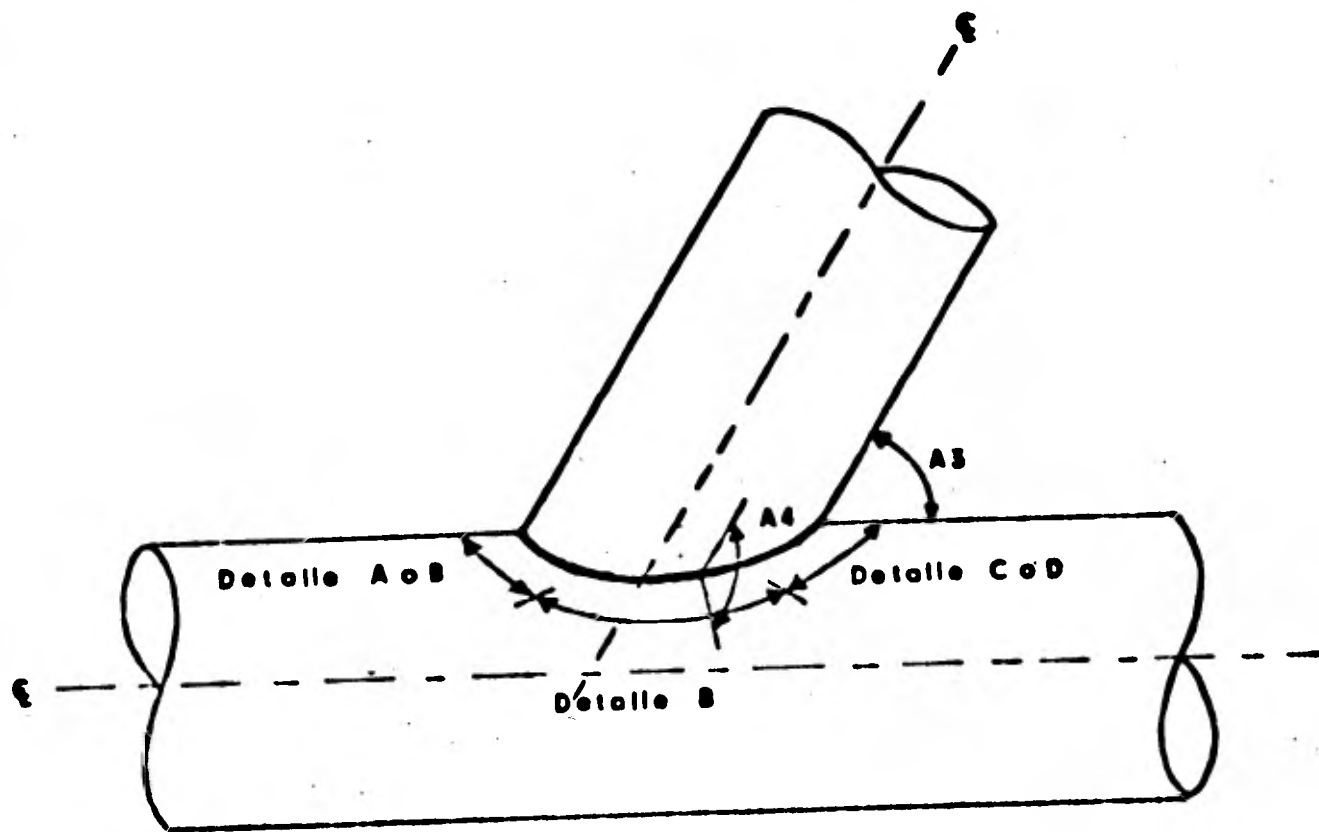
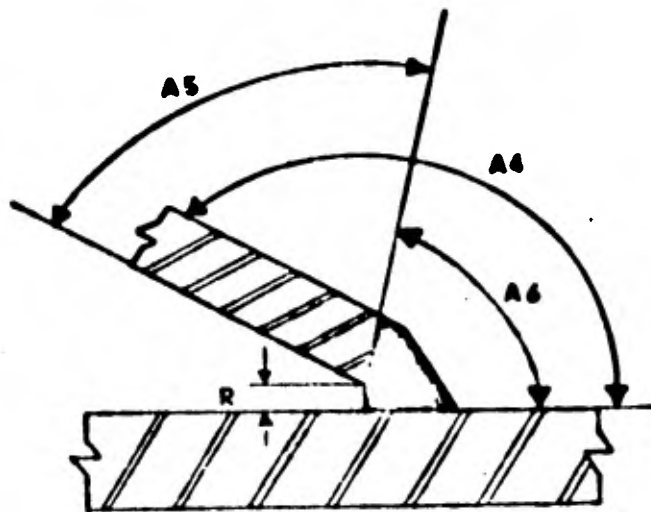


