



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

RECONSTRUCCION DE UNA MAQUINA DE LABORATORIO PARA VERIFICACION DE RUEDAS FULLFACE.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE INGENIERO ELECTRICO ELECTRONICO AREA ELECTRICA

INGENIERO EN COMPUTACION PRESENTAN

ROBERTO YAMIL FARJAT ESQUIVEL / MIGUEL ANGEL FERNANDEZ CALDERON



DIRECTOR DE TESIS:  
ING. ENRIQUE R. GOMEZ ROSAS

MEXICO, D. F.

2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

## **AGRADECIMIENTOS**

**De Yamil:**

**A mis padres:**

*Porque gracias a su apoyo y consejo he llegado a realizar la más grande de mis metas. La cual constituye la herencia más valiosa que pudiera recibir, y que siempre les agradeceré pues con ello podré enfrentarme a la vida y salir adelante*

**A mis hermanos:**

*Gracias por siempre motivarme a seguir adelante y por ayudarme en esos momentos de agotamiento y cansancio cuando creía ya no poder más, siempre estuvieron junto a mí.*

**A la familia Fernández Calderón:**

*Por motivarme a continuar y estar al pendiente de los avances y retrasos al realizar esta tesis.*

**A Miguel:**

*Contigo pase una parte muy importante de mi vida así que gracias por ese apoyo.*

**A Pilar:**

*Gracias a que me motivaste con tu ejemplo, y estuviste dispuesta a seguir ayudando.*

**A Eduardo:**

*Gracias por orientarme en esos momentos de desconcierto además por brindarme tu apoyo e interés porque esta tesis fuera una realidad.*

**Al Ing. Rodolfo Peters Lammel:**

*Gracias a la oportunidad que me brindo de ser su amigo así como para ingresar al instituto de ingeniería, ya que de no ser así esta tesis no existiría.*

**Al Ing. Enrique Gómez:**

*Gracias a que me brindo su amistad y me guió en la elaboración de esta tesis.*

**A todos los del Instituto de Ingeniería:**

*Gracias por haberme hecho sentir parte de esa gran familia.*

*Todos aquellos que de alguna forma me ayudaron les agradezco su apoyo*

## AGRADECIMIENTOS

De Miguel:

*A MI PAPA: Porque ere uno de los dos tesoros más grandes de mi corazón, porque mis éxitos son tus éxitos, porque siempre has sido y serás lo más valioso en mi vida; porque juntos hemos luchado por lo que hoy concluimos, por creer en mi a todo momento, por confiar y comprenderme como padre y como amigo, por la admiración que te tengo, el respeto y el cariño que te mereces, por eso y muchas otras cosas que no terminaría de decir, te dedico esta primera de muchas conquistas juntos, este es tu titulo porque tengo tu nombre y tu cariño. TE AMO*

*A MI MAMA: Porque eres uno de los dos tesoros que hacen a mi corazón completo, porque mis éxitos también son tuyos, porque siempre has sido y serás lo que más amo en la vida, por darme la vida, por estar con migo en mis alegrías y mis tristezas, por la admiración que te tengo como madre, mujer y profesionalista, y es que hablar de ti, es hablar de amor y ternura; porque tu sola presencia me hace sentir feliz y contento, no existen palabras para terminar de agradecerte lo que hoy soy, por eso te dedico uno de tantos triunfos que también son tuyos. TE AMO*

*A MI HERMANA CARMEN: Por el cariño y la admiración que te tengo como hermana y como profesionalista, al igual que me has brindado todo tu apoyo, y por demostrarme que en la vida todo se puede lograr con dedicación y esfuerzo. TQM*

*A MI HERMANO RICARDO: Por compartir mis triunfos y fracasos durante nuestra infancia y parte de nuestra adolescencia, por todo el cariño que me has dado, y toda la admiración que te tengo. TQM*

