



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**“RECONSTRUCCION Y RECONVERSION DE UNA  
MAQUINA DE EXTRUSIÓN SOPLADO PARA EL  
LABORATORIO DE PROCESAMIENTO DE PLASTICOS”**

**T E S I S**

**Q U E P A R A O B T E N E R E L  
T I T U L O D E :**

**I N G E N I E R O M E C A N I C O  
E L E C T R I C I S T A**

**P R E S E N T A :**

**A N G E L A L F R E D O C U A D R O S V I L L E G A S**

**DIRECTOR: M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN  
ING. FRANCISCO JOSE RODRIGUEZ RAMIREZ**



**2011**



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.

# Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, en especial a mis papas Jesús y María C. a mis hermanos, Felipe de Jesús, Francisco, Rosa María y especialmente a María de Lourdes, por ayudarme y apoyarme todo el tiempo.

Un especial agradecimiento a mi hijo Ángel Alfredo por creer en mí y ser la parte más importante de mi vida.

Quiero agradecer a la maestra Magdalena por darme la oportunidad de poder concluir mi ciclo en la Universidad, confiando en la propuesta que se convirtió en tema para arrancar la extrusora sopladora del Laboratorio de Procesamiento de Plásticos.

A todos los compañeros que pasaron conmigo momentos difíciles durante la estancia en la facultad que me brindaron su amistad y compañerismo.

# Índice

## “RECONSTRUCCION Y RECONVERSION DE UNA MAQUINA DE EXTRUSION SOPLADO DEL LABORATORIO DE PROCESAMIENTO DE PLASTICOS”

1. Introducción.
2. Antecedentes.  
Objetivo: Conocer la historia del proceso, su evolución y aplicaciones, así como los sistemas de control.
  - 2.1. Historia del proceso.
  - 2.2. Los sistemas de control.
3. Las máquinas de extrusión soplado en la actualidad.  
Objetivo: Analizar cuál ha sido el desarrollo de las maquinas de extrusión soplado, como de sus componentes y mejoras.
  - 3.1 Introducción
  - 3.2 Generalidades
  - 3.3 Componentes del proceso
4. Modernización de la máquina de extrusión soplado del laboratorio.  
Objetivo: Propuesta de cambio del sistema de control de contactores por un sistema de control a PLC e inversor de frecuencia para controlar la velocidad del motor del extrusor.
  - 4.1 Introducción
  - 4.2 Estado inicial de la máquina.
  - 4.3 Propuesta de cambio del sistema de control de la máquina.
  - 4.4 Características finales del sistema de control de la máquina en base a los nuevos diseños.
5. Análisis de la propuesta.  
Alcance: Modernizar el sistema de control de una maquina de extrusión soplado que permita movimientos automáticos con las nuevas tecnologías.
  - 5.1 El nuevo sistema de control.
  - 5.2 Costos de la inversión.
6. Conclusiones.  
Bibliografía.

## 1. Introducción

¿En que pensamos cuando decimos o escuchamos la palabra plástico?

Hace mas de cien años, al mencionar el término plástico, éste se podía entender como algo relativo a la reproducción de formas o de las artes plásticas, la pintura, la escultura y el modelado. En la actualidad, esta palabra se utiliza con mayor frecuencia y tiene un significado que implica no sólo arte, sino también tecnología y ciencia.

PLASTICOS es una palabra que deriva del griego "Plastikos" que significa "Capaz de ser Moldeado", sin embargo, esta definición no es suficiente para describir de forma clara la gran variedad de materiales que así se denominan.

Técnicamente los plásticos son sustancias de origen orgánico formado por largas cadenas macromoleculares que contienen en su estructura carbono e hidrógeno principalmente y se obtienen mediante reacciones químicas entre diferentes materias primas de origen sintético o natural.

Es posible moldearlos mediante procesos de transformación aplicando calor y presión.

Los plásticos son parte de la gran familia de los Polímeros.

Polímeros es una palabra de origen latín que significa Poli, muchas y meros, partes, de los cuales se derivan también otros productos como los adhesivos, recubrimientos y pinturas.

Para procesar estos polímeros se requiere de maquinaria y equipo que pueda transformarlos en diferentes formas, colores y tamaños, para eso se crearon diferentes procesos que se utilizan para esta transformación y de ellos se destaca uno que es el proceso de extrusión soplado (extrusión soplo) para fabricación de artículos de formas huecas con partes estrechas como el cuello o boca que no pueden ser procesadas en otro tipo de equipos como lo son el moldeo, por inyección, por compresión, etcétera.

Con este trabajo conoceremos la historia de este proceso (extrusión soplado) así como su desarrollo desde sus inicios hasta nuestros días y veremos cómo se reconstruye (rehabilita, remodela, etc.) la extrusora que tenemos en el laboratorio de plásticos hasta proponer su conversión de control discreto (contactores y relevadores, etc.) a un nuevo control con PLC (por sus siglas en inglés Programmable Logic Controller) que nos facilitará la operación de la máquina y un inversor de frecuencia que nos permitirá la extrusión de un plástico controlando la entrega infinitamente, en resumen un mejor control operacional y un proceso más controlado..

## 2. Antecedentes

### 2.1.-Historia del proceso de extrusión

El proceso más importante y de gran variedad utilizado en la actualidad es por supuesto, el que se realiza al forzar una mezcla plástica a través de un dado y el significado de esto es un tornillo extrusor. Algunas veces llamado tornillo, gusano o husillo y se remonta hasta el griego matemático Arquímedes quien vivió en los años 287-212 AC. El tornillo a menudo atribuido a Arquímedes ya que fue conocido por los egipcios antes de la era de Arquímedes y fue probablemente dado su nombre porque Arquímedes practicaba trabajando en la mecánica y la geometría.

En escrituras del siglo I antes de Cristo, Diodorus menciona el uso del tornillo de Arquímedes en la irrigación del delta del río Nilo.

El tornillo de Arquímedes tiene la fama de tener 3 modelos:

1. Un cilindro lleno de agua en el cual encierra una hélice
2. Una barra o tubo formado helicoidalmente alrededor de su eje
3. Una hélice girando libremente dentro de un cilindro fijo

Arquímedes de acuerdo a la historia ideó este tornillo para remover o bombear agua contenida en un bote (barco). Este diseño se aplica en la actualidad en varias industrias y es realmente idéntico. Hoy en día en principio bombea una mezcla plástica a través de un dado.

El extrusor actual consiste esencialmente de un cilindro horizontal en el cual está girando un tornillo de Arquímedes modificado. Esto significa que está provisto de un orificio al fondo del cilindro para permitir la alimentación de un compuesto dentro de él, al extremo opuesto se encuentra el cabezal y el dado.

Por un periodo largo no hubo cambios drásticos hasta que a finales del siglo 19 fue adoptado y necesariamente adaptado para la extrusión de plásticos.

En aquella época el cilindro estaba cubierto con una chaqueta para permitir la circulación y transferencia de calor mediante aceite o vapor (para extrusores de caucho). En unos pocos diseños tuvieron algún tipo de adaptaciones para obtener y/o controlar temperaturas uniformes e independientes a las del cabezal y el dado. Donde los extrusores de plástico fueron introducidos como aisladores de conductores eléctricos y la prueba fue realizada para utilizar la máquina para extruir un tubo convencional de caucho sobre un conductor eléctrico o núcleo cableado (reunido de filamentos de cobre). El material plástico alimentado a estas máquinas inicialmente fue una cinta de caucho. La alimentación fue llevada en el cilindro por el tornillo y calentada por contacto a través de las paredes del cilindro. El compuesto fue reducido a un estado de plastificación suave por el calor externo, por el trabajo mecánico y la contra presión creada. El material fue forzado a pasar por el cabezal a través de un dado en forma de tubo.

Los resultados obtenidos no fueron satisfactorios cuando el material termoplástico fue llevado y alimentado a esta máquina a temperatura ambiente. Con ello se intentó realizar una prueba más con el material almacenado y previamente calentado. Algunas ventajas se obtuvieron de este procedimiento, el extrusor convencional de caucho no trabajaba con material almacenado aun siendo este precalentado, para alcanzar el estado propio del plástico.

Ésto llevó a que necesariamente tuviera que precalentarse el material almacenado en un mezclador abierto (dos rodillos girando en sentidos opuestos) para crear suficiente plasticidad o flujo en el compuesto y que cuando este fuera alimentado dentro del extrusor previamente calentado, fuera transportado al cabezal y al dado en un estado homogéneo.

Como resultado, fueron desarrollados nuevas variantes de extrusores para usarse con materiales termoplásticos aunque lentamente desarrollados. Las nuevas máquinas desarrolladas, fueron diferentes a las típicas de caucho debido a los siguientes cambios:

1. Los cilindros y los tornillos fueron aproximadamente  $1/3$  más largos, en la relación longitud diámetro (L/D) nomenclatura posteriormente adoptada, para el viejo extrusor de caucho de  $3 \frac{1}{2}$ " de diámetro que tenía una relación L/D de 6:1 o aún menor. Las modificaciones posteriores para los extrusores de plástico fueron cercanas a una relación L/D de 8:1.
2. Se hicieron provisiones para la inserción de un plato rompedor con mallas para crear y controlar una contra presión debido al trabajo mecánico del material plástico (fricción) que tiene grandes efectos en el avance de la masa.
3. Las secciones de acometida (es donde inicia la sección de alimentación del extrusor) fueron más sólidamente construidas para absorber la contra presión desarrollada con los termoplásticos. Este incremento en la contra presión permitió el desarrollo de mayor trabajo mecánico (fricción), y como resultado mejorar el flujo y la uniformidad del plástico.
4. Se prepararon sistemas de calefacción y control independientes para el cabezal y el dado.
5. Las temperaturas del cilindro y del extrusor fueron individualmente controladas, estas se hicieron ajustables para poder modificarlas durante el proceso de extrusión como una condición básica.

Los trabajos de desarrollo continuaron, resultando mejoras adicionales al extrusor, las longitudes del cilindro y el tornillo fueron incrementadas hasta dar una relación L/D de 12:1. Este incremento en la longitud resultó en un considerable aumento en la capacidad de extrusión, uniformidad y una cualidad de sobre extrusión.

Actualmente las longitudes de los tornillos son del orden de 24:1 y este factor es probablemente el desarrollo más prominente en este tipo de equipos en las tres o cuatro últimas décadas.

Bibliografía Electrical Wire Handbook, The Wire Association International paginas de 125 hasta 127.

Paralelamente al desarrollo de la extrusora se dio el desarrollo de los plásticos cuando se descubrió que las resinas naturales podían emplearse para elaborar objetos de uso práctico. Estas resinas como el betún, la gutapercha, la goma laca y el ámbar, fueron extraídas de árboles, y se tienen referencias de que se utilizaban en Egipto, Babilonia, la India, Grecia y China. En América se conocía otro material que era utilizado por sus habitantes antes de la llegada de Colón, conocido como hule o caucho.

El hule y otras resinas presentaban algunos inconvenientes y, por lo tanto, su aplicación resultaba limitada.

Sin embargo, después de muchos años de trabajos e investigaciones se llegaron a obtener resinas semi-sintéticas, mediante tratamientos químicos y físicos de resinas naturales.

Se puede decir que la primera resina semi-sintética fue el hule vulcanizado, obtenida por Charles Goodyear en 1839 al hacer reaccionar azufre con la resina natural caliente. El producto obtenido resultó ser muy resistente a los cambios de temperatura y a los esfuerzos mecánicos.

A mediados del siglo XIX, el inventor inglés Alexander Parkes obtuvo accidentalmente nitrocelulosa, mediante la reacción de la celulosa con ácido nítrico y sulfúrico, la cual llamó "Parkesina", que con aceite de ricino se podía moldear, pero debido a su flamabilidad, no tuvo éxito comercial.

Alrededor de 1860, en los Estados Unidos surgió el primer plástico de importancia comercial gracias a un concurso para encontrar un material que sustituyera al marfil en la fabricación de las bolas de billar (en esa época se utilizaban tanto marfil, que se sacrificaban 12,000 elefantes anualmente para cubrir la demanda). Casualmente los hermanos Hyatt trabajaban con el algodón tratado con ácido nítrico, siendo un producto muy peligroso que podía utilizarse como explosivo. Aprovechando la idea de Parkes, sustituyeron el aceite de ricino por alcanfor y al producto obtenido le llamaron "Celuloide", el cual hizo posible la producción de varios artículos como peines, bolas de billar y películas fotográficas.

Otro plástico semi-sintético que tuvo buena aceptación comercial fue el que desarrollaron Krische y Spitteler en 1897, debido a la demanda de pizarrones blancos en las escuelas alemanas. Este material se fabricó a base de Caseína, una proteína extraída de la leche al hacerla reaccionar con formaldehído y su principal aplicación fue la elaboración de botones.

En 1899 Leo H. Baeklan, descubrió una resina considerada totalmente sintética, "la baquelita", la cual se obtienen mediante la reacción del fenol con formaldehído.

Aunque en el siglo XIX se observó en diversos laboratorios que, por acción de la luz o del calor, muchas sustancias simples, gaseosas o líquidas se convertían en compuestos viscosos o incluso sólidos, nadie se imaginó el alcance que tendrían estos cambios como nuevas vías de obtención de plásticos.

El siglo XX puede considerarse como el inicio de "La Era del Plástico", ya que en esta época la obtención y comercialización de los plásticos sintéticos ha sido continuamente incrementada y

el registro de patentes se presenta en número creciente. La consecución de plásticos sintéticos se originó de la Química Orgánica que se encontraba entonces en pleno auge.

En 1907 salió al mercado la resina fenólica "Baquelita", mientras Staundinger trabajaba en la fabricación de poliestireno y Otto Rhom enfocaba sus estudios al acrílico, que para 1930 ya se producían industrialmente.

Por su parte el PVC (por sus siglas en inglés Poli Vinil Chloride), aunque había sido sintetizado desde 1872 por Bauman, fue hasta 1920 cuando Waldo Semon, mezclándolo con otros compuestos, obtuvo una masa parecida al caucho, iniciándose así la comercialización del PVC en 1938.

El químico Herman Staundinger, premio Nobel de 1953 con sus trabajos revolucionarios iniciados en 1920, demostró que muchos productos naturales y todos los plásticos, contienen macromoléculas. Este descubrimiento hizo que se considerara como el "Padre de los Plásticos".

Muchos laboratorios de Universidades y grandes Industrias Químicas concentraron sus esfuerzos en el desarrollo de nuevos plásticos, aprendiendo las técnicas para encausar y dirigir casi la voluntad las reacciones químicas.

Entre los años de 1930 y 1950, debido a la segunda Guerra Mundial surge la necesidad de desarrollar nuevos materiales que cumplan con mejores propiedades, mayor resistencia, menor costo y que sustituyeran a otros que escaseaban. Es en este período, cuando surgieron plásticos como el Nylon, Polietileno de Baja densidad y el Teflón en un sector de gran volumen, y la industria química adquirió de suministrador importante de materiales.

Otro momento exitoso dentro de la historia de los plásticos fue en 1952, cuando K. Ziegler, premio Nobel en 1964 junto con G. Natta, descubren que el etileno en fase gaseosa resultaba muy lento para reaccionar. Ambos logran su polimerización de manera más rápida por contacto con determinadas substancias catalizadas a presión normal y temperatura baja. Por su parte, G. Natta descubrió en 1954 que estos catalizadores y otros similares daban lugar a las macromoléculas de los plásticos con un lato ordenamiento.

La década de los sesenta se distinguió porque se lograron fabricar algunos plásticos mediante nuevos procesos, aumentando de manera considerable el número de materiales disponibles. Dentro de este grupo destacan las llamadas "resinas reactivas" como: Resinas Epoxi, Poliésteres Insaturados, y principalmente Poliuretanos, que generalmente se suministran en forma líquida, requiriendo del uso de métodos de transformación especiales.

En los años siguientes, el desarrollo se enfocó a la investigación química sistemática, con atención especial a la modificación de plásticos ya conocidos mediante espumado, cambios de estructura química, copolimerización, mezcla con otros polímeros y con elementos de carga y de refuerzo.

En los años setentas y ochentas se inició la producción de plásticos de altas propiedades como la Polisulfornas, Poliariletercetonas y Polímeros de Cristal Líquido. Algunas investigaciones en este campo siguen abiertas.

Las tendencias actuales van enfocadas al desarrollo de catalizadores para mejorar las propiedades de los materiales y la investigación de las mezclas y aleaciones de polímeros con el fin de combinar las propiedades de los ya existentes.

A la par del descubrimiento y síntesis de los materiales plásticos, la creatividad del hombre ha ideado formas para moldearlos con el objeto de satisfacer sus necesidades. Por ejemplo: la sustitución de los materiales tradicionales como el vidrio, metal, madera o cerámica, por otros nuevos que permiten obtener una mejoría de propiedades, facilidad de obtención y, por las necesidades del presente siglo, la posibilidad de implementar producciones masivas de artículos de alto consumo a bajo costo.

El nacimiento de los procesos de moldeo de materiales plásticos, se remota a épocas bíblicas con el uso del bitumen, para la confección de la canasta en la que se puso al patriarca hebreo Moisés en el río Nilo y en el uso de este material en vez de cemento para edificar Babilonia. Al seguir el curso de la historia, se detectan otros usos de resinas naturales como el ámbar en joyería en la antigua roma, la laca como recubrimiento en la India, pelotas de hule natural para juegos rituales en América Central, y otras. En 1839, Charles Goodyear descubrió el proceso de vulcanización del hule con azufre, pero aún no se puede hablar de procesos de moldeo comercial o industrial.

En 1868 Parkes, en Londres, idea el moldeo de nitrato de celulosa utilizando una pequeña cantidad de solvente y calor para plastificar el compuesto. Los intentos para el desarrollo de productos y proceso para moldear continuaron y en 1872 se patenta la primera máquina de inyección, para moldear nitrato de celulosa, pero debido a la flamabilidad de este material y su peligrosidad de trabajar, el proceso no se desarrolló.

Al término del siglo XIX, los únicos materiales plásticos disponibles para usos prácticos eran el Shellac (laca), la Gutta Percha, la Ebonita y el Celuloide, el ámbar y el bitumen, moldeados en formas artesanales.

En 1926, la expansión de materiales poliméricos y las experiencias en el diseño de máquinas para procesarlos, estimulan la creación de máquinas con aplicación industrial, en la construcción y fabricación en serie de inyectoros de émbolo impulsada por la Síntesis del Poliestireno (PS por sus siglas en ingles Polystyrene) y Acrílico (PMMA por sus siglas en ingles Polymethyl methacrylate).

En 1935 Paul Toroester, en Alemania, construye una máquina extrusora de termoplásticos, basada en diseños anteriores para el procesamiento de hules. A Partir de estas fechas inicia el uso de electricidad para el calentamiento, que sustituye al vapor. En Italia se genera el concepto del uso de husillos gemelos. En 1938, se concibe la idea industrial de termo formado, y en 1940 el moldeo por soplado. A la fecha, se cuenta con la existencia de cientos de polímeros patentados; de ellos aproximadamente 30 son imprescindibles. Los productos manufacturados con plásticos, son obtenidos por más de 20 procesos de moldeo distintos aproximadamente 10 gobiernan la mayor parte del volumen de plásticos transformados.

Adicionalmente se tiene la siguiente información.

Los plásticos sintéticos fueron comercialmente utilizados en 1880 cuando la celulosa fue utilizada para fabricar, pelotas de ping pong, cepillos para el pelo, muñecas y joyería.

Desde 1930 hasta 1940 muchas innovaciones fueron desarrolladas para la fabricación de productos huecos, la hidráulica y los principios hidráulicos fueron utilizados para generar movimientos simples, así como la electricidad y el vapor fueron utilizadas para calentar y los plásticos utilizados fueron, el PS (por sus siglas en inglés Polystyrene), El Acetato de Celulosa, y algunos PVC (por sus siglas en inglés Polyvinyl Chloride).

La industria finalmente despertó en la realidad cuando tuvieron lugar 2 hechos. El primero fue cuando el LDPE (por sus siglas en inglés polyethylene low density) fue patentado en 1937 y el segundo cuando la primera planta comercial inicio funciones en 1939, el primer LDPE disponible fue utilizado para fines bélicos en 1945 y solo una pequeña cantidad de este producto estuvo disponible para uso comercial.

Enoch T. Ferngren está acreditado como el primero en realizar soplado plástico en la "era moderna". Mr. Ferngren junto con William Kopitke diseñaron y produjeron artículos moldeados y los vendieron a la Harford Empire en 1937.

En 1940 la Corporación Plax fue formada para producir esferas para Árboles de Navidad con acetato de celulosa.

En 1945 la cía. Plax introdujo el "Soplete" una botella desodorante de las cuales fueron vendidas 5, 000,000 de piezas lo que resulto el primer suceso industrial y comercial real, mas sin embargo solo pequeñas piezas fueron posiblemente consideradas para el proceso de soplado hasta que en 1956 el HDPE (por sus siglas en inglés Polyethylene High Density) estuvo comercialmente disponible para la industria y particularmente para el moldeo por soplado.

En 1945 Mr. James Bailey autor de un articulo donde describe, directa e indirectamente el método de diafragma que había investigado, estableció que el futuro del moldeo por soplado pudiera estar en el campo de la Extrusión y la Inyección.

En 1945 DUPONT publicó un anuncio que decía:

"For chemical inertness consider POLYTHENE a new plastic, MADE BY DUPONT"

Fueron muchas invenciones e implementaciones en la industria del plástico desde 1945 hasta 1950, sin embargo los mayores avances fueron hechos desde 1950 hasta principios de los 60's la maquinaria comercial fue ofrecida por BEKUM, KOTEX and FISHER.

En 1957 en el listado del directorio SPI únicamente aparecían 3 fábricas de moldeo por soplado y en 1962 el directorio tuvo un extraordinario crecimiento listando a 13 fábricas que podían producir botellas.

#### LISTA DE DESARROLLOS DESDE 1930 HASTA 1994

1930 Corporación Femplas soplo acetato de celulosa con una maquina.

1935 Ferngren patento para extruir un tubo de mezcla plástica dentro de un molde cerrado e inyecta aire.

1935 Primera máquina de inyección importada dentro de USA.

1937 Ferngren y Kopitke fabricaron y desarrollaron la primera máquina para moldeo por soplado y utilizaron la inyección por pistón.

1938 BASF fabrica máquinas de extrusión soplado en Europa.

1939 PLAX opera máquinas moldeadoras por soplado para fabricar 25,000 piezas sopladas por día.

1942 OWENS –Illinois patenta un proceso de inyección soplado con expulsores automáticos dentro de la pieza.

Otros desarrollos importantes para el Moldeo por Soplado

- Existencia de máquinas procesadoras de plástico modificadas para el moldeo por soplado.
- Diseño específico para el moldeo por soplado.
- Las únicas máquinas disponibles eran las inyectoras de pistón.
- La extrusión establecía, extruir un parison, el desarrollo de un molde bipartido, la boquilla para soplar, el corte de la manga (tubo), la transferencia del tubo de parison al molde, así como otras operaciones básicas fueron resueltas.
- Disponibilidad de material plástico, acetato de celulosa (1927), PVC (1927), Nylon (1935), acrílicos (1936), etil celulosa (1936), acetato de celulosa Butyrate (1938), Polyvinylidene Chloride (1939), PS /1938), experimental LDPE (1942), Polyester (1942), Celulosa Propionate (1945).
- Productos moldeados por soplado. Esfera para árbol de navidad (1939), juguetes, pelotas de ping pong, botellas pequeñas, cantimploras, productos para bebe, cepillos, flotadores y novedades.

Bibliografía Practical Extrusion Blow Molding, author Samuel L. Belcher Ed. Marcel Dekker, Inc. Amazon.com

## 2.2.-Los sistemas de control

En el siglo IX el regulador de nivel del tipo flotador es reinventado en Arabia (inventada la válvula flotador por Tesibios de Alejandría en el siglo III AC) y es utilizado para mantener el nivel constante en los bebederos de agua.

En el siglo XVI, en Inglaterra se utiliza el principio de realimentación para mantener automáticamente las paletas de los molinos de viento y en el siglo XVII se inventa el termostato para mantener la temperatura de un horno y una incubadora.

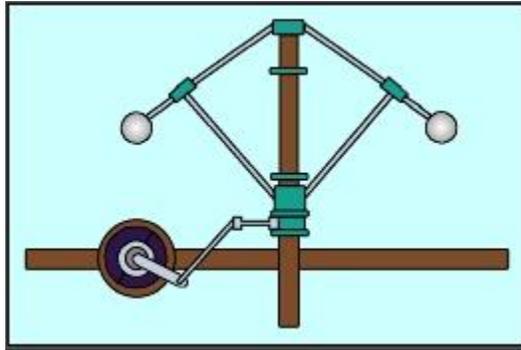
Hacia 1660 el Marqués de Worcester diseñó un "motor impulsado por agua", siendo la semilla de la máquina de vapor. Tiempo después, el francés Denis Papin diseñó una máquina de vapor donde la presión atmosférica jugaba un papel decisivo.

En 1712 Thomas Newcomen y el ingeniero militar Thomas Savery construyeron la primera máquina de vapor atmosférica de pistón. Utilizaba un pistón de simple efecto, una de las caras del émbolo estaba expuesta al exterior y a la presión atmosférica y la otra cara era la pared deslizante de un cilindro. En él se introducía vapor que hacía avanzar el émbolo. Al final del recorrido el cilindro se enfriaba por medio de un chorro de agua y por lo tanto el vapor se condensaba, ocupando un volumen 2700 veces inferior. El vacío creado, "el poder de la nada" como fue llamado, no contrarrestaba la presión atmosférica de la otra cara del émbolo y por ello la pared móvil del cilindro retrocedía. Era este movimiento el que permitía elevar agua de una mina por medio de una bomba de pistón. Pero su rendimiento era muy pobre, de tan solo el 0.5% de la energía del combustible utilizado.

El ingeniero James Watt introdujo una modificación a la máquina, que consistía en una cámara aparte encargada de enfriar el vapor. También introdujo el cilindro de doble efecto, que aceptaba vapor alternativamente a ambos lados del émbolo. El resultado fue que se aumentó el rendimiento de la máquina hasta el 4%.

Watt se asoció con Mathew Boulton para fabricarlas a gran escala y arrendar las máquinas de vapor [Dickinson 27]. La primera gran máquina de vapor con mecánica rotativa fue instalada por Boulton y Watt en 1786 en el Molino de Albión en Londres. La maquinaria del molino fue diseñada y construida por el escocés Meikle que después se dedicaría a instalar reguladores centrífugos en los molinos de piedra. Se debe remarcar que la invención de los reguladores centrífugos se le ha atribuido desde siempre a Meikle, el cual era el líder en el diseño e implantación de molinos, pero se reconoce que Meikle basó los diseños de sus reguladores centrífugos en el patentado por Mead en 1787.

En este contexto, en 1788 Boulton envía una carta a Watt donde le informa que ha visitado las instalaciones de Albión y ha observado los molinos en operación con los reguladores centrífugos, describiendo también su forma de trabajo. Watt sugiere inmediatamente la posibilidad de aplicar el mismo principio para controlar la velocidad de las máquinas de vapor.



*Figura 2.2.1 Regulador de Watt.*

Boulton y Watt hicieron lo posible para que el diseño de su regulador (figura 2.2.1) permaneciera secreto el máximo tiempo posible. Cuando la patente de Watt caduca en 1800, su regulador centrífugo bajo el pensamiento de conservar el principio de controlar la velocidad de las maquinas de vapor se había convertido en una parte normal del equipamiento de la época.

Este invento resultaría ser de gran importancia en el desarrollo histórico de la Regulación Automática, dado que incorpora el sensor y el actuador en un único bastidor, sin disponer de un amplificador de potencia que aislaría al sensor del actuador. [Auslander 71]

Los primeros reguladores de Watt funcionaron satisfactoriamente haciendo el sistema de por si estable. Sobre 1868 existían unos 75000 reguladores de Watt operando en Inglaterra.

En los primeros 70 años del siglo XIX, una vez caducada la patente de Watt, se realizaron grandes esfuerzos por mejorar el diseño de los reguladores, ejemplos de estos son los reguladores patentados por Williams Siemens en 1846 y 1853, que sustituyeron la acción proporcional por la acción integral.

A lo largo del siglo XIX se siguen desarrollando reguladores de temperatura, como el de Ure (1830), y reguladores de velocidad para turbinas de agua diseñados por Woodward en 1870. En éste se usaba el regulador centrífugo solo para accionar un embrague que controlaba la transmisión de potencia a la admisión. Se aíslan sensor y accionador incorporando en medio un amplificador de Potencia. Por lo tanto los servomecanismos adoptan la estructura funcional que se mantiene hasta el presente. Mientras que en los reguladores de Mead y Watt el control era proporcional, en éste el control pasa a ser integral.

Los amplificadores de potencia mecánicos, conocidos como servomotores, siguen desempeñando una función fundamental en los sistemas de control. En la década de los 1860 M.J. Farcot diseña un regulador centrífugo de alta sensibilidad cuya señal de salida era suficiente para comandar un pequeño cilindro de doble pistón que inyectaba vapor a una de las dos caras del pistón de otro cilindro de potencia de diámetro mucho mayor. El factor de amplificación era proporcional a la relación de áreas de los cilindros. Farcot denominó su patente como "Servomoteur, ou moteur asservi" y de aquí se origina el término servomotor.

Los sistemas mecánicos se desarrollan hasta 1900, entonces son superados por sistemas hidráulicos. Los motores eléctricos y el desarrollo de la electrónica adquieren gran relevancia durante la segunda guerra mundial, desempeñando un gran papel en el desarrollo de la teoría clásica de control

Al mismo tiempo que Watt se dedicaba a perfeccionar su regulador de bolas, Laplace y Fourier desarrollaban los métodos de Transformación Matemática, tan utilizados y asumidos en la Ingeniería Eléctrica y por supuesto en la actual Ingeniería de Control.

Cauchy (1789-1857), con su teoría de la variable compleja, completo las bases matemáticas necesarias para la Ingeniería de Control. Pero hasta 75 años después de la muerte de Cauchy, no surgió lo que se podría denominar la Teoría de Control.

A mediados del siglo XIX cambian las técnicas de diseño de las máquinas y se mejoran los procesos de fabricación, entonces se empezó a observar que la velocidad de las máquinas variaba cíclicamente con el tiempo, con comportamientos no muy estables.

Entre los primeros científicos interesados en el tema, se puede señalar a G.B. Airy, el cual en 1840 y 1851 publica sus trabajos relativos a la regulación de velocidad de telescopios [Airy 1840]. Su interés se debió a la necesidad de mantener el telescopio girando lentamente a una velocidad uniforme durante las observaciones astronómicas. La principal aportación de sus trabajos el estudio de la influencia del amortiguamiento en la estabilidad.

El problema fue resuelto por Maxwell y por el ingeniero ruso Vischnegradsky. Este ingeniero publicó sus resultados [Vyschne 1876] en términos de una regla de diseño que relacionaba los parámetros de ingeniería del sistema con su estabilidad. El análisis de Vischnegradsky demostraba que los cambios de diseño de la máquina que habían tenido lugar desde la época de Watt, habían disminuido el rozamiento entre sus componentes y esto conllevaba inevitablemente al fenómeno de oscilaciones en la regulación de la velocidad. Vischnegradsky también demostró la incapacidad de un regulador proporcional para establecer un correcto comportamiento de un sistema de tercer orden.

El trabajo que presenta Maxwell en 1868: "On Governors" [Thaler 74], puede considerarse como el origen de la Teoría de Control. En él presenta su criterio de estabilidad para sistemas lineales dinámicos e invariantes. En este trabajo Maxwell establece una diferenciación entre Reguladores ó Moderadores (los conocidos actualmente como reguladores proporcionales) y Gobernadores (reguladores con acción integral)

La contribución importante de Maxwell estuvo en demostrar que el comportamiento de un sistema de control automático en la vecindad de una posición de equilibrio se podía aproximar por una ecuación diferencial lineal y por lo tanto la estabilidad se podía así discutir en términos de las raíces de la ecuación característica asociada.

Maxwell plantea de esta forma el problema general de estudiar la estabilidad de un sistema dinámico en función de la localización de las raíces de su ecuación característica. Hermite

había publicado un trabajo sobre el mismo problema unos años antes pero no era muy conocido.

Routh resuelve este problema en 1877 en su trabajo " A treatise on the stability of a given state of motion", con el que obtiene el premio Adams. En este trabajo presenta por primera vez su conocido criterio de estabilidad.

Hurwitz en 1885, de una forma independiente y utilizando las técnicas de Cauchy y Hermite resuelve el mismo problema en términos de un conjunto de determinantes. Bompiani demostraría en 1911 la equivalencia de los criterios de Routh y Hurwitz [Bompiani 11].

En 1889, Liapunov presenta sus trabajos sobre estabilidad, los cuales servirán de base a la teoría moderna de control. Es importante resaltar la aportación de Heaviside, aplicando el análisis impulsional en el estudio de los sistemas dinámicos. Heaviside es el primero que aplica el cálculo operacional a un amplio espectro de problemas de Ingeniería Eléctrica.

A finales del siglo XIX se encuentran asentadas las bases necesarias para el desarrollo de la Teoría de control

Dos trabajos de singular importancia son los desarrollados por Minorsky y Hazen. En el trabajo de Minorsky "Directional Stability of Automatic Steered Bodies" [Thaler 74] de 1922, se reconoce la no-linealidad de los sistemas y aplica la linealización mediante el desarrollo en serie de Taylor a sistemas no-lineales correspondientes al movimiento angular de un buque. Estudia la estabilidad y los efectos de los retrasos de la información sobre las salidas de los Sistemas.

Hazen en su publicación "Theory of Servomechanism" (1934) [Thaler 74], analiza el funcionamiento de los servomecanismos utilizando en su análisis entradas típicas de escalón y rampa. Aparte de proponer un marco conceptual, Hazen utiliza herramientas matemáticas como el cálculo operacional de Heaviside. En sus trabajos estudia el diseño de servomecanismos para posicionar ejes.

## **El desarrollo de las técnicas frecuenciales**

El estudio de los servomecanismos y los reguladores en el dominio frecuencial se realiza al obtenerse resultados sobre el diseño de amplificadores de señal realimentados. Destacan los trabajos de Nyquist (1932), Black (1934) y Bode (1940).

El suceso que realmente marca época en el desarrollo de los métodos de respuesta en frecuencia es la aparición de trabajo clásico de Nyquist sobre la estabilidad de amplificadores realimentados. Nyquist presenta en este trabajo "Regeneration Theory" [Thaler 74], su célebre criterio de estabilidad. Su investigación surge de los problemas que presentaban la atenuación y distorsión de la señal en la telefonía a grandes distancias.

En 1915 la Bell System había finalizado un enlace telefónico experimental entre New York y San Francisco. Este enlace utilizó una línea aérea de cobre que pesaba 500 Kg/milla y fue cargado inductivamente para tener una frecuencia de corte de 1000 Hz. La atenuación de la señal a lo largo de las 3000 millas era de 60 dB, se redujo a 18dB utilizando seis amplificadores con una ganancia total de 42 dB.

Esta dificultad sólo se pudo vencer con el magnífico invento desarrollado por H. Black de los laboratorios Bell quien propuso la idea de un amplificador realimentado, en su trabajo "Stabilized Feedback Amplifiers" [Thaler 74] en 1934. El descubrimiento importante de Black fue que la elevada ganancia en un dispositivo amplificador no lineal y cuyos parámetros eran variables con el tiempo se podía negociar para conseguir una reducción en la distorsión no lineal de manera que el sistema se comportase como una ganancia lineal, estable y precisa. Black utiliza el criterio de Nyquist y llega a interpretar una serie de fenómenos que se producen en los sistemas realimentados.

Hacia 1932 Black y su equipo podían construir amplificadores que funcionaban razonablemente bien. Sin embargo presentaban la tendencia a inestabilizarse. Algunos lo hacían cuando aumentaba la ganancia del lazo del amplificador realimentado, lo cual se podía esperar, pero otros manifestaban estas características cuando la ganancia se disminuía y esto sí que era completamente inesperado.

Antes de 1932 el enfoque basado en las ecuaciones diferenciales había sido la gran herramienta del ingeniero del control; en la década que siguió a la contribución de Nyquist estas técnicas fueron casi completamente reemplazadas por métodos basados en la teoría de variable compleja los cuales fueron la consecuencia natural y directa de su nuevo planteamiento.

El trabajo de Nyquist dejaba sin resolver como estaban relacionadas la amplitud y la fase en función de la frecuencia de la función de transferencia de la ganancia en lazo abierto.

En el trabajo de Bode "Relations Between Attenuation and phase in Feedback Amplifier Design" [Thaler 74] de 1940, se presenta la definición de margen de fase y margen de ganancia y la definición de los diagramas logarítmicos de Bode.

En la industria de los procesos químicos la introducción del control por realimentación tendió en un principio a desarrollarse de forma aislada de los desarrollos mecánicos y eléctricos. En estos procesos la evolución de la variable controlada era tan lenta (y lo sigue siendo) que el control se hacía mediante realimentación manual. Los primeros pasos que se dan para controlar estos procesos son la incorporación de instrumentos para supervisar la operación y registradores de plumilla. El desarrollo natural fue utilizar el movimiento de la plumilla del registrador para efectuar una acción de realimentación sobre las válvulas de control en la planta utilizando líneas de transmisión, amplificadores y transductores neumáticos.

Los primeros controladores de temperatura, ofrecían una acción de control de tipo on-off por medio de un simple mecanismo conmutador o relé que pronto se reveló insuficiente para las

exigencias planteadas en los procesos industriales, como por ejemplo en la industria láctea, en el proceso de pasteurización de la leche. El siguiente desarrollo fueron los primeros reguladores con acción proporcional. En estos reguladores se manifestaba claramente el dilema de la automática precisión frente a la estabilidad, si se desea un error estacionario pequeño, se debía aumentar la ganancia del regulador, o lo que es lo mismo disminuir la banda proporcional. Pero esto conllevaba que el proceso era sometido a fuertes oscilaciones en el transitorio. Y si se aumentaba la banda proporcional, disminuían las oscilaciones pero en caso de cambios en la carga aparecía un error estacionario apreciable. El máximo valor recomendado entonces para la banda proporcional era del cinco por ciento.

Durante los años 30 se desarrollaron completamente estos reguladores neumáticos y se transfirió a este campo del control la idea de utilizar el término de acción integral que se venía empleando desde tiempo en los sistemas mecánicos. El primer regulador de temperatura con acción proporcional integral fue el Foxboro Stabilog patentado por Mason en 1931. En este regulador neumático, se incorporaba amplificación lineal, basada en el principio de la realimentación negativa (al igual que Black en los amplificadores de señal realimentados) y acción integral (reset). Hay que hacer constar que en un principio el Stabilog no tuvo mucho éxito comercial, debido entre otras cosas a su precio y a que no era comprendido su funcionamiento.