Figura F.1.



$$135^\circ \leq A4 \leq 180^\circ$$

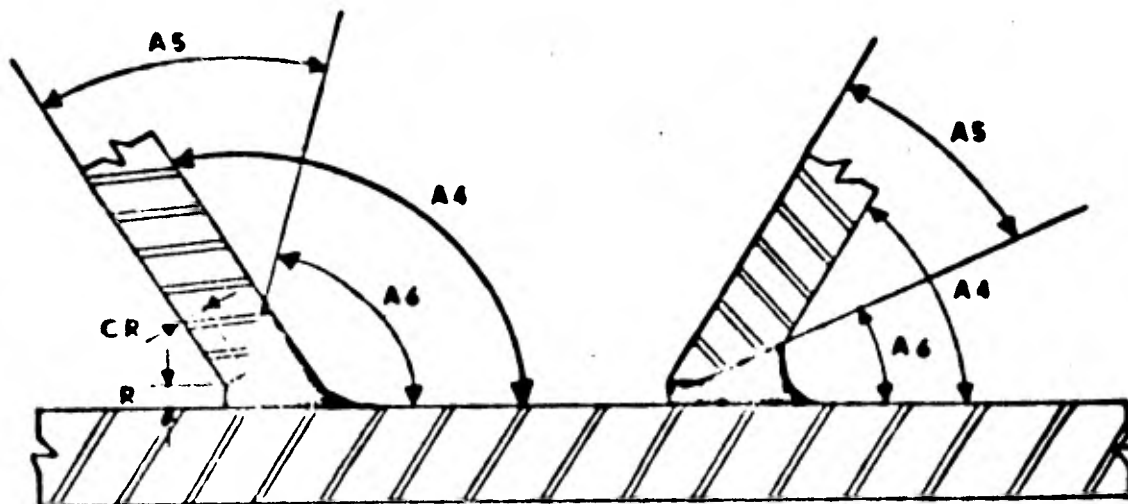
$$45^\circ \leq A5 \leq 90^\circ$$

$$45^\circ \leq A6 \leq 90^\circ$$

$$1.6 \text{ mm} \leq R \leq 4.8 \text{ mm}$$

$$CR=0$$

Detalle A



$$90^\circ \leq A4 \leq 150^\circ$$

$$45^\circ \leq A5 \leq 90^\circ$$

$$45^\circ \leq A6 \leq 90^\circ$$

$$1.6 \text{ mm} \leq R \leq 6.4 \text{ mm}$$

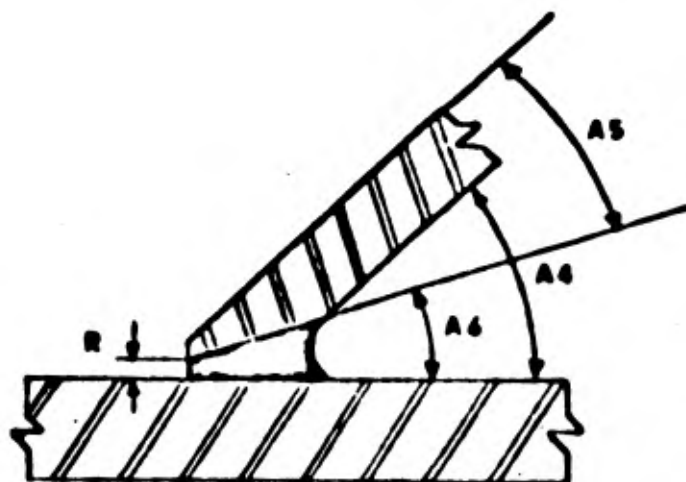
$$0.0 \text{ mm} \leq CR \leq 1.6 \text{ mm}$$