*A MI HERMANO FRANCISCO: Por el apoyo y cariño que siempre me ha brindado, pero sobre todo por enseñarme a crecer como persona y saberme escuchar en los momentos difíciles. TQM*

*A MI HERMANA MONICA: Por el cariño que me has dado, y por creer en mi a todo momento, al igual que me has dado tu apoyo y comprensión. TQM*

*A MIS SOBRINOS VANIA, ANDREA Y RICARDO: Por todo el cariño que me han dado, y por ser una motivación muy importante en mi vida ya que ustedes forman una parte muy importante dentro de mi vida y de mi corazón. LOS QUIERO MUCHO.*

*A MI CUÑADO LALO: Por el cariño y el apoyo que me has brindado, pero sobre todo por ser la persona que admiro como profesionalista, y demostrarme que las cosas se pueden hacer cuando uno lo quiere, al igual que eres para mí como una meta a seguir. TQ1CH.*

*A MI CUÑADA GABY: Por el cariño y el apoyo que me has dado, pero sobre todo por estar a mi lado en los momentos más difíciles de mi prepa, ayudándome y enseñándome que con dedicación y esfuerzo todo se puede lograr. TQM*

*A MI CUÑADO RIAT: Por el cariño que me ofreces y por venir a dar felicidad a una de las personas que más admiro y quiero.*

*A MIS AMIGOS DAVID Y DANIEL: Por estar conmigo en las buenas y en las malas, por compartir parte de mis triunfos y parte de mis fracasos, pero sobre todo por darme lo más importante, SU AMISTAD.*

*A MI AMIGO YAMIL: Por estar conmigo en las buenas y en las malas, por acompañarme durante 6 años de tu vida a cruzar esta aventura que se llama ingeniería, por ser el mejor compañero y el mejor amigo, mil gracias por estar conmigo hasta el final y recuerda FOREVER FREENDS.*

*A MI AMIGO JUAN Y SU FAMILIA: Por el cariño ofrecido pero sobre todo por estar conmigo, apoyarme y ayudarme cuando lo necesitaba, gracias por creer en mi.*

*AL ING. ENRIQUE GOMEZ: Por enseñarme a querer a mi carrera, enseñarme a trabajar con dedicación y seriedad, pero sobre todo por el apoyo que nos dio en la realización de esta tesis y por trasmitirnos todos sus conocimientos y experiencia.*

*AL ING. RODOLFO PETERS: Por toda la confianza demostrada, por el infinito apoyo y por trasmitirnos todos sus conocimientos, pero sobre todo por su gran amistad.*

*A LA UNAM: porque a pesar de ser la mas criticada, la mas lastimada, eres la más grandiosa y magnánima, gracias por abrirme tus puertas, gracias por darme lo que muchos, muchos envidian; una educación integral.*

# CONTENIDO

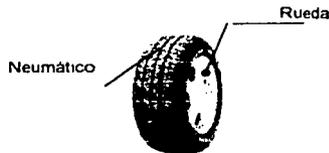
|            |   |    |
|------------|---|----|
| CAPÍTULO 1 | INTRODUCCIÓN.....                               | 7  |
| CAPÍTULO 2 | OBJETIVO.....                                   | 9  |
| CAPÍTULO 3 | VARIABLES DE INTERÉS A MEDIR:                   |    |
|            | 3.1 MÉTODOS DE MEDICIÓN DE UNA RUEDA.....       | 11 |
|            | 3.2 MÉTODOS DE CÁLCULOS NUMÉRICOS.....          | 12 |
| CAPÍTULO 4 | DISPOSITIVOS A USARSE:                          |    |
|            | 4.1 SENSORES DE DESPLAZAMIENTO LINEAL.....      | 23 |
|            | 4.1.1 LVDT .....                                | 23 |
|            | 4.1.2 DCDT S.....                               | 24 |
|            | 4.1.3 POTENCIÓMETROS LINEALES.....              | 25 |
|            | 4.1.4 SENSORES DE DESPLAZAMIENTO INDUCTIVO..... | 26 |
|            | 4.2 SENSORES DE DESPLAZAMIENTO ANGULAR.....     | 26 |
|            | 4.2.1 ÓPTICOS.....                              | 26 |
|            | 4.2.2 MAGNÉTICOS.....                           | 31 |
|            | 4.2.3 POTENCIOMÉTRICOS.....                     | 33 |
|            | 4.3 SENSORES DE LIMITE DE CARRERA.....          | 35 |
|            | 4.3.1 MECÁNICOS.....                            | 35 |
|            | 4.3.2 INDUCTIVOS.....                           | 36 |
|            | 4.3.3 ÓPTICOS.....                              | 38 |