A finales de los años 30 se introdujo la acción derivativa en estos controladores neumáticos dando lugar así al regulador PID de 3 términos (Proporcional, Integral y Derivativo).

En 1942 Ziegler y Nichols, ingenieros de Taylor Instruments hicieron un estudio importante que condujo a fórmulas empíricas para sintonizar el regulador PID al proceso. Este estudio "Optimum Settings for Automatic Controllers" [Thaler 74] fue presentado en el "ASME Winter Annual Meeting". Los coeficientes de las distintas acciones proporcional, integral y derivada, se podían determinar de valores medidos experimentalmente del proceso que se deseaba controlar. La importancia de estas reglas de ajuste óptimo de controladores es enorme, siguen siendo vigentes y excesivamente utilizadas en el ámbito del control de procesos industriales.

El trabajo de Ziegler y Nichols es pionero en el desarrollo de la idea de control óptimo, aunque su criterio de optimización, que consiste en minimizar la superficie de error absoluto, no se puede tratar analíticamente.

## **Avances durante la Segunda Guerra Mundial**

La Segunda Guerra Mundial creó una necesidad para diseñar servomecanismos de alto desempeño y llevando a construir sistemas de control realimentados. El llamado problema de control de tiro se desarrolló en esta época proporcionando una cadena automática de órdenes entre la detección del blanco, el apuntamiento del arma y el disparo dado en tres etapas:

- Detección y seguimiento del blanco.
- Predicción.
- Colocación del cañón en posición de disparo.

El matemático Wiener durante esta época desarrolla la teoría estocástica clásica, la cual tuvo su inicio en el estudio del problema de automatización de un cañón aéreo. En este trabajo se da un enfoque radicalmente distinto del estudio del problema del control, y supone el inicio de la conocida como teoría estocástica clásica. Las aportaciones de Wiener consisten en considerar la presencia de ruidos en las señales, e introduce también el concepto de control óptimo, cuyo objetivo consiste en minimizar un determinado criterio que define la calidad del control, en este caso minimiza la superficie (área bajo la curva) de error cuadrático [Wiener 49].

Wiener también establece la relación entre estos auto-regulados y determinados procesos que suceden en los seres vivos. Todo ello, conduce a la formulación de lo que se denominaría cibernética en su trabajo "Cybernetics" de 1948 publicado por el MIT press [Wiener 48].

A finales de la década de los años cuarenta del siglo pasado, surgen otras dos vías de desarrollo de la teoría de control: el Método del modelo de Truxal [Truxal 54] y el método del lugar de las Raíces, de Evans. Se presentan también aportaciones como la extensión de los métodos frecuenciales a sistemas no-lineales y a sistemas estocásticos.

El método del modelo es una adaptación del método de Guillemin desarrollado inicialmente para el diseño de redes pasivas. Partiendo de las especificaciones deseadas se obtiene la función de transferencia que debe seguir el sistema de control. El cálculo de la función de transferencia del regulador se realiza fácilmente por medio de operaciones algebraicas. Este método resultaba atractivo dado que no utiliza la técnica de prueba y error. Pero se manifestaban en él algunas dificultades prácticas como podían ser la complejidad de los correctores que se obtienen, que dejaban de tener la estructura clásica PID.

Los trabajos de Evans

- "Graphical Analysis of Control Systems" [Evans 48].
- "Control System Synthesis by Root Locus Method" [Evans 50].

Ambos recogidos en [Thaler 74], constituyen la última gran contribución a la teoría clásica de control. En palabras del propio autor "el lugar de las raíces determina todas las raíces de la ecuación diferencial de un sistema de control por medio de una representación gráfica, la cual permite una síntesis rápida de la respuesta transitoria o en frecuencia deseada".

El método de Evans cuenta con una desventaja de no poder abordar el análisis de sistemas con retraso puro y la difícil estimación de la respuesta temporal de sistemas con distribuciones dispersas de polos y ceros. A su favor, aporta un método gráfico de estimar la influencia de variaciones en los parámetros del sistema o del regulador sobre la estabilidad y el comportamiento dinámico de los sistemas.

## **Primeros pasos del control por computadora**

Como la rotación de un radar de seguimiento solamente ilumina a su blanco de forma intermitente, muchos de los sistemas de control de tiro desarrollados durante la Segunda Guerra Mundial tuvieron que diseñarse para tratar con datos que estaban disponibles de forma pulsada o muestreada.

Las computadoras desarrollando funciones de control de procesos son elementos que trabajan por ciclos. No trabajan en tiempo continuo sino en tiempo discreto. La computadora necesita un tiempo para procesar las entradas (mando y realimentaciones), calcular las acciones, y canalizar las acciones sobre el sistema, que consiste en un proceso de conversión digital-analógico. Este ciclo se ejecuta cada cierto intervalo de tiempo o período de muestreo por lo que las computadoras trabajan en tiempo discreto. Por lo tanto la teoría de los sistemas continuos desarrollada hasta entonces era inservible.

La teoría de sistemas muestreados es llevada a cabo, entre otros, por Balker, Ragazzini, Zadeh y Salzer. Salzer en 1954 introduce la transformada  $Z$ , la cual permite que los resultados obtenidos en el estudio de los sistemas continuos se puedan aplicar a los sistemas discretos en el tiempo. Esto hace que se desarrollen los estudios que pretenden trasladar al campo discreto los resultados obtenidos para el campo continuo.

A finales de la década de los cincuenta, los trabajos de Jury en 1958, "Sampled data control Systems" con su criterio de estabilidad, los de Ragazzini y Franklin también en 1958 con idéntico título al de Jury, y el trabajo de Tou de 1959 "Digital and Sampled Data Control Systems" terminan por definir y establecer la teoría clásica de los sistemas muestreados.

A partir del año 1955, se desarrollan los métodos temporales, con el objetivo de solucionar los problemas planteados en aplicaciones aeroespaciales, estos métodos reciben un fuerte impulso con el desarrollo de las computadoras digitales, que constituían la plataforma tecnológica necesaria para su implantación, prueba y desarrollo.

Aparece un nuevo método de diseño de control, conocido a partir de entonces como teoría de control moderna. Se basaba en representar los sistemas en variables de estado o representación interna y trabajando casi exclusivamente en el dominio del tiempo.

La primera formulación en términos de estado, función de transición y de lectura, se hizo en el marco de la teoría de máquinas discretas formulada por Turing, en 1936.

Los métodos de control óptimo se basan en los trabajos de físicos de los siglos XVII al XIX, entre los que destaca Euler, con su cálculo de variaciones. Kalman efectúa la resolución de los problemas de control óptimo cuadrático y lineal cuadrático gaussiano. Zadeh generaliza los resultados de teoría de circuitos a sistemas en el espacio de estados y Luenberger en 1966 lo hace en lo que concierne al diseño de observadores.

En el control algebraico, basado en la utilización de matrices polinomiales y racionales, hay que hacer mención de los trabajos de Kalman, Rosembrock y Wolowich. Son métodos que utilizan la descripción externa. Al final de los sesenta y comienzo de los setenta se presenta el enfoque geométrico del problema de control, que utiliza métodos del álgebra lineal. En paralelo se desarrollan los métodos de identificación de sistemas, por mínimos cuadrados y de máxima verosimilitud, este último fue desarrollado por Fisher en 1912 y aplicado en sistemas industriales por Åström y Bohlin en 1965.

El concepto de regulador adaptable fue propuesto inicialmente por Kalman, utilizando un método de identificación de mínimos cuadrados recursivos en su artículo "Design of a self-optimizing control system" [Kalman 58], otro sistema, basado en la minimización de la varianza de salida es desarrollado por Peterka en 1970, y por Åström y Witenmark en [Åström 73]. Se consideraba el problema en un entorno estocástico.

Los Sistemas Adaptables con Modelo de Referencia propuestas por Whitaker, Narmon, y Kezer en 1958 se basan en otro concepto muy simple: se desea que el comportamiento del proceso sea "idéntico" al de un modelo que se da como referencia. Si existe diferencia entre las salidas del proceso y del modelo un mecanismo de adaptación intenta minimizarla con el ajuste de los parámetros del regulador, o añadiendo una variación en la acción sobre el sistema físico.

Esta aproximación alcanzó un primer paso hacia su madurez teórica con el trabajo de Parks "Model Reference adaptative methods. Redesign using Liapunov's second method" [Parks 76]. De esta forma se pudo garantizar la estabilidad global del sistema adaptativo. Posteriormente, Landau en su trabajo. "Adaptative Control. The model reference aproach" [Landau 79] utiliza la teoría de la hiperestabilidad de Popov en el diseño de SAMR.

En principio se llegó a pensar que la teoría de control moderna conduciría a un método de diseño de sistemas de control bien definido, sencillo y que pudiera ser mecanizado. Pero se tuvo que admitir que la bondad del diseño dependía de la bondad del modelo y de las especificaciones que se emplean para desarrollarlos.

Se han llegado a desarrollar métodos mecanizados de diseño en el dominio de la frecuencia que son equivalentes a los métodos de diseño de variable de estado cuando la estructura del control es coincidente.

La aplicación de las computadoras en el control de procesos supone un salto tecnológico enorme que se traduce en la implantación de nuevos sistemas de control en el entorno Industria y posibilita el desarrollo de la navegación espacial. Desde el punto de vista de la aplicación de las teorías de control automático el computador no está limitado a emular el cálculo realizado en los reguladores analógicos. Las computadoras permiten la implantación de avanzados algoritmos de control mucho más complejos como pueden ser el control óptimo o el control adaptativo. El objetivo en un principio era sustituir y mejorar los reguladores analógicos, pero este objetivo se fue ampliando dada las capacidades de las computadoras en realizar un control integral de las plantas de fabricación, englobando también la gestión de la producción.

Las principales aplicaciones industriales de las computadoras son

- **Adquisición de datos.** Consiste en la captura, tratamiento y almacenamiento de los datos.
- **Supervisión.** En esta función la computadora no efectúa directamente el control del proceso. Se conecta a los controladores del proceso (autómatas, reguladores PID...) por medio de un sistema de comunicación serie o por una red de comunicaciones industrial. La principal función es la ayuda al operador de planta. La computadora suministra informes elaborados como pueden ser alarmas, tratamiento de fallas, procedimientos de re conexión o rearme.
- **Control secuencial.** En esta función la computadora suele tomar la forma de autómata programable, en el cual se ejecutan programas de control de sistemas secuenciales.
- **Control analógico digital.** Es una forma de control que se utilizaba con las primeras computadoras en la cual la computadora se encargaba de elaborar la consigna de los lazos analógicos.
- **Control digital directo.** La computadora ejecuta directamente el control del proceso continuo. Toma la forma de regulador industrial o de computador industrial con tarjetas de interface con el proceso.
- **Análisis de datos.** Función clásica de las computadoras de gestión en el que se analizan los datos de producción

Las ventajas del uso de la computadora en el control de procesos son múltiples, entre ellas se podría nombrar una mayor eficacia de las operaciones, mayor seguridad y una reducción drástica de las operaciones manuales.

### **Evolución histórica de la tecnología del control por la computadora aplicada al control de sistemas continuos**

El desarrollo de la tecnología de la computadora aplicada al control de procesos industriales, recibió a finales de los años cincuenta un gran impulso debido a que existían industrias como las refinerías de la industria petrolera donde los procesos a controlar en este tipo de plantas son complicados. Los sistemas de control disponibles estaban bastante limitados, implicando en el proceso de fabricación a gran cantidad de mano de obra, como sucedía en la Industria de producción de papel. La calidad de la producción dependía en muchos casos de la experiencia del operario y de su rapidez de reacción ante situaciones anómalas. Era por decirlo un control semiautomático y semimanual. Los operarios eran quienes decidían cuales eran las referencias de mando más adecuadas para el sistema de control analógico.

La primera instalación industrial de una computadora la realiza la compañía de suministro eléctrico "Louisiana Power and Light" que instaló en septiembre de 1958 un ordenador Daystrom para monitorizar la planta de producción de energía en Sterling, Louisiana. Pero este no era un sistema de control industrial. Su función era supervisar el correcto funcionamiento de la instalación.

La primera computadora dedicada a control industrial se instaló en la refinería de Port Arthur, en Texas. La compañía Texaco Company instaló un RW-300 de la casa Ramo-Wooldridge. La refinería comenzó a funcionar controlada en lazo cerrado por computador el 15 de Marzo de 1959.

En los años 1957-1958 la compañía química Monsanto en cooperación con Ramo-Wooldridge estudia la posibilidad de instalar un control por computadora. En octubre de 1958 deciden implantar un sistema de control en la planta de la ciudad de Luling, dedicada a la producción de amoniaco. Comenzó a funcionar el 20 de enero de 1960, teniendo grandes problemas con el ruido que se introducía en las realimentaciones. Este sistema como otros muchos basados en el ordenador RW- 300 no realizaba un control digital directo sobre las plantas, sino que eran sistemas supervisores dedicados a calcular las referencias óptimas de los reguladores analógicos. Este sistema se denomina control analógico-digital (DAC) o control supervisor. Se debe observar que este esquema de control fue protegido por una patente (EXNER Patent), lo cual ha limitado su aplicación.

En 1961 la Monsanto comienza a diseñar un control digital directo (DCC por sus siglas en inglés) para una planta en Texas city y un sistema de control jerarquizado para el complejo petroquímico de Chocolate Bayou. En el control digital directo la computadora controla directamente el proceso, tomando medidas del proceso y calculando la acción a aplicar.

El primer control digital directo se instala en la planta de amoniaco y soda de la compañía Imperial Chemical Industries en Fleetwood (Reino Unido), mediante un ordenador Ferranti Argus 200. El cual comenzó a funcionar en noviembre de 1962.

El sistema disponía de 120 lazos de control y efectuaba la medida de 256 variables. Actualmente se utilizan 98 lazos y 224 medidas en esta instalación de Fleetwood. En la instalación se sustituyeron los antiguos reguladores analógicos por la computadora digital que realizaba sus mismas funciones.

Las computadoras utilizadas en los primeros años combinaban memorias magnéticas de ferrita y el programa se almacenaba en programadores cíclicos rotativos. En estas primeras aplicaciones la solución de determinados problemas suponía un incremento en el costo del sistema. Esto llevo a que en un mismo computador se implementarán las dos tareas principales supervisión y control digital directo.

Las dos tareas funcionaban a una escala de tiempo muy diferente. La tarea del control digital directo tenía que tener prioridad sobre la supervisión. El desarrollo del programa se realizaba por personal muy especializado y el lenguaje era puro código máquina. Además aparecían problemas debido al aumento de la cantidad de códigos, en cambio la capacidad de memoria de los ordenadores era bastante limitada. Lo cual conllevaba que se tenía que descargar parte de la memoria del ordenador para cargar el código de la otra tarea.

A finales de los años sesenta y principios de los setenta se desarrollan los Minicomputadores que encuentran gran aplicación en el control de procesos industriales. En pocos años el

número de ordenadores dedicados a control de procesos pasa de 5,000 en 1970 a 50,000 en 1975.

Estos Minicomputadores disponían de una memoria de hasta 124 Kbytes, disco duro y de unidad de disco flexible para almacenamiento.

### **Una computadora para un solo proceso**

En la década de los años sesenta la complejidad y prestaciones de los sistemas de control se incrementan gracias al empleo de circuitos integrados y en particular los microprocesadores.

El desarrollo en la década de los años 70 del microprocesador permite que llegue a ser rentable el dedicar un computador para el control de un solo proceso. Aplicaciones del ordenador al control de procesos que antes no eran rentables instalarlas, dado que el control analógico era mucho más barato, se vuelven competitivas.

Además de la razón económica, una de las razones que impedía que se implantará los controles digitales sobre máquinas eléctricas era la excesiva rapidez de los accionamientos electromecánicos, con constantes de tiempo en muchos casos bastante inferiores al segundo (comparemos con los procesos químicos). Esto hacía imposible que un computador calculará el algoritmo de control en el período de muestreo marcado por el diseño del controlador.

Los primeros controles digitales se implantan sobre máquinas de corriente continua, que presentan un modelo matemático muy sencillo de tratar. Los esfuerzos se vuelcan en el desarrollo de controles digitales sobre motores síncronos y asíncronos que permitieran obtener a los accionamientos prestaciones de precisión y dinámica de par comparables a los de corriente continua, con el objeto de utilizar un motor mucho más barato (asíncrono) que no presentará los problemas de los motores de corriente continua.

Los primeros controles digitales consistían en la simple emulación programada de los algoritmos de control clásicos, pero la aplicación de las modernas técnicas del control ha permitido desarrollar aplicaciones de control vectorial, las cuales, en accionamientos de motores asíncronos proporcionan una calidad en la respuesta dinámica superior a los accionamientos de motores de corriente continua. En el momento actual existe toda una amplia gama de micro controladores especializados en el control de máquinas eléctricas.

### **Control en tiempo real**

Los requisitos del control de tiempo real se manifiestan en una de sus características principales: las restricciones temporales a que está sometido. Estas son inherentes al funcionamiento de los sistemas de tiempo real. Para tareas periódicas de control, vienen impuestas por el período de muestreo con que se debe ejecutar el algoritmo de control. Para otro tipo de tareas periódicas como pueden ser tareas de tratamiento de datos, tareas gráficas o de supervisión, tareas de comunicación las restricciones temporales no son tan estrictas y muchas veces el diseñador de las aplicaciones dispone de un margen donde elegir.

Estas restricciones temporales también implican prioridad de ejecución, siendo comúnmente las tareas dedicadas al control las más frecuentes y por lo tanto las que se deben ejecutar con mayor prioridad, interrumpiendo en el caso de los sistemas mono procesadores a todas las demás tareas. También pueden existir tareas de control que se ejecuten con períodos grandes como en las aplicaciones de control de variables lentas como la temperatura, existiendo algunas otras tareas con períodos de ejecución menor. Pero la tarea de control es la más crítica dado que es la que actúa de interface con el proceso y debe garantizar su correcto funcionamiento.

Para las tareas activadas como respuesta a eventos, las restricciones vienen impuestas por los márgenes de seguridad y buen funcionamiento del proceso a controlar. Por ejemplo las acciones que se deben producir ante la aparición de una parada de emergencia, deberán producirse en un tiempo mínimo que intente garantizar al máximo la seguridad de los operarios en primer lugar y del proceso controlado en segundo lugar.

Se puede establecer una nueva clasificación entre sistemas de tiempo real críticos y acrícos. Los sistemas de tiempo real críticos son aquellos en que los plazos de respuesta de todas las tareas deben respetarse bajo cualquier circunstancia. En estos sistemas el incumplimiento de un plazo de respuesta, podría acarrear un mal funcionamiento o un accidente en el proceso o aplicación militar controlada. En los sistemas de tiempo real acrícos se puede incumplir ocasionalmente el plazo de respuesta de alguna tarea. En un sistema de tiempo real se debe distinguir entre tareas críticas (control, emergencia...) y acrícas (representación gráfica, tratamiento de datos).

## **Hardware y software de los sistemas de tiempo real**

En los años 70 se desarrollan nuevos sistemas de computación repartidos que podían adoptar estructuras centralizadas o distribuidas. En los sistemas centralizados las decisiones del control las toma el computador central, pero alrededor de él se acoplan una serie de periféricos, algunos de ellos especializados capaces de realizar determinadas tareas. Estos periféricos intercambian datos y reciben órdenes del ordenador central por medio de una red de comunicaciones.

Los sistemas descentralizados o distribuidos consisten en un conjunto de unidades de control que pueden tomar decisiones autónomas, intercomunicándose por medio de una red de comunicaciones.

Desde el punto de vista del software los lenguajes y también las metodologías de desarrollo de las aplicaciones deben suministrar las herramientas y mecanismos necesarios para que los sistemas de control de tiempo real cumplan todas las características de restricciones temporales, tolerancia a fallos y seguridad de funcionamiento entre ellas destaca el lenguaje ensamblador.

Los siguientes pasos consistieron en añadir extensiones a los lenguajes de programación clásicos de los años 70 como el Fortran (Process Fortran), el Basic y el Algol. Estos cuentan

con la ventaja de poseer un nivel de abstracción más alto, pero dependen del sistema operativo para las funciones de concurrencia y temporización, además suele ser necesario realizar algunas funciones en ensamblador.

### **Compiladores que generen un código eficaz**

El camino andado ha conducido al desarrollo de los lenguajes concurrentes (Modula-2, Occam, Ada). En estos, las funciones que posibilitan la gestión de la concurrencia y de las restricciones temporales forman parte del propio lenguaje. Además permiten el acceso a recursos de bajo nivel evitando el uso del ensamblador.

El lenguaje Modula-2 es un descendiente del Modula y del Pascal. Las funciones de concurrencia y restricciones temporales se realizan en un módulo específico denominado núcleo. Es un lenguaje que se muestra adecuado para el desarrollo de aplicaciones de tamaño pequeño a medio. El lenguaje Occam es un lenguaje asociado a la plataforma Transputer. No es adecuado para el desarrollo de grandes aplicaciones.

Estos dos lenguajes están prácticamente abandonados, en el caso del Occam al dejarse de fabricar el Transputer. El lenguaje que se ha convertido en una norma para el desarrollo de sistemas de tiempo es el lenguaje ADA.

Su nombre rinde honor a Lady Ada de Lovelace, la cual fue colaboradora de Charles Babbage. El ADA, cuya primera norma se definió en 1983, se diseñó y desarrolló por encargo del Departamento de defensa de los Estados Unidos, orientado a la programación y desarrollo de sistemas empujados. ADA integra la noción de tipo abstracto y un mecanismo que permite expresar la cooperación y comunicación entre procesos. Sus principales características son:

- Soporta tecnologías de software avanzadas.
- Incluye concurrencia, tiempo real, acceso a recursos de bajo nivel y un potente tratamiento de excepciones.
- Transportabilidad, legibilidad, eficiencia, seguridad.

ADA es un lenguaje definido para el desarrollo y programación de aplicaciones complejas como pueden ser las aplicaciones de control de ingenios militares. El ADA se ha convertido en una de las opciones disponibles para el desarrollo de sistemas de tiempo real en el ámbito industrial, sobre todo en Europa. Las limitaciones detectadas en la norma del año 83 fueron corregidas en la norma del año 95. El ADA 95 permite la programación orientada a objetos, presenta mejoras en el tratamiento de la concurrencia y tiempo real. También se definieron anexos especializados en aplicaciones distribuidas, sistemas de información...

### **Automatismos industriales**

Los actuales sistemas de automatización industrial pueden considerarse como herederos de los autómatas mecánicos del pasado. La definición de autómata que aparece en la real academia

índice que un autómatas es una "máquina que imita la figura y los movimientos de un ser animado".

La realización física de los automatismos ha dependido continuamente del desarrollo de la tecnología implementándose en primer lugar mediante tecnologías cableadas como la neumática, circuitos de relevadores electromagnéticos, tarjetas electrónicas. En las dos últimas décadas se han abandonado las tecnologías cableadas sustituidas por los autómatas programables.

Los sistemas de automatización industrial han recibido un gran impulso en el siglo XX sobre todo por parte de la industria automotriz. El término automatización fue acuñado en 1947 por Delmar S. Halder de la compañía automovilística Ford en Detroit. Halder opina que la automatización debería ser un concepto global que abarque todos los diseños y dispositivos realizados para conseguir una plena automatización de la producción.

La formalización del tratamiento de los automatismos es muy reciente. Históricamente se puede decir que el tratamiento de los automatismos lógicos se ha basado en el álgebra de Boole y en la teoría de autómatas finitos. No fue hasta la década de los años sesenta que se dispuso de herramientas como las redes de Petri, para el diseño y análisis de automatismos secuenciales y concurrentes.

## **Tecnologías cableadas**

Las primeras tecnologías disponibles para implementar controladores de sistemas de eventos discretos, se basaban en la aplicación de tecnologías cableadas, lo que se denominaba automatismos cableados. Se utilizaban principalmente las tecnologías neumática y electromecánica.

La tecnología neumática adquiere especial relevancia en la implementación cableada de automatismos, además cuenta con la ventaja de que es homogénea con numerosas máquinas de producción equipadas con cilindros neumáticos. Se debe resaltar que aunque sea una tecnología cableada, el mando neumático utiliza secuenciadores modulares que suprimen una parte del cableado. En la actualidad en muchas máquinas neumáticas industriales el sistema de control que sigue en activo está integrado por circuitos neumáticos. Los nuevos productos desarrollados incorporan como sistema de mando, en el caso de algunas máquinas pequeñas, circuitos de relevadores electromagnéticos, pero la mayoría está comandada por autómatas programables.

Los relevadores electromagnéticos disponen de contactos accionados por una bobina electromagnética. La puesta en tensión de la bobina hace que los contactos conmuten debido a la fuerza electromagnética creada. Los relevadores electromagnéticos pueden efectuar conmutaciones de grandes corrientes. Continúan siendo interesantes para automatismos muy sencillos. Aunque han sido prácticamente sustituidos por autómatas programables, se siguen utilizando alrededor de ellos en particular para realizar los circuitos de seguridad.

## **EL CONTACTOR**

### **DEFINICION Y GENERALIDADES**

Podemos definir un contactor como un aparato mecánico de conexión y desconexión eléctrica, accionado por cualquier forma de energía, menos manual, capaz de establecer, soportar e interrumpir corrientes en condiciones normales del circuito, incluso las de sobrecarga.

Las energías utilizadas para accionar un contactor pueden ser muy diversas: mecánicas, magnéticas, neumáticas, fluidicas, etc. Los contactores corrientemente utilizados en la industria son accionados mediante la energía magnética proporcionada por una bobina, y a ellos nos referimos seguidamente.

Un contactor accionado por energía magnética, consta de un núcleo magnético y de una bobina capaz de generar un campo magnético suficientemente grande como para vencer la fuerza de los muelles antagonistas que mantienen separada del núcleo una pieza, también magnética, solidaria al dispositivo encargado de accionar los contactos eléctricos.

Así pues, la característica importante de un contactor será la tensión a aplicar a la bobina de accionamiento, así como su intensidad ó potencia. Según sea el fabricante, dispondremos de una extensa gama de voltajes de accionamiento, tanto en continua como en alterna siendo las más comúnmente utilizadas, 24V, 48V, 220V, y 440V. La intensidad y potencia de la bobina, naturalmente dependen del tamaño del contactor.

El tamaño de un contactor, depende de la intensidad que es capaz de establecer, soportar e interrumpir, así como del número de contactos de que dispone (normalmente cuatro). El tamaño del contactor también depende de la tensión máxima de trabajo que puede soportar, pero esta suele ser de 600V. para los contactores de normal utilización en la industria.

Referente a la intensidad nominal de un contactor, sobre catálogo y según el fabricante, podremos observar contactores dentro de una extensa gama, generalmente comprendida entre 5A y a varios cientos de amperios.

Esto equivale a decir que los contactores son capaces de controlar potencias dentro de un amplio rango; así, como por ejemplo, un contactor para 25A. conectado en una red bifásica  $2\phi$  de 440V es capaz de controlar equipos de hasta  $440V \times 25A \times 2 = 22,000$  VA. Para trifásica  $3\phi$  de 220V es  $220V \times 25A \times 1.73 = 9,515$ VA. Naturalmente nos referimos a equipos cuya carga sea puramente resistiva ( $fp = \cos \theta = 1$ ), ya que de lo contrario, las condiciones de trabajo de los contactos quedaran notablemente modificadas.

Cuando el fabricante establece la corriente característica de un contactor, lo hace para cargas puramente resistivas y con ella garantiza un determinado número de operaciones, pero si el factor de potencia  $fp = \cos \theta$  de la carga que se alimenta a través del contactor es menor que uno, el contactor ve reducida su vida como consecuencia de los efectos destructivos del arco eléctrico, que naturalmente aumentan a medida que disminuye el  $fp$ .

Prácticamente, la casi totalidad de las aplicaciones industriales, tales como máquinas-herramientas, equipos para minas, trenes de laminación, puentes-grúas, líneas de extrusión etc., precisan de la colaboración de gran número de motores para realizar una determinada operación, siendo conveniente que puedan ser controlados por un único operador situado en un "centro de control o de operación", desde donde sea posible observar y supervisar todas las partes de la instalación. Esta clase de trabajo no se puede realizar con interruptores o cualquier otro elemento de control que precise de un mando manual directo, debido a que el operador no tendría tiempo de accionar los circuitos que corresponden de acuerdo con las secuencias de trabajo. Estos y otros problemas similares pueden quedar resueltos con el uso de contactores según un circuito de marcha-paro que denominaremos "función memoria" y que es la base de los automatismos eléctricos.

### **Funcionamiento del contactor**

Los contactos principales se conectan al circuito que se quiere controlar, asegurando el establecimiento y cortes de las corrientes principales y según el número de líneas de paso de corriente que podrá ser bifásico, trifásico, realizándose las maniobras simultáneamente en todas las líneas.

Los contactos auxiliares son de dos clases una es normalmente abiertos (NA) y la otra es normalmente cerrados (NC), estos forman parte del circuito auxiliar del contactor y aseguran las auto alimentaciones, los mandos, enclavamientos de contactos y señalizaciones en los equipos del automatismo.

Cuando la bobina del contactor queda excitada por la circulación de la corriente, esta mueve el núcleo en su interior y arrastra los contactos principales y auxiliares, estableciendo a través de los polos, el circuito entre la red y el receptor.

Este arrastre o desplazamiento puede ser:

- Por rotación, pivote sobre su eje.
- Por traslación, deslizándose paralelamente a las partes fijas.
- Combinación de movimientos, rotación y traslación.

Cuando la bobina deja de ser alimentada, abre los contactos por efecto del resorte de presión de los polos y del resorte de retorno de la armadura móvil. Si se debe controlar desde diferentes puntos, los botones de arranque se conectan en paralelo y el de paro en serie.

### **Clasificación de los contactores**

Por su construcción:

- Contactores electromagnéticos. Su accionamiento se realiza a través de un electroimán.
- Contactores electromecánicos. Se accionan con ayuda de medios mecánicos.
- Contactores neumáticos. Se accionan mediante la presión de un gas.
- Contactores hidráulicos. Se accionan por la presión de un líquido.

- Contactores estáticos. Estos contactores se construyen a base de tiristores y presentan algunos inconvenientes como
  - Su dimensionamiento debe ser muy superior a lo necesario.
  - La potencia disipada es muy grande.
  - Son muy sensibles a los parásitos internos y tiene una corriente de fuga importante.
  - Su costo es muy superior al de un contactor electromecánico equivalente.

Por el tipo de corriente que alimenta a la bobina

- Contactores para corriente alterna.
- Contactores para corriente continúa.

Por la función y la clase de contactos

- Contactores principales (con contactos principales y auxiliares).
- Contactores Auxiliares (con contactos únicamente auxiliares).
- Por la carga que pueden maniobrar (o categoría de empleo). Se tiene en cuenta la corriente que el contactor debe conducir o cortar durante las maniobras.

Para ello se toman en cuenta el tipo de carga que controla y las condiciones en las cuales se efectúan las operaciones:

- AC1: cargas no inductivas o débilmente inductivas, cuyo factor de potencia es mínimo 0,95.
- AC2: para arranques de motores de anillos, inversión de marcha, frenado por contracorriente, marcha a impulsos de motores de anillos, cuyo factor de potencia es de 0,3 a 0,7.
- AC3: para el control de motores jaula de ardilla que se apagan a plena marcha y que en el arranque consumen de 5 a 7 veces la intensidad normal.
- AC4: Arranque de motores de rotor en cortocircuito, inversión de marcha, marcha a impulsos, frenado por contracorriente.

Ventajas

- Control y automatización de equipos y máquinas con procesos complejos, con la ayuda de equipos auxiliares de mando como lo son los interruptores de posición (micro switch), los detectores, los presostatos, los temporizadores, etc.
- Automatización en el arranque y paro de motores con seguridad para el personal.
- Posibilidad de maniobrar circuitos sometidos a corrientes muy altas mediante pequeñas corrientes.
- Posibilidad de controlar completamente una máquina desde varios puntos de operación (mediante estaciones de botones remotas).
- Ahorro de tiempo al realizar maniobras prolongadas.

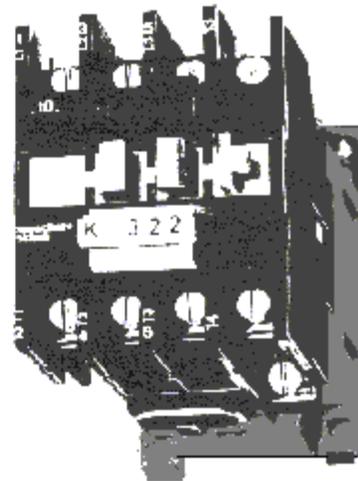
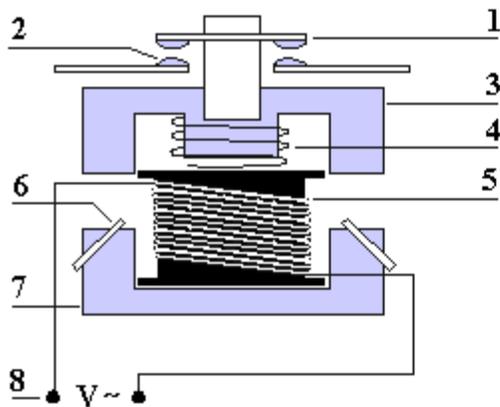
En la figura 2.2.2 podemos observar diferentes tipos de contactores, de acuerdo a la clasificación previamente descrita, así como el la figura 2.2.3 y la figura 2.2.4 donde nos muestran las partes que conforman un contactor cortesía de Telemecanic.



Contadores Telemecanique

Figura 2.2.2 Contactores varios

### PARTES DEL CONTACTOR.



- 1.- Contactos móviles. 2.- Contactos fijos.
- 3.- Hierro móvil. 4.- Muelle antagonista.
- 5.- Bobina. 6.- Espira de sombra (en corriente alterna).
- 7.- Hierro fijo. 8.- Alimentación bobina.

Figura 2.2.4 Partes de un contactor

La figura anterior describe las partes del contactor y a continuación explicaremos cada una de ellas.

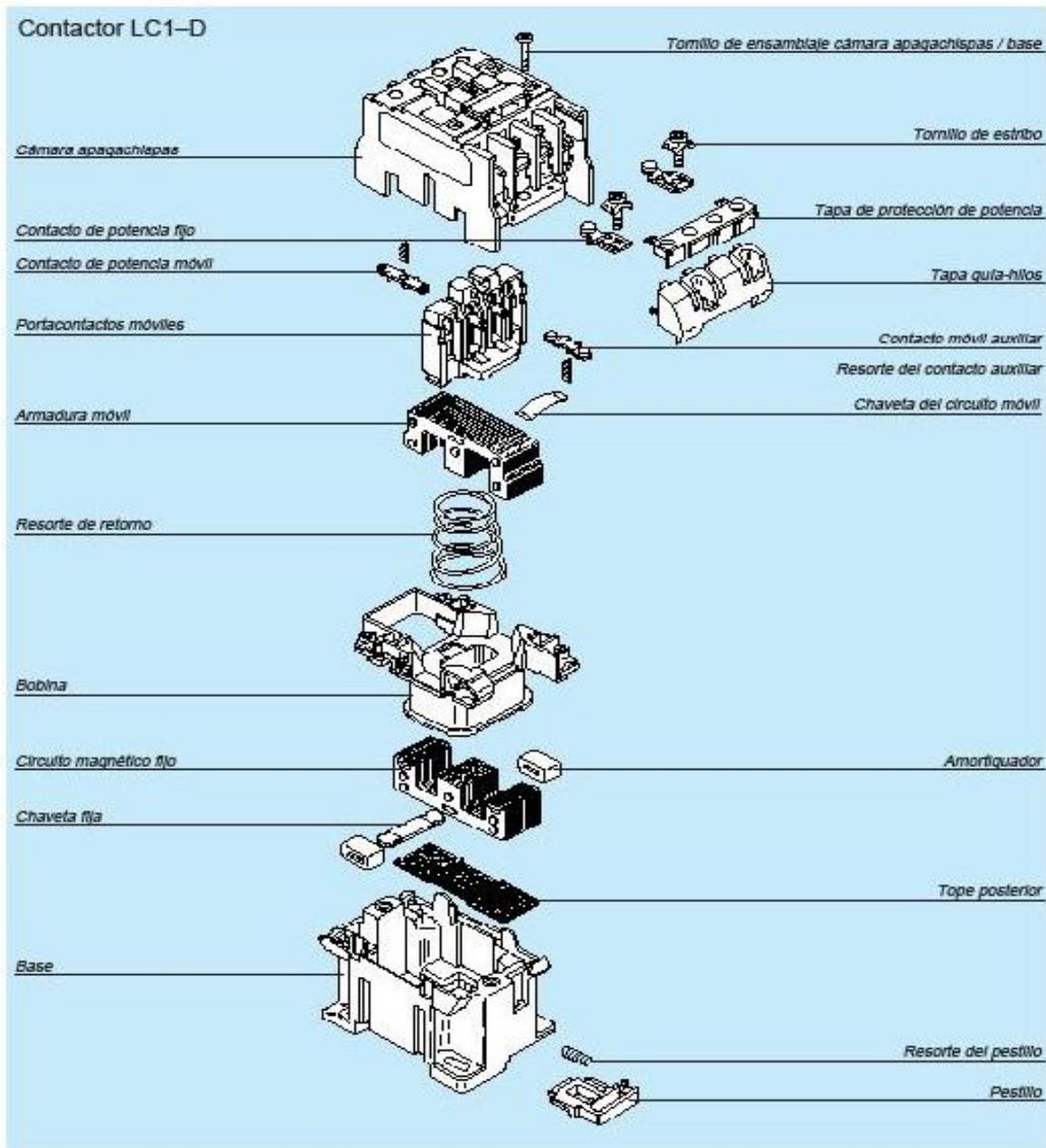


Figura 2.2.3 Partes de un contactor (Telemecanic)

### Partes del contactor

**Carcasa.** Es el soporte fabricado en material no conductor que posee rigidez dieléctrica y soporta el calor no extremo, sobre el cual se fijan todos los componentes conductores al contactor.

**Electroimán.** Es el elemento motor del contactor, compuesto por una serie de dispositivos cuya finalidad es transformar la energía eléctrica en magnetismo, generando así un campo magnético muy intenso, que provocará un movimiento mecánico.

**Bobina.** Es un arrollamiento de alambre de cobre muy delgado con un gran número de espiras, que al aplicársele tensión o voltaje genera un campo magnético. Éste a su vez produce un campo electromagnético, superior al par resistente de los muelles, que a modo de resortes, separan la armadura del núcleo, de manera que estas dos partes pueden juntarse estrechamente. Cuando una bobina se alimenta con corriente alterna la intensidad absorbida por ésta, denominada corriente de arranque es relativamente elevada, debido a que en el circuito solo se tiene la resistencia del conductor de la bobina.