$$50^\circ \leq A4 \leq 90^\circ$$

$$10^\circ \leq A5 \leq 45^\circ$$

$$40^\circ \leq A6 \leq 80^\circ$$

Detalle B



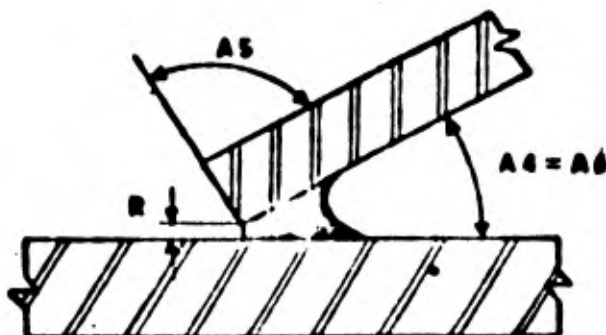
$$30^\circ \leq A4 \leq 75^\circ$$

$$10^\circ \leq A5 \leq 37.5^\circ$$

$$20^\circ \leq A6 \leq 65^\circ$$

$$3.2 \text{ mm} \leq R \leq 4.8 \text{ mm}$$

Detaille C



$$15^\circ \leq A4 \leq 40^\circ$$

$$A5 = 90^\circ$$

$$3.2 \text{ mm} \leq R \leq 4.8 \text{ mm}$$

Detaille D

Con estas consideraciones, se ajustó una función lineal a intervalos que relaciona el ángulo de bisel con el ángulo diedro local, la cual se presenta en la tabla F.2.

A4 grados	A5 = f(A4) grados
135 a 180	90
90 a 135	A4 - 45
30 a 90	$\frac{1}{2} A4$

Tabla F.2 Función que relaciona el ángulo de bisel con el ángulo diedro local.

ANEXO G

INSTRUCTIVO DE OPERACION

La secuencia para operar la máquina cortadora de tubos en las condiciones en que se encuentra es:

0. Inicio.
1. Levantar el soporte del soplete aflojando el prisionero que mantiene fija la guía vertical del soplete.
2. Colocar el tubo sobre los rodillos. Se debe procurar que una de las orillas del tubo coincida aproximadamente con el extremo derecho de las guías del carro longitudinal del soplete. (Se considera como frente el lado donde se encuentra el soplete).
3. Bajar el soplete hasta que la punta del mismo se encuentre a 1 cm. del borde superior del tubo. Apretar firmemente el prisionero una vez concluida esta operación.
4. Abrir el interruptor (posición NO) que conecta la computadora con los controladores de los motores. El interruptor está localizado en la parte posterior del gabinete.
5. Cerrar el interruptor GENERAL (SI).
6. Energizar los motores 1 a 4.

7. Para posicionar el carro del soplete (motor 1) en el extremo derecho, se hace coincidir la punta del soplete con la orilla del tubo, mover la palanca DIRECCION hacia el lado conveniente, oprimir el botón OSCILADOR y girar hacia la derecha la perilla VELOCIDAD hasta que el carro alcance la posición deseada. Regresar la perilla velocidad hacia la izquierda, oprimir de nuevo el botón OSCILADOR y regresar la palanca - dirección a la posición central.
8. Poner la punta del soplete (motor 2) en posición vertical cerrando el interruptor PASO SIMPLE (SI). Colocar la palanca DIRECCION hacia el lado conveniente. Oprimir el botón OPRIMA tantas veces como se requiera para poner vertical el soplete. Al concluir regresar el interruptor PASO SIMPLE a su posición original (NO).
9. El ajuste de la posición inicial del regulador de presión del oxígeno (motor 3) se realiza siguiendo una secuencia semejante a la anterior - hasta lograr que la perilla graduada del regulador de dos vueltas completas partiendo de la posición en que está completamente abierta.
10. Encender la computadora PDP-11/40 (computadora del lado izquierdo).
11. Ejecutar el programa SIMULA.IAI. Es necesario proporcionar al programa los datos de la unión y de las características de los actuadores. El programa al concluir imprime el número de registro que contiene la tabla de señales producto de la ejecución.

12. Verificar que el interruptor del DRK-11 se encuentra en la posición adecuada. (Este interruptor está localizado en la parte superior de la computadora derecha y debe estar en 'ON').
13. Cerrar el interruptor descrito en el paso 4.
14. Cerrar el interruptor SOLENOIDE (SI).
15. Encender la flama del soplete.
16. Ejecutar el programa CONF.LAI proporcionando como datos el número de registros obtenidos en el paso 11, el factor de amplificación (usualmente la unidad) y el intervalo de barrido (se recomienda usar 1 ms).
17. Apagar el soplete.
18. Abrir el interruptor SOLENOIDE (NO).
19. Abrir el interruptor descrito en el paso 4.
20. Apagar la computadora.
21. Desenergizar los motores.
22. Abrir el interruptor GENERAL (NO).
23. Fin.