|            |   |    |
|------------|---|----|
| 4.4        | DISPOSITIVOS DE CONVERSIÓN ANALÓGICO DIGITAL Y DIGITAL ANALÓGICO..... | 39 |
| 4.5        | DISPOSITIVOS DE ENTRADA Y SALIDA DIGITALES.....                       | 45 |
| 4.6        | ACTUADORES NEUMÁTICOS.....  | 51 |
| CAPÍTULO 5 |   |    |
|            | LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN.....  | 54 |
| CAPÍTULO 6 |   |    |
|            | IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO:  |    |
| 6.1        | CONSTRUCCIÓN DE TARJETAS ANALÓGICAS Y DIGITALES....                   | 58 |
| 6.2        | OPERACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LOS ENCODERS.....                       | 59 |
| 6.3        | PROGRAMA .....  | 60 |
|            | 6.3.1 MÓDULO DE CALIBRACIÓN.....                                      | 61 |
|            | 6.3.2 MÓDULO DE OPERACIÓN.....  | 64 |
|            | 6.3.3 MÓDULO DE USUARIOS.....   | 71 |
| 6.4        | PRUEBAS DEL SISTEMA.....  | 73 |
| CAPÍTULO 7 |   |    |
|            | CONCLUSIONES.....   | 75 |
| CAPÍTULO 8 |   |    |
|            | BIBLIOGRAFÍA.....   | 76 |

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN.

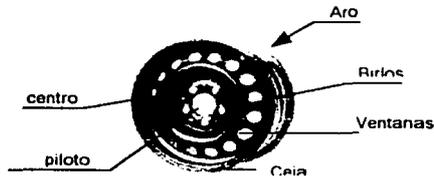
La industria automotriz, está formada por varias ramas, una de éstas es la fabricación de ruedas. La rueda es una pieza muy importante para el automóvil. Se pueden definir dos tipos, según su construcción, ruedas de radios y ruedas de disco. Éstas pueden estar hechas de acero o de aleaciones de materiales ligeros; La rueda junto con el neumático constituyen el apoyo para el automóvil, ya que soporta al mismo tanto estática como dinámicamente.



**HAYES WHEELS ACERO S.A. de C.V.**, es una empresa que se dedica a la fabricación de ruedas. En el caso de la planta situada en Naucalpan se fabrican ruedas de acero, en las cuales el proceso consiste de varias etapas, sin embargo el aro y el centro son elaborados paralelamente.

En la fabricación del centro, se hace pasar una lámina de acero por siete prensas que le dan la forma a éste. En la primera prensa se hace el **Corte** que consiste en dar la concavidad que llevará el centro y las pestañas que se soldarán en el aro, en la segunda prensa se realiza el **Preformado**, que consiste en marcar el lugar donde irán las perforaciones de los **birlos** y se va detallando la concavidad del centro, en la tercera prensa se hace el **Formado total** el cual consiste en doblar las pestañas que se soldarán en el aro, en la cuarta prensa se realiza el **Corte de Cejas** que, como lo dice su nombre, las recorta para que, al ser unidas con el aro, embonen correctamente. En la quinta Prensa se procede al **Marcado de las ventanas** en donde se perforan las mismas que permiten la ventilación. En la sexta prensa se hace el **Formado del piloto** y en la séptima prensa se realiza la **Perforación de birlos** y el **Marcaje de sellos** que indican el tipo de producto, para quien se produce y la fecha de producción.