En estas condiciones, el factor de potencia  $f_p = \cos \theta$  es alto (0,8 a 0,9) y la reactancia inductiva muy baja por existir mucho entrehierro entre el núcleo y la armadura.

Esta corriente elevada genera un campo magnético intenso, de manera que el núcleo puede atraer a la armadura y a la resistencia mecánica del resorte o muelle que los mantiene separados en estado de reposo. Una vez que el circuito magnético se cierra, al juntarse el núcleo con la armadura, aumenta la impedancia de la bobina, de tal manera que la corriente de arranque se reduce, la corriente formada se le denomina de trabajo. Ésta es mucho más baja de – 6 a 10 veces con un  $f_p$  más bajo, pero con capacidad para mantener el circuito cerrado.

Se hace referencia a la nomenclatura de la bobina de la siguiente forma: A1 y A2.

### **La armadura está formada por**

**Núcleo.** Es una parte metálica, de material ferro magnético, generalmente en forma de E, que va fijo en la carcasa. Su función es concentrar y aumentar el flujo magnético que genera la bobina (colocada en la columna central del núcleo), para atraer con mayor eficiencia la armadura. Se construye con una serie de láminas delgadas, de acero al silicio con la finalidad de reducir al máximo las corrientes parásitas, aisladas entre sí pero unidas fuertemente por remaches. El magnetismo remanente se elimina completamente por medio de la inserción de un material paramagnético, complementando al pequeño entrehierro. Cuando se alimenta a la bobina con, el núcleo debe llevar un elemento adicional llamado espira de sombra o anillo de desfasaje. Este elemento, al estar desfasado de la onda principal, suministra al circuito magnético un flujo adicional creando una especie de CC (corriente continua). Esto evita ruidos y vibraciones, evitando la elevación la corriente de mantenimiento o trabajo.

**Elemento móvil.** Cuya construcción es similar a la del núcleo, pero sin espiras de sombra. Su función es cerrar el circuito magnético una vez energizada la bobina, ya que debe estar separado del núcleo, por acción de un muelle. Este espacio de separación se denomina distancia de arranque. Las características del muelle permiten que, tanto el cierre como la apertura del circuito magnético, se realicen de forma muy rápida, alrededor de unos 10 milisegundos. Cuando el par resistente del muelle es mayor que el par electromagnético, el núcleo no logrará atraer a la armadura o lo hará con mucha dificultad. Por el contrario, si el par resistente del muelle es demasiado débil, la separación de la armadura no se producirá con la rapidez necesaria.

**Contactos.** Son elementos conductores que tienen por objeto establecer o interrumpir el paso de corriente en cuanto la bobina se energice. Todo contacto está compuesto por tres conjuntos de elementos. Dos partes fijas ubicadas en la coraza y una parte móvil colocada en la armadura para establecer o interrumpir el de la corriente entre las partes fijas. El contacto móvil lleva el mencionado resorte que garantiza la presión y por consiguiente la unión de las tres partes.

- Contactos principales: Son contactos instantáneos cuya función es establecer o interrumpir el circuito principal, consiguiendo así que la corriente se transporte desde la red a la carga, por el cual deben estar debidamente calibrados y dimensionados para permitir el paso de intensidades de corriente requeridas por la carga sin peligro de deteriorarse. Por su función, son contactos únicamente abiertos. Simbología: se identifican con un solo número del 1 al 16.
- Contactos auxiliares: son contactos cuya función específica es permitir o interrumpir el paso de la corriente a las bobinas de los contactores o los elementos de señalización, por lo cual están dimensionados únicamente para intensidades muy pequeñas o débiles. Éstos actúan tan pronto se energiza la bobina a excepción de los retardados.

Existen dos clases:

- Contactos NC (normalmente cerrados): llamados también instantáneos de cierre, cuya función es cerrar un circuito cuando se energiza la bobina del contactor al cual pertenecen.
- Contactos NA (normalmente abiertos): llamados también instantáneos de apertura, cuya función es abrir un circuito cuando se energiza la bobina del contactor al cual pertenecen.
- Un contactor debe llevar necesariamente un contacto auxiliar instantáneo NA. Uno de los contactos auxiliares NA debe cumplir la función de asegurar la auto alimentación de la bobina, por lo cual recibe el nombre específico de auxiliar de sostenimiento, retención o candado.
- Existen contactores que tienen únicamente contactos auxiliares, ya sean NA, NC o NA y NC. Estos se les llama contactores auxiliares o relevadores. Cuando un contactor no tiene el número suficiente de contactos auxiliares se puede optar por bloques aditivos o contactores auxiliares Para identificar a un contacto auxiliar, a pesar de las marcas del fabricante se utiliza un sistema de números:
  - Si son normalmente cerrados (NC), la entrada es (11, 21, 31, 41...) y la salida (12, 22, 32, 42...).
  - Si son normalmente abiertos (NA), la entrada es (13, 23, 33, 43...) y la salida (14, 24, 34, 44...).
  - Si son de apertura temporizada es (15, 25, 35, 45...) y la salida (16, 26, 36, 46...).
  - Si son de cierre temporizado es (17, 27, 37, 48...) y la salida (18, 28, 38, 48...).

**Relevador térmico.** Es un elemento de protección que se ubica en el circuito de potencia, contra sobrecargas y su principio de funcionamiento se basa en la deformación de ciertos elementos, bimetales, bajo el efecto de la temperatura, para accionar, cuando este alcanza ciertos valores, unos contactos auxiliares que desactiven todo el circuito y energicen al mismo tiempo un elemento de señalización.

**El bimetálico.** Está formado por dos metales de diferente coeficiente de dilatación y unidos firmemente entre sí, regularmente mediante soldadura de punto. El calor necesario para curvar o reflexionar la lámina bimetálica es producido por una resistencia, arrollada alrededor del bimetálico, que está cubierto con asbesto, a través de la cual circula la corriente que va de la red al motor.

**Los bimetales** comienzan a curvarse cuando la corriente sobrepasa el valor nominal para el cual han sido dimensionados, empujando una placa de fibra hasta que se produce el cambio de estado de los contactos auxiliares que lleva. El tiempo de desconexión depende de la intensidad de la corriente que circule por las resistencias.

**Resorte.** Es un muelle encargado de devolver a los contactos a su posición de reposo una vez que cesa el campo magnético de la bobina.

### **Funcionamiento del contactor**

Cuando la bobina es recorrida por la corriente eléctrica, genera un campo magnético intenso, de manera que el núcleo atrae con un movimiento muy rápido. Al producirse este movimiento, todos los contactos del contactor (tanto principales como auxiliares) cambian de posición solidariamente: Los contactos cerrados se abren y los abiertos se cierran. Para volver a los contactos a su posición inicial de reposo basta con desenergizar la bobina.

### **Criterios para la elección de un contactor**

Para elegir un contactor adecuado se deben tener en cuenta algunos aspectos, como los siguientes:

- El tipo de corriente, la tensión de alimentación de la bobina.
- La potencia nominal de la carga.
- Condiciones de servicio: ligero, normal, pesado, extremo.
- Frecuencia de accionamientos o maniobras, su robustez mecánica y eléctrica.
- Si es para circuito de potencia o de mando y el número de contactos auxiliares que se necesitan.
- Para trabajos silenciosos o con frecuencias de maniobra muy altas es recomendable el uso de contactores estáticos o de estado sólido.

## EL RELEVADOR

Es un dispositivo que consta de dos circuitos diferentes, un circuito electromagnético (electroimán) y un circuito de contactos, el cual utilizaremos en el circuito que se desea controlar. En la figura 2.2.5 podemos ver la simbología así como su construcción.

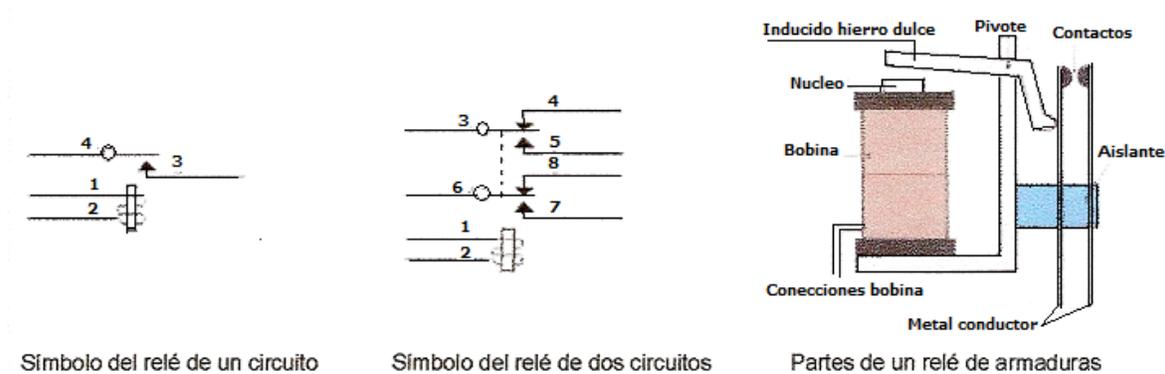


Figura 2.2.5. Símbolos y partes de un relevador

Su funcionamiento se basa en el fenómeno electromagnético, cuando la corriente pasa por la bobina, esta produce un campo magnético que magnetiza un núcleo de hierro dulce (ferrita), este atrae al inducido y provoca que los contactos se toquen, cuando la corriente cesa estos contactos se separan regresando a su estado de reposo. En la figura se representan a relevadores de uno y dos contactos pero existen con mayor número de contactos.

Las características técnicas se dividen en 2 y son:

- La parte electromagnética.
- La parte mecánica o contactos.

Las características técnicas de la parte electromagnética son:

- Corriente de excitación.- Corriente necesaria que circula por la bobina para activar el relevador.
- Voltaje nominal.- Voltaje de trabajo para la cual el relevador se acciona.
- Voltaje de trabajo.- Margen entre la voltaje mínimo y máximo, garantizando el funcionamiento correcto del dispositivo.
- Consumo nominal de la bobina.- Potencia que consume la bobina cuando el relevador esta excitado con el voltaje nominal a 20°C.

Las características técnicas de la parte mecánica son:

- Voltaje de conexión.- Voltaje entre contactos antes de cerrar y después de abrir.
- Intensidad de conexión.- Intensidad máxima que un relé puede conectarlo o desconectarlo.

- Intensidad máxima de trabajo.- Corriente máxima que puede circular por los contactos cuando se han cerrado.

Los materiales con que se fabrican los contactos son: La plata y aleaciones de plata que pueden ser con cobre, níquel u oxido de cadmio. El material que se elija en la fabricación dependerá de la aplicación, uso y vida útil necesaria de los mismos.

Los relevadores más utilizados son:

- Los relevadores de armadura.
- Los relevadores de núcleo móvil.

En los relevadores de armadura el electroimán hace vascular la armadura al ser excitada, accionando los contactos (abriendo o cerrando) y dependiendo de si son normalmente cerrados o si son normalmente abiertos.

Los relevadores de núcleo móvil tienen un embolo en lugar de la armadura, utilizando un solenoide para accionar los contactos y se suelen aplicar cuando hay que manejar corrientes elevadas.

En la siguiente figura 2.2.6 se muestran diferentes tipos de relevadores.



Figura 2.2.6 Relevadores existentes en el mercado

Las aplicaciones de este tipo de dispositivos son múltiples como en automatismos eléctricos, control de motores, como interfaces de PC, alarmas, en electrónica y sirven para controlar corrientes y voltajes superiores a los del circuito propiamente dicho.

### El desarrollo de los autómatas programables

En las instalaciones de las fábricas de Automóviles se instalaban grandes gabinetes en paralelo con las líneas de producción. Dentro de estos gabinetes se construía mediante circuitos de relevadores electromagnéticos la inteligencia que controlaba el proceso de fabricación. Esta

tecnología funcionaba y por supuesto se fabricaban coches pero también poseían una gran problemática.

Los elementos que la forman eran electromecánicos (en el caso de los relevadores), lo cual implica un número no ilimitado de maniobras y la necesidad de implantar logísticas de mantenimiento preventivo. Ofrecían una gran dificultad para la búsqueda de averías (un cable que no hace contacto sigue estando visualmente junto al tornillo). Para facilitar la localización de averías se instalaban contactores y relevadores que señalaran los fallos. A veces se debían realizar conexiones entre cientos o miles de relevadores, lo que implicaba un enorme esfuerzo de diseño y mantenimiento. Cuando se cambiaban los procesos de producción se necesitaban cambiar también a los sistemas de control.

Los tiempos de parada ante cualquier avería eran considerables. Si había un paro de emergencia, se tenía que reiniciar manualmente el sistema, dado que se perdía la secuencia de la producción.

A finales de los años cincuenta los fabricantes de automóviles necesitaban nuevas y mejores herramientas de control de la producción. Los "nuevos controladores" debían ser fácilmente programables por ingenieros de planta o personal de mantenimiento. El tiempo de vida debía ser largo y los cambios en el programa tenían que realizarse de forma sencilla. Finalmente se imponía que trabajaran sin problemas en entornos industriales adversos. La solución fue el empleo de una técnica de programación familiar y reemplazar los relevadores mecánicos por relevadores de estado sólido.

El Control Lógico Programable (PLC por sus siglas en inglés Programmable Logic Controller) apareció con el propósito de eliminar el enorme costo que significaba el reemplazo de un sistema de control basado en relevadores a finales de los años 60.

## **El Control Lógico Programable (PLC)**

Un **PLC** en sí es un equipo electrónico capaz de controlar máquinas e incluso procesos a través de entradas y salidas, las entradas y las salidas pueden ser tanto analógicas como digitales.

Los elementos importantes en un PLC (para este caso utilizaremos como base el PLC de siemens) al igual que un alambrado lógico con elementos eléctricos como los relevadores y estos son:

- Contactos normalmente abiertos y normalmente cerrados.
- Bobinas.
- Temporizadores (Timers).
- Contadores.

A continuación se muestran los símbolos de cada elemento para un PLC siemens, en la siguiente figura 2.2.7:

SIMBOLO	ELEMENTO
CONTACTO NORMALMENTE ABIERTO	
CONTACTO NORMALMENTE CERRADO	
BOBINA	
Temporizadores (timers)	
CONTADORES	

Figura 2.2.7 Simbolos de elementos utilizados en PLC

### Contactos normalmente abiertos y normalmente cerrados

Un contacto es un elemento eléctrico cuya principal y única función es abrir y cerrar un circuito eléctrico ya sea para impedir el paso de la corriente o permitir el paso de la misma. El PLC toma en cuenta al contacto como un elemento de entrada. Las entradas se representan por medio de la letra **I** (por sus siglas en inglés input). Cuando un contacto se activa y éste se cierra (contacto normalmente abierto) este pasa de un estado lógico 0 a un estado lógico de 1. Cuando un contacto se activa y este se abre (contacto normalmente cerrado) este pasa de un estado lógico 1 a un estado lógico 0.

Las bobinas no son más que un arrollamiento de alambres los cuales al aplicarles un voltaje, estas crearan un fuerte campo magnético. Por lo tanto las bobinas que actúan en los programas de PLC representan los electroimanes de los relevadores eléctricos. Las bobinas se consideran como elementos internos del PLC pero estas también representan salidas.

Cuando se representan internamente actúan como electroimanes donde su principal letra característica son: la **M** y la **V**.

Cuando representan una salida estos se representan especialmente con la letra **Q**. (las salidas más comunes representan a motores eléctricos, solenoides, cilindros eléctricos entre otras salidas). A continuación veremos 2 ejemplos sencillos en donde se pueden utilizar únicamente contactos y bobinas.

Ejemplo A: armar un programa en escalera el cual me encienda un motor eléctrico a través de un contacto y que éste se apague cuando presionemos otro contacto.

### ENCENDIDO Y PARO DE UN MOTOR ELECTRICO

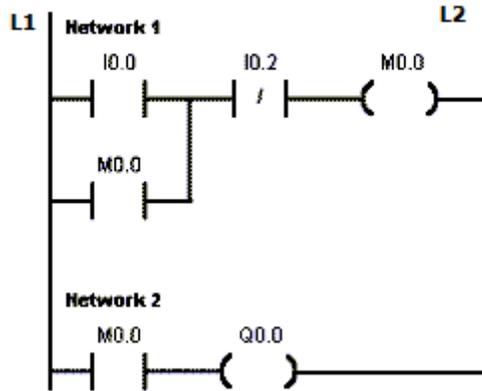


Figura 2.2.8 Diagrama de escalera

Como se observa en la figura 2.2.8 en el diagrama de escalera el contacto I0.0 e I0.2 son elementos de entrada y la bobina M0.0 es una bobina interna del PLC. La salida en este caso un motor eléctrico se representa con la bobina Q0.0

Como ejemplo podemos decir que cuando se presione el elemento I0.0 este hará que se active la bobina M0.0 y a causa de ello provocara que los contactos auxiliares M0.0 se cierren y así se encienda el motor eléctrico.

Un contacto auxiliar M0.0 sirve como una retroalimentación al circuito. Esto se hace porque por lo común los contactos de entrada son momentáneos y este se encuentra en **uno** cuando lo tengamos presionado y al soltarlo cae a **cero**. Por lo tanto para evitar eso se retroalimenta el segundo contacto (llamado candado).

El motor se detendrá únicamente cuando se presione el contacto I0.2 ya que este cortara la retroalimentación que existe en el circuito.

En la figura 2.2.9 se representan físicamente las conexiones en un CPU de Siemens del diagrama anterior.

Otra forma de arrancar y parar un motor puede llevarse a cabo haciendo un programa en lenguaje escalera el cual encienda y pare un motor eléctrico. Además, dicho programa deberá incluir protecciones que protejan al motor, esto es, que se detenga automáticamente cuando haya una sobrecarga (recordando que una sobrecarga en el motor significa un aumento en la corriente de consumo) y además que se pare cuando exista alta temperatura en el motor.

## ENCENDIDO Y PARO DE UN MOTOR ELECTRICO

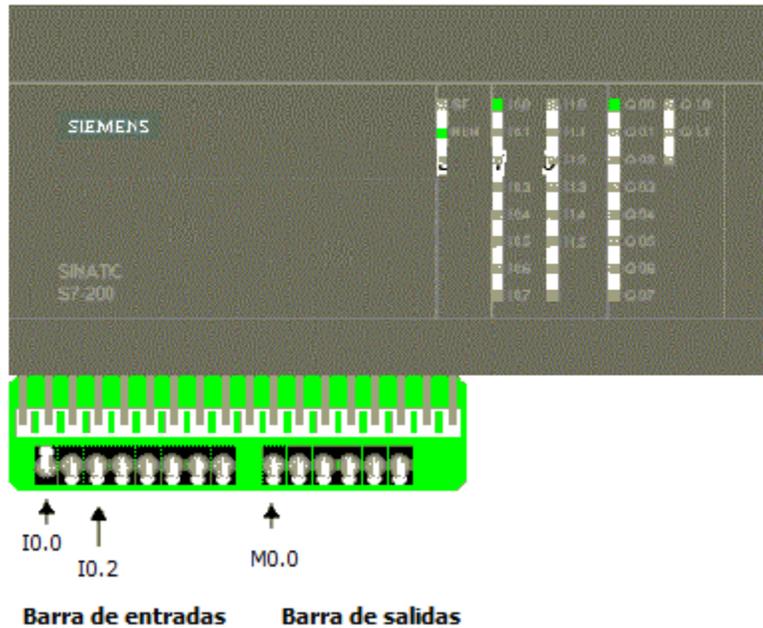


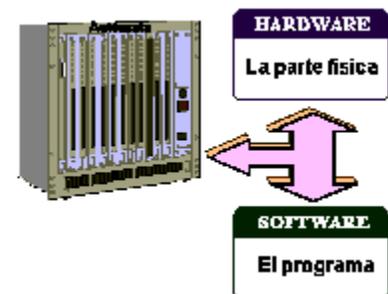
Figura 2.2.9 Representación física de las conexiones en un CPU de encendido y paro de un motor

**Hardware del PLC está conformado por, la fuente de alimentación (F.A.), la unidad de control del proceso (CPU por sus siglas en inglés Central Processing Unit) así como las tarjetas de entradas y salidas, adicionalmente un Software que conforma el conjunto de programas.**

En la actualidad estamos habituados a compartir nuestra vida con una máquina, llamada computadora. Los autómatas (también llamados PLC o Dispositivos lógicos Programables) podemos definirlos como computadoras especializadas en la automatización de procesos ya sean estos industriales, domésticos, militares.

Como las computadoras, el PLC, constara de dos partes fundamentales (ver figura 2.2.10).

- El **HARDWARE** (los fierros) que es la parte física o tangible de la computadora y del autómata.
- El **SOFTWARE** (los programas) es la parte que no es tangible: es el programa o conjunto de programas que hacen que la computadora o el autómata haga un trabajo determinado



### Hardware (los fierros)

El hardware del autómata, al ser básicamente una computadora, podemos dividirlo de la siguiente forma:

Figura 2.2.10 Hardware

- La F.A., o fuente de alimentación, suministra los distintos niveles de Vcc. que necesitan los circuitos electrónicos del autómatas para poder funcionar.
- El CPU, o Unidad de Control de Proceso, en la que va alojado el microprocesador junto con los dispositivos necesarios para que éste realice su función: las tarjetas de memoria, el reloj, los circuitos (integrados que ayudan al microprocesador en sus tareas de comunicación con otros dispositivos), etc.
- Las tarjetas de entradas/salidas (I/O por sus siglas en inglés Input/ output), o tarjetas I/O, en las que otros circuitos integrados se encargan de que el microprocesador sea capaz de comunicarse con otros dispositivos, ya sean estos otros microprocesadores, un teclado, una pantalla, etc.

Se necesitan ventiladores que tienen por misión refrigerar todos los elementos que componen el PLC, ya que tanto la F.A. como el CPU pueden alcanzar temperaturas peligrosas para los circuitos de uno y otro componente; una falla en dichos ventiladores requiere de una alarma que nos indique por la pantalla, o por un led (por sus siglas en inglés light emitting diode) indicador o por la impresora (“Avería en ventiladores PLC”).

Pero si la temperatura es peligrosa, no es menos peligroso el polvo y las partículas en suspensión que hay en el aire, con los ventiladores, estamos provocando una corriente de aire forzada que recorre las distintas tarjetas, para evitar la entrada de partículas en suspensión en dichos elementos, entre los ventiladores y el PLC, se deben instalar unos filtros que es conveniente revisar y cambiar de vez en cuando.

### Hardware del PLC, el bastidor o rack

En el bastidor o rack central podemos situar la fuente de alimentación (F.A). La batería que podemos utilizar sería del tipo recargable con duración determinada por lo que en caso de falla se hiciera necesaria su sustitución. La misión fundamental de esta batería está en que el CPU conserve datos como son el programa, la hora y la fecha, datos que almacena en una memoria de acceso aleatorio RAM (por sus siglas en inglés Random Access Memory Module) (La memoria RAM es una memoria que tiene la particularidad de perder todo lo que tiene almacenado cuando pierde la alimentación). Los PLC también cuentan con un conmutador para reinicializar RESET que nos sirve para reinicializar el equipo cuando, por ejemplo, hemos cambiado la batería. Tanto la operación de cambio de batería como el reseteo del equipo se deben hacer cuando el autómatas no está atendiendo a operaciones fundamentales de la misma operación (arranque, parada, grupo en marcha, etc.)

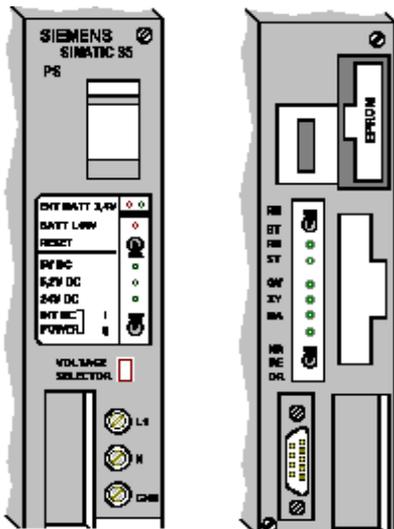


Figura 2.2.11 Racks

El PLC de la marca Siemens cuenta con una memoria ROM (por sus siglas en inglés Read-Only Memory) programable y borrable EPROM (por sus siglas en inglés Erasable Programmable ROM). Este tipo de memoria tiene la particularidad de que mantiene la información aunque no esté alimentada. En esta tarjeta, está grabado el programa que va a ejecutar el PLC y nos va a servir para recargar el programa en el PLC si, por cualquier motivo, éste se borrase de la memoria volátil RAM.

La memoria RAM (por sus siglas en inglés Random-Access Memory es una memoria de acceso aleatorio) es un tipo de memoria que se caracteriza por su extremada rapidez, en ella podemos leer y escribir cuantas veces queramos; su único problema es que pierde todo su contenido si le quitamos la alimentación. El microprocesador del PLC utiliza esta memoria para escribir los datos (estado de las entradas, órdenes de salida, resultados intermedios,...) y recurre a ella para leer el programa. No se utiliza otro tipo de memoria (la EPROM, por ejemplo) porque, aunque tienen la ventaja de no perder los datos cuando no tienen alimentación, son memorias más lentas y que requieren procesos más complicados para su borrado y regrabación: otra de las ventajas de la memoria RAM es que no necesitamos borrar los datos que contiene, escribimos directamente los nuevos datos sobre los que ya tiene grabados.

En este tipo de PLC existe un conector cuya finalidad es conectar en él un dispositivo de programación o un PC con los que se puedan cambiar el programa, introducir un nuevo programa, visualizar el funcionamiento del programa, etc. La tarjeta de comunicaciones (CP), sirve para comunicar el autómatas, a través de una red SINEC L-2, con:

- Los otros autómatas de la instalación si es que se tienen (PLC1 y PLC3)
- La computadora que sirve para la comunicación con el operador (SCADA por sus siglas en inglés System Control and Data Acquisition o Control Supervisor y Adquisición de Datos).
- El sistema de telemando (telem) para que en el despacho reciban las distintas señales y desde el despacho se transmitan las órdenes hacia los elementos de la instalación.

### **Hardware del PLC, tarjetas de E/S**

Con el fin de proveer un aislamiento galvánico del **PLC** con el medio (la instalación), las tarjetas de entradas digitales no se conectan directamente a los elementos de la instalación; los elementos de la instalación se conectan a unas terminales de relevador situadas en la parte posterior de los gabinetes, de los contactos libres de potencial de estas terminales se toman las señales que entran en las tarjetas, como lo muestra la figura 2.2.12.

Sólo en algunos casos específicos las señales de campo llegan directamente a las tarjetas de entradas digitales con la admisión de dos estados.

- **[0]** (ausencia de voltaje, contacto abierto,...)
- **[1]** (presencia de voltaje, contacto cerrado,...).

Por otro lado también existe una tarjeta de expansión, la misión de esta tarjeta es permitir conectar más tarjetas de entradas o salidas a través de un nuevo bastidor de ampliación (situado, en este caso, en la parte superior del bastidor central). Este nuevo bastidor se comunicará con el bastidor central a través de una nueva tarjeta de expansión.

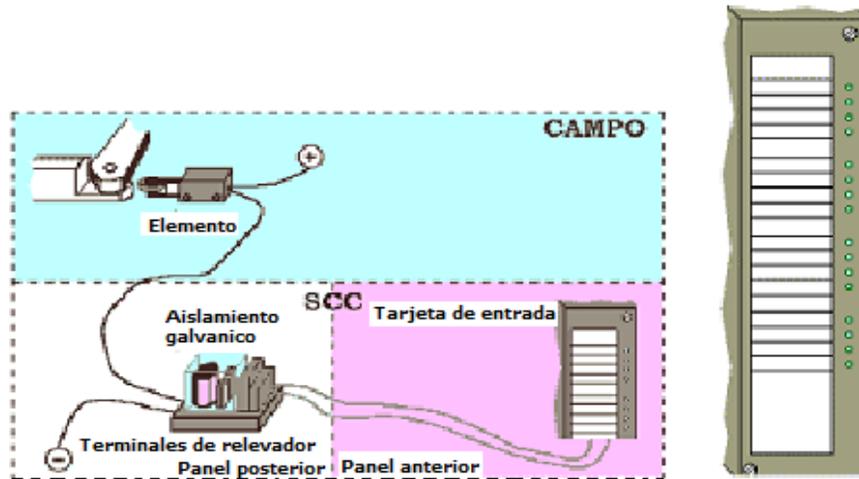


Figura 2.2.12 Conexión con aislamiento galvánico

En el bastidor de ampliación, a la izquierda de la tarjeta de expansión, tenemos instaladas tres nuevas tarjetas de entradas digitales a las que le siguen tres tarjetas de salidas digitales (SD).

Como vemos en el dibujo el aspecto de estas tarjetas es muy parecido a las de entradas digitales, estas tarjetas van a servir, por un lado, para que el automático transmita las órdenes a los distintos órganos de la instalación (válvulas, motores, etc.) y, por otro, para que se enciendan las lámparas de funcionamiento y/o avería situadas al frente del gabinete.

Las tarjetas de salidas digitales, como las de entradas digitales, están aisladas galvánicamente de campo a través de unas terminales de relevadores. Estas terminales de relevador están situadas en la parte posterior de los gabinetes.

A las tarjetas de salidas digitales les sigue una tarjeta de entradas analógicas (EA). Una señal analógica es aquella que es variable en el tiempo (el ejemplo más típico que se suele poner es el caso de una corriente alterna). A través de esta tarjeta se introducen datos que sirven, solamente, para la información del operador (potencia activa del/los grupo(s), potencia reactiva, nivel de la cámara de carga,...)

## Software del PLC, operandos

### Software

El software del PLC consta de documentación del programa que se halla hecho. Si queremos entender algo del programa, tenemos que tener claros una serie de conceptos básicos que explicamos a continuación:

- **Operando:** es un elemento (entrada o salida) con el que vamos a trabajar en el programa. Existen tres tipos de operandos:
  - **Entradas:** son las distintas entradas digitales que llegan al autómata. Estas entradas van agrupadas en grupos de 8 entradas (un byte). Los bytes van numerados de forma correlativa atendiendo a su posición en los bastidores. Como en informática siempre se empieza contando por el cero, el primer byte (el correspondiente a la parte superior de la tarjeta ED más próxima al CPU) correspondería a las 8 primeras entradas de esta tarjeta. Cada entrada, a su vez, irá numerada correlativamente de 0 a 7. Las entradas, en el programa, van numeradas con la letra E seguida del número de byte y, separado por un punto, va el número de la entrada. Veamos unos ejemplos:
    - E0.0 Sincronizador en prueba
    - E0.1 Sincronizador en manual
    - E0.6 E0.6 (no está conectada)
    - E0.7 E0.7 (no está conectada)
    - E1.0 Protección diferencial alternador
    - E29.2 Ataguía socaz abierta
  - **Salidas:** Son las diferentes salidas digitales. Su numeración sigue el mismo criterio que las entradas, la única diferencia estriba en que el número de las salidas comienza con la letra A y la numeración del byte empieza en el número 36. Veamos unos ejemplos:
    - A36.0 Señal bomba principal aceite turbina.
    - A36.1 Señal aceite turbina.
    - A39.2 Salida señal grupo parado.
  - **Marcas:** son resultados intermedios del programa que los podemos utilizar como entradas o como salidas. Se numeran con los mismos criterios que las entradas y salidas empezando por el byte 0 y anteponiendo la letra M. Ejemplos:
    - M0.0 Siempre cero.
    - M0.1 Siempre uno.
    - M0.2 Necesidad de bocina.

## M2.6 Preparado drenaje.

- **Nemónico:** es un símbolo (abreviatura) que utiliza el programador para facilitarle la tarea en la programación ya que, dependiendo del lenguaje de programación, se le puede permitir utilizar sólo las numeraciones de las entradas, salidas y marcas o bien se le puede permitir el empleo de los nemónicos que, para él, son más fáciles de recordar. Veamos unos ejemplos:

➤ <b>Módulo de programa:</b>	Operando	Nemónico	Comentario
Podemos definirlo	E0.0	Sinprueb	Sincronizador en prueba
	E4.5	ACTPalta	Acumulador turbina presión alta
	A36.0	S_BAT1	Bomba principal aceite turbina
	A36.4	S_VAG	Válvula agua general abrir
	M0.2	Bocina	Necesidad de bocina

como

una hoja en blanco donde el programador puede escribir datos, órdenes, funciones, etc. Tenemos cuatro tipos de módulos:

- **DB:** Son módulos que contienen datos.
- **FB:** módulos que contienen funciones.
- **OB:** módulos que sirven para organizar otros módulos.
- **PB:** módulos que contienen las órdenes.

De todos los módulos los que más nos interesan a nosotros son los módulos PB ya que en estos tenemos las distintas secuencias que realiza el programa.

- **Segmento:** si el módulo de programación lo definiáramos como una hoja, el segmento equivaldría a una línea dentro de la hoja, es decir, dentro del módulo.
- **Constantes:** Especifican el formato de los datos, aunque para nosotros carecen de mayor importancia, las enumeramos porque vamos a encontrar alguna en los esquemas que pretendemos interpretar (como la KT). Tenemos las siguientes constantes:

- **KC:** Constante en caracteres ASCII
- **KF:** Constante en número natural sin coma
- **KG:** Constante en número natural con coma
- **KH:** Constante en hexadecimal
- **KM:** Constante en binario
- **KT:** Constante de temporización
- **KZ:** Constante de contador

Software del PLC, operadores: compuerta Y (AND), compuerta O (OR), y los Temporizadores.

- **Operadores:** son las funciones (operaciones) que el autómata puede realizar y que nosotros podemos utilizar en el programa. Entre los muchos operadores que incorpora SIEMENS en sus autómatas son:
  - **Compuerta Y:** Realiza la función lógica denominada "AND", o producto lógico; esta función activa su salida cuando todas sus entradas están activadas; equivale a tantos contactos en serie como entradas tengamos. Su símbolo, y circuito equivalente, son los siguientes:

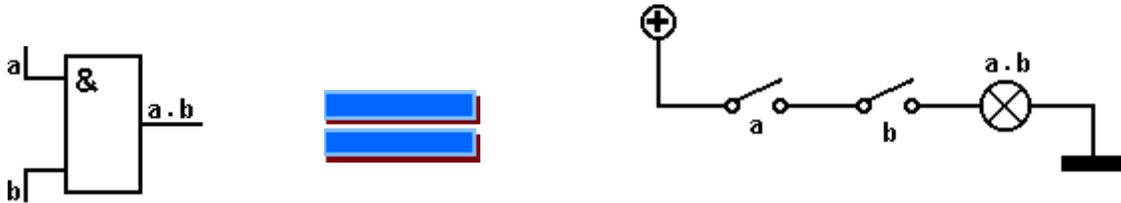


Figura 2.2.13 Símbolo y circuito equivalente de compuerta "Y"

- **Compuerta O:** Realiza la suma lógica o función "OR"; en esta función basta que una de las entradas esté activada para que la salida esté activada. Equivale a tantos contactos en paralelo como entradas dispone la función. Su símbolo, y circuito equivalente, es el siguiente:

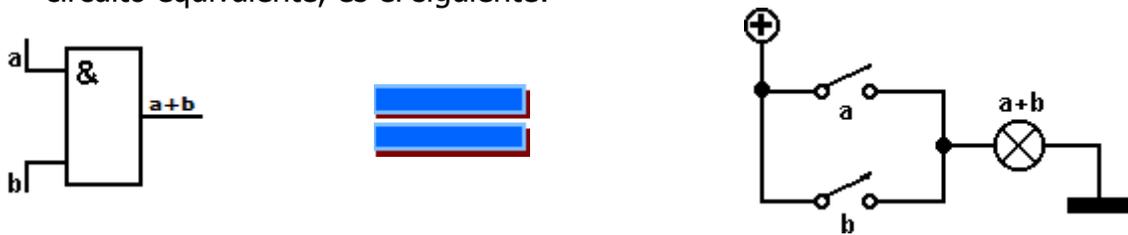


Figura 2.2.14 Símbolo y circuito equivalente de compuerta "O"

- **Temporizador:** La única función de temporización que utilizamos en los programas es la de un temporizado a la conexión. Este temporizado se caracteriza porque cuando la entrada [T] se pone a [1], el autómata empieza a contar el tiempo que se fija en la entrada [TW]. Para determinar el tiempo que se ha fijado en esta entrada pasemos a explicar cómo se interpreta el valor de la constante KT; la constante KT tiene el siguiente formato.

<b>KT</b>	<b>Valor</b>	<b>.</b>	<b>Retícula de tiempo</b>
-----------	--------------	----------	---------------------------

**KT**, como ya se ha dicho, es el nombre de la constante (es obligatorio ponerlo con el fin de que el programa sepa qué tipo de constante tiene en esta entrada).

**El valor** es el número de pulsos que tiene que contar, este valor no puede superar las tres cifras.

**La retícula** indica el tamaño de los pulsos que se van a contar, puede adquirir los siguientes valores:

- 0 = Centésimas de segundo
- 1 = Décimas de segundo

2 = Segundos  
3 = Intervalos de 10 segundos  
Veamos unos ejemplos:

Un temporizado que tiene una constante de tiempo de KT 5.3, activará su salida [Q] transcurridos 50 segundos (5 valor x 10 seg. retícula). Un temporizado con constante de tiempo KT 12.2 activará su salida transcurridos 12 segundos (12 valor x 1 segundo. retícula).

El símbolo del temporizador lo vemos a continuación:

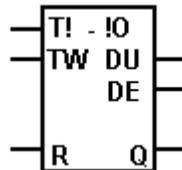


Figura 2.2.15 Símbolo del temporizador

Las salidas [DU] y [DE] no se utilizan. La entrada [R] pone a cero el temporizado

### Software PLC: Basculador (Flip-Flop) RS, salidas

- **Basculador RS:** Este circuito basculador es un multivibrador biestable del tipo RS, este multivibrador se caracteriza porque si activamos su entrada de Set [S], la salida se pone en estado alto ([1]), la salida permanece en este estado hasta que se active la entrada de Reset [R] aunque la entrada de Set se vuelva al estado bajo.

Lo mismo ocurre con la entrada de Reset [R], la salida permanecerá en estado bajo ([0]) hasta que se active la entrada de set, aunque la entrada de Reset haya pasado a estado bajo. Su símbolo es el siguiente:

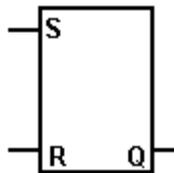


Figura 2.2.16 Símbolo del multivibrador

- **Salidas:** Las salidas se van a utilizar cuando queremos generar el final de un segmento con alguna de las funciones lógicas AND u OR, ya que a estas funciones no le podemos asignar nemónico (sí lo podemos hacer con los temporizados y con los basculadores, en éstos el nombre del nemónico se pone en la parte superior sustituyendo al nombre de la función).