El primer paso en la fabricación del aro consiste en desenrollar los carretes de lámina de acero en la máquina **desenrolladora**. Posteriormente pasa al **cortador** en donde se determina el largo de la lámina y en consecuencia el diámetro de la rueda. De ahí sigue a los rodillos que le dan la forma de aro, continuando con la máquina de **soldadura a tope** que es la que une los extremos del mismo, y para darle la forma final al aro y terminarlo se pasa por varias etapas en máquinas de **Rolado**.



En otra área que se llama de ensamble se une el centro con el aro. Este ensamble se realiza por dos formas, por Unión de puntos y por Cordón. Posteriormente que se han ensamblado las partes que componen la rueda tiene que pasar a un control de calidad el cual es realizado por una máquina de evaluación de uniformidad, que es utilizada para controlar los parámetros dimensionales de las ruedas producidas

El tipo de rueda que se evaluará es **fullface** el cual tiene la característica de que el centro es parte integral de una ceja.

Así pues la máquina además de evaluar la rueda con respecto al centro del mismo también la evaluará con respecto a los orificios donde se ubicarán los **birlos**, esto con el objetivo de evaluar el aro, el centro y el ensamble. Al evaluar estos tres puntos se obtiene más información a fin de conocer los puntos críticos del proceso.

Teniendo en cuenta que por las características propias del sistema de medición y de adquisición de datos usado no era posible realizar los análisis requeridos por la empresa además de que la computadora que utilizaba era ya obsoleta y a fin de garantizar los parámetros que solicitan las industrias automotrices, es que se decidió la RECONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA DE LABORATORIO PARA VERIFICACIÓN DE RUEDAS FULLFACE (INFAS) DE HAYES WHEELS. ACERO. Por estos inconvenientes y aprovechando los avances tecnológicos en la medición y la adquisición de datos así como en el manejo de los mismos, se decidió implementar en lugar del sistema anterior uno nuevo que lo sustituyera. Este es el tema que trata esta tesis. Así mismo es importante hacer notar que algunos términos usados estarán en español y otros en inglés debido a que es la forma en que se conocen comercialmente.

En este capítulo se menciona la necesidad de la máquina (INFAS), así como la importancia en reconstruirla; en el siguiente capítulo se explicara el objetivo de esta tesis, que nos dirá a grandes rasgos como es que se realizó esta reconstrucción.

# CAPÍTULO II

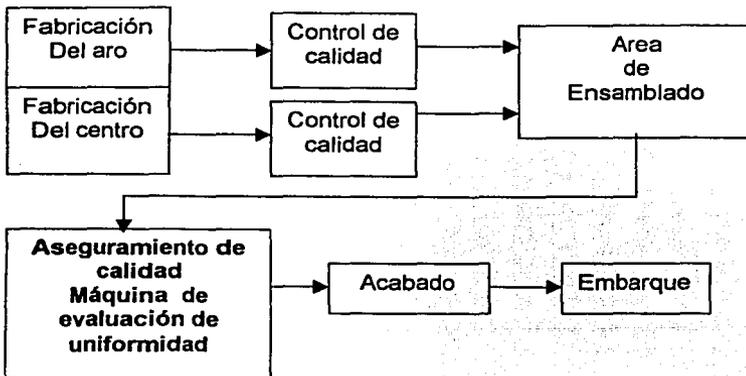
## OBJETIVO.

El objetivo de esta tesis es mostrar como se realizó la reconstrucción de la máquina de evaluación de uniformidad INFAS. Primeramente se revisó el equipo a fin de determinar qué partes eran necesarias de reconstruir y comprobar qué elementos (neumáticos, mecánicos y eléctricos) eran adecuados. Una vez finalizada esta tarea se procedió con el trabajo propiamente de reconstrucción, incorporando el equipo adicional de posicionamiento y de adquisición de datos.

Una vez realizadas estas tareas, la máquina estuvo en capacidad de evaluar la variación radial y axial en una rueda *Fullface* con respecto a *birlos* y/o *piloto*, calculando hasta la octava armónica.

Esta máquina al evaluar la variación radial y axial con respecto a *birlos* y *piloto* puede calcular la excentricidad, que es un parámetro el cual nos permite conocer cómo es nuestro proceso. Si la evaluación con respecto a *birlos* es parecida a la realizada con respecto a *piloto* significa que el proceso de ensamblado es correcto, pero si es diferente el proceso de ensamblado es erróneo.

La máquina de evaluación de uniformidad permitirá evaluar las ruedas producidas, con lo cual la empresa puede asegurar su calidad y también detectar si existen fallas en el proceso de producción. Y sobre las variables y métodos de medición para evaluar las ruedas, es que hablaremos en el siguiente capítulo.



# **CAPÍTULO III**

## **VARIABLES DE INTERES A MEDIR**

### **¿Por qué Medir?**

Actualmente cualquier fabricante debe mantener sus productos dentro de ciertos estándares, asegurando que la calidad siempre sea la misma, ya que de esta forma será predecible la vida y la falla del producto.

Para determinar la calidad del producto se deben realizar una serie de inspecciones al mismo, es decir, se deben medir los parámetros importantes del producto, ya sea al 100% o de una muestra representativa. Los resultados arrojados en las mediciones nos permiten realizar un control de la producción, y con una correcta interpretación, se pueden determinar los puntos débiles del proceso. La información permite al responsable tomar decisiones y conocer los errores del proceso así como determinar cuales son las variables que afectan la producción y que peso tiene cada una de ellas en el proceso.

Es muy importante que las mediciones realizadas sean reales y sobre todo repetitivas, por lo que un sistema de control de calidad requiere de un estudio de los métodos de medición y el control.

La medición y el control automáticos pueden ser parciales, totales o de alguna extensión intermedia. El control comprende siempre un valor preestablecido o predeterminado llamado punto fijo o de ajuste. El sistema (no se entienda como una máquina) se diseña para medir y controlar económicamente cualquier desviación de la variable de control, de manera que se mantenga el valor dentro los límites escogidos con el objeto de producir un artículo de calidad.

Normalmente la variable a controlar tendrá un error, pero siempre y cuando esté en un rango permisible, el control no alterará el proceso. Si no es así, el control indicará que el error está fuera de los parámetros, y realizará una corrección.

La corrección se logra mediante alguna forma de retroalimentación, anticipación o alimentación directa. La precisión necesaria en el control del sistema, al igual que la velocidad de respuesta para la acción correctiva, en una aplicación particular, determinan tanto el tipo del sistema como su costo.

En esta tesis nos enfocaremos en las siguientes variables que son las que le interesan medir a la empresa a fin de que se pueda validar la calidad del producto, siendo:

#### Variables de Medición Directa.

- Variación Radial Anterior
- Variación Radial Posterior
- Variación Axial Anterior
- Variación Axial Posterior

#### Variables de Medición Indirecta.

- Armónicas
- Concentricidad

La variación radial y axial tanto anterior como posterior y las variables obtenidas por medición indirecta, sirven para determinar si la rueda cumple o no con los estándares preestablecidos. El que cualquiera de las variables no esté en rango, provoca fallas consistentes en vibración, desgaste en el dibujo del neumático, deformación del mismo o desgaste irregular en la suspensión o en la dirección.

### 3.1. - MÉTODOS DE MEDICIÓN DE UNA RUEDA.

El proceso de medición implica la comparación de alguna magnitud con respecto a otra en forma directa, por ejemplo, al medir distancia es posible comparar directamente la distancia con una regla métrica estándar, o también se puede realizar en forma indirecta, por ejemplo la medición de un área, la cual se calcula por modelo matemático.