Las salidas pueden referirse directamente a uno de los bornes de las tarjetas de salidas o bien ser marcas internas que luego utilizaremos en el programa.

## Funcionamiento de un autómata

El autómata está siempre repitiendo un ciclo, llamado ciclo de BARRIDO, figura 2.2.17 que consiste en lo siguiente:

- En primer lugar lee todas las entradas y almacena el estado de cada una de ellas.
- En segundo lugar ejecuta las operaciones del programa siguiendo el orden en que se han grabado (ejecuta el segmento 1 del módulo PB 0, a continuación el segmento 2 del mismo módulo, y así hasta terminar con todos los segmentos del módulo PB 0, a continuación hace lo mismo con el módulo PB 1, el PB2,...). Todo esto si el programador en otro tipo de módulos (los OB) no le ha fijado otro orden distinto.
- En tercer lugar escribe el resultado de las operaciones en las salidas.
- Una vez escritas todas las salidas (activando o desactivando las que el resultado de las operaciones así lo requieran) vuelve al paso a).

Este ciclo de barrido se realiza indefinidamente hasta que pasemos el conmutador del CPU a la posición de paro (STOP).

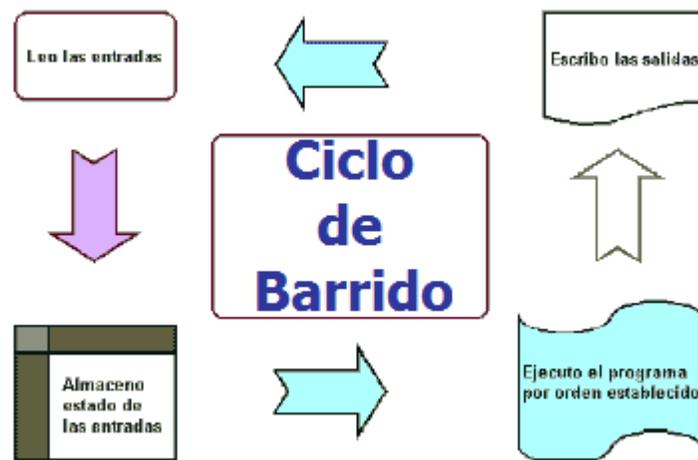


Figura 2.2.17 Ciclo de barrido

En la documentación entregada con el listado del programa del PLC hay una parte titulada "*lista de referencias*" que nos sirve para saber:

- en qué módulos y en qué segmentos se tratan las entradas.
- en qué módulos y segmentos se generan las marcas.
- en que módulos y segmentos se utilizan las marcas.
- en qué módulos se generan las salidas.

Por la lista de referencias sabemos que la salida se genera en el segmento 4 del módulo PB40 (ya que es este segmento el que tiene el asterisco). Si buscamos dicho segmento encontramos el siguiente diagrama de la figura 2.2.18.

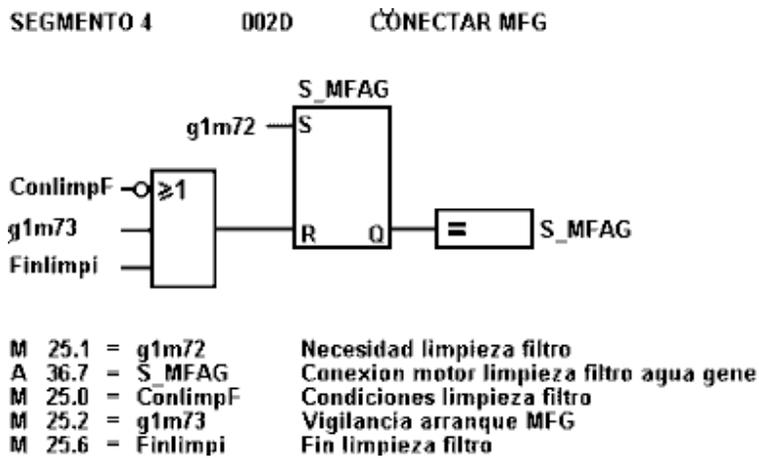


Figura 2.2.18 Del funcionamiento de un segmento de automata

Para la activación de la salida **[Q]** tenemos que activar la marca g1m72, ya que esta marca es la que está conectada a la entrada de Set del basculador **[S]** (como este nombre es un nemónico, miramos en la parte inferior del segmento para saber cuál es el número de la marca, en este caso el nemónico g1m72 es el nombre que se le ha asignado a la marca M25.1).

Recurrimos, de nuevo, a la lista de referencias para saber en qué segmento y módulo se activa dicha marca: la lista nos dice la marca M 25.1 se activa en el segmento 1 del módulo PB40 según figura 2.2.19.

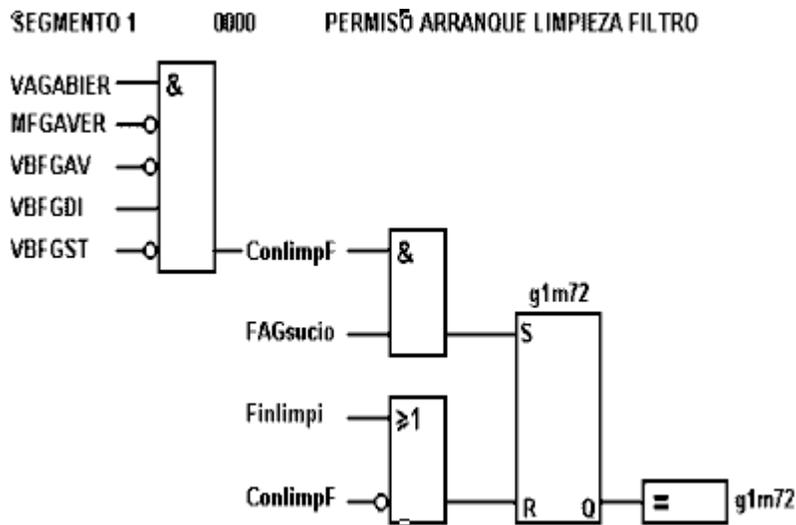


Figura 2.2.19 Del funcionamiento de un segmento de automata

Por el diagrama lógico vemos que esta marca g1m72, permiso arranque limpieza filtro, se genera a través de un basculador RS. Para su activación (entrada [S] a [1]) es necesario que se cumplan las dos condiciones siguientes:

- Que existan las condiciones de limpieza del filtro (ConlimpF esté a [1])
- Y que nos llegue la confirmación de que el filtro está sucio (la marca FAGsucio correspondiente a la entrada E 9.4 esté, también, a [1])

Para que existan las condiciones de limpieza del filtro (ConlimpF a [1]) es necesario, a su vez, que se cumplan todas y cada una de las siguientes condiciones:

- Que la válvula de agua general esté abierta: VAGABIER (E 27.1) a **[1]**
- Y que no exista avería en el motor del filtro general: MFGAVER (E 27.5) esté a **[0]**

Vamos a explicar aquí que una entrada, o una salida, que tiene colocado un círculo, como tiene en este caso la MFGAVER, significa que dicha entrada (o salida) está negada.

Si es una entrada, esto significa que la entrada tiene que estar desactivada para que se cumpla la condición (la entrada debe estar a **[0]**, de ahí la expresión de "que no exista avería..."); si la negación está en la salida, esto significa, que después de la negación tendremos el resultado inverso al que tenemos a la entrada de dicha negación (por eso se le llama función inversión).

- Y que tampoco exista avería en la válvula de broza: VBFGAV, E 27.7, a [0]
- Y que la válvula de broza esté en distancia (conmutador instalado en la CML): VBFGDI, E 28.0, a **[1]**
- Y que no esté pulsada la seta de la válvula de broza: VBFGST, E28.1, a **[0]**

La marca g1m72 se pondrá a cero cuando se cumpla una de estas condiciones:

- O bien cuando se active la marca Finlimpi (Fin limpieza filtro): M 25.6
- O bien si se desactiva ConlimpF (elaborada en este mismo módulo)

Para desconectar el motor del filtro (S\_MFAG a **[0]**, segmento 4 del módulo PB 40, visto anteriormente), basta que se cumpla una de estas condiciones:

- Que la marca ConlimpF se desactive: M 25.0 a **[0]**
- Que se active la marca g1m73 (M 25.2: vigilancia arranque MFG)
- O que se active la marca Finlimpi (M 25.6)

Como la marca ConlimpF (M 25.0) la estudiamos anteriormente, veamos ahora cómo se genera la marca g1m73 (vigilancia arranque MFG).

Si buscamos en la lista de referencias, ésta, nos dice que esta marca se genera en el segmento 2 del módulo PB 40.

Un vistazo al diagrama lógico de este segmento nos revela lo siguiente según la figura 2.2.20:

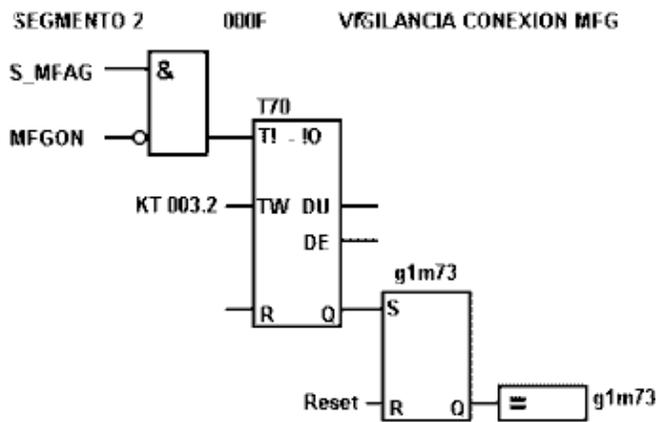


Figura 2.2.20 Del diagrama logico de un segmento

Esta marca se activa y desactiva a través de un basculador RS, para que la salida del basculador se active es necesario que haya transcurrido un tiempo de 3 segundos desde que se activó la entrada del temporizador T70. Este tiempo de 3 segundos viene determinado por la constante KT ya que su retícula "2" nos indica que hay que multiplicar el valor (3, en este caso) por 1 segundo. Para que la entrada del temporizador se active es necesario que se cumplan las dos condiciones:

- Que el autómata haya dado orden de marcha al filtro: S\_MFAG (salida A 36.7 a **[1]**)
- Que el motor del filtro se haya puesto en marcha: entrada E 27.3 (MFGON) a **[1]**

Para que la marca Finlimpi (M 25.6) se active son necesarias las siguientes condiciones (segmento 9 del módulo PB40, extraído de la lista de referencias) ver figura 2.2.21:

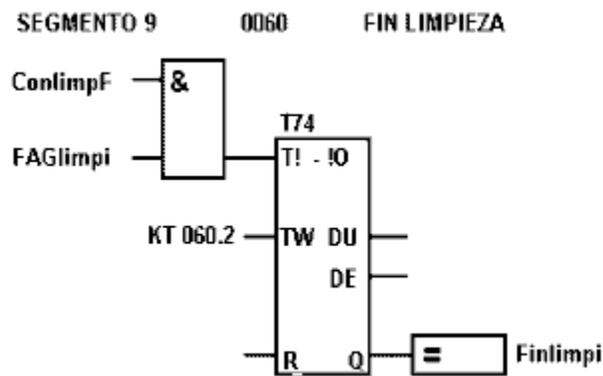


Figura 2.2.21 Diagrama lógico

Que haya transcurrido un tiempo de 60 segundos desde que se han activado las dos señales:

- Condiciones de limpieza filtro (ConlimpF, marca M 25.0)
- Filtro agua general limpio (entrada E9.5, FAGlimpio)

La empresa Bedford Associates (Bedford, MA) propuso un sistema al que llamó Modular Digital Controller o MODICON (por sus siglas en inglés) a la empresa General Motors fabricante de autos en los Estados Unidos. El MODICON 084 resulto ser el primer PLC producido comercialmente. Con este sistema cuando la producción necesitaba variarse, entonces se variaba el sistema y ya.

En el sistema basado en relevadores, estos tenían un tiempo de vida limitado y se necesitaba un sistema de mantenimiento muy estricto. El alambrado de muchos relevadores en un sistema muy grande era muy complicado, si había una falla, la detección del error era muy tediosa y lenta.

Este nuevo controlador (el PLC) tenía que ser fácilmente programable, su vida útil tenía que ser larga y ser resistente a ambientes difíciles. Esto se logró con técnicas de programación conocidas y reemplazando los relevadores por elementos de estado sólido.

En los años 80 se intentó normalizar la comunicación entre los PLC con el protocolo de automatización de manufactura (MAP por sus siglas en inglés) de la General Motors. En esos tiempos el tamaño del PLC se redujo, su programación se realizaba mediante computadoras personales (PC por sus siglas en inglés)) en vez de terminales dedicadas sólo a ese propósito.

En los años 90 se introdujeron nuevos protocolos y se mejoraron algunos anteriores. La última norma ([IEC 1131-3](#)) ha intentado combinar los lenguajes de programación de los PLC en una sola norma internacional.

Ahora se tienen los PLC que se programan en función de diagrama de bloques, listas de instrucciones, lenguaje C, etc. al mismo tiempo.

También se ha dado el caso en que computadoras personales han reemplazado a los PLC. La compañía original que diseñó el primer PLC (MODICON) ahora crea sistemas de control basados en PC.

## **VARIADOR DE FRECUENCIA**

(VFD, por sus siglas en inglés: Variable Frequency Drive o bien AFD Adjustable Frequency Drive).

Se puede dividir el mundo del control electrónico de los motores en dos categorías: ca (corriente alterna) y cd (corriente directa). Un control electrónico de un motor controla la velocidad, el par (torque), la dirección y como resultado la potencia del motor. Un control de cd típicamente controla un devanado shunt de un motor de cd, el cual tiene separada la armadura y los circuitos de campo. Los controles de ca controlan motores de inducción, y como su contraparte del de cd controla velocidad, par (torque), y potencia.

El controlador de dispositivo de variación de frecuencia está formado por dispositivos de conversión electrónicos de estado sólido. El diseño habitual primero convierte la energía de entrada ca en cd usando un puente rectificador. La energía intermedia de cd es convertida en una señal cuasi-senoidal de ca usando un circuito inversor conmutado. El rectificador es usualmente un puente trifásico de diodos, pero también se usan rectificadores controlados. Debido a que la energía es convertida en continua, muchas unidades aceptan entradas tanto monofásicas como trifásicas (actuando como un convertidor de fase, un variador de velocidad).

En la figura 2.2.22 podemos observar una simple aplicación con un ventilador con velocidad fija utilizando un arrancador normal. Podemos reemplazar el arrancador trifásico con un variador de frecuencia (VFD) para operar el ventilador a velocidad variable. Ya que se puede operar el ventilador a cualquier velocidad inferior a la máxima, y se puede variar el flujo del aire controlando la velocidad del motor.

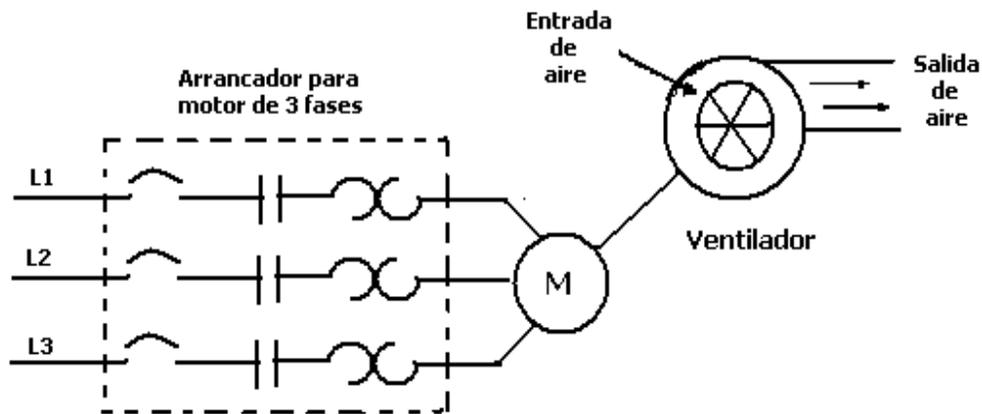


Figura 2.2.22 Aplicación de un ventilador con velocidad fija.

Un variador puede controlar a dos características básicas de un motor de inducción de 3 fases: el par y la velocidad. La figura 2.2.23 nos muestra la construcción de un motor de inducción. Las dos partes básicas del motor, el rotor y el estator trabajan a través de una interacción magnética. El motor contiene un par de polos ver la figura 2.2.24. Este par de polos en el estator, forman una figura típica para proveer un campo magnético de norte a sur.

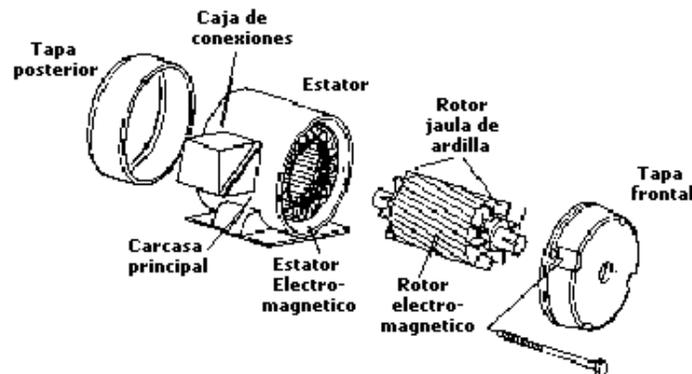


Figura 2.2.23 Construcción básica de un motor de inducción

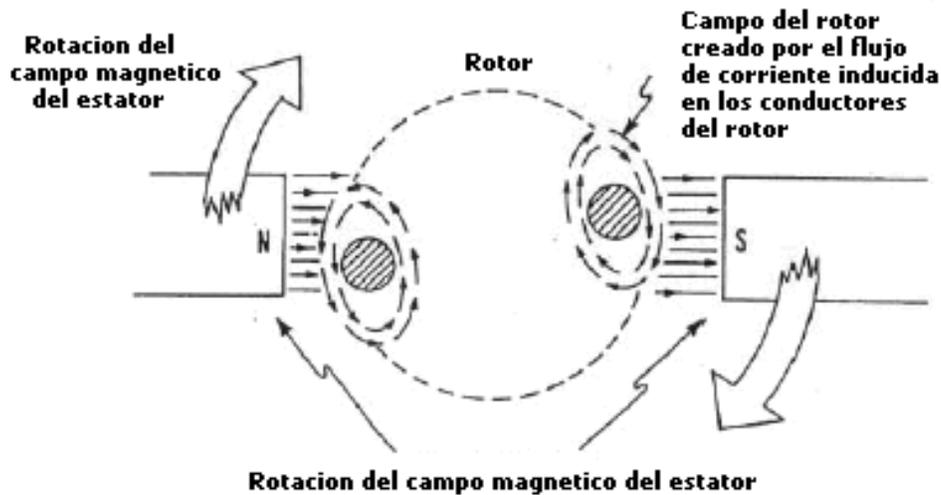


Figura 2.2.24 Principio de operación de un motor de inducción.

Con un par de polos en un motor, el rotor (la flecha) gira a una velocidad específica de 3,600 rpm que es la velocidad base. El número de polos y la frecuencia aplicada determinan esta velocidad. Esta fórmula incluye el efecto llamado "deslizamiento". El deslizamiento es la diferencia entre la velocidad del rotor y la rotación del campo magnético en el estator. Cuando el campo magnético pasa a través de los conductores del rotor, el rotor toma este campo magnético como propio. Este campo magnético del rotor tratará de atrapar los campos rotatorios del estator. Sin embargo esto nunca ocurrirá y esta diferencia es el deslizamiento. Por lo tanto el deslizamiento es lo que permite al motor girar.

El deslizamiento del motor es:

$$\omega = \frac{120 \times f}{p} (1 - s)$$

De donde:

$\omega$  = Velocidad de la flecha

f = frecuencia en cpm y/o Hz

p = número de polos

s = deslizamiento

El deslizamiento según la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos NEMA (National Electrical Manufacturers Association por sus siglas en inglés) para un motor tipo B el deslizamiento varía de 3 a 5% de la velocidad base, la cual es 1,800 RPM a plena carga.

Como ejemplo para un motor de 4 polos la fórmula quedaría de acuerdo a la siguiente figura 2.2.25

$$\omega = \frac{120 \times 60 \text{ Hz}}{4} (1 - s)$$

Figura 2.2.25 Cálculo del deslizamiento de un motor de inducción de 4 polos.

El número de polos más frecuentemente utilizado en motores de ca son 2, 4, 6 y 8 polos que, siguiendo la ecuación anterior resultarían en 3,600, 1,800, 1,200 y 900 RPM respectivamente para motores síncronos de ca a 60 Hz únicamente.

Podemos ajustar la velocidad de un motor de dos formas, una es cambiando la frecuencia aplicada al motor, la otra es ajustando el número de polos, esto último en realidad representa un cambio físico al motor y caro. Tanto por conveniencia, de costo-beneficio y precisión la mejor alternativa es cambiando la frecuencia aplicada al motor en la figura 2.2.26 se muestran las características del desarrollo del par en cada motor relacionando volts contra frecuencia (V/Hz). Cambiando esta relación se cambia el par del motor. Un motor conectado a una fuente de 460 Vca, 60 Hz tiene una relación de 7.67, ésta relación quedara en proporción y el motor desarrollará el par proporcional. Un control provee muchas salidas de frecuencia diferentes y a cualquier frecuencia de salida dada del motor tendrá una nueva grafica de par.

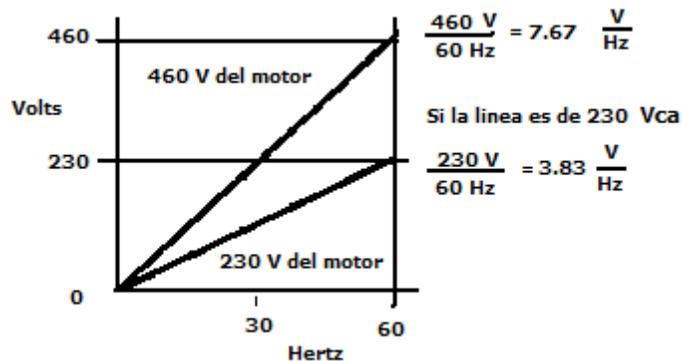


Figura 2.2.26 Relación Volts / Hertz.

Un motor de 4 polos que está conectado directamente a la red de distribución eléctrica de 60 Hz debería tener una velocidad síncrona de 1800 rpm:

$$\frac{120 \times 60}{4} = 1800 \text{ RPM}$$

Si el motor es un motor de inducción, la velocidad de operación a plena carga estará sobre los 1750 RPM. Si el motor está conectado al variador de velocidad que le proporciona 40 Hz, la velocidad síncrona será de 1200 RPM:

$$\frac{120 \times 40}{4} = 1200 \text{ RPM}$$

¿Como hace un control para suministrar la salida de frecuencia y voltaje necesarios para cambiar la velocidad del motor? Eso es lo que veremos enseguida. La figura 2.2.27 muestra un

control básico por Modulación por Ancho de Pulso (PWM por sus siglas en inglés Pulse With Modulation). Todos los controladores PWM contienen las mismas partes con pequeñas diferencias en las componentes básicas de Hardware y Software.

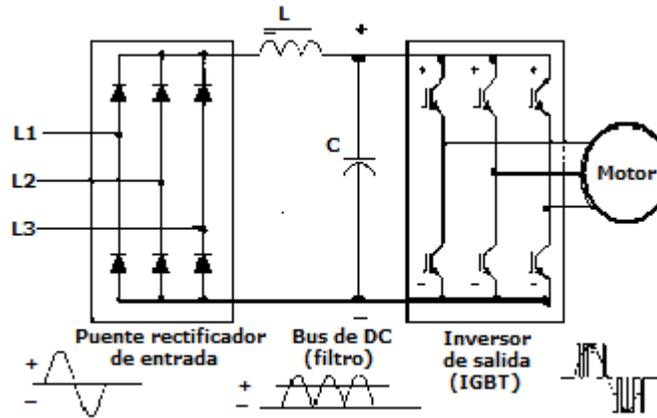


Figura 2.2.27 Componentes básicos de un controlador PWM.

No obstante algunos controladores manejan alimentación monofásica, nos enfocaremos en los controladores trifásicos. Pero para simplificar las ilustraciones de las señales en las siguientes figuras solamente mostraremos una fase de entrada y salida.

La sección de entrada del control es el convertidor, el cual contiene 6 diodos en un arreglo de tipo puente rectificador, estos diodos convierten la alimentación ca en cd. En la siguiente sección llamada Bus de cd maneja un voltaje de cd fijo.

La sección del Bus de cd filtra y uniformiza la señal. Los diodos reconstruyen las mitades de onda negativa en la mitad positiva. En 460 Volts no se puede medir el promedio de voltaje en el Bus de cd de 650 a 680 V. Se puede calcular esto como 1.414 del voltaje de línea. El inductor (L) y el capacitor (C) trabajan conjuntamente para filtrar cualquier componente de ca de la señal de cd.

El Bus de cd alimenta la última sección del controlador: el inversor. Como su nombre lo dice, esta sección invierte el voltaje de cd a ca. Pero la salida la hace a una frecuencia y un voltaje variable. La tecnología de Transistores Bipolares inició a mediados de los años 70 reemplazando a los SCR (por sus siglas en inglés Silicon Controlled Rectifier) en los controladores. A principios de los años 90 dio inicio al uso de la tecnología del transistor de compuerta bipolar aislada (IGBT por sus siglas en inglés Insulated Gate Bipolar Transistor).

Un SCR (originalmente llamado tiristor) contiene un elemento de control llamado compuerta. La compuerta actúa como el interruptor que permite conducir el voltaje totalmente. El controlador conducirá el voltaje hasta que la polaridad del controlador este en reversa y luego automáticamente se apague. Usualmente requiere de una circuitería especial y de otra tarjeta de circuitos con alambrado controlando este interruptor.

La salida de los SCR depende de que tan rápido sea el ciclo de control para encenderlo. La salida del IGBT también depende del tiempo para que la compuerta se encienda. Sin embargo puede apagarla en cualquier tiempo en el ciclo de control, suministrando una señal de salida

más precisa. Los IGBTs también requieren de un circuito de control conectado a la compuerta, pero este circuito es menos complejo y no requiere de polaridad en reversa.

Hoy en día los inversores utilizan el IGBT para prender y apagar al Bus de DC a intervalos específicos. Haciendo que el inversor actualmente cree una salida variable de voltaje y frecuencia de ca. Como en la figura 2.2.28, la salida del controlador no suministra una réplica exacta de la señal de entrada de ca. En vez de eso suministra pulsos de voltaje con magnitud constante.

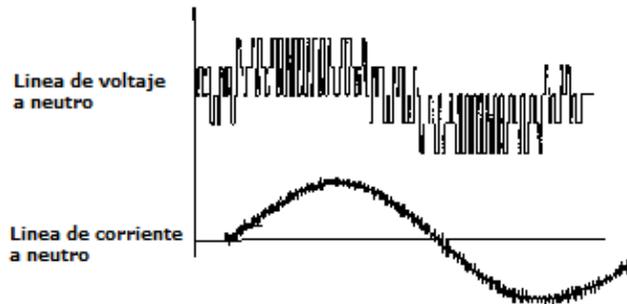


Figura 2.2.28 Señal a la salida del controlador.

La tarjeta de señales de control del controlador, controla los circuitos de potencia para prender la mitad positiva o la mitad negativa de la señal. Esta alternancia de prendido de positivo a negativo reconstruye la salida de las tres fases. El menor tiempo que este prendida la energía, menor es la salida de voltaje (ver figura 2.2.29). Recíprocamente el mayor tiempo que este apagada la energía, menor es la salida de frecuencia.

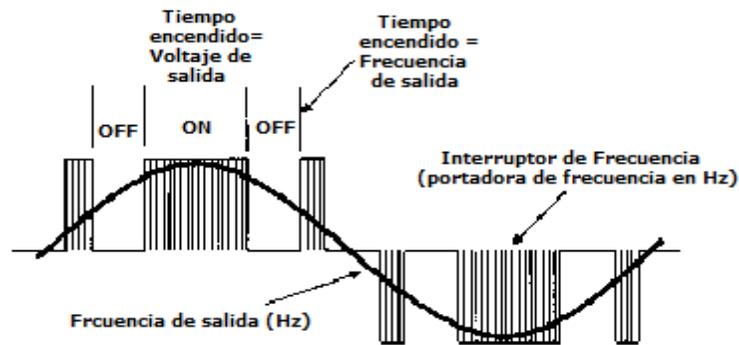


Figura 2.2.29 Componentes de la señal a la salida del controlador.

La velocidad de conmutación de encendido y apagado es la frecuencia de la portadora también conocida como el interruptor de frecuencia. Mientras más grande sea el interruptor de frecuencia más grande es la resolución de cada pulso contenido en el PWM. Los interruptores de frecuencia típicos van de 3,000 a 4,000 veces por segundo (3KHz a 4KHz). (En los antiguos controladores basados en SCR, los interruptores de frecuencia eran de 250 a 500 veces por segundo). Como se podrán imaginar, mientras mayores sean los interruptores de frecuencia, la señal de salida será más tersa y mayor será la resolución. Sin embargo a mayores interruptores de frecuencia, decrece la eficiencia de los controladores debido al incremento de calor con el manejo de la potencia.

Los controladores varían de acuerdo a la complejidad de sus diseños, pero continúan mejorando. La tendencia es similar a las computadoras personales con más características con mejor comportamiento, y menores costos con las futuras generaciones.

Sin embargo, distinto a las computadoras, los controladores tienen grandes mejoras en su rendimiento y fácil uso. También y distinto a las computadoras, el típico controlador de hoy arroja armónicas en el sistema de distribución y esto afecta al factor de potencia. Los controladores están creciendo hacia el "conéctese y úsese". Como componente electrónico de potencia mejora en rendimiento y disminuye en tamaño, el costo y tamaño del VFD continuarán disminuyendo.

Información de ABB inc. Controles y Electrónica de Potencia.

## **Clasificación de los transductores según la variable física a medir.**

### **Temperatura:**

**RTD:** Sensor de tipo resistivo y que varía su resistencia según la temperatura. Actúa como un metal, por lo tanto tiene coeficiente de temperatura positivo. Es un sensor muy lineal, repetibilidad alta y presentan un error del 0,1% a 1%. La sensibilidad es 10 veces mayor a los termopares, y 10 veces menor que los termistores.

**TERMISTORES:** Son semiconductores sensibles a la Temperatura. Se consigue actuando sobre la movilidad de los semiconductores. Hay de 2 tipos: NTC (coeficiente de temperatura negativo por sus siglas en inglés) y PTC (coeficiente de temperatura positivo por sus siglas en inglés). Las NTC son incluso más alinéales que las PTC. Tienen una alta sensibilidad (10+ que las RTD), presenta una resistencia muy alta a la temperatura de trabajo, bajo calentamiento y son económicos. Son no-lineales. Presentan una disparidad de valores entre el mismo componente de la misma familia.

**TERMOPAR:** Son sensores generadores y se basan en el efecto Peltier y del efecto Seebeck. Se distingue por el principio de dos metales homogéneos, A y B, unidos y al someterse a una temperatura, aparecerá una corriente eléctrica.

**PIROELECTRICOS:** Son sensores generadores. Aparecen cargas superficiales en una dirección determinada cuando el material experimenta un cambio de temperatura. Estas cargas son debidas al cambio de su polarización espontánea al variar la temperatura.

**UNIONES P-N:** DIODO, TRANSISTORES, dada sus características estáticas, la movilidad de los semiconductores variará a la temperatura variando la corriente que circule por ella.

**FOTOELÉCTRICOS:** Basada en uniones p-n.

### **Distancia, desplazamiento o posición:**

**POTENCIOMETROS:** Es un sensor de tipo resistivo. Básicamente es un resistor con un contacto móvil deslizante o giratorio. Y según el ángulo girado o la distancia recorrida por la resistencia entre el contacto móvil y una de las terminales este varía.

**GALGAS:** Se basan en la variación de resistencia de un conductor o un semiconductor cuando es sometido a un esfuerzo mecánico. Si se le somete a un esfuerzo en dirección longitudinal, cada una de las tres magnitudes que intervienen en el valor de R experimenta un cambio, por lo tanto, R también cambia la forma.

**MAGNETORRESISTENCIAS:** Si se le aplica un campo eléctrico a un conductor por el que circula una corriente eléctrica, dependiendo de la dirección del campo, además de la tensión de Hall hay una reducción de la corriente al ser desviados algunos electrones de su trayectoria.

**CAPACITOR DIFERENCIAL:** Sensor de tipo capacitivo. Consiste en dos condensadores variables dispuestos físicamente de tal modo que experimenten el mismo cambio pero en sentidos opuestos.

**LVDT:** Sensor inductivo. Es un transformador diferencial de variación lineal. Se basa en la variación de la inductancia mutua entre un primario y cada uno de los secundarios al desplazarse a lo largo de su interior un núcleo de material ferro magnético, arrastrado por un vástago no ferro magnético, unido a la pieza cuyo movimiento se desea medir.

**CORRIENTES DE FOUCAULT:** Sensor inductivo. La impedancia de una bobina por la que circula una corriente alterna queda alterada si se introduce una superficie conductora dentro de su campo magnético. Ello es debido a que se inducen corrientes de Foucault en la superficie que crean su propio campo magnético, opuesto al de la bobina. Cuanto más próximas estén la bobina y la superficie, mayor es el cambio de impedancia.

**EFECTO HALL:** Sensor inductivo. Consiste en la aparición de una diferencia de potencial transversal en un conductor o semiconductor, por el que circula corriente, cuando hay un campo magnético aplicado en dirección perpendicular a ésta.

**CODIFICADOR INCREMENTAL:** Es un sensor digital y hay un elemento lineal o un disco con poca inercia que se desplaza solidario a la pieza cuya posición se desea determinar.

**CODIFICADOR ABSOLUTO:** Sensor digital. Ofrecen a su salida una señal codificada correspondiente a la posición de un elemento móvil, regla o disco, con respecto a una referencia interna.

**REFLEXIÓN:** Por ultrasonidos.

**LEY FARADAY:** Sensor inductivo. En un circuito con N espiras que abarque un flujo magnético, si éste varía con el tiempo se induce en él una tensión o fuerza electromotriz.  
[www.electronicafacil.net](http://www.electronicafacil.net) Búsqueda en Google. Web

### **Análisis y formalización de los automatismos lógicos industriales:**

Los primeros trabajos dedicados al análisis de estos sistemas no aparecen hasta 1938 cuando Shannon desarrolla el primer análisis simbólico de las propiedades de los circuitos de conmutación utilizando como herramienta el álgebra de Boole. Esta fue desarrollada por el

matemático y filósofo George Boole en su trabajo "The Mathematical Analysis of Logic" con el objetivo simular y formalizar las leyes del pensamiento

El álgebra de Boole constituye el método principal para efectuar el análisis y síntesis de circuitos lógicos sin memoria, es decir, que no poseen memoria. En estos circuitos las salidas en un instante determinado dependen exclusivamente del valor de las entradas en ese instante. Por lo cual en un principio solo sirven para realizar automatismos combinatorios. Otra herramienta disponible para la descripción de automatismos combinatorios son los programas de decisiones binarias desarrollados por C.Y. Lee en 1959.

Los automatismos provistos de una cierta capacidad de memoria, los sistemas secuenciales, se empezaron a estudiar a partir de los años 40. El primer método formal orientado a la síntesis de sistemas secuenciales se debe a Huffman. Se trata de un método cartesiano, el cual atrajo el interés de un gran número de investigadores, dedicados al estudio de las cuatro fases de que consta. La idea básica de este método es construir un sistema secuencial a partir de uno combinatorio realimentado. Pero se encuentra con un gran escollo tecnológico que fácilmente se comprenden al observar que los circuitos combinatorios se modelan mediante Álgebra de Boole, y esta no recoge más que situaciones estáticas. El álgebra de Boole no puede modelar la "dinámica" de los sistemas secuenciales.

Todo esto conlleva que se aumente progresivamente el uso de las redes de Petri, herramienta matemática propuesta por Carl Adam Petri en 1962 [Petri 62]. Las redes de Petri suministran un método de análisis y síntesis de automatismos secuenciales y concurrentes. La potencia de la herramienta es enorme y se aplica en el análisis y modelado de sistemas no solo en el campo de la automática, sino también en el de la informática, las comunicaciones...

Las redes de Petri consiguen que los ámbitos Universitario e Industrial pasen a utilizar un lenguaje común para diseñar y analizar automatismos. Al contrario que el método de Huffman, el cual no tuvo aceptación en el campo industrial, debido principalmente a su difícil manipulación. En la actualidad los métodos basados en la experiencia e intuición han sido prácticamente abandonados, la gran mayoría de los programadores de autómatas utilizan como herramienta de análisis y diseño las redes de Petri.

En casi todas las fases de los procesos industriales se utilizan aparatos de control automático, los cuales se utilizan comúnmente en:

- Industrias como la del petróleo, la química, el acero, la energía y la de alimentación para el control de la temperatura, la presión, el caudal y variables similares.
- Manufactura de artículos como repuestos o partes automotrices, heladeras y radios, para el control del ensamble, producción, tratamiento térmico y operaciones varias.
- Sistemas de transporte, como ferrocarriles, aviones, proyectiles y buques.
- Maquinas herramientas, compresores y bombas, maquinas generadoras de energía eléctrica, para el control de posición, velocidad y potencia.

Algunas de las muchas ventajas del control automático, ya muy difundido, son las siguientes:

- Aumento en la cantidad o número de productos.
- Mejora en la calidad de los productos.
- Economía de materiales.
- Economía de energía o potencia.
- Economía de equipos industriales.
- Reducción de inversión de mano de obra en tareas no especializadas.

Estos factores contribuyen al aumento de la productividad. La difusión de la aplicación del control automático en la industria ha creado la necesidad de elevar el nivel de educación de un sector de obreros semi-especializados, capacitándolos para desempeñar tareas de mayor responsabilidad para el manejo y mantenimiento de equipos e instrumentos de control.

## Capítulo 3: Desarrollo del proceso de moldeo por extrusión soplado (EBM).

### 3.1 Introducción

En el presente capítulo se abordará el tema de extrusión soplado, comenzaremos describiendo las características generales del proceso, sus componentes y las diferentes variantes que existen. Para así identificar los parámetros importantes que conforman una máquina para moldeo por extrusión soplado. Con esto asentamos las bases para continuar con el siguiente capítulo.

### 3.2 Generalidades

#### 3.2.1 Definición y aplicaciones

El proceso de extrusión soplado es uno de los procesos más utilizados para la formación de productos huecos, por lo que generalmente se tiende a definirlo como un proceso de moldeo que sirve para la producción de componentes termoplásticos huecos. Debido a que la definición anterior no enmarca las características del proceso con respecto a otros (ejemplo: roto-moldeo), una definición alternativa es necesaria para esclarecer y dar exactitud a éste.