Para nuestros fines resulta conveniente mencionar que la evaluación se realiza en forma directa e indirecta, ya sea el proceso de medición manual o automática.

Si la medición es manual esta se puede realizar con respecto a **birlos** o **piloto** utilizando el **longímetro** o el **micrómetro**. Si la medición es con respecto a piloto empleando el **longímetro** se tendría que ubicar el centro del piloto con un punto imaginario y medir desde ahí el radio de la rueda repitiendo este proceso punto a punto. Si la medición se realizara con respecto a **birlos** habría que ubicar el centro de cada **birlo** con un punto imaginario y medir desde ahí la distancia al

aro repitiendo la operación punto a punto. Al utilizar el **micrómetro** el proceso de medición ya sea con respecto a **birlos** o **piloto** es el mismo, pues solo cambia el sistema de sujeción y consiste en ubicar el **micrómetro** perpendicularmente en el aro o paralelamente al aro en la ceja para medir las variaciones radiales y axiales tanto anterior como posterior respectivamente

Si la medición es automática, se utilizará la máquina que se ha construido con ese fin (Máquina de evaluación de uniformidad **INFAS**) la cual realiza una evaluación de la rueda con respecto a **birlos** o **piloto** dependiendo del sistema de sujeción que se utilice. Si ésta se realiza con respecto a **birlos**, lo que se mide es la excentricidad de los **birlos** con respecto al aro y para ello se usan las rodajas que se encuentran acopladas mecánicamente a los sensores de entrada. Si la medición se realiza con respecto a **piloto** lo que se medirá será la excentricidad del **piloto** con respecto al aro utilizándose también las rodajas; obteniéndose las variaciones radial y axial tanto anterior como posterior en ambos casos.

### 3.2. - MÉTODOS DE CÁLCULOS NUMÉRICOS.

Una rueda al ser medida radialmente puede presentar cuatro casos:

**CASO 1.** Que la rueda sea un círculo perfecto y que esté perfectamente centrada sin importar el sistema de sujeción (caso ideal).

**CASO 2.** La rueda sigue siendo un círculo perfecto pero se encuentra descentrada.

**CASO 3.** La rueda se considera ahora una elipse que se encuentra centrada.

**CASO 4.** Este caso es el más real ya que la rueda se considera una elipse que se encuentra descentrada

Para el análisis matemático de los cuatro casos que se presentan, la ecuación de la elipse cumple con las cuatro posibilidades, ya que al considerar iguales los ejes "a" y "b" lo que obtenemos, es la ecuación de la circunferencia, con un radio "a" en el caso que este centrada, si es el caso que esté descentrada, lo único que se adiciona son las coordenadas del centro con respecto al punto de referencia; las ecuaciones deben estar en coordenadas polares, ya que la forma en que se realiza la evaluación de la rueda, es girando, y es necesario encontrar la ecuación en términos del radio y el ángulo con respecto al punto de referencia, pues a esta ecuación se le aplicará la transformada rápida de *Fourier*, a fin de obtener las armónicas, ya que la primer armónica nos representa la excentricidad, y la segunda armónica nos representa lo ovalada que se encuentre la rueda, por lo que a continuación se encontrarán las ecuaciones en términos del radio y el ángulo con respecto al punto de referencia, para los cuatro casos.

### ***Ecuación de la elipse centrada***

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

### ***Ecuación de la elipse descentrada***

$$\frac{(x - x_0)^2}{a^2} + \frac{(y - y_0)^2}{b^2} = 1$$

### ***Cambio de coordenadas cartesianas a polares***

$$x = \rho \cos \theta \quad y = \rho \operatorname{sen} \theta$$

$\rho$  = radio

$\theta$  = Angulo (Ubicación del radio medido con respecto al punto de referencia)

$$x_0 = \rho_0 \cos \phi \quad y_0 = \rho_0 \operatorname{sen} \phi$$

$\rho_0$  = Distancia de descentrado con respecto al punto de referencia

$\phi$  = Angulo de corrimiento con respecto al punto de referencia

$$x - x_0 = \rho \cos \theta - \rho_0 \cos \phi$$

$$y - y_0 = \rho \operatorname{sen} \theta - \rho_0 \operatorname{sen} \phi$$

### ***SUSTITUCIÓN***

$$\frac{(\rho \cos \theta - \rho_0 \cos \phi)^2}{a^2} + \frac{(\rho \operatorname{sen} \theta - \rho_0 \operatorname{sen} \phi)^2}{b^2} = 1$$

$$\frac{\rho^2 \cos^2 \theta - 2\rho\rho_0 \cos \theta \cos \phi + \rho_0^2 \cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\rho^2 \operatorname{sen}^2 \theta - 2\rho\rho_0 \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi + \rho_0^2 \operatorname{sen}^2 \phi}{b^2} = 1$$

***Encontrar ecuación  $\rho(\theta)$***

$$\frac{\rho^2 \cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\rho^2 \sin^2 \theta}{b^2} - 2\rho\rho_0 \left[ \frac{\cos \theta \cos \phi}{a^2} + \frac{\sin \theta \sin \phi}{b^2} \right] + \rho_0^2 \left[ \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\sin^2 \phi}{b^2} \right] = 1$$

$$\rho^2 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right] - 2\rho\rho_0 \left[ \frac{\cos \theta \cos \phi}{a^2} + \frac{\sin \theta \sin \phi}{b^2} \right] + \rho_0^2 \left[ \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\sin^2 \phi}{b^2} \right] - 1 = 0$$

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$a = \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2}$$

$$b = -2\rho_0 \left[ \frac{\cos \theta \cos \phi}{a^2} + \frac{\sin \theta \sin \phi}{b^2} \right]$$

$$c = \rho_0^2 \left[ \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\sin^2 \phi}{b^2} \right] - 1$$

### CASO 1 Circunferencia Centrada

$$a=b \quad x_0 = y_0 = 0$$

### CASO 2 Circunferencia Descentrada

$$a=b \quad x_0 \neq y_0 \neq 0$$

### CASO 3 Elipse centrada

$$a \neq b \quad x_0 = y_0 = 0$$

### CASO 4 Elipse Descentrada

$$a \neq b \quad x_0 \neq y_0 \neq 0$$

*Sustitución para resolver ecuaciones de 2° grado*

$$-b = 2\rho_0 \left[ \frac{\cos \theta \cos \phi}{a^2} + \frac{\sin \theta \sin \phi}{b^2} \right]$$

$$b^2 = 4\rho_0^2 \left[ \frac{\cos \theta \cos \phi}{a^2} + \frac{\sin \theta \sin \phi}{b^2} \right]^2$$

$$4ac = 4 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right] \left[ \rho_0^2 \left( \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\sin^2 \phi}{b^2} \right) - 1 \right]$$

$$2a = 2 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right]$$

*Desarrollo*

$$b^2 = 4\rho_0^2 \left[ \frac{\cos^2 \theta \cos^2 \phi}{a^4} + 2 \frac{\cos \theta \text{sen} \theta \cos \phi \text{sen} \phi}{a^2 b^2} + \frac{\text{sen}^2 \theta \text{sen}^2 \phi}{b^4} \right]$$

$$b^2 = 4\rho_0^2 \left[ b^4 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + 2a^2 b^2 \cos \theta \text{sen} \theta \cos \phi \text{sen} \phi + a^4 \text{sen}^2 \theta \text{sen}^2 \phi \right]$$

$$4ac = 4\rho_0^2 \frac{\cos^2 \theta}{a^2} \left[ \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\text{sen}^2 \phi}{b^2} \right] - 4 \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + 4\rho_0^2 \frac{\text{sen}^2 \theta}{b^2} \left[ \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\text{sen}^2 \phi}{b^2} \right] - 4 \frac{\text{sen}^2 \theta}{b^2}$$