La definición para el proceso de moldeo por extrusión soplado es: aquel proceso de transformación primario discontinuo, de un material que es fundido y forzado a pasar por un orificio, el cual le conferirá una forma intermedia (parison) necesaria para que posteriormente esta sea aprisionada entre placas (molde) y ser inflada con la finalidad de que tome la forma existente en el interior de las placas (molde).

Los procesos de transformación primarios son aquellos en los cuales el material es moldeado a través de un proceso térmico que pasa a un estado fundido pastoso, y es conformado para que finalmente sea solidificado, así mismo los procesos secundarios preceden a los anteriores como en el caso del termoformado o el soplado.

El proceso de extrusión soplado es único para la producción de recipientes de cuello angosto, con y sin cuerda, con asas huecas integradas al cuerpo. Una de las ventajas del proceso es la fácil operación y la diversidad de capacidades volumétricas, que van desde 2 ml hasta 10,000 l. Con respecto al moldeo por inyección el soplado ofrece grandes ventajas económicas y técnicas dentro de las que se encuentran el moldeo de formas irregulares, de difícil desmolde, bajos esfuerzos internos, variación de espesor, reducidos costos de producción y mantenimiento.

Comparativamente con el proceso de inyección soplado, el proceso de extrusión soplado ocupa presiones de trabajo de 0.2 a 1.0 MPa (30 a 150 psi), mientras que el de inyección soplado utiliza presiones de 13.8 a 138 MPa (2,000 a 20,000 psi). Lo anterior repercute en que a menores esfuerzos internos, los artículos soplados obtienen mejores características físicas y mecánicas.

Contrariamente a las facilidades que ofrece el proceso de extrusión, se presenta el inconveniente de sufrir variaciones por ser de producción intermitente. Se requiere de especial atención en el control de las dimensiones de la cuerda y cuello, así como operaciones de post moldeo, monitoreo continuo del peso de las piezas, el volumen, el espesor de pared, las fugas potenciales y calidad del cuello.

El plástico más usado para el proceso de extrusión soplado es el Polietileno de alta densidad (PEAD). Las aplicaciones del proceso por sector de mercado son:

- Sector del envase; producción de recipientes pequeños de diversas formas, como recipientes para agua carbonatada, condimentos, garrafas para líquidos o garrafones de agua potable.
- Sector industrial; dentro de este sector la producción se centra en la fabricación de envases de altos volúmenes que resistan ataques químicos, algunos ejemplos son los recipientes para reactivos y sustancias corrosivas, tarimas y bidones.
- Sector de consumo; dentro del rubro de los juguetes, como muñecos, carros montables y en recipientes para productos de limpieza, en portafolios, hieleras.
- Sector automotriz; la rama automotriz ha sido una de las más beneficiadas con el proceso de extrusión soplado, puesto que mediante este proceso se pueden obtener recipientes para aceites y lubricantes, tanques de gasolina, fuelles y accesorios para automóviles.
- Sector cosmético-farmacéutico; en este sector también se aprovecharon las ventajas del proceso para producir envases asépticos libres de cualquier tipo de contaminación del tipo ampollitas, muestras medicas, medicamentos, pastillas, jarabes, soluciones y suspensiones, recipientes grandes de suero y cremas.

### 3.2.2 Descripción del proceso

Los procesos de moldeo por soplado se basan en pasos comunes, parten siempre de tener un proceso de extrusión, en el cual el material se le da una forma cilíndrica intermedia llamada parison. Está es transferida a un temperatura controlada dentro del molde de inflado y por la acción del cierre del molde es sellado e inflado mediante la introducción de aire proveniente de una espiga, así el parison es deformado hasta tomar la configuración del molde, en este paso, adquiere estabilidad debido a la pérdida de calor, principalmente por conducción en las paredes del molde. Paso seguido del enfriamiento, el molde es abierto, la pieza es expulsada y el ciclo es repetido ver figura 3.2.2.1.

Es necesario tomar en cuenta el tiempo que tarda en formarse el parison, desde que sale del dado de extrusión hasta que se forma con la longitud necesaria, dado que al enfriarse alguna porción del material extruido perderá sus propiedades para ser moldeado. Durante la etapa en la cual el parison es expandido hacia las paredes éste sufre reducciones de espesor debido al aumento del área superficial.

Como en todo sistema existen variables que determinan el resultado del mismo. En el caso del ciclo de extrusión soplado se debe de poner especial atención en el tiempo de enfriamiento, ya que generalmente abarca gran parte del tiempo del ciclo, pudiendo tomar hasta dos terceras partes del tiempo del proceso.

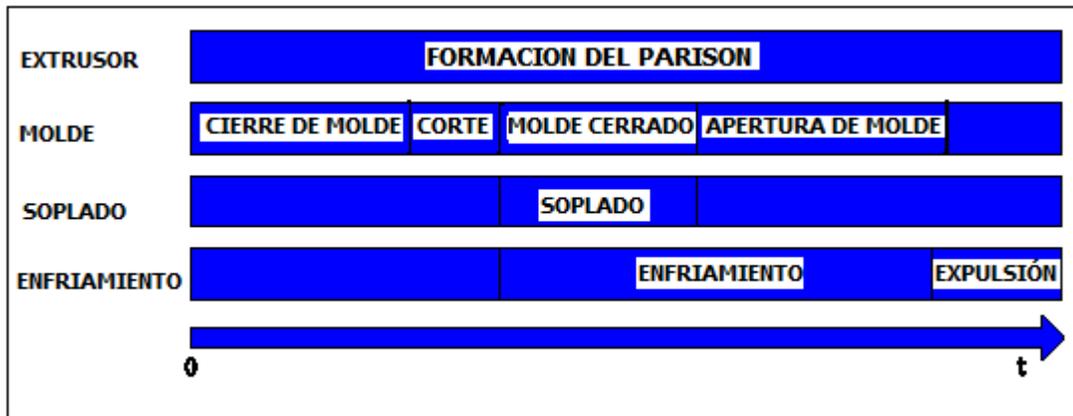


Figura 3.2.2.1 Tiempo de moldeo; diagrama de la distribución de tiempo por etapa.

El rendimiento económicamente óptimo es logrado sólo cuando el extrusor opera de manera continua. La extrusión intermitente no es muy popular no solo por razones económicas, sino porque aumenta el riesgo de zonas de estancamiento donde el material se descompone. Este tipo de proceso se escoge cuando se requieren dos estaciones para los extrusores donde se alimenta un cabezal de acumulación capaz de producir más rápido el parison.

La tecnología de la extrusión-soplado se ha extendido a moldeo por co-extrusión soplado de multicapas, que han crecido de gran manera en nuevos mercados como el de los empaques para productos alimenticios, farmacéuticos y especialmente químicos.

### 3.3 Componentes del proceso

De forma general todo el proceso de extrusión soplado se compone del siguiente equipo.

- Extrusor.
- Cabezal y dado de extrusión.
- Molde y unidad de cierre.
- Válvula de soplado.
- Equipo auxiliar.

Estos trabajan en conjunto de forma cíclica, el diagrama conceptual de cualquier ciclo de extrusión soplado es el siguiente ver figura 3.3.1.

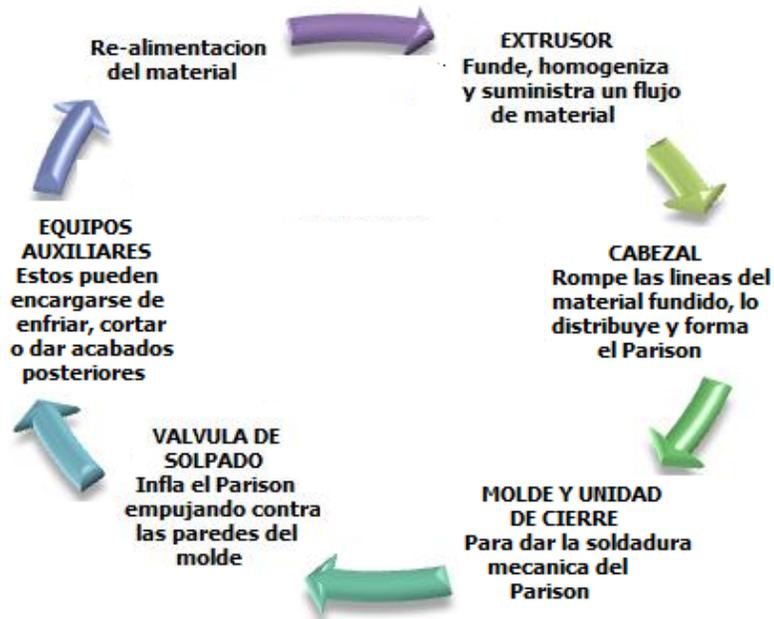


Figura 3.3.1. Ciclo de Extrusión - Soplado

Las características de cada uno de los componentes tienen gran importancia, debido a que cada uno de ellos determina de cierta manera el resultado del producto. A continuación se describen las características de cada uno de ellos.

### 3.3.1 El Extrusor

El extrusor es la herramienta que transporta el material a través de las zonas de calentamiento, en donde el plástico se funde y homogeniza, mezclando el material así como los aditivos, colorantes y el material alimentado. Para evitar la formación de burbujas que se pudieran presentar en el producto final, algunos extrusores cuentan con zonas de descompresión donde se localizan válvulas de venteo que sirven para purgar el aire atrapado durante el proceso ver figuras 3.3.1.1 a) y b), 3.3.1.2 a) y b).



Figura 3.3.1.1.a) cortesía de American Kune

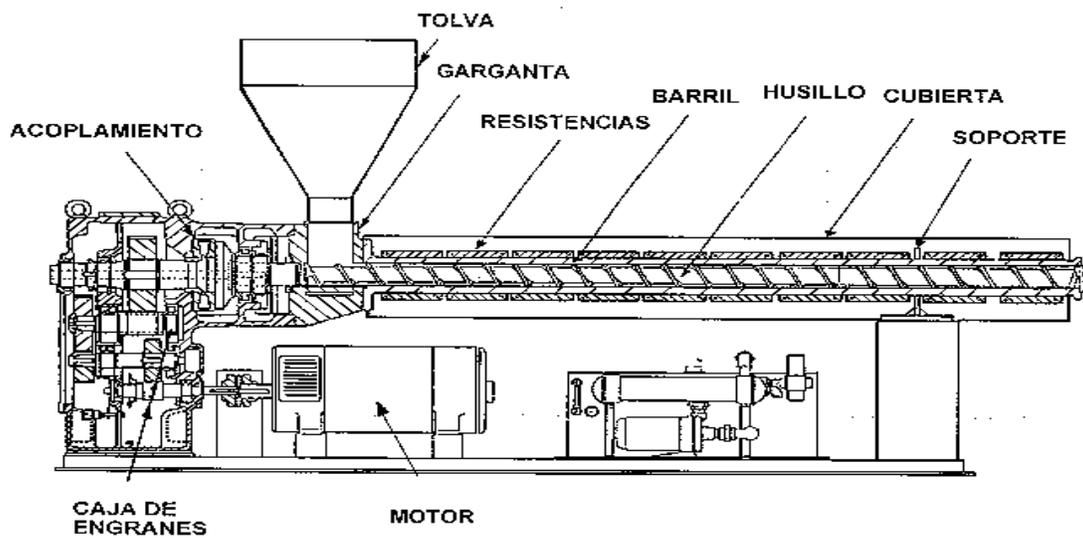
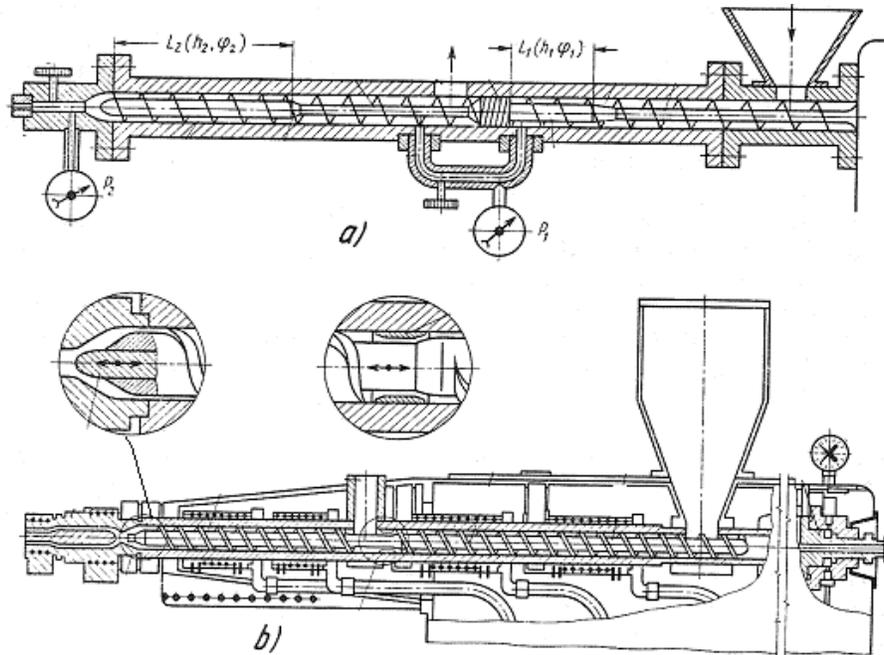


Figura 3.3.1.1. b) Diagrama de Extrusor y sus partes. Obtenido de: Empaques Plásticos de México S.A. de C.V.



Extrusora de un husillo con dispositivo para evacuar los elementos volátiles del material: a, husillo con zona de separación; b, husillo con zona de descompresión corta

Figura 3.3.1.2 Transformación de plásticos vk savgorodny pág. 36

### 3.3.1.1 La Tolva

La forma más común de la tolva de alimentación usada en máquinas de extrusión es la del tipo cónico. El material suministrado al husillo cae por su propio peso, por lo que este tipo de tolva se le conoce como de alimentación por gravedad ver figura 3.3.1.1.1.

La tolva debe estar cubierta con una tapa para mantener el material libre de polvo y humedad y esta provista de una mirilla que permite ver el nivel del material. Cuenta con una compuerta en la base de la tolva la cual regula y detiene el suministro del material; algunas máquinas cuentan con una unidad de precalentamiento o secado que sirve para eliminar la humedad de los materiales antes de ingresar al extrusor.

La tolva debe diseñarse para permitir un buen flujo del material por lo que se prefieren los diseños circulares a los cuadrados, ya que estos tienen una transición gradual en la zona cónica de la tolva. Aún cuando están bien diseñadas, existe el riesgo de que el material forme cavernas produciendo una alimentación discontinua y en algunos casos se detiene totalmente el flujo del material.

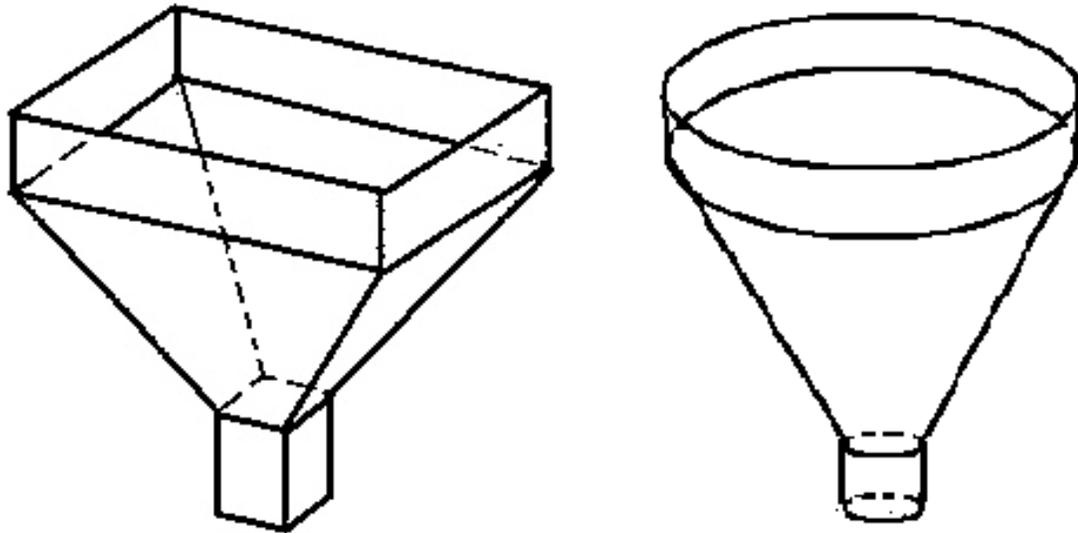


Figura 3.3.1.1.1 Diseño Típico de Tolvas  
Centro Catalán del Plástico; Cap. 2, La Máquina de Extrusión

#### La Tolva Vibratoria.

Se instala para evitar los estancamientos de material. Como resultado de la vibración, el material se mueve a lo largo de la plataforma, cayendo en el extremo de la abertura de alimentación figura 3.3.1.1.2. Variando la amplitud de las vibraciones se puede ajustar la velocidad de alimentación, de tal manera que se mantiene la altura constante del material.



Figura 3.3.1.1.2 Tolva vibratoria  
CCP; Cap. 2, La Máquina de Extrusión

#### Tolva Forzada.

Su mecanismo de alimentación es un tornillo de Arquímedes. Actúa como un transportador y dosificador del material en el cual se varía la frecuencia de oscilación de acuerdo a la velocidad del husillo.

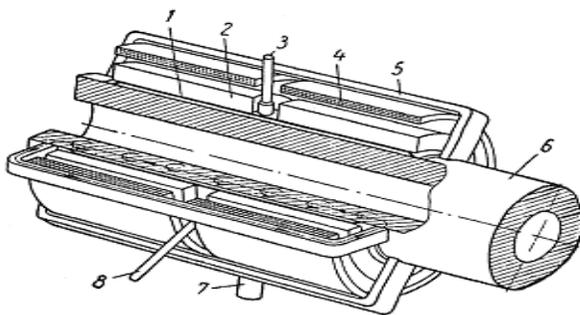
### 3.3.1.2 El Cilindro (cañón)

El cilindro debe de ser lo suficientemente sólido como para soportar presiones de hasta  $70 \text{ MN/m}^2$  (meganewtons/ $\text{m}^2 \approx 700 \text{ kg/cm}^2$ ), resistente a los efectos térmicos para aguantar temperaturas de hasta  $400^\circ\text{C}$  y lo suficientemente resistente al desgaste y a la corrosión.

Existen varios tipos de cilindros que difieren entre sí por la disposición constructiva: pueden ser de una pieza (de forja o de fundición), desmontables, combinados (por ejemplo, bimetálicos); por el medio de calefacción usado, que pueden ser de circulación de agua o vapor, o eléctricos (resistivo o inductivo); por el procedimiento utilizado para acoplar el accionamiento y el cabezal.

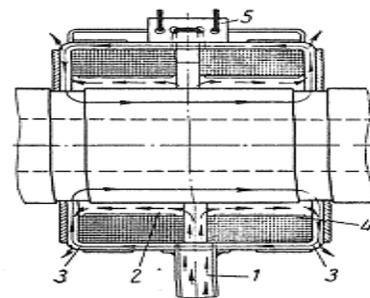
Por lo general la cavidad del cilindro se suele reforzar con una camisa o juego de camisas. Los hay sin camisa protectora, siendo directamente la superficie interior del cilindro la que soporta la carga. En todos los casos la superficie interior del cilindro deberá estar nitrurada. Puesto que las superficies nitruradas tienen la propensión a deformarse y formar grietas, debido a la concentración de las tensiones en la capa lindante, y está expuesta a la corrosión (a causa de la eliminación de las partículas de nitruro de cromo al efectuar el mecanizado definitivo de la superficie tratada), hoy en día se emplean con éxito cilindros bimetálicos fabricados mediante fundición centrífuga. El grosor de la capa con que se reviste el cilindro para elevar su resistencia al desgaste, después del mecanizado de acabado, deberá tener aproximadamente 1.5 mm. Se suelen emplear las aleaciones siguientes: Colmonoy 5 y 6 con el 9 al 17 % de Cr; Stellite 6 y 12 con el 27 al 32 % de Cr; Xaloy 306, 420 y 600, con el 9 al 30 % de Cr. Los cilindros bimetálicos suelen durar tres veces más que los nitrurados.

En el exterior del cilindro van instalados unos dispositivos especiales previstos para calentar y refrigerar las zonas del cilindro, los termopares y la cubierta termoaislante. En la zona de alimentación del husillo se encuentra la tolva de carga que puede ser rectangular, redonda u ovalada. En esta misma zona el cilindro lleva una camisa de refrigeración por la que circula agua fría ver figura 3.3.1.2.1.



Calentador de induccion con refrigeracion por agua

- 1.- Camara de comunicacion de agua
- 2.- Capa termoaislante
- 3.- Entrada del agua
- 4.- Calentadores instalados sobre la capa termoaislante
- 5.- Placas de forma especial que cierran los circuitos del campo electromagnetico
- 6.- Superficie del cilindro
- 7.- Salida del agua
- 8.- Termoposo donde se coloca el termopar



Calentador de induccion con refrigeracion por aire

- 1.- Entrada del aire comprimido
- 2.- Camara de refrigeracion
- 3.- Salidas del aire
- 4.- Lamina protectora del calefactor
- 5.- Bornes de coneccion electrica para la resistencia

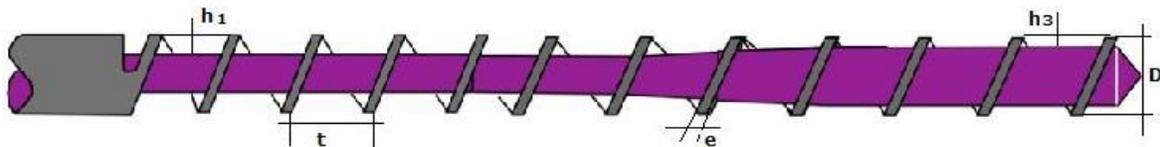
Figura 3.3.1.2.1 Calentadores con sistemas de refrigeración por aire y por agua  
Transformación de plásticos vk savgorodny pág. 29

Los cojinetes radiales y axiales, así como el dispositivo para el desplazamiento axial del husillo se encuentran en la parte posterior del husillo. Al frente del cilindro (que generalmente es una brida) se fija el cabezal. Generalmente el cilindro consta de 2 zonas: de carga y de trabajo. La primera se fabrica de acero fundido y lleva una boca de alimentación rectangular, con las esquinas redondeadas, desplazada con respecto al eje del husillo. La longitud de la boca de alimentación oscila entre 1.2 y 1.5 del diámetro del husillo, siendo el paso del husillo en la zona de alimentación igual al diámetro del husillo.

### 3.3.1.3 El Husillo

El husillo es una pieza fundamental en el proceso de extrusión; es el elemento que ha recibido más atención en cuanto a diseño. Su función es transportar el material plástico desde la tolva hacia la boquilla a velocidad constante, en dicho transporte, el termoplástico se funde y se homogeniza.

Uno de los parámetros más importantes es la relación de compresión y ésta se define como: la relación entre el volumen de la primera vuelta del canal del husillo (al lado de la tolva) y el volumen de la última vuelta (al lado del cabezal). Otra forma es medir la profundidad del canal de la primera vuelta del husillo y la profundidad de la última vuelta. En máquinas comerciales la relación va del 2:1 al 4:1. Otro parámetro es la configuración geométrica del husillo y la aplicación para cada tipo de termoplástico, la siguiente tabla nos muestra las dimensiones típicas figura 3.3.1.3.1.



Diámetro $D$	Paso $t$	Profundidad del canal en la zona de alimentación, $h_1$	Profundidad del canal en la zona de extrusión, $h_3$	Anchura de la cresta del filete, $e$
32	32	6	1,9	3,8
45	45	8	2,1	5
63	63	9,6	2,4	6,3
90	90	11,2	2,8	9
125	125	13,5	3,2	12
160	160	15	3,7	15

Figura 3.3.1.3.1 Parámetros geométricos de los husillos en mm  
Transformación de plásticos de V.K. Savgorodny pagina. 17

Existen diferentes tipos de husillos, cada uno de estos se diseña para usarse con determinados materiales. En la siguiente figura 3.3.1.3.2 se ejemplifican los más comunes.

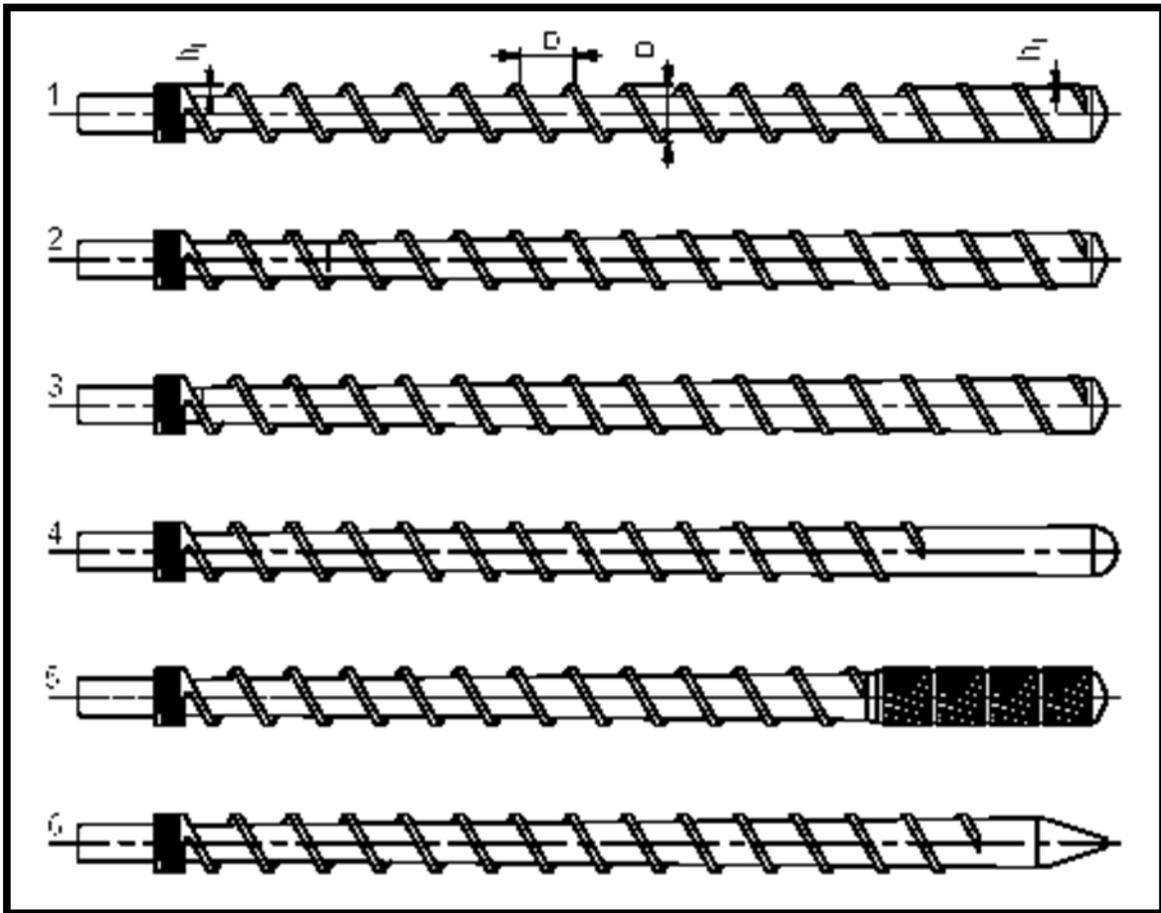


Figura 3.3.1.3.2 Tipos de Husillos  
Extrusión de Plásticos; Anguila delgado, página 55

1. **Husillo tipo Poliamida:** Profundidad de canal constante. Cuatro vueltas en la sección de dosificación
2. **Husillo tipo Polietileno:** Canal de profundidad decreciente: las dos primeras vueltas en la sección de alimentación tienen profundidad constante.
3. **Husillo usos generales:** Canal de profundidad decreciente. Se emplea con boquillas no muy angostas
4. **Husillo con cabeza plastificadora:** Proporciona escaso trabajo mecánico
5. **Husillo tipo estireno:** Cabeza plastificadora
6. **Husillo tipo Saran:** Con punta cónica y profundidad decreciente del canal

El husillo puede considerarse formado por tres secciones; alimentación, compresión y dosificación. Estas zonas están bien definidas en cuanto al comportamiento del polímero se refiere, pero la transición de una a otra no es demasiado brusca ver figura 3.3.1.3.3.

1. Zona de alimentación. En esta zona se inicia el calentamiento y transporte del material aun en estado granulado. La profundidad de canal es constante y la longitud en esta zona es tal que permite una buena alimentación en dirección hacia la salida, esto es en dirección hacia el cabezal del extrusor.

2. Zona de compresión o transición. La segunda zona tiene una profundidad de canal decreciente, en esta zona se llevan a cabo tres procesos:
  - a. Se expulsa el aire atrapado entre los gránulos.
  - b. Se mejora la transferencia de calor desde las paredes del barril, conforme el material se vuelve menos denso.
  - c. Ocurre un cambio de densidad debido a la fusión del material.
 La zona de compresión se diseña para cada tipo de polímero. Si el material se funde de forma abrupta se requiere de una zona de compresión muy corta, comúnmente de la longitud de una vuelta de la espiral del tornillo, ejemplos de estos tipos de polímero son el nylon y otros polímeros semicristalinos como el polipropileno y el acetal. De forma contraria existen polímeros que necesitan una zona de compresión de mayor tamaño, por ejemplo el cloruro de polivinilo, ya que este se funde de forma lenta.
3. Zona de dosificación. La función de esta zona es la de proporcionar al dado un material homogéneo a temperatura y presión constantes, por lo cual mantiene una profundidad de canal constante.

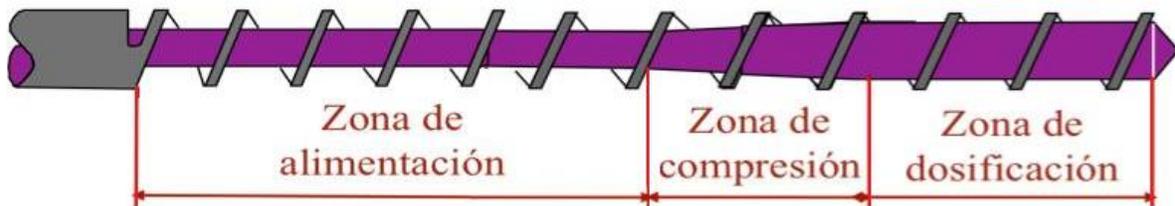


Figura 3.3.1.3.3 Zonas características del husillo  
Extrusión de Plásticos; Anguita delgado, página 54

En la zona de alimentación generalmente se cuenta con una zona de enfriamiento, con la finalidad de prevenir de forma prematura la fusión del material, lo que generaría una zona de atascamiento de los gránulos y ocasionaría tapones formados por material semi-fundido.

El control de la temperatura del cilindro se puede llevar a cabo de dos formas, la primera de ellas es mediante bandas calefactoras para calentarlo, en la segunda pueden utilizarse conductos térmicos por los que se hace circular agua o aceite caliente y en ambos casos se utilizan ventiladores con la finalidad de regular la temperatura y enfriar el cilindro, controlando el proceso con los pirómetros de cada zona.

Dentro del proceso de extrusión es importante definir perfiles de temperatura para el procesamiento adecuado de los termoplásticos, cuidando la transformación de los mismos y garantizando la adecuada fusión del material, dependiendo de las condiciones del proceso de cada tipo de material. Estos perfiles varían dependiendo de varios factores, dentro de los que se encuentra el grado de la resina utilizada, la permanencia del material en el extrusor, el número de zonas de calefacción del extrusor, el ciclo de soplado, etc. En la siguiente figura 3.3.1.3.4 se muestran los perfiles de temperaturas de algunos plásticos.

Zona (°C)	1	2	3	Cabezal	Dado	Molde
ABS	185	195	205	205	200	75
HDPE	185	190	195	200	190	10
LDPE	140	150	160	150	150	20
LLDPE	160	170	180	170	170	20
PC	285	280	275	265	265	70
PP-H	190	200	205	210	220	30
PP-C	180	180	190	190	200	30
PVC-R	165	175	185	180	185	20

Figura 3.3.1.3.4 Perfil de temperaturas  
Enciclopedia del Plástico Industrial; Tomo 4, Página 14

Las máquinas de extrusión soplado utilizan diversos sistemas de plastificación, como extrusores mono husillo de baja velocidad y longitud 20D-25D, cilindros lisos con husillo de compresión, sistemas para la alimentación de polvo con cilindros ranurados enfriados y con baja compresión, extrusores reciprocantes de diseño convencional o modificados para la alimentación de polvos, extrusores mono husillo de alta velocidad, extrusores de doble husillo y extrusores Ram<sup>1</sup>.

El extrusor de tornillo simple consta de un eje circular con uno o dos "hilos" en forma de espiral en toda su longitud. Dicho eje se encuentra insertado en el interior de una camisa cilíndrica o barril dejando un "claro" o "ajuste" entre piezas necesario para que el eje pueda girar. El eje tiene un diámetro de tal manera que el canal en espiral varía en profundidad. Generalmente la profundidad del canal disminuye desde el extremo de alimentación hasta el extremo del dado, dicha modificación da como consecuencia un aumento en la presión a lo largo de la camisa cilíndrica. Así este momento de presión impulsa al material fundido a pasar a través del dado.

De forma generalizada se recomienda una alta relación de compresión para las poliolefinas<sup>2</sup>, husillos de alto esfuerzo cortante y una corta sección de dosificación, necesario para garantizar la homogeneidad del material fundido y producir un parison sin defectos. En cambio para plásticos de ingeniería se suele incrementar la temperatura del fundido, ya que son más sensibles al cortante que las poliolefinas, este aumento de temperatura puede causarse con mayor velocidad de husillo. Con la finalidad de poder controlar la temperatura de mejor manera durante el proceso, es recomendable utilizar un husillo de bajo cortante con relaciones de compresión de 2:1 a 2.5:1 y una relación L/D de 20:1 a 24:1, en la siguiente figura 3.3.1.3.5 se muestran los diferentes husillos para cada tipo de material.

<sup>1</sup> Tipo de extrusión, en el que se empleaba un pistón reciprocante para materiales con muy bajo índice de fluidez, actualmente en desuso. <http://www.plasticodigital.com/?c=117&a=1152>

<sup>2</sup> Las poliolefinas son todos aquellos polímeros obtenidos mediante la polimerización de olefinas. El término de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) para olefinas es "alquenos", por lo cual a las poliolefinas también se les puede denominar polialquenos. Entre las poliolefinas se encuentran Polietileno de Baja Densidad (LDPE), Polietileno de Alta Densidad (HDPE), Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE), Polipropileno (PP) y Caucho Etileno-Propileno (EPR).

HUSILLOS PARA TERMOPLASTICOS			
MATERIAL	RELACION L/D	RELACION DE COMPRESION	ANGULO DE INCLINACION
ABS	24:1	2.7 A 3	17.7°
PC	25:1	2.2:1	/
LDPE	20:1 A 24:1	3:1 A 4:1	17.7°
LLDPE	20:1 Y 24:1	3:1 A 4:1	/
HDPE	20:1	3:1	/
PP	24:1	3:1	17.7°

Figura 3.3.1.3.5 Enciclopedia del plástico industrial; Tomo 4, Página 13

Un extrusor para Polietileno tiene las siguientes características:

1. El husillo tiene una relación de largo entre diámetro (L/D) con valores de 20:1 a 24:1.
2. Relación de compresión de 2.5:1 a 4:1.
3. Paso constante entre álabes, equivalente al diámetro del husillo; este tipo de denomina "paso cuadrado".
4. Dispositivo mezclador al final del husillo, con la finalidad de promover e intensificar la homogeneidad del material fluido.

### 3.3.1.4 El Plato rompedor y el paquete de mallas

Aunque la zona final de un extrusor es el cabezal, entre el husillo y éste último, se encuentra el porta mallas el cual consiste comúnmente en un rompedor de flujo y un conjunto de mallas de alambre situadas del lado del tornillo ver figura 3.3.1.3.6.

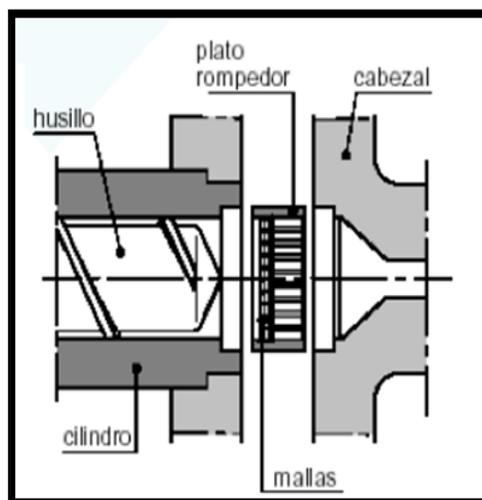


Figura 3.3.1.3.6 Ubicación Plato Rompedor y Paquete de Mallas  
Centro Catalán del Plástico; Cap. 2, La Máquina de Extrusión

El ensamble de la placa rompedora y el juego de mallas tienen tres funciones:

- 1) Evitar el paso de material extraño reduciendo los defectos en el producto al tener que remover partículas no deseadas, como pueden ser polímero no fundido, así como partículas de metal.
- 2) Crear un frente de presión cuando se opone una resistencia al bombeo de la zona anterior. Éste frente de presión supe la fuerza impulsora para vencer la resistencia del dado.
- 3) Eliminar la memoria de giro del material fundido. Los polímeros son materiales constituidos por moléculas de cadenas largas, que se encuentran enrollados o enmarañados aun cuando están fundidos. Cuando un material visco elástico se somete a un tratamiento mecánico prologado como lo es el paso por un tornillo, se produce una alineamiento de las cadenas lo cual produce al enfriarse una tendencia a recuperar elásticamente este alineamiento como una configuración energética optima. Las piezas que son realizas en máquinas de extrusión sin rompedor de flujo han presentado defectos por torceduras en distintas direcciones.

Existen difentes tipos de placas rompedoras, su uso depende de la viscosidad del material ver figura 3.3.1.3.7.



Figura 3.3.1.3.7 Placas Rompedoras  
Centro Catalán del Plástico; Cap. 2, La Máquina de Extrusión

La velocidad de producción depende en gran medida de la presión del fundido y, por supuesto del grado de contaminación que obtura el paso de malla por retención de impurezas. Esta disminución de producción es más fácil de detectar no tanto por la disminución de la producción en sí misma sino por el aumento del consumo energético.

### 3.3.2 El Cabezal

El cabezal de la extrusora es la pieza situada entre el husillo y la boquilla. El cabezal se puede quitar y poner de la máquina con gran facilidad, lo que permite la sustitución o reparación del plato rompedor y el paquete de mallas. Debido a esto, el cabezal se une directamente al cilindro o cañón por medio de tornillos y tuercas atornilladas directamente en la brida.

El perfil interno del cabezal debe de facilitar lo más posible el flujo del material hacia la boquilla. Se deben

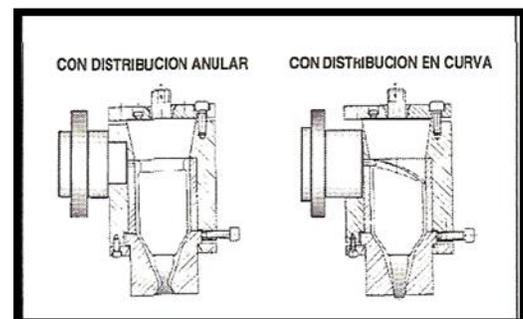


Figura 3.3.2.1.1 Cabezal Flujo Radial  
Enciclopedia del Plástico; Tomo 4, página 20

de evitar ángulos excesivamente convergentes.

### 3.3.2.1 Los Tipos de cabezales

#### El Cabezal de Flujo Radial.

El funcionamiento de este cabezal inicia cuando el plástico fundido entra lateralmente y se divide rodeando a un mandril; posteriormente se une para entrar a un área de alta contrapresión la cual asegura la soldadura del material fundido. Debido a su forma de alimentación y distribución este diseño fue impuesto para la transformación de Polietileno. Este cabezal tiene una gran problemática en el cambio de color, ya que durante éste quedan residuos del color anterior. Existen dos variantes de este tipo de cabezal; de distribución anular y distribución curva ver figuras 3.3.2.1.1, 3.3.2.1.2, 3.3.2.1.3 y 3.3.2.1.4.

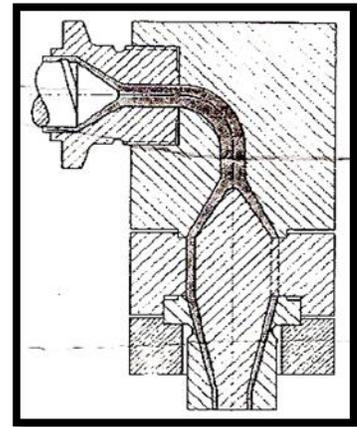


Figura 3.3.2.1.2 Cabezal Flujo Radial  
Procesamiento de los Plásticos, página 73.

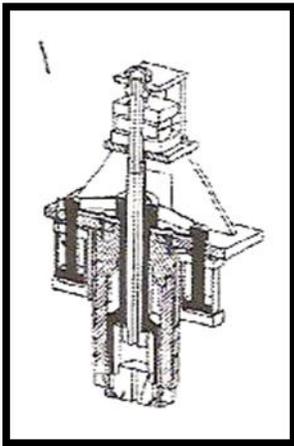


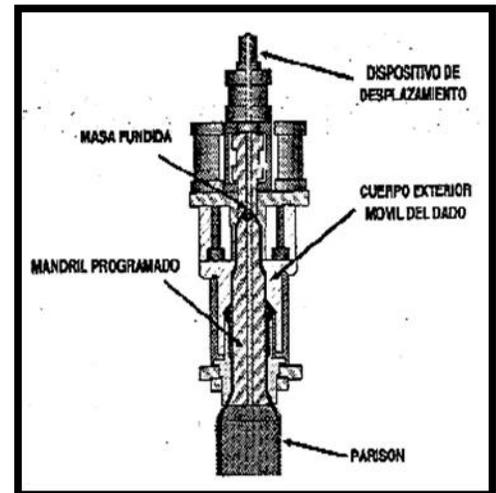
Figura 3.3.2.1.4. Cabezal Flujo Radial  
Procesamiento de los Plásticos, página 73.

#### El Cabezal de Flujo Axial.

Está constituido por un torpedillo central, generalmente acoplado con un dispositivo llamado araña, el cual dirige el flujo y crea la presión para lograr que el material se homogenice. Este cabezal recibe su nombre ya que la masa fundida proveniente de la extrusora pasa por un codo el cual cambia su dirección enfrentándolo al vértice del cono del torpedillo de manera axial. Este tipo de cabezal es recomendado para PVC; en ocasiones, se utiliza también para PE porque ofrece la capacidad de cambios rápidos de color; sin embargo es necesaria la compensación de la araña para asegurar un parison libre de soldaduras y perfectamente liso.

#### El Cabezal Acumulador.

Este tipo de cabezal es considerado en la categoría de extrusión soplado intermitente, donde el plástico fundido es almacenado en un dispositivo, para posteriormente formar el parison con alta velocidad y de esta manera evitar su estiramiento natural. Generalmente se utiliza para la fabricación de cuerpos huecos de más de 5 litros y principalmente cuando se requiere una distribución del espesor de pared.



Cabezal acumulador  
Figura 3.3.2.1.3. Enciclopedia del Plástico; Tomo 4 página 21.

## El Cabezal con Programación.

La variación del espesor en el caso de formas irregulares y complicadas obedece a que durante el soplado, algunas zonas de la pared del parison experimentan mayor elongación que otras, produciendo paredes más delgadas y débiles, o muy gruesas, donde se desperdicia material. Esta diferencia de espesores en el parison puede lograrse por medio de un dado que incremente o reduzca la apertura por donde se extruye la resina. Esto es logrado con el movimiento ascendente y descendente del mandril del dado de extrusión.

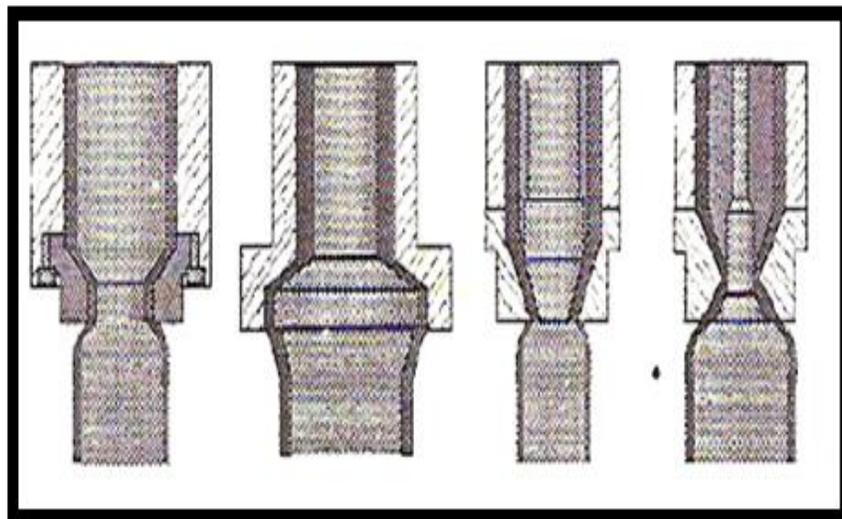
En el caso de contenedores de altas especificaciones, es necesario el uso del cabezal con programación pero con sistemas computarizados los cuales manejan de 5 a 50 puntos de control, lo que permite adecuarse al diseño de la pieza.

Los sistemas actuales recurren a mecanismos más sofisticados de control de espesor, SFDR (por sus siglas en inglés Static Flexible Deformable Ring), anillo estático deformable y el PWDS (por sus siglas en inglés Programable Wall Thickness Distribution System), sistema de programación de pared.

Una de las partes que tienen en común todos los cabezales es la boquilla. Se sitúa al final y dentro del cabezal, tiene como función dar la forma deseada al plástico fundido para formar el parison. Su diseño se adapta progresivamente al perfil final evitando en todo momento zonas en las que el material pueda quedar retenido y pueda llegar a degradarse térmicamente. Se ha de favorecer un aumento uniforme en la velocidad del fundido, así como evitar los cambios bruscos de dirección.

Las boquillas se clasifican en función de la forma del producto. Los tipos de Boquillas son ver figura 3.3.2.1.5.

a)            b)            c)            d)



a) Cilíndrica b) Ensanchadora c) Forma de Plato d) Forma de Tulipan

Figura 3.3.2.1.5 Diseño de Boquillas  
Enciclopedia del Plástico Industrial; Tomo 4, Página 24

La boquilla cilíndrica se conoce como clásica para parison y es la más utilizada en la maquinaria de extrusión soplado, se caracteriza porque la boquilla y el mandril se encuentran en el mismo cuerpo. Sin embargo, actualmente en los nuevos sistemas de extrusión soplado se recurre a boquillas en forma de plato y tulipán ya que estas permiten variar el espesor del parison y así desarrollar productos más complejos.

### 3.3.3 Los Métodos de soplado

El soplado del parison es un punto de suma importancia para obtener un producto de calidad ya que del adecuado suministro y presión de aire dependerá el formado del producto y copiado fiel de las formas, bordes, letras y diseños superficiales del molde. En la siguiente tabla se describen los rangos de las presiones de operación del soplado con respecto a algunos materiales ver figura 3.3.3.1.

Plástico	Presión [Psi]
LDPE	20-60
HDPE	60-100
PVC	75-100
PC	70-150
PP	75-100
ABS	50-150
POM	100-150

Figura 3.3.3.1 Presión de Soplado para Termoplásticos  
Enciclopedia del Plástico Industrial; Tomo 4, Página 27

De manera general el aire utilizado para el soplado cumple tres funciones, la primera es expandir el parison contra las paredes del molde; ejercer presión en el parison expandido para copiar la forma del molde y la última ayuda al enfriamiento del producto.

Existen diferentes configuraciones o formas diseñadas por los principales fabricantes de maquinaria de Extrusión-soplado para llevar a cabo el soplado.

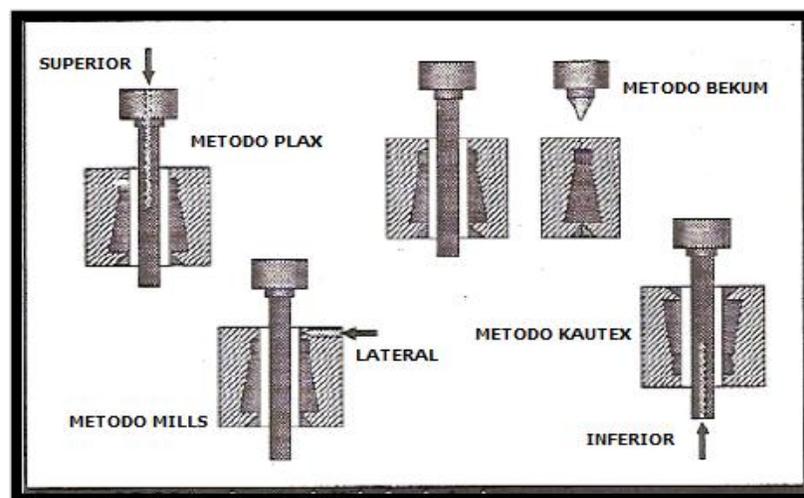


Figura 3.3.3.2 Válvulas de Soplado  
Enciclopedia del Plástico Industrial; Tomo 4, Página 29

En la figura anterior 3.3.3.2, se observa los diseños de diferentes válvulas de soplado, en particular, el diseño lateral suele causar algunos problemas ya que los pequeños orificios crean un efecto venturi, que consiste en la generación de pequeños vacíos en el tubo provocando su colapso miento, otro problema registrado con la velocidad del aire, cuando es muy alta provoca que el parison sea arrastrado a la parte inferior del molde. En función de la presión de soplado existe también el riesgo de que si la presión es muy alta, puede reventarse o explotar el parison o si es demasiado baja se obtendrán piezas carentes de detalles superficiales bien definidos.

Se debe considerar que el diámetro del orificio de soplado no sea tan pequeño, ya que de ser así el tiempo de soplado será muy grande y la presión del aire insuficiente. En la siguiente tabla figura 3.3.3.3 se presenta una guía de selección de diámetro de orificio de soplado según la capacidad del recipiente.

Diámetro Orificio [mm]	Capacidad [l]
1.6	Hasta 1
6.4	1-4
12.7	4-20

Figura 3.3.3.3 Diámetro de Orificio para Soplado  
Enciclopedia del Plástico Industrial; Tomo 4, Página 28

### 3.3.4 Los Moldes

El molde es la herramienta en donde sucede el aprisionamiento del parison, el soplado, el formado de la pieza y el enfriamiento ver figura 3.3.4.1.

Para el diseño de un molde se requiere seleccionar el material más adecuado, tomar en cuenta las características del acabado, la posición de la línea de partición, las contracciones del material y por último la durabilidad. Los moldes se clasifican en moldes para corridas largas de producción, de operación continua, para corridas cortas y para prototipos.

Los materiales para la construcción de moldes de soplado pueden ser diversos, los de hierro y acero se utilizan para moldes de alta producción y grandes esfuerzos mecánicos, así como, elementos de sujeción, guía, ajuste y corte, los metales no ferrosos como el aluminio y aleaciones tienen baja densidad, alta conductividad térmica, resistencia química y resistencia a la intemperie, pero son de baja resistencia mecánica a severos esfuerzos de compresión, estos tipos de materiales se utilizan generalmente para corridas de producción corta.

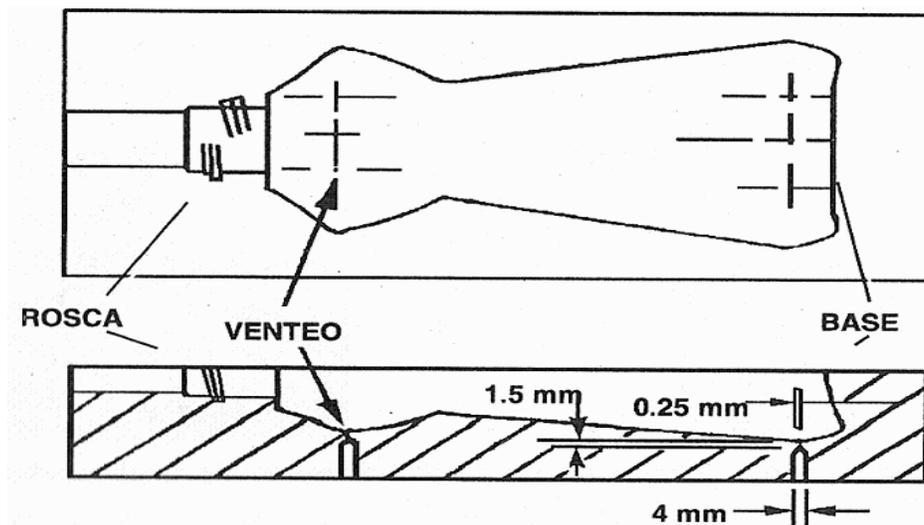


Figura 3.3.4.1 Molde de botella

### 3.3.5 Unidad de cierre

El sistema de sujeción de molde y la unidad de cierre deben de ser capaces para que el molde abra y cierre perfectamente, soportar el peso del molde y mantenerlo alineado durante el proceso así como soportar la presión de soplado figura 3.3.5.1.

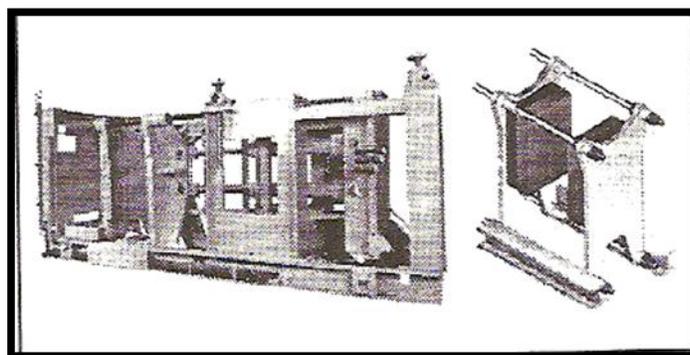


Figura 3.3.5.1. Unidad de Cierre con Barras Guía  
Enciclopedia del Plástico Industrial; Tomo 4, Página 49

La mayoría de las máquinas de soplado utilizan prensas de cierre horizontales que

son accionadas por sistemas hidráulicos, mecánicos o combinados; sin embargo, también existen de cierre vertical. Los medios de cierre generalmente son hidráulicos.

El área de las platinas debe de ser mayor al área del molde con el fin de ejercer una presión uniforme a lo largo de ella, dirigir correctamente los moldes y poder utilizar una variedad de moldes de diversos tamaños. En el proceso de extrusión soplado existen cuatro tipos comerciales de unidades de cierre, las cuales fueron diseñadas por los principales fabricantes de maquinaria:

#### BATENFELD

Utiliza unidades de cierre con cuatro barras guía ampliamente espaciadas y las platinas son accionadas

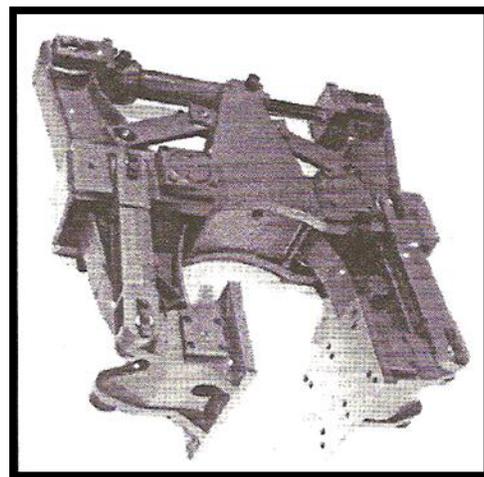


Figura 3.3.5.2. Unidad de Cierre en "U"  
Enciclopedia del Plástico Industrial; Tomo 4, Página 49

por un sistema de rodilleras, lo cual garantiza un movimiento de cerrado sincronizado figura 3.3.5.1.

#### BEKUM

Diseño de un sistema de platinas sin barras guía, movidas por un bastidor de cuatro transportadores accionado hidráulicamente y controlado por sistemas de piñones y cremalleras para asegurar el cerrado sincronizado figura 3.3.5.1.

#### KAUTEX

Proporciona unidades de cierre en forma de "U" que incluye un bastidor cerrado inclinado para absorber la fuerza de prensado; este bastidor cuenta con una unidad de cierre sin barras guía y con bloques de cadena para sincronizar la operación figura 3.3.5.2.

#### VOITH FISCHER.

Su diseño incluye la forma en "U" sin barras guía con sistema de guía y prensado independiente, de movimiento en ambas platinas y operación sincronizada mediante engranes y cremalleras figura 3.3.5.3.

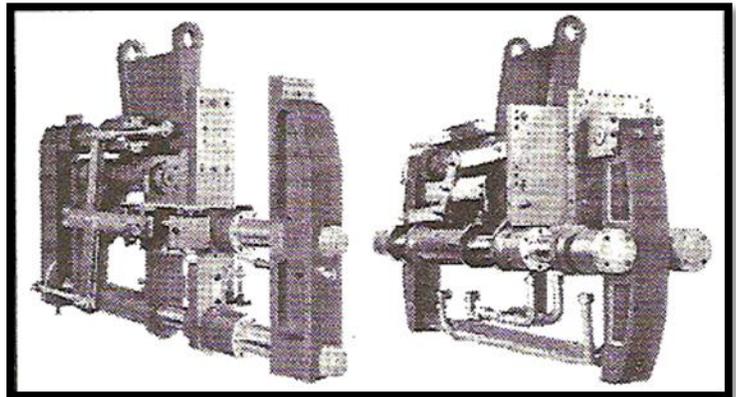


Figura 3.3,5.3 Unidad de Cierre en "U" sin barras guía  
Enciclopedia del Plástico Industrial; Tomo 4, Página 49

### 3.3.6 Corte de parison

Una vez que el parison ha sido formado y aprisionado por el molde, existe un mecanismo que corta el parison y permite el paso de la boquilla de soplado. Comercialmente existen cuatro formas de corte de parison:

- Pulling off o jalado.
- Pinching off o prendido.
- Corte por cuchillas.
- Cuchillas o alambres calientes.

#### Jalado (Pulling off)

Este método se utiliza principalmente cuando el arreglo del molde es rotativo vertical. Consiste en cortar el parison desde el molde y sepáralo para la extrusión continua o deslizamiento del molde. Cuenta con las desventajas de que con plásticos de baja viscosidad puede formarse una película cuando se jala o estira el parison.

El jalado puede formar fabricación o malformación del cuello que podría causar problemas con la inserción del mandril de calibración figura 3.3.6.1.

**Aprisionador (Pinch-off)**

Este sistema de corte de parison se utiliza cuando los moldes de soplado se localizan fuera del área de extrusión. Consta de un brazo en uno de sus extremos provisto de un mecanismo tipo mandíbula el cual aprisiona al parison y lo transporta al área de soplado figura 3.3.6.2.

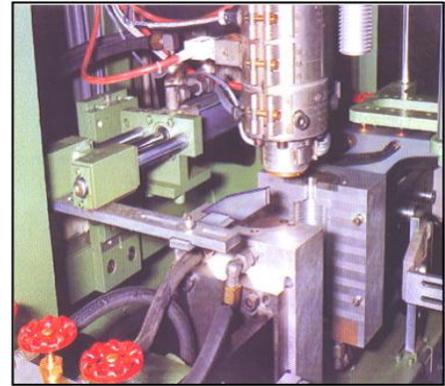


Figura 3.3.6.1 Sistema de corte Jalado C C P; Cap. 2, La Máquina de Extrusión

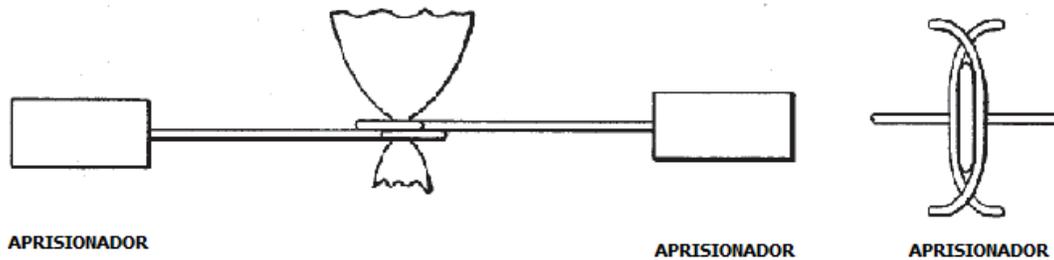


Figura 3.3.6.2 Sistema de Corte por Aprisionamiento United States Patent 4919880

**Corte por Cuchillas**

En este método, el parison puede ser cortado por medio de una cuchilla o navaja al salir del dado. Generalmente operan a una velocidad de 1 m/s con el fin de no afectar el borde del parison al cortarlo; para evitar esto se utiliza un flujo de aire interno que contrarresta la distorsión transversal, proporcionando un parison abierto, sin distorsión y homogéneo.

**Cuchillas o Alambres calientes**

Estas cuchillas son hechas con filo continuo, tienen sección transversal en forma de espada y son resistentes al calor. Las cuchillas o hilos son calentados al rojo vivo por medio de suministros de energía bajos (6-24 V).

Es común en estas cuchillas el afilado y el reemplazo inmediato. Al trabajar con PVC si no se tiene controlada la temperatura de la resistencia es posible la degradación térmica en la zona de corte y en el caso del Acetal se recomienda una temperatura baja para evitar la ignición del parison figura 3.3.6.3.



Figura 3.3.6.3 Sistema de corte por cuchillas calientes C C P; Cap. 2, La Máquina de Extrusión

### 3.3.7 El Equipo auxiliar

Dentro de una máquina de extrusión soplado existe una serie de equipos que ayudan a que se lleve a cabo el proceso, a continuación se describen cada uno de ellos.

#### El Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico de una máquina de extrusión, tiene la función de transmitir energía del motor eléctrico a través de una bomba y un medio no compresible como lo es el aceite hidráulico. Para la transmisión de la energía se requieren de varios componentes como bombas, válvulas, pistones, accesorios hidráulicos, tubería y tanques o depósitos.

#### El Sistema Eléctrico

Para operar satisfactoriamente una máquina de extrusión soplado y seguir una secuencia de pasos tales como: el cierre y apertura del molde, tiempo del proceso de extrusión, tiempo de enfriamiento, tiempo de soplado y en general controlar toda la secuencia del ciclo de operación del proceso se requiere de un tablero de control o sistema eléctrico.

El sistema eléctrico se le considera el sistema nervioso y la memoria del ciclo de la máquina. Su propósito es detectar una señal, programar la siguiente secuencia del ciclo y proporcionar el orden necesario para que se ejecuten todas las funciones.

La detección de los componentes (sensores) de la máquina se realiza por medio de interruptores límite, los cambios de temperatura por medio de termopares, los tiempos de ciclo por medio de temporizadores. Una vez detectado un cambio, este se procesa y el sistema de control transmite la señal que puede verse reflejada en el movimiento del sistema hidráulico y/o mecánico.

#### La Transmisión

El motor del extrusor proporciona la fuerza motriz y cuenta con una polea variable que va acoplada a la polea de entrada del reductor y a la salida de éste se acopla mediante una cadena silenciosa al husillo controlando el par y la velocidad requerida. Actualmente las velocidades varían de entre 10 y 120 rpm (para nuestro equipo varia de entre 20 y 60 rpm). Con esto se controla la entrega que el extrusor requiere para cada tipo de molde es decir de acuerdo a la velocidad del husillo la plastificación aumenta o disminuye.

#### El Enfriamiento

El equipo utilizado para enfriar o mantener la máquina de extrusión es sumamente importante para conseguir una operación satisfactoria y obtener un producto de calidad. Una de las principales funciones es proporcionarle al molde la temperatura adecuada y evitar grandes

choques térmicos que provoquen que el material pierda sus propiedades, y no obtener la forma deseada.

Otra de sus funciones es extraer el calor del aceite del sistema hidráulico mediante un intercambiador de calor para así mantener la viscosidad y la presión necesaria en el sistema.

### El Sistema Neumático

Éste sistema es el que proporciona a través de una boquilla con el orificio adecuado y la presión necesaria para aprisionar al parison dentro del molde y obtener la forma deseada, generalmente el aire es suministrado y controlado por un compresor, un conjunto de válvulas, manómetros, filtro, regulador y lubricador.

### 3.4 Los Tipos de maquinaria

Como se ya se ha mencionado, existen diversos tipos de máquinas de extrusión soplado, las cuales se diseñan de acuerdo a la capacidad de producción, al tipo de molde y al tamaño de la pieza. La maquinaria más importante en la industria es:

- Máquinas tipo "Shuttle" (meza de traslado)
- Máquinas de moldes corredizos
- Máquinas rotativas
- Máquinas co-extrusión

#### Máquina tipo "Shuttle" (meza de traslado)

Este tipo de configuración permite una extrusión continua, la característica principal es: el cabezal de extrusión está centrado y los moldes localizados lateralmente, por lo que estos se mueven alternativamente hacia el cabezal para tomar el parison y regresar a su posición inicial para soplar el artículo y expulsarlo. Consta de una sola prensa la cual se sincroniza para los dos moldes figura 3.4.1.

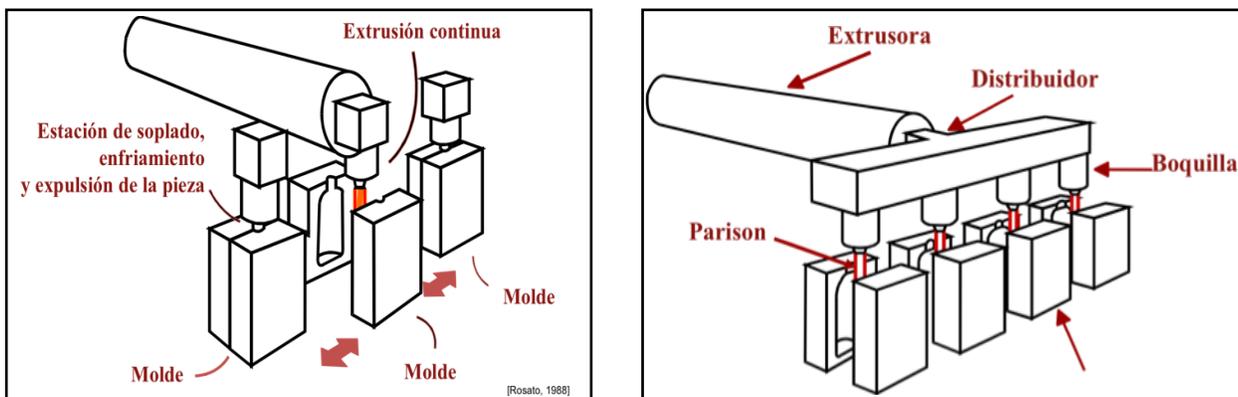


Figura 3.4.1 Extrusoras continuas

## La Máquina de Moldes Corredizos.

También conocidas como máquinas "long stroke", su configuración es muy similar a las máquinas tipo shuttle con la diferencia principal en el tamaño del molde, que pueden tener hasta 20 cavidades y para su desplazamiento se utilizan rieles deslizantes. Este diseño es adecuado para altas producciones.

## Las Maquinas Rotativas

Existen dos tipos de configuraciones verticales y horizontales, ambas constan de un carrusel con moldes montados que al girar pasan de una estación a otra realizando el ciclo de extrusión. Para poder aumentar la producción es necesario incrementar el número de moldes y regular la velocidad de rotación. Una diferencia entre las dos variantes, es que en el arreglo vertical no se corta el parison y el tubo formado es continuo hasta la etapa de expulsión logrando que los envases producidos presenten mayor calidad figura 3.4.2.

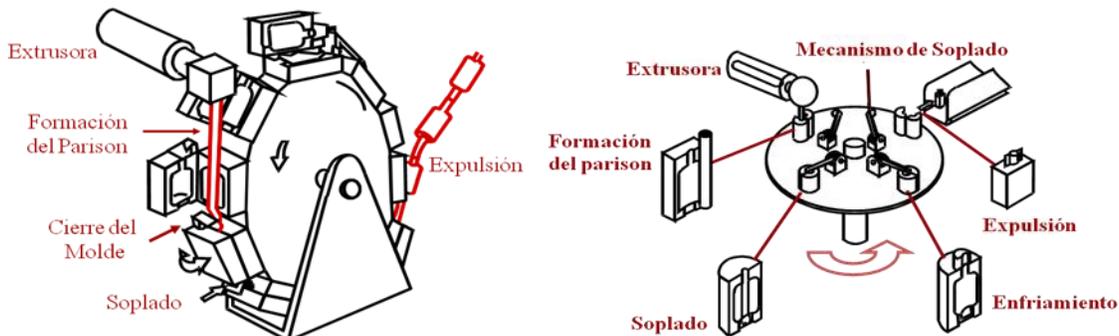


Figura 3.4.2 Extrusoras rotativas

## Las Máquinas de Co-extrusión

En este tipo de maquinaria permite la combinación de materiales formando dos o más capas, con la ayuda de un solo dado. El principio de co-extrusión de tres capas consiste en aplicar una capa fina de barrera sobre un material de soporte (PE generalmente) unidos entre sí por un adhesivo figura 3.4.3.

La principal razón para utilizar una co-extrusión es mejorar la permeabilidad, pero también se utiliza para el ahorro de material el cual es remplazado por material reciclado, que se coloca entre capas de material virgen. Este tipo de maquinaria produce envases que generalmente contienen productos químicos alimenticios y farmacéuticos.

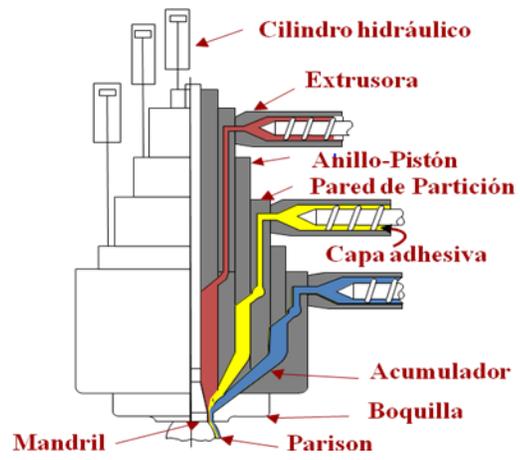


Figura 3.4.3 Extrusoras de coextrusión

E. G. Fisher Extrusión de Plásticos C.E.C.S.A, primera edición Abril 1970  
 •Rosato & Rosato. Blow Molding Handbook. Hanser. Múnich, 1988

## Capítulo 4: Reconstrucción y reconversión de la máquina de extrusión soplo del laboratorio.

### 4.1 Introducción

En el presente capítulo se abordará el tema de la propuesta del cambio de control. Comenzaremos describiendo las condiciones en que se recibió el equipo, posteriormente describiremos la conformación de la maquina con todos sus elementos que la integran y en especial nos enfocaremos a las características generales del control, sus componentes y las diferentes variantes que existen en él, para así identificar los parámetros importantes que conforman el control actual y proponer los cambios basados en esta premisa.

### 4.2 Estado inicial de la máquina.

La extrusora sopladora del laboratorio se recibió en condiciones de deterioro considerables, el equipo se encontró totalmente oxidado, con el tablero sucio y separado de la máquina (es decir los cables cortados y separados del tablero), dentro del tablero cables sueltos y cortados, la unidad hidráulica llena de lodo totalmente sucia y no se diga el aceite lubricante, por lo que se deduce que el equipo se encontraba almacenado a la intemperie y llega sin ninguna información del equipo, sin ningún manual, sin diagramas eléctrico, hidráulico y neumático las siguientes fotografías nos dan testimonio del estado en que se recibió el equipo.

#### 4.2.1 Historial fotográfico inicial.

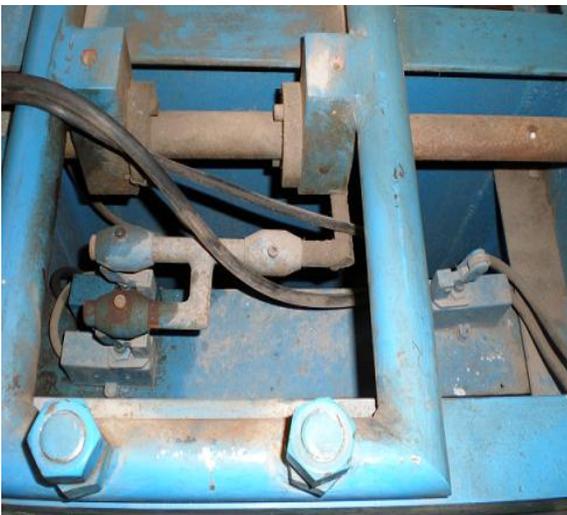


Figura 4.2.1.1 Interruptores de la prensa



Figura 4.2.1.2 Interior tablero de control



Figura 4.2.1.3 Unidad hidráulica



Figura 4.2.1.4 Electroválvulas de unidad hidráulica



Figura 4.2.1.5 Vista frontal extrusor



Figura 4.2.1.6 Vista lateral de extrusor



Figura 4.2.1.7 Sistema de cierre de la prensa



Figura 4.2.1.8 sistema mecánico de cierre



Figura 4.2.1.9 Vista frontal del tablero de control



Figura 4.2.1.10 Vista del sistema de soplado

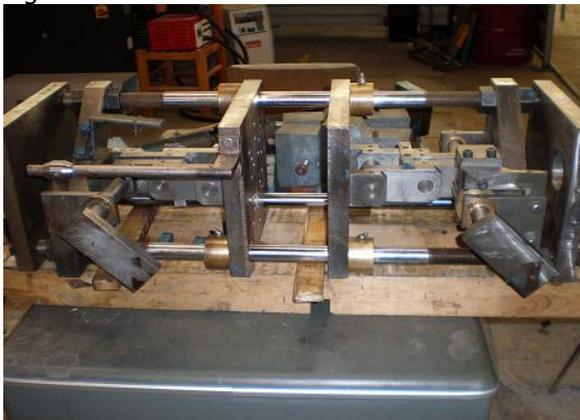


Figura 4.2.1.11 Vista sistema de cierre de la prensa



Figura 4.2.1.12 Rodillera del sistema de cierre

## 4.2.2 Revisión de los componentes de la máquina.

Lo primero que se decidió hacer, fue desarmar el sistema mecánico, revisar la prensa para revisar sus componentes mecánicos como son bujes, empaques, rodamientos, sistemas de lubricación, etc., el sistema hidráulico, revisando la bomba, las electroválvulas, las válvulas de alivio, el manómetro y la válvula reguladora de presión, el sistema neumático revisando las válvulas, el manómetro, las conexiones, y el sistema de control eléctrico revisando los contactores, los relés, los selectores, los botones y las luces indicadoras.

### 4.2.2.1 Sistema mecánico.

Se desarmo la prensa para limpiarla y quitarle el oxido y el sarro impregnado en las partes metálicas verificando los sistemas de lubricación de grasa para que los bujes y las partes que están sujetas a fricción estén correctamente lubricadas, también la mesa deslizante que

mueve la prensa se revisaron sus correderas, los rodamientos o baleros para lubricarlos y demás piezas quedando en condiciones de operarse.

Se revisó el cabezal y se encontró que el distribuidor estaba dañado, se procedió a la compra del material buscando un acero grado herramienta para trabajo en caliente encontrando el acero H-13 que es un acero al cromo molibdeno vanadio para uso en continuos choques térmicos. El maquinado se realizó en el laboratorio de la facultad utilizando las maquinas herramientas disponibles, al terminar el maquinado se envió a tratamiento térmico solicitando una dureza de 52-54 Rc, después del tratamiento térmico se pulió y se le quito la cascara que deja el tratamiento térmico y se le dio el acabado final.

A continuación se revisó el sistema motriz del extrusor, verificando que el variador mecánico que acciona el movimiento del motor, que aumenta o disminuye la velocidad del husillo, a este sistema mecánico se le realizo un mantenimiento para que el sistema del variador estuviera libre de obstáculos y funcione libremente con la tensión propia del sistema, se revisó el reductor y el acoplamiento de este con el husillo a través del la cadena silenciosa y las catarinas, lo que finalmente nos llevó a la elaboración del cinemático del sistema motriz del extrusor (ver diagrama del cinemático anexo figura 4.2.2.1.1).

También se anexa una fotografía del sistema de transmisión de la extrusora donde se indican cada una de las partes que integran el sistema constatando que el diagrama cinemático y la fotografía tiene la misma correspondencia figura 4.2.2.1.2.

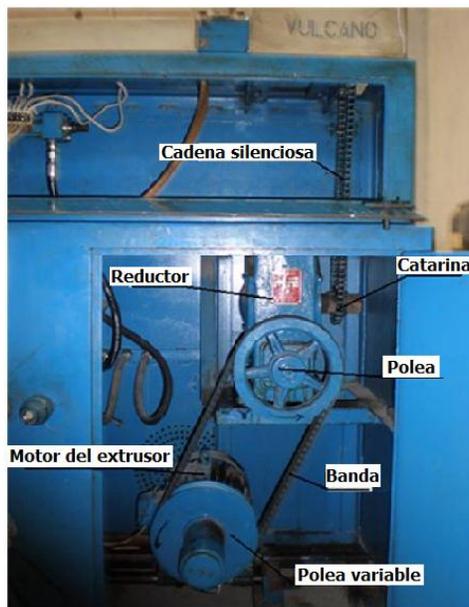


Figura 4.2.2.1.2 Del sistema de transmisión de la extrusora

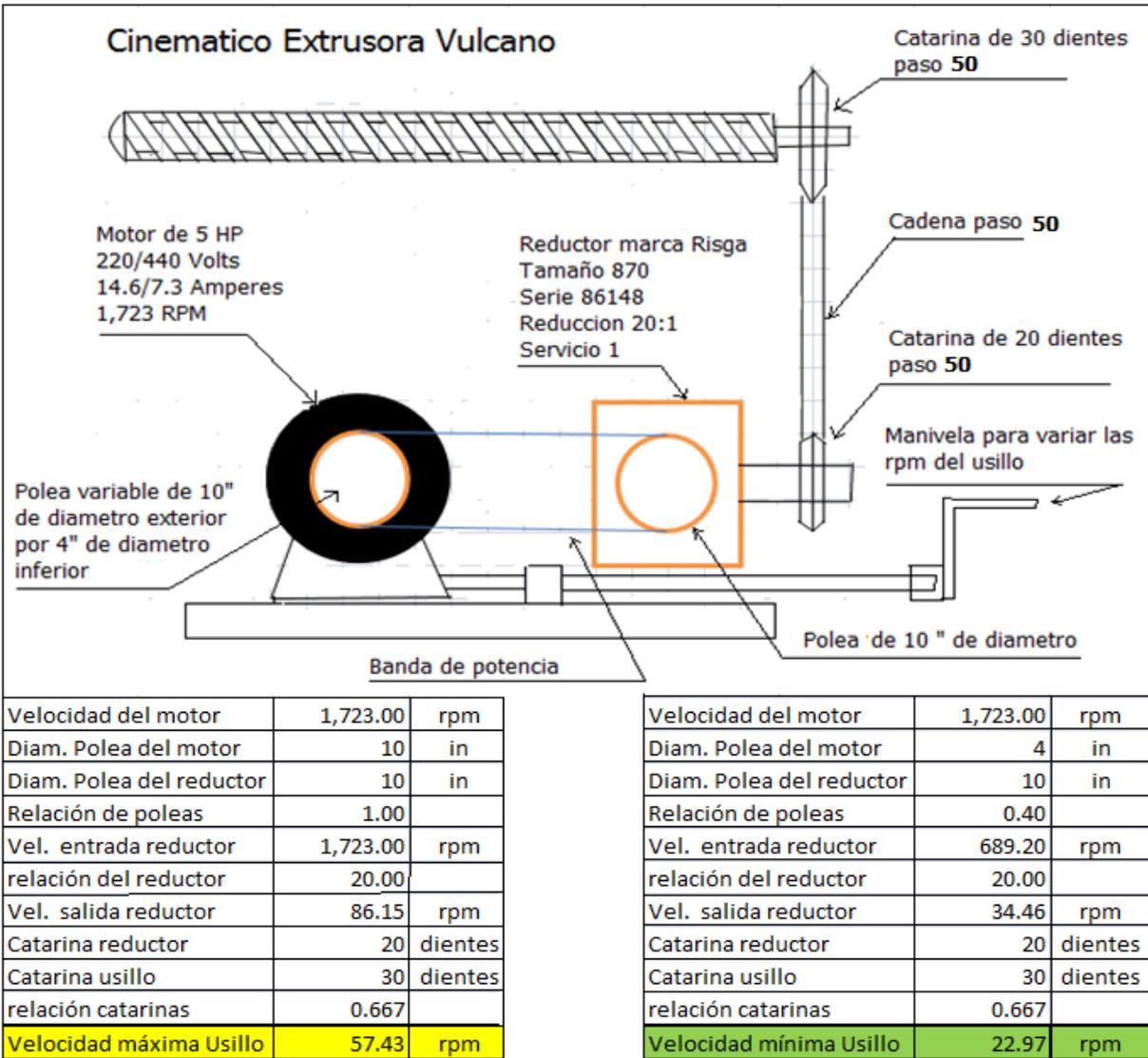


Figura 4.2.2.1.1 Del cinemático del sistema de transmisión de la extrusora

#### 4.2.2.2 Sistema hidráulico.

Para el sistema hidráulico iniciamos revisando la bomba, las electroválvulas, la válvula de alivio, el manómetro y la válvula reguladora de presión, detectando que la bomba estaba dañada y su modelo obsoleto por lo cual se procedió a sustituirla, enfrentándonos al reto del acoplamiento por ser un equivalente de la bomba original, no quedando más remedio que realizar adaptaciones en las conexiones de succión y descarga de la bomba para dejar perfectamente alineada la bomba con el motor, de tal forma que al instalarse no sufra desalineamiento que pueda dañarla. Finalmente se elaboro su diagrama hidráulico de acuerdo a las componentes actuales del equipo (ver diagrama hidráulico anexo figura 4.2.2.2.1).

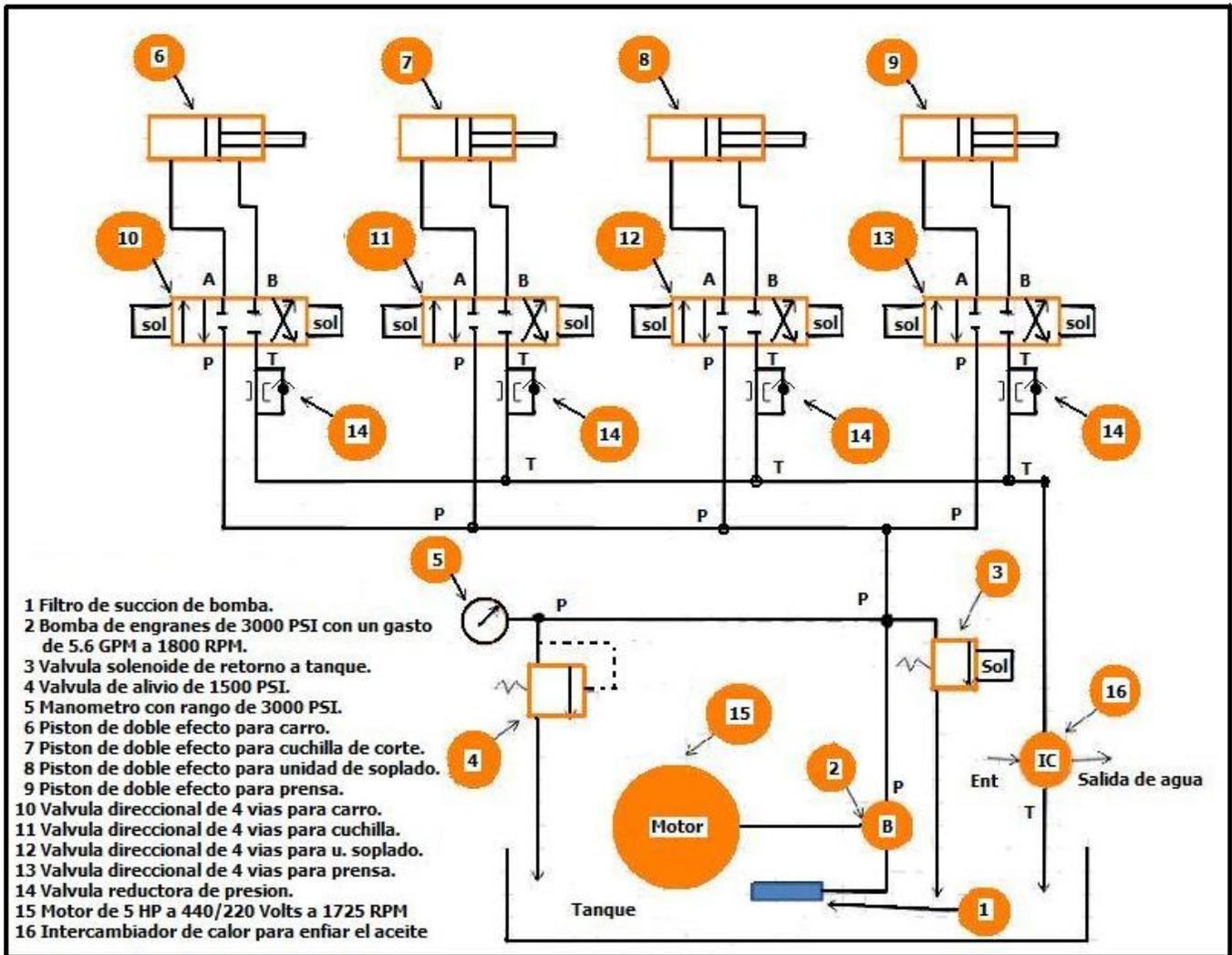


Figura 4.2.2.2.1 Diagrama hidráulico de la extrusora sopladora.

También se anexa una fotografía del sistema hidráulico de la extrusora donde se indican cada una de las partes que integran el sistema constatando que el diagrama hidráulico y la fotografía son correspondientes figura 4.2.2.2.2.

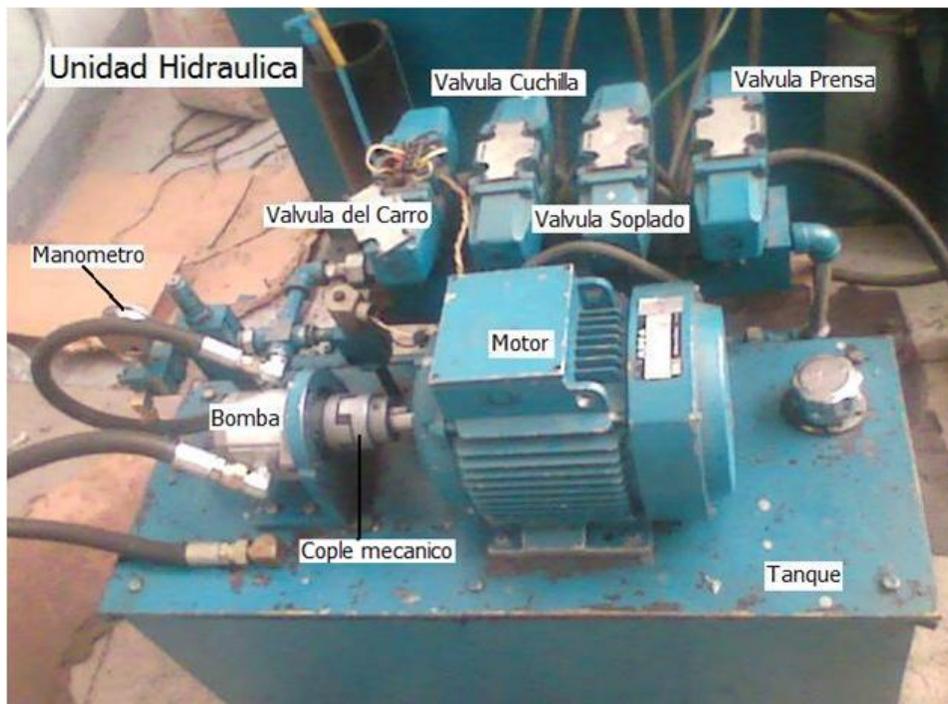


Figura 4.2.2.2.2 Del sistema hidráulico.

### 4.2.2.3 Sistema neumático.

De la misma forma se reviso el sistema neumático, verificando el buen funcionamiento de las válvulas y del manómetro, al desarmar el pistón que aplica el aire al molde se encontró que sus empaques estaban dañados, los cuales se cambiaron quedando en condiciones de operar sin problemas, y se procedió a elaborar el diagrama neumático (ver diagrama neumático anexo).

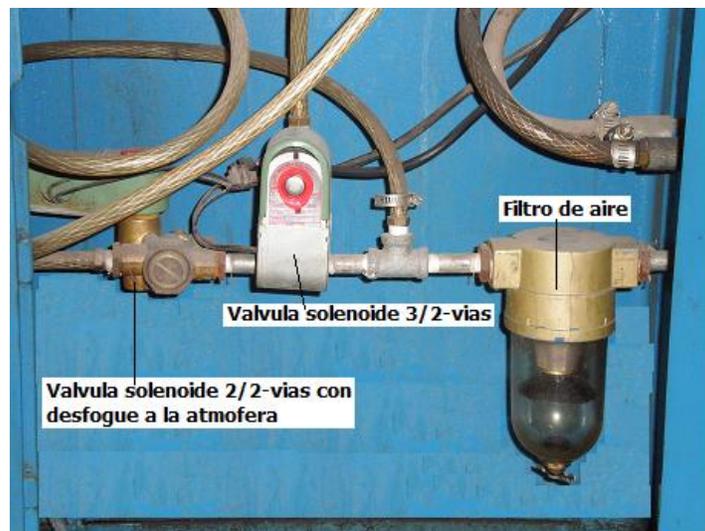


Figura 4.2.2.3.1 Del sistema neumático

#### 4.2.2.4 Sistema eléctrico.

El tablero de control de la máquina extrusora que actualmente tiene está construido con: interruptores, contactores, relés, temporizadores, relojes, botones, selectores y focos de señalización.

Al revisar los componentes del tablero se observa que los contactores son de modelo muy antiguo y presentan desgaste, oxidación y erosión en los platinos de contacto, se limpiaron y dejaron en condiciones de operar pero debido al desgaste y uso pueden llegar a ocasionar falsos contactos y fallas en la operación.

Los temporizadores funcionan aunque se requiere de verificar si su ajuste de tiempo es correcto es decir que estén calibrados al tiempo (segundos, minutos, hora, etc.) lo mismo que los pirómetros cuyo intervalo es de 0 a 400°C y uno parece estar dañado ya que no controla la temperatura dado que el termopar que lo controla se encuentra en perfectas condiciones por lo que procedemos a cambiarlo, todos los selectores funcionan bien lo mismo que los botones de arranque y paro de los motores.

Las resistencias calefactoras presentan una potencia adecuada (las 2 zonas de la recamara son de 1,800 watts cada una,) y están bien distribuidas de manera uniforme en el cañón, y las del cabezal (la del cabezal 1,750 watts y la del dado 600 watts) todas funcionan calientan bien y están en condiciones de trabajar, se elaboro su diagrama eléctrico de acuerdo a los componentes actuales del equipo (ver diagrama sistema de control de temperaturas anexo figura 4.2.2.4.1).

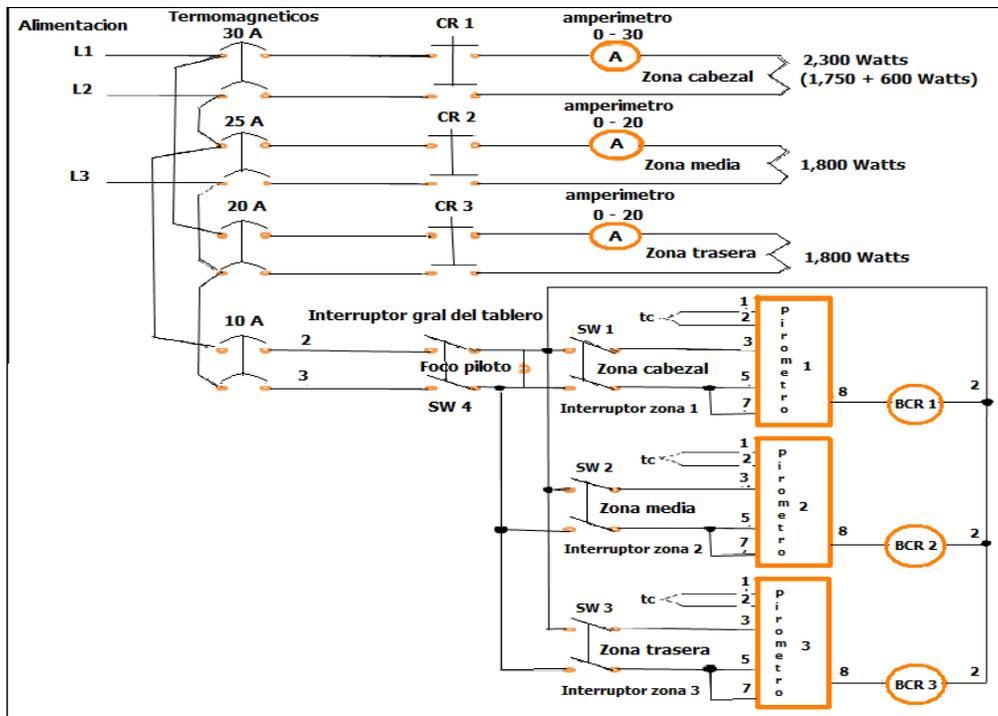


Figura 4.2.2.4.1 Figura del sistema de control de temperaturas

Los arrancadores de los motores del sistema hidráulico y del extrusor están en condiciones y funcionan sin problema, sus protecciones de sobrecarga funcionan y están calibradas de acuerdo a la capacidad de los motores se elaboro su diagrama eléctrico de acuerdo a los componentes actuales del equipo (ver diagrama sistema de arrancadores del motor y del hidráulico anexo figura 4.2.2.4.2).

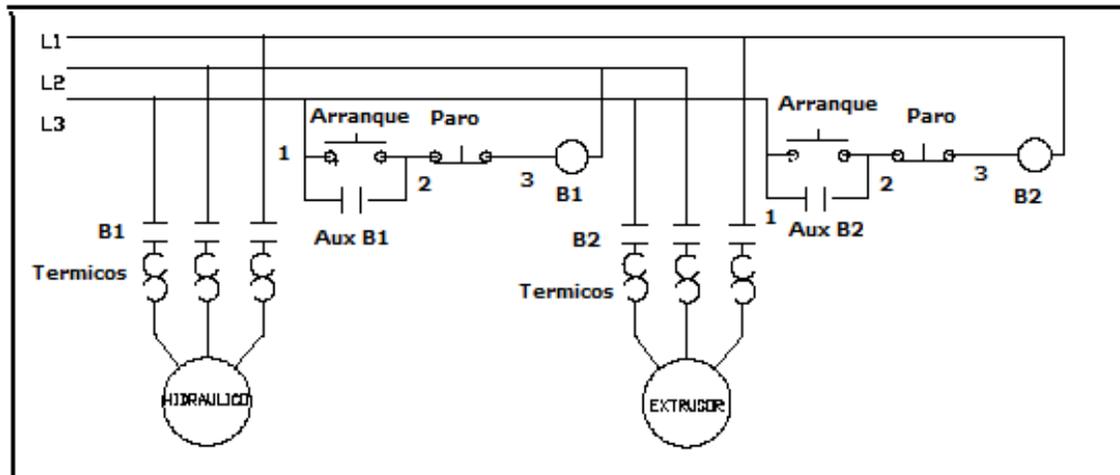


Figura 4.2.2.4.2 Diagrama de los arrancadores del hidráulico y del motor del extrusor

El sistema de corte (cuchilla de corte) de parison funciona incorrectamente ya que se queda trabado en una de las 2 posiciones con las que cuenta, lo que ocasiona que no se corte el parison y puede provocar desperdicio, se reviso y se encontró un falso contacto en los conductores que alimentan a la electroválvula, se corrigió el problema y se probó nuevamente encontrándose que uno de los interruptores de limite (microswitch) del sistema de conmutación estaba dañado, se cambio y se volvió a verificar su operación encontrándose otro interruptor de limite (microswitch) del mismo sistema dañado, se procedió a cambiarlo quedando listo.

En el sistema de soplado se revisaron los interruptores de limite (microswitch) que el embolo del pistón de soplado acciona al bajar y al subir resultando que uno de ellos estaba dañado, por lo que procedimos a reemplazarlo por uno nuevo.

El alambrado del tablero de control se encontró en pésimas condiciones notándose que fue hecho sin criterio de canalizaciones al no contar con terminales los cables que van sujetos en los componentes lo que provoca falsos contactos y en algunos casos la desconexión de los mismos además sin el peinado (acomodo y separación dentro de canaletas) de los cables, con identificación deficiente en los cables ya que no todos están numerados y no están separados los circuitos de control y fuerza, acciones que normalmente se aplican a este tipo de tableros.

Se le dedicó especial interés y mayor tiempo al tablero de control ya que el equipo se recibió sin ningún diagrama ya sea eléctrico, neumático, hidráulico o mecánico que pudiera facilitar la comprensión del funcionamiento del equipo, ni mucho menos un instructivo de operación del mismo por lo que el siguiente paso fue plantear su forma de operar mediante un diagrama de

bloques Figura 4.2.2.4.3 y realizar un levantamiento físico de los componentes de la extrusora sopladora para poder así entender su funcionamiento.



Figura 4.2.2.4.3 Diagrama de bloques del sistema de extrusión soplado

Una vez analizada la operación y mediante el diagrama de bloque se estableció la secuencia de cada uno de los componentes del sistema y se verifico que cada uno de los equipos estuviera adaptado y fuera el adecuado para la operación quedando compuesta la extrusora sopladora con los siguientes equipos mostrando la figura 4.2.2.4.4 cada uno de los componentes.

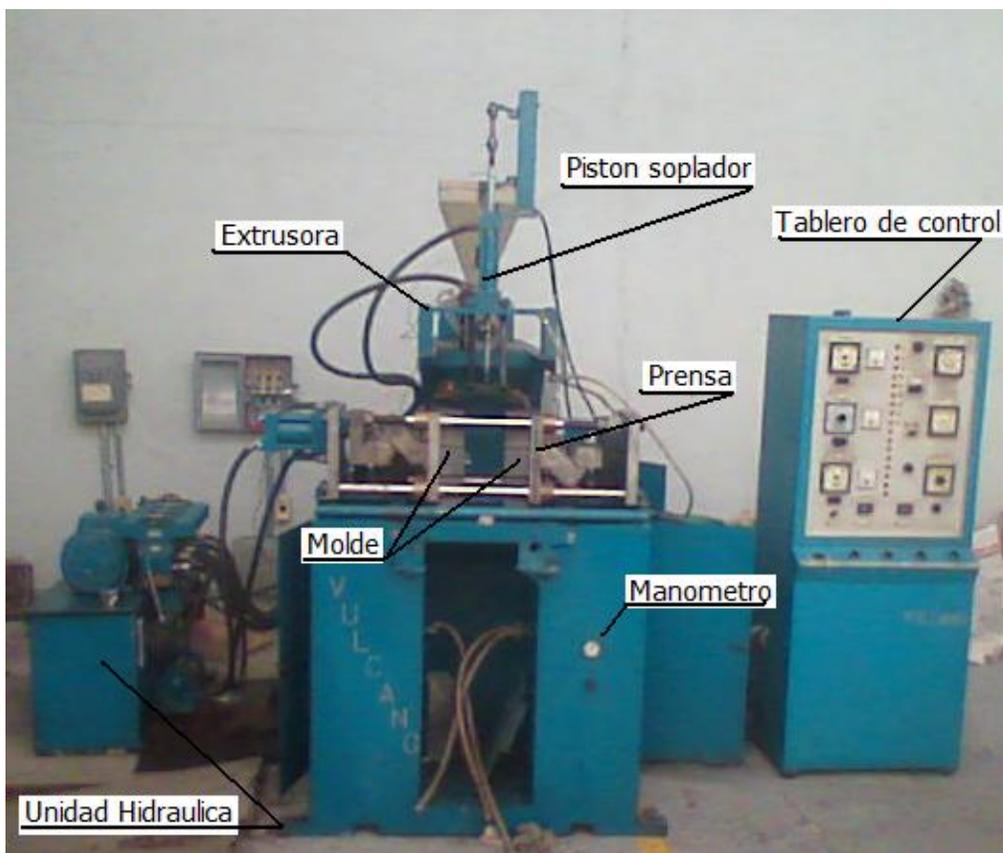


Figura 4.2.2.4.4 Componentes de la Extrusora Sopladora

Componentes que integran el sistema de extrusión soplado

- Un extrusor
- Una prensa
- Un molde
- Un sistema de pistón soplador
- Un Tablero de control
- Una unidad hidráulica
- Un manómetro de presión de aire

Las características de cada uno de los componentes de la extrusora sopladora son:

➤ El Extrusor:

El extrusor tiene un husillo con:

L= Longitud (largo).	= 930.0 mm
D= Diámetro del husillo.	= 44.5 mm
Con paso de hélice.	= 44.5 mm
Tipo de compresión.	= creciente
Relación de compresión del husillo.	= 2.63:1
Angulo de la hélice.	= 17.7°
Espesor de hélice (filete).	= 8.25 mm
Relación L/D = 930/44.5	= 20.9
Para efectos prácticos L/D.	= 21:1
Diámetro de la recámara.	= 44.65 mm
La entrega a cabezal cerrado es:	
A vel. mín. 23 rpm del husillo.	= 8.0 kg/hr
A vel. máx. 57 rpm del husillo.	= 20.0 kg/hr

➤ La Prensa.

Consiste en un mecanismo combinado hidráulico-mecánico de apertura y cierre, su operación es mediante un pistón accionado por cremallera y engrane, se realiza el cierre mediante trinquete mecánico (hidráulico y mecánico) figuras 4.2.2.4.5. y 4.2.2.4.6.



Figura 4.2.2.4.5 Mecanismo del cierre de molde de la prensa



Figura 4.2.2.4.6 Mecanismo de cierre de la prensa

➤ La Unidad Hidráulica.

Cuenta con motor de 5 HP 220/440 volts a 1725 RPM y Bomba de engranes de 5.39 GPM a 1,800 RPM y con una presión máxima de operación de 3,600 PSI e intercambiador de calor para enfriar aceite figura 4.2.2.4.7.

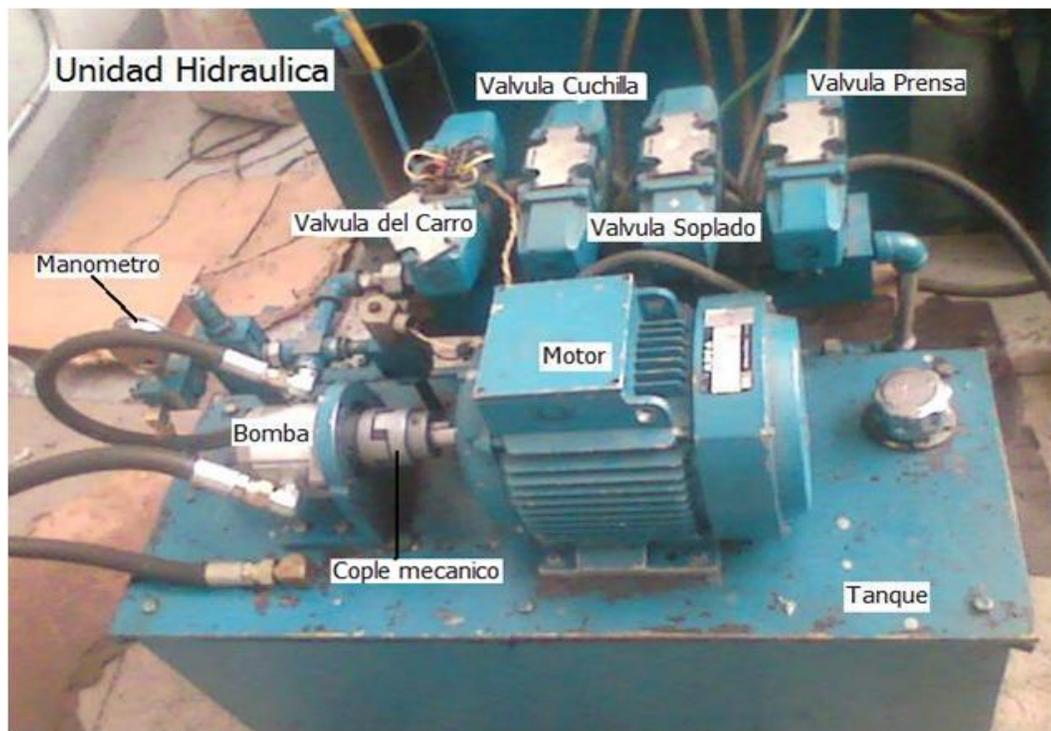


Figura 4.2.2.4.7 Unidad hidráulica

- El Manómetro de presión de aire.  
Manómetro con intervalo de 0 - 11 kg figura 4.2.2.4.8.



Figura 4.2.2.4.8 Manómetro para aire

- La Unidad motriz.  
Cuenta con motor de 5 HP 220/440 volts de 1,723 RPM con polea variadora de velocidad, acoplada por medio de bandas a reductor con relación de 20:1 acoplado a husillo mediante catarinas y cadena silenciosa con paso 50 figura 4.2.2.4.9.

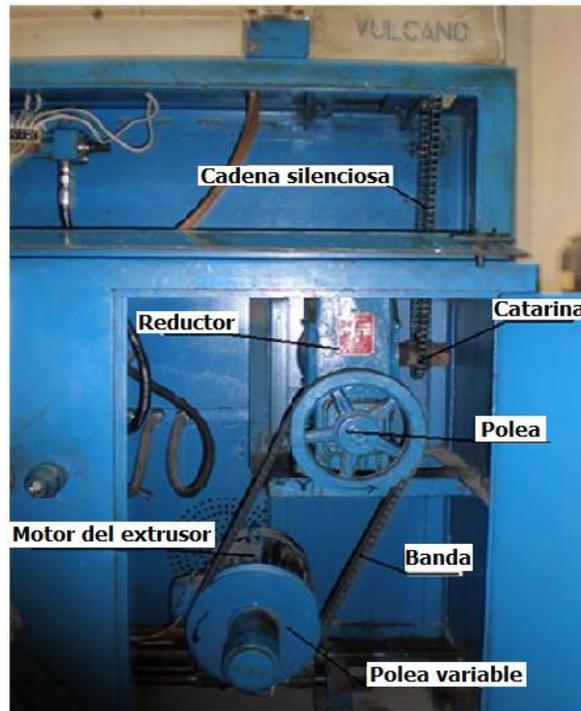


Figura 4.2.2.4.9.Sistema motriz

➤ El Molde.

La maquina cuenta con un Molde para fabricar Botella de 1 Litro con enfriamiento mediante agua figura 4.2.2.4.10.

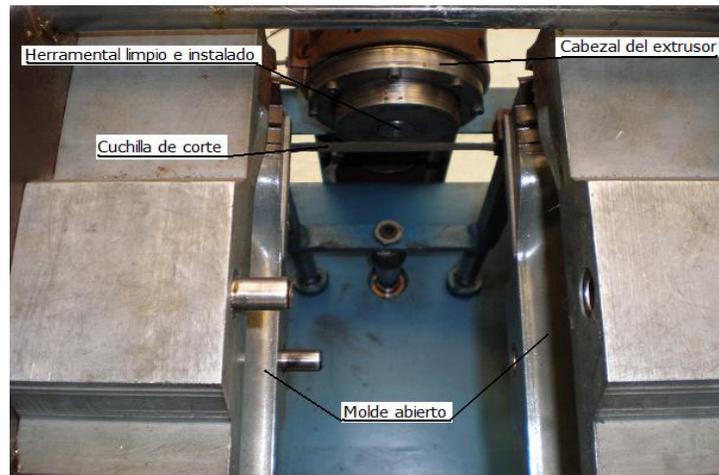


Figura 4.2.2.4.10 Molde de botella de 1 litro

➤ El Pistón con boquilla sopladora.

La boquilla sopladora puede suministrar aire a una presión de 6 a 7 kg/cm<sup>2</sup> figura 4.2.2.4.11.



Figura 4.2.2.4.11 Pistón con boquilla sopladora

➤ El Tablero de Control.

Cuenta con 3 zonas de calentamiento 6 temporizadores (relojes) con controles para arrancar y parar los motores de la unidad hidráulica y el extrusor, fabricado a base de contactores, selectores de posición, interruptores y relevadores e indicadores tipo led indicando la operación y mostrando que elementos están funcionando figura 4.2.2.4.12.

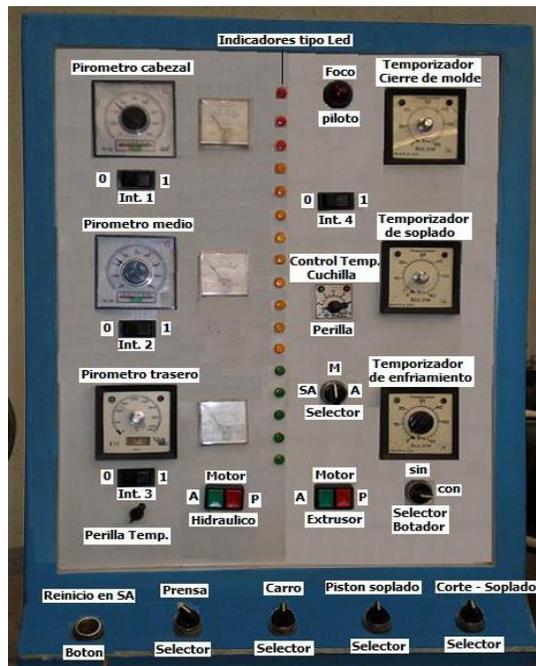


Figura 4.2.2.4.12 Tablero de control

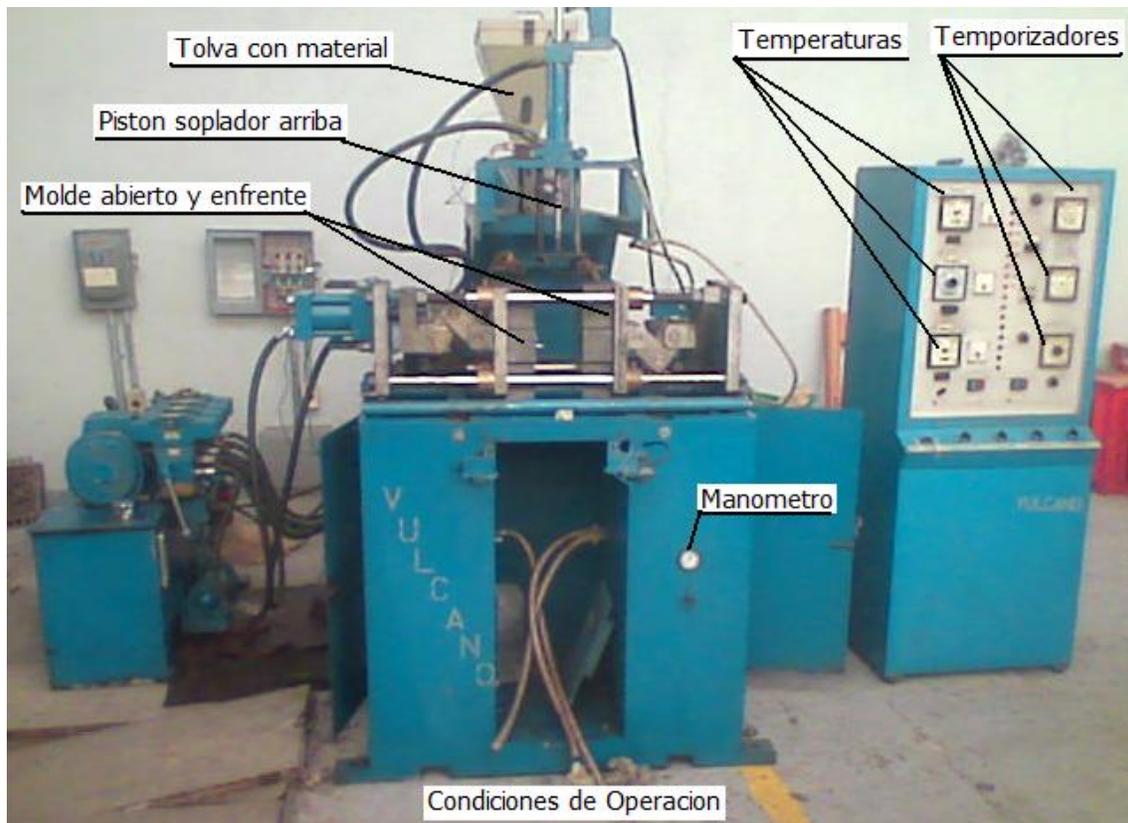


Figura 4.2.2.4.13 Extrusora

Con el diagrama de bloques se realizo un diagrama eléctrico inicial y se relacionó físicamente contra cada uno de los componentes contenidos en el tablero, siguiendo la secuencia se plasmó en papel el diagrama eléctrico del tablero (ver diagrama eléctrico anexo).

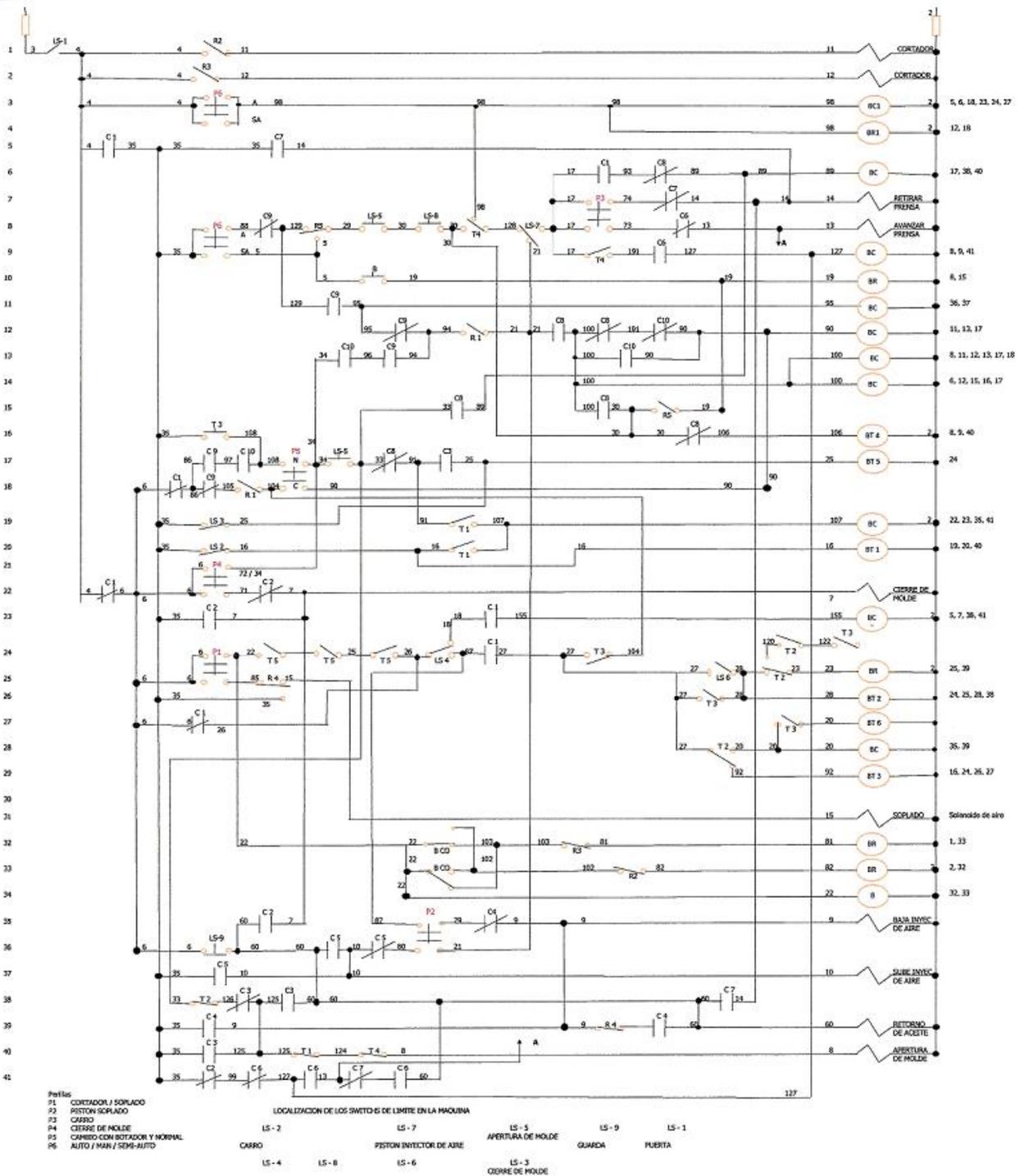


Figura 4.2.2.4.14 Diagrama eléctrico de la extrusora sopladora Vulcano

### 4.3 Propuesta de cambio del sistema de control de la máquina.

La propuesta del cambio consiste en substituir el sistema de control compuesto por contactores y relevadores actualmente instalados en el tablero del Extrusor, por un sistema integrado conocido con el nombre de PLC. Con este cambio reduciremos dentro del tablero de

control el número de conductores que actualmente interconectan a cada uno de los contactores (10) y relevadores (5), aumentaremos el espacio, mejoraremos la distribución de las canalizaciones, reduciremos fuentes de calor y optimizaremos la operación del sistema.

<b>Dispositivo</b>	<b>Función</b>	<b>Entrada</b>	<b>Salida</b>
LS-1	Puerta de seguridad	X	
LS-2	Carro bajo el parison	X	
LS-3	Cierre de molde	X	
LS-4	Carro enfrente fuera del parison	X	
LS-5	Apertura de molde	X	
LS-6	Pistón de soplado abajo	X	
LS-7	Pistón de soplado arriba	X	
LS-8	Carro enfrente fuera del parison	X	
LS-9	Guarda protectora	X	
Selector 1	Pistón cuchilla adelante	X	
	Pistón cuchilla atrás	X	
Selector 2	Pistón de soplado arriba	X	
	Pistón de soplado abajo	X	
Selector 3	Pistón carro adentro	X	
	Pistón carro afuera	X	
Selector 4	Pistón molde cerrado	X	
	Pistón molde abierto	X	
Selector 5	Con botador	X	
	Sin botador	X	
Selector 6	Manual	X	
	Semi Automático	X	
	Automático	X	
Botón pulsador	Reset solo en semi automático	X	
Temporizador 1	3 contactores	X	
Temporizador 2	4 contactores	X	
Temporizador 3	4 contactores	X	
Temporizador 4	3 contactores	X	
Temporizador 5	3 contactores	X	
Temporizador 6	1 contactor	X	
	Con temporizadores	41	
	Sin temporizadores	23	
Solenoide 1	Pistón apertura de molde		X
Solenoide 2	Pistón cierre de molde		X

Solenoides 3	Pistón cuchilla adelante		X
Solenoides 4	Pistón cuchilla atrás		X
Solenoides 5	Pistón soplado arriba		X
Solenoides 6	Pistón soplado abajo		X
Solenoides 7	Pistón carro adentro		X
Solenoides 8	Pistón carro afuera		X
Solenoides 9	By pass de aire		X
Solenoides 10	Soplado de aire		X
Solenoides 11	Retorno de aceite a tanque		X
Temporizador 1	Bobina temporizador 1		X
Temporizador 2	Bobina temporizador 2		X
Temporizador 3	Bobina temporizador 3		X
Temporizador 4	Bobina temporizador 4		X
Temporizador 5	Bobina temporizador 5		X
Temporizador 6	Bobina temporizador 6		X
	Con temporizadores		17
	Sin temporizadores		11

Figura 4.3.1 Tabla de entradas y salidas

De acuerdo con el diagrama eléctrico iniciaremos la selección del tipo de PLC que se necesita para la propuesta del cambio de control, primero debemos analizar cuantas entradas y salidas contiene el proceso y siguiendo el criterio que se mencionó en capítulos anteriores, el PLC toma al contacto (ya sea cerrado o abierto) como un elemento de entrada, las salidas más comunes representa motores eléctricos, solenoides, cilindros eléctricos, etc., considerando esto se elaboró la tabla de la figura 4.3.1 seleccionando entradas y salidas de la maquina extrusora sopladora que vamos a utilizar para seleccionar y programar el PLC.

Como podemos observar de la tabla de la figura 4.3.1 existen 2 alternativas: una es incluyendo los temporizadores actualmente instalados en el tablero de control, lo que representan más entradas y salidas, la otra sin los temporizadores instalados lo que se traduciría en menos entradas y salidas con estas consideraciones analizaremos las dos opciones según las características de los PLC que existen en el mercado, las evaluaremos, cuantificaremos los costos y los beneficios que nos representan dichos cambios.

Para cada una de las opciones de la figura 4.3.1 realizamos su diagrama operativo quedando los nuevos diagramas eléctricos con PLC representados en las figuras 4.3.2 y 4.3.3. Costearemos y analizaremos cada una de las opciones.

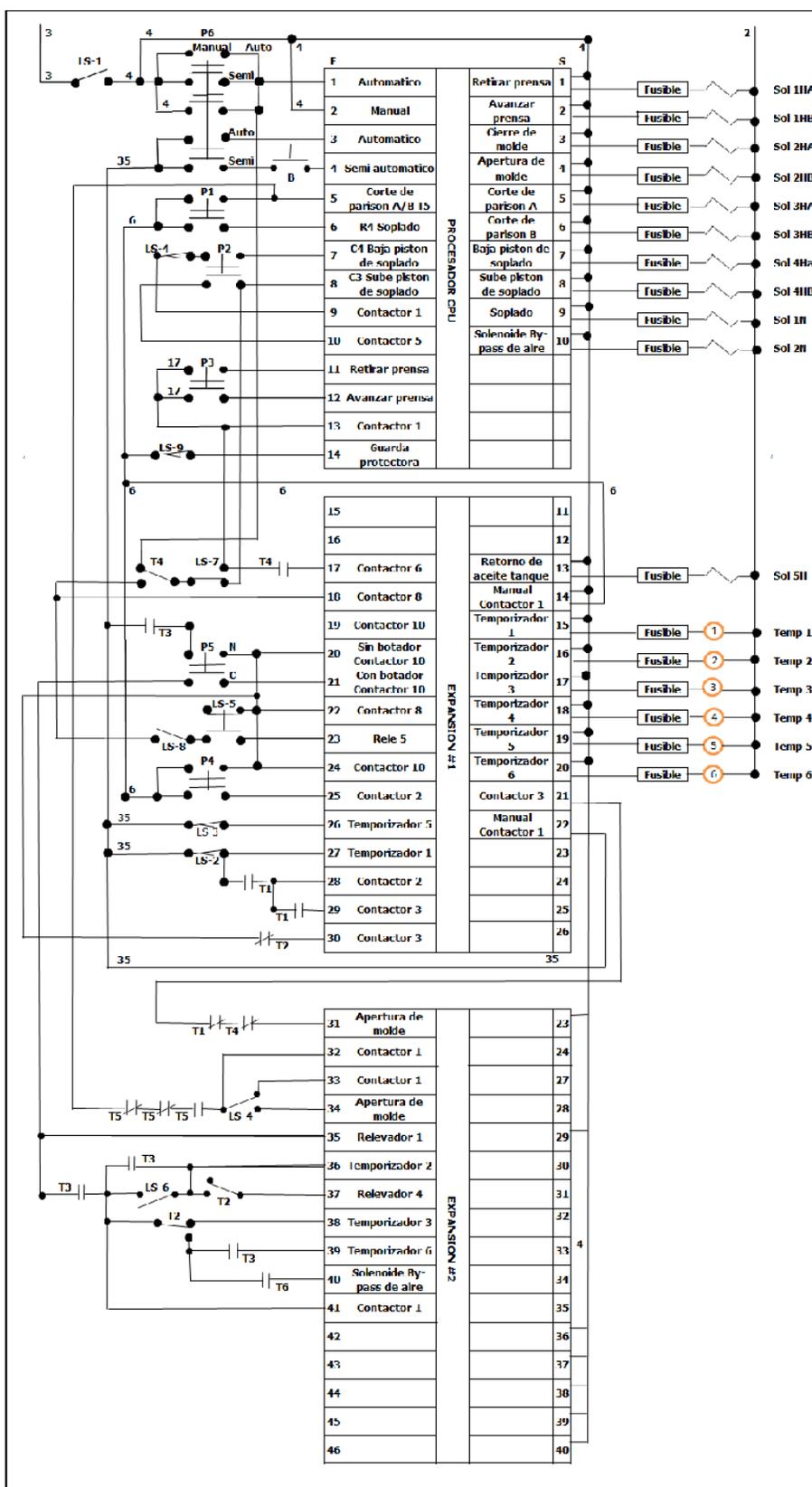


Figura 4.3.2 Primera opción para cambio de control con PLC

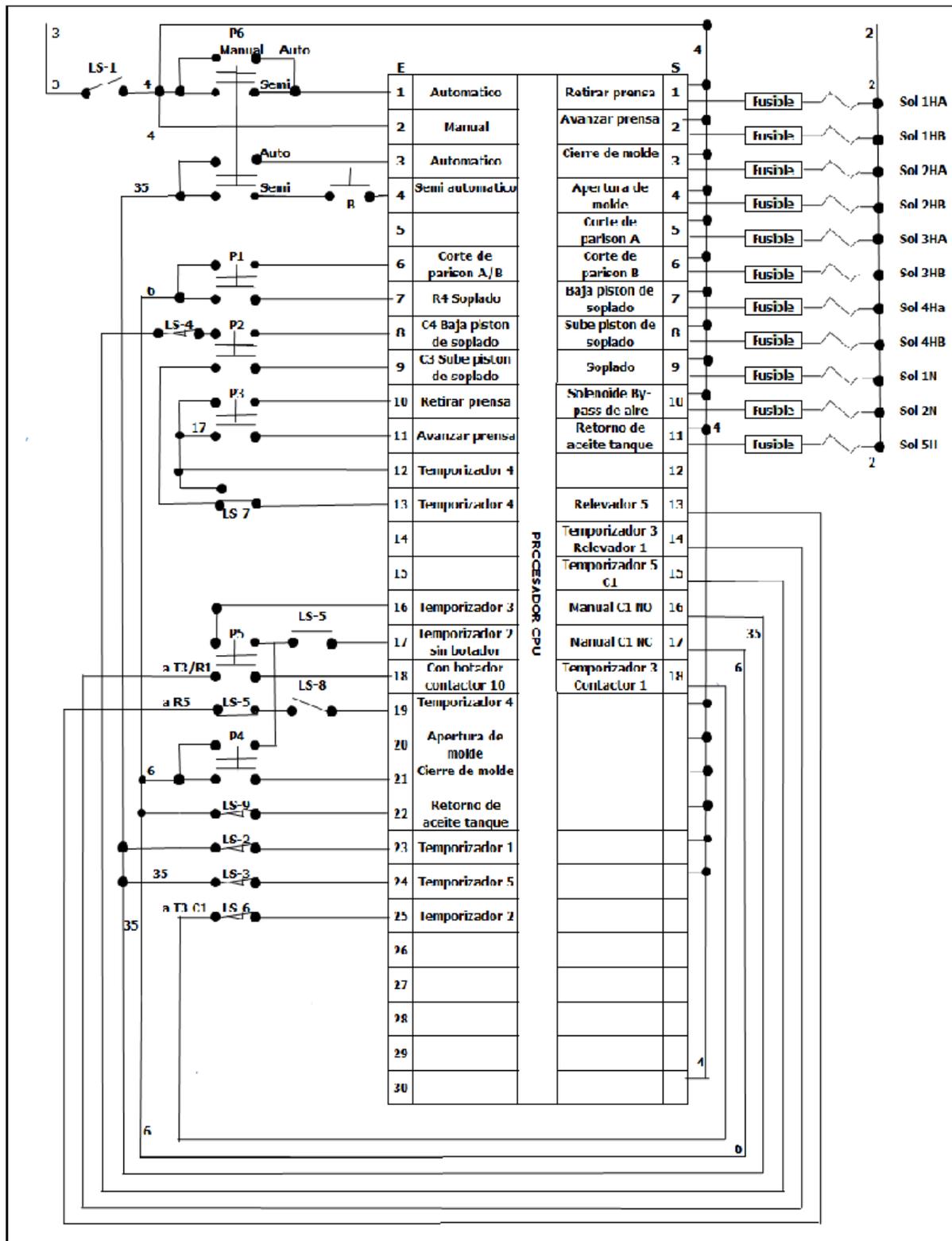


Figura 4.3.3. Segunda opción para cambio de control con PLC

Para la primera opción necesitamos que el PLC al menos tenga de acuerdo a la tabla de la figura 4.3.1 de 41 entradas y 17 salidas en las que se incluyen los temporizadores que actualmente tiene la extrusora.

Actualmente existe una gran variedad de PLC con diferentes arreglos siendo las más populares las siguientes marcas Allen Bradley, Milenium, Crouzet, Siemens, etc., para nuestro caso utilizaremos el de la marca Siemens, los cuales tienen una mayor capacidad de sus módulos y con mayor número de entradas y salidas que los demás fabricantes de estos dispositivos los cuales tienen limitadas estas características.

Con la consideración expuesta se selecciono para la primera opción un PLC con un modulo de CPU con 14 entradas y 10 salidas mas dos módulos de expansión con 16 entradas y 16 salidas cada uno, quedando un total de 46 entradas y 42 salidas. Al realizar el trabajo de análisis, arreglo eléctrico y de programación de esta opción nos dio como resultado la utilización de tan solo 39 entradas y 20 salidas del PLC seleccionado según la figura 4.3.2.

Para la segunda opción lo mismo que la primera necesitamos que el PLC al menos tenga de acuerdo a la tabla de la figura 4.3.1 de 23 entradas y 11 salidas, con la variante de esta opción que es sin los temporizadores ya que se utilizaran los internos del PLC con lo que se reduce la necesidad. Al analizar el arreglo eléctrico de esta opción el resultado es un PLC que este configurado con un modulo de CPU con 30 entradas y 18 salidas, quedando esta opción con 21 entradas 17 salidas del PLC según la figura 4.3.3.

Con las dos opciones presentadas tomaremos la mejor decisión para realizar el cambio de control de los contactores y sustituirlos por el PLC.

## Capítulo 5: Análisis de la propuesta.

### 5.1 El nuevo sistema de control.

Como ya se ha expuesto en la maquina cuenta con contactores, relevadores, temporizadores y pirómetros electromecánicos, así como sus conductores ya envejecidos que tienen un deterioro considerable de desgaste por uso, corrosión, temperatura y herrumbre causados por el tiempo y el calor, lo que nos lleva a considerar que ya no están aptos para realizar las operaciones para lo que fueron instalados.

Por otro lado el sistema de transmisión del extrusor, acoplado por motor, reductor catarinas poleas y cadena silenciosa con un sistema de deslizamiento que permite variar la velocidad del husillo al cambiar el diámetro de la polea motriz montada en la flecha del motor, realizándose esta operación mediante una manivela que hace que se desplace el motor alejándolo o acercándolo a la polea del reductor. Todo este mecanismo resulta tener un control escalonado en la velocidad del husillo, lo que permite no tener una entrega de material plástico muy preciso, lo que lo hace poco funcional, por lo que lo hace materialmente obsoleto.

Tomando en consideración lo anteriormente expuesto, se propone cambiar el control general así como también el control de entrega del extrusor para hacer de tal forma infinitamente variable la entrega del plástico.

Para el control de la operación de la maquina se cambiarían los contactores y relevadores por un PLC de la marca Siemens de 32 entradas y 22 salidas de acuerdo a lo propuesto en el anterior capítulo seleccionaríamos el diagrama que mejor nos conviene para este tipo de aplicación.

Con el sistema variador de frecuencia (inversor) el cambio de entrega se realizaría mediante un potenciómetro de tal forma que el control de velocidad es infinitamente ajustable permitiéndonos un mejor control en la entrega del material plástico.

Todo esto se realizara sin modificar nada mecánico, la recomendación sería dejar la polea motriz (variable) acoplada en la flecha del motor ajustándola a la relación de 1:1 con la polea del reductor e instalar el variador de frecuencia (inversor) y conectarlo al motor como si fuera un simple arrancador, con la salvedad que este arrancador puede controlar la velocidad del motor desde cero hasta 60 Hz.

A continuación las siguientes figuras muestran algunas características así como los bloques de terminales para su conexión figura 5.1.1, los diagramas de bloques de cómo está configurado el inversor figura 5.1.2, y finalmente sus características figura 5.1.3, las figuras son cortesía de Allen Bradley.

## Bloques de terminales para alambrado

Detalle del bloque de terminales

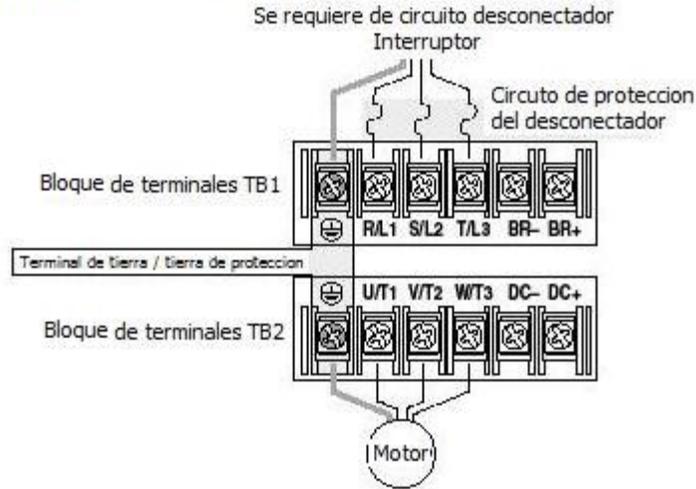


Figura 5.1.1 Bloque de terminales para alambrado

## Diagrama de bloques

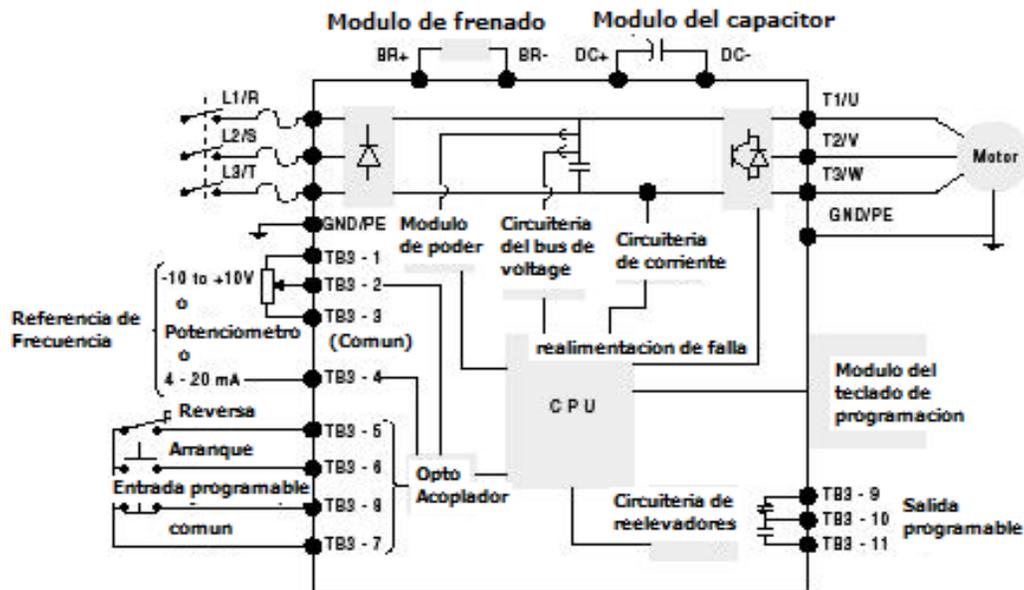


Figura 5.1.2 Diagrama de bloques

## Características Opcionales del Controlador

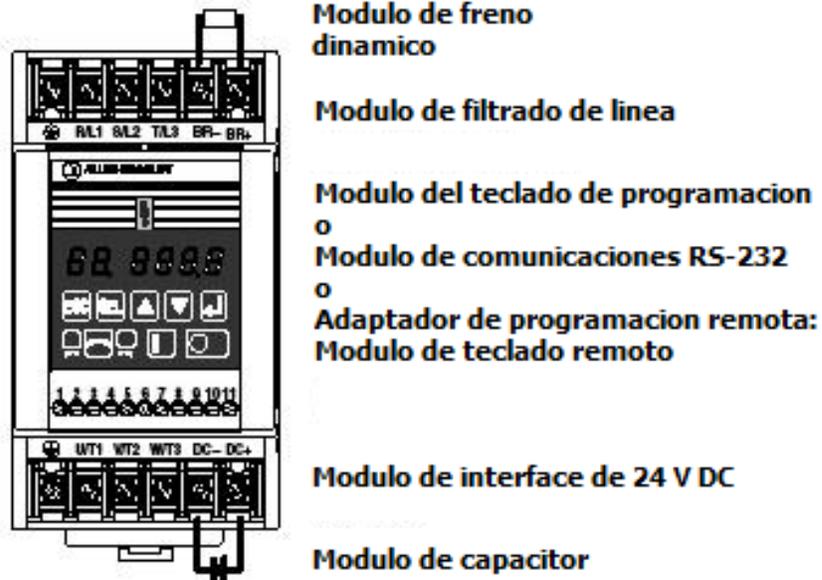


Figura 5.1.3 Características opcionales

De esta forma se tendrá la maquina sopladora con un control general con PLC y un control de velocidad del husillo con un inversor lo que obtendremos es un extrusor totalmente moderno, actualizado y con su operación totalmente controlada.

## 5.2 Costo de la inversión.

El costo de los componentes de acuerdo a la siguiente lista tenemos:

1 PLC Simatic S7-1200, CPU 1214C, DC/DC/RLY, Onboard I/O 14 DI 24 marca Siemens Costo (\$475.00 USD) al tipo de cambio del día 26/04/2011.....	\$ 8,770.00
1 Modulo PID ctrl soft update service P/1 y c/prolong. Auto marca Siemens Costo (\$135.00 USD) al tipo de cambio del día 26/04/2011.....	\$ 1,570.00
1 Simatic S7-1200 Digital I/O sm 1223 8di/8do 8di dc 24V sin marca Siemens Costo (\$215.00 USD) al tipo de cambio del día 26/04/2011.....	\$ 2,510.00
1 Variador Microm Vector MM440 para 5HP 220V marca Siemens Costo (\$755.00 USD al tipo de cambio del día 26/04/2011.....	\$ 8,760.00
1 Panel de operación básico Micromaster marca Siemens MM Costo (\$42.00 USD) al tipo de cambio del día 26/04/2011.....	\$ 480.00
1 Potenciómetro remoto para control de velocidad en el tablero tiene un Costo de.....	\$ 90.00
5 Temporizadores marca Eurasin modelo H3BA-8 costo (\$490.00).....	\$ 2,450.00
5 Bases para temporizador Costo (\$ 40.00).....	\$ 200.00
3 Pirómetros digitales marca TJ modelo xmtg 808 costo (\$900.00).....	\$ 2,700.00
3 Medidores de corriente marca fimesa de 0-30A ca costo (\$150.00).....	\$ 450.00
1 Lote de bornes de conexiones o clemas o kulkas de 30A costo.....	\$ 320.00
1 Lote de conductores de diferentes calibres costo.....	\$ 3,900.00
1 Lote de canaletas para alambrado costo.....	\$ 450.00
1 lote de terminales o zapatas (ojillo, espada, etc.)para conexión costo de.....	\$ 250.00
1 Interruptor termomagnético de 70A para la capacidad total de la maquina con gabinete para sobreponer con un costo de.....	\$ 750.00
Costo total de materiales.....	\$33,650.00

Para los módulos del PLC tienen un tiempo de entrega de 3 a 4 semanas para el demás equipo el tiempo de entrega es inmediato.

Costo estimado de la mano de obra para el cambio de PLC e Inversor.....\$ 8,700.00

Tiempo necesario para el cambio de 8 a 12 días.

El Costo Total de la inversión es de.....\$42,350.00

## Capítulo 6:

### Conclusiones

Dado que las ventajas del uso de la computadora en el control de procesos son múltiples, entre ellas se podría nombrar una mayor eficacia de las operaciones, mayor seguridad, una reducción drástica de las operaciones manuales, un menor mantenimiento a sus componentes, menor número de piezas de desgaste (en el tablero de control), repetitividad de operaciones sin variaciones, informe periódico del proceso, historial de operaciones y control.

Se concluye que la sustitución de componentes electromecánicas por un control PLC (el cambio de control general en la maquina extrusora sopladora del laboratorio de plásticos de la Facultad de Ingeniería) tendría mayores beneficios que prejuicios dando como resultado mejor operación de la extrusora sopladora como son los ciclos de operación de la maquina más controlados y precisos, es decir el tiempo de proceso del ciclo de moldeo.

Con lo que se lograría un rendimiento optimo en la operación de la maquina, resultando un equipo altamente productivo con menor consumo de energía, mayor productividad, menor desperdicio por concepto de tiempo de mala producción o menor desperdicio así como por un menor tiempo en mantenimiento de sus componentes.

Así como también del cambio de control del motor por un variador (inversor), con el cual se lograría un control en la entrega del extrusor infinitamente variable, lo que resultaría en control de espesores del producto a producir, obviamente reduciendo el contenido en el producto, ahorrando material de proceso y como consecuencia incrementando la productividad del mismo.

Lo anteriormente expuesto viene a dar como resultado que su tasa interna de retorno de la inversión se vería favorecida y se justificaría la inversión propuesta esto es si el equipo estuviera en una organización que requiriera de hacer una inversión de mejora en equipo productivo y estuviera en esta situación como la que proponemos para el equipo del Laboratorio.

Aún en este caso es recomendable realizarla para beneficio del Laboratorio para que sus estudiantes puedan realizar prácticas de proceso así como de contenidos de material en los procesos productivos a los que llegaran a enfrentarse durante su vida productiva una vez fuera de la escuela.

## Bibliografía

### ***Referencias históricas***

Se presenta a continuación una serie de referencias, donde se incluyen los trabajos, artículos y libros más relevantes desde el punto de vista histórico de la Ingeniería de Control.

Libros y artículos sobre historia de la Ingeniería de Control:

[Auslander 71] Auslander D.E.: Evolutions in Automatic Control. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. ASME Transactions. Marzo, 1969.

[Alistair 79] Alistair G.J. MacFarlane Editor: Frequency-Response Methods in Control Systems. Editorial IEEE press, New York, 1979.

[Bennett 79] Stuart Bennett: A history of control engineering: 1800-1930. Editorial Peter Peregrinus, Londres 1979.

[Bennett 93] Stuart Bennett: A history of control engineering: 1930-1955. Editorial Peter Peregrinus, Londres 1993.

[Dickinson 27] H. W. Dickinson and R. Jenkins: James Watt and the steam engine. Oxford University Press, 1927.

[Dormido 95b] Sebastián Dormido Bencomo: Control Automático: Evolución Histórica. Curso de Verano de Control de Procesos: de la Teoría a la práctica. Dpto. de Informática y Automática. UNED, Julio, 1995.

[Otto 70] Otto Mayr: The origins of Feedback Control. Editorial M.I.T. Press 1970.

[Standh 89] Sigvard Strandh: The History of the Machine. Bracken Books.1989.

[Thaler 74] George J. Thaler Editor: Automatic control: Classical Linear Theory. Editorial Stroudsburg, Pennsylvania: Dowden, Hutchinson and Ross, cop. 1974.

Aportaciones relevantes en la historia a la teoría y práctica de la Ingeniería de Control:

[Lee 1745] British patent 615, 1745, Edmund Lee: Self-regulating wind machine. Otto Mayr: origins pp 93-99

[Mead 1787] British patent 1628, 1787, Thomas Mead: Regulator for wind and other mills.

[Airy 1840] G. B. Airy: On the regulator of the clockwork for effecting uniform movement of equatoreals. Mem. Roy. Astron. Soc. vol. 11, pp. 249-267, 1840.

[Farcot 1868] British patent 2476, 1868, Joseph Farcot; FARCOT, J.L.L: Le Servo-moteur ou moteur asservi. Baudy, Paris, 1873

[Maxwell 1868] J.C. Maxwell: On Governors. Proc. Roy. Soc. London, vol. 16, pp. 270-283, 1868.

[Vyschne 1876] J. A. Vyschnegradsky. Sur la theorie generale des regulateurs. Comptes Rendus, vol. 83, pp. 318-321, 1876.

[Routh 1877] Routh, E. J.: A treatise on the stability of a given state of motion. Macmillan, London, 1877.

[Hurwitz 1885] A. Hurwitz: Uber die Bedingungen, unter welchen eine Gleichung nur Wurzeln mit negativen reellen Teilen besitzt. Math. Annalen, pp. 273-284, 1885.

[Heaviside 1899] O. Heaviside: Electromagnetic Theory. London, 1899.

[Liapunov 07] A. M. Liapunov: Probleme generale de la stabilite du mouvement. Annales de la Faculte des Sciences de Toulouse, 1907.

[Bompiani 11] Bompiani, E: Sulle condizioni sotto le quali un'equazione a coefficienti reali ammette solo radici con parte reale negativa. Giornale di Matematica, 1911, 49, pp. 33-39.

[Minorsky 22] Minorsky: Directional Stability of Automatic Steered Bodies. J. Am.Soc Naval Eng., 1922, 34, p.284

[Nyquist 32] H. Nyquist: Regeneration theory. Bell Syst. Tech. J., vol. 11, pp. 126-147, 1932.

[Hazen 34] Hazen, H.L.: Theory of Servomechanisms. JFL, 1934, 218, pp. 283-331

[Black 34] H.S. Black: Stabilized feedback amplifiers. Bell Syst. Tech. J., vol. 13, pp. 1-18, 1934.

[Weiss 39] Weiss, H.K.: Constant Speed Control Theory. J. Aeron. Sci, 1939, 6(4), pp. 147-152.

[Bode 40] H. W. Bode: Relations between attenuation and phase in feedback amplifier design. Bell Syst. Tech. J., vol. 19, pp. 421-454, 1940.

[Ziegler 42] J.G. Ziegler, N.B. Nichols: Optimum settings for automatic controllers. ASME, 1942, 64, pp 759-768.

[Harris 42] H.J. Harris: The analysis and design of servomechanisms. OSRD Rep, 454, 1942.

[Willy 44] Willy Ley: Rakete und Raumschiffahrt. Berlin, 1944

- [Brown 46] Brown, G.S., and A.C. Hall: Dynamic Behavior and Design of Servomechanism. ASME, pp. 503-524, 1946.
- [Hall 46] Hall, A.C.: Application of circuit theory to the desing of servomechanism. JFI, 242(4), pp. 279-307, 1946.
- [Harris 46] Harris, H. Jr: The frecuency Response of Automatic Control. AIEE, 65, pp. 539-46, 1946.
- [Evans 48] Evans, W. R.: Graphical Analysis of Control Systems. Trans AIEE, 67, pp. 547-551, 1948.
- [Shanon 48] Shanon, C. E.: The mathematical theory of communication. Bell Syst. Tech. J., 27, Julio y Octubre de 1948.
- [Wiener 48] N. Wiener: Cybernetics. Cambridge, MA, MIT Press, 1948.
- [Wiener 49] N. Wiener: Extrapolation. Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. Cambridge, MA, MIT Press, 1949.
- [Aizermann 49] M. A. Aizermann: On a problem concerning the stability in the large of dynamic systems. Usp. Mat. Nauk. vol. 4, pp. 187-188, 1949.
- [Brown 50] Brown, G.S., Campbell, D.P.: Instrument engineering: its growth and promise in process-control problem. Mechanical Engineering, 72(2): 124, 1950.
- [Evans 50] Evans, W. R.: Control System Synthesis by Root Locus Method. Trans AIEE, 69, pp.1-4, 1950
- [Truxal 54] Truxal, J.G.: Feedback theory and control system synthesis. McGraw Hill, New York, 1954.
- [Bellman 57] R. Bellman: Dynamic Prograrnrning. Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press, 1957.
- [Kalman 58] R. E. Kalman: Design of a self-optimizing control system. Trans. ASME, 80, 468-478, 1958.
- [Whitaker 58] Whitaker H.P, J. Yamron y A. Kezer: Desing of a Model Reference Adaptive System for Aírcraft. R-164, Instrumnetation laboratory, MIT, Cambridge, USA, 1958.
- [Kalman 60] R. E. Kalman: Contributions to the theory of optimal control, Bol. Soc. Math. Mexicana, vol. 5, pp. 102-119, 1960.
- [Kalman 60] R. E. Kalman: On the general theory of control Systems. Proceedings of the First IFAC Confress in Moscow, vol. 1. London: Butterworth, pp. 481-492, 1960.

[Kalman 61] R. E. Kalman and R. S. Bucy: New results in linear filtering and prediction theory. Trans. ASME J. Basic Eng., vol. 83, ser. D, pp. 95-108, 1961.

[Popov 61] V. M. Popov: On the absolute stability of non linear control systems. Avtomat. Telemekh., vol. 22, p. 8, 1961.

[Petri 62] Petri, C. A.: Kommunikation mit Automaten, Universidad de Bonn, 1962.

[Pontryagin 63] L.S. Pontryagin, V.G. Boltyanskii, R.V. Gamkrelidze and Y.F. Mischensko: The Mathematical Theory of Optimal Processes. New York: Interscience, 1963.

[Åström 73] Åström, K.J., B. Wittenmarrk: On Self-Tuning Regulators. Automática, vol 9, pp. 185-189, 1973.

[Parks 76] Parks, P.C.: Model Reference adaptative methods. Redesign using Liapunov's second method. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC-11, pp. 362-367. 1976.

[Landau 79] Landau: Adaptative Control. The model reference approach. Marcel Dekker, 1979

Los siguientes trabajos han sido recogidos en la colección [Thaler 74]:

- Brown, G.S., and A.C. Hall: Dynamic Behavior and Design of Servomechanism. [Brown 46].
- Harris, H. JR: The frequency Response of Automatic Control. [Harris 46].
- Hall, A.C: Application of Circuit Theory to the Design of Servomechanisms. [Hall 46]. Weiss, H.K.: Constant Speed Control Theory. [Weiss 39].

## **OTRAS FUENTES DE INFORMACIÓN**

- 1. Siskilnd, Charles S., Electrical Control Systems in Industry, Ed. McGraw-Hill
- 2. Gary Rockis, Glen Mazur, Electrical Motor Controls, American technical publishers, inc. 2nd. Edition 2001
- 3. Stephen W. Fardo, Dale R. Patrick, Electric Motors and Control Techniques, ISBN: 0070240124
- 4. Square "D", Diagramas de alambrado
- 5. Catálogos de productos eléctricos, Cutler Hammer, Square "D" , Siemens, General Electric, Federal Pacific, entre otros.
- 6. Anderson, Paul T., Protección de motores por medio de relevadores de sobrecarga térmicos, Equipos IEM, S.A. de C.V.
- 7. Norma oficial mexicana NOM-001-SEDE-1999, Instalaciones eléctricas (utilización)
- 8. National electric code
- 9. Roe, Lionel B., Practical Electrical project engineering, Ed. McGraw-Hill
- 10. Brighton, Robert J. Renade, Prashant N., Why overloads relays do not always project motors, U.S.A. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 1A-18, No 6 Nov./Dic. 1982

- 11. Miller Master, Electrical control motor
- 12. R. Boylestad & L. Nashelsky, Electrónica: teoría de circuitos, Ed. Prentice-Hall, 5ª. Edición 1994
- 13. Muhammad H. Rashid, Electrónica de potencia, Ed. Prentice-Hall
- 14. D.A. Gualda, Electrónica industrial, Ed. Alfa Omega
- 15. Maloney Timothy J., Electrónica industrial: dispositivos y sistemas, Ed. Prentice-Hall
- 16. PSPICE, Microsim Corporación, Versión estudiantil de la 5.0 en adelante Spectrum Software, 1995
- 17. Electrical Wire Handbook, The Wire Association International paginas de 125 hasta 127.
- 18. Practical Extrusion Blow Molding, author Samuel L. Belcher Ed. Marcel Dekker, Inc. Amazon.com
- 19. Procesamiento de plásticos. Morton. Jones. Limusa 1999. ISBN 968-18-4434-3
- 20. Extrusión de plásticos, principios básicos. Ramos. Editorial Limusa 2002. ISBN 968-18-4504-8
- 21. Moldeo por inyección de termoplásticos. Valdés, S. Flores, Y. Fernández, R. Limusa 2003. ISBN 968-18-5581-7
- 22. Bird, R.B, Stewart, W.E, Lightfoot. Fenómenos de transporte. Reverte, 1996. ISBN 842-91-7050-2

## Mesografía

- <http://es.mobile.wikipedia.org/transcode.php?go=Contactor&chapter=Clasificaci%C3%B...> 12/10/08
- [http://www.ptonline.com/articles/article\\_print1.cfm](http://www.ptonline.com/articles/article_print1.cfm) 09/10/2008
- The American Plastics Council (APC) figures North American HDPE consumption in 2004 at 15.264 billion lb, making it the second-largest volume commodity thermoplastic after PP
- <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Clasificacion-transductores-segun-variable-fisic...> 02/10/2008
- <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/El-rele.html> 02/10/2008
- [http://www.ptonline.com/articles/article\\_print1.cfm](http://www.ptonline.com/articles/article_print1.cfm) 09/10/2008
- <http://www.monografias.com>
- <http://plastics.turkavkaz.ru/processes/molding/blow-molding/> 15/09/2008
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Husillo\\_de\\_extrusi%C3%B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Husillo_de_extrusi%C3%B3n) 18/01/2009
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Extrusi%C3%B3n\\_de\\_pol%C3%ADmero"](http://es.wikipedia.org/wiki/Extrusi%C3%B3n_de_pol%C3%ADmero)  
Categoría: Ingeniería de polímeros
- [http://www.unicrom.com/Tut\\_ProgramarPLC.asp](http://www.unicrom.com/Tut_ProgramarPLC.asp) 08/02/2009
- [http://www.andrebarbosa.eti.br/SimuPLC\\_Eng](http://www.andrebarbosa.eti.br/SimuPLC_Eng) 08/02/2009