$$4ac = 4 \frac{\cos^2 \theta}{a^2} \left[ \rho_0^2 \left( \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\text{sen}^2 \phi}{b^2} \right) - 1 \right] + 4 \frac{\text{sen}^2 \theta}{b^2} \left[ \rho_0^2 \left( \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\text{sen}^2 \phi}{b^2} \right) - 1 \right]$$

$$4ac = \rho_0^2 \left[ \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\text{sen}^2 \phi}{b^2} \right] \left[ 4 \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + 4 \frac{\text{sen}^2 \theta}{b^2} \right] - \left[ 4 \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + 4 \frac{\text{sen}^2 \theta}{b^2} \right]$$

*Caso 1*

$$a = b$$

$$x_0 = y_0 = 0 \Rightarrow \rho_0 \cos \phi = \rho_0 \text{sen} \phi = 0$$

$$-b = 2\rho_0 \left( \frac{\cos \theta \cos \phi}{a^2} + \frac{\text{sen} \theta \text{sen} \phi}{b^2} \right)$$

$$-b = \frac{2\rho_0 \cos \phi \cos \theta}{a^2} + \frac{2\rho_0 \text{sen} \phi \text{sen} \theta}{b^2} = 0 \Rightarrow b^2 = 0$$

$$4ac = \rho_0^2 \left[ \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\text{sen}^2 \phi}{b^2} \right] \left[ 4 \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + 4 \frac{\text{sen}^2 \theta}{b^2} \right] - \left[ 4 \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + 4 \frac{\text{sen}^2 \theta}{b^2} \right]$$

*sustituyendo*

$$\rho_0 \cos \phi = \rho_0 \text{sen} \phi = 0$$

$$-4ac = \frac{4 \cos^2 \theta}{a^2} + \frac{4 \text{sen}^2 \theta}{b^2} = 4 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\text{sen}^2 \theta}{b^2} \right]$$

$$a = b$$

**SUSTITUCIÓN**  $\cos^2 \theta + \text{sen}^2 \theta = 1$

$$-4ac = 4 \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + 4 \frac{\text{sen}^2 \theta}{b^2} = 4 \left[ \frac{\cos^2 \theta + \text{sen}^2 \theta}{a^2} \right] = \frac{4}{a^2}$$

$$2a = 2 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\text{sen}^2 \theta}{b^2} \right] = 2 \left[ \frac{\cos^2 \theta + \text{sen}^2 \theta}{a^2} \right] = \frac{2}{a^2}$$

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{0 \pm \sqrt{0 + \frac{4}{a^2}}}{\frac{2}{a^2}} = \pm \frac{\frac{2}{a}}{\frac{2}{a^2}} = \pm \frac{2a^2}{2a} = \pm a$$

$$\rho(\theta) = \pm a \text{ ó } \pm b; a = b$$

Caso 2

$$a = b$$

$$x_0 \neq y_0 \neq 0$$

$$-b = 2\rho_0 \left( \frac{\cos\theta \cos\phi}{a^2} + \frac{\text{sen}\theta \text{sen}\phi}{b^2} \right)$$

$$-b = \frac{\rho_0 \cos\phi 2 \cos\theta}{a^2} + \frac{\rho_0 \text{sen}\phi 2 \text{sen}\theta}{b^2}$$

$$-b = \frac{\rho_0 \cos\phi 2 \cos\theta + \rho_0 \text{sen}\phi 2 \text{sen}\theta}{a^2}$$

$$-b = 2\rho_0 \left( \frac{\cos\phi \cos\theta + \text{sen}\phi \text{sen}\theta}{a^2} \right)$$

**Aplicando identidad trigonométrica**

$$-b = 2\rho_0 \left( \frac{\frac{1}{2} \cos(\phi + \theta) + \frac{1}{2} \cos(\phi - \theta) + \frac{1}{2} \cos(\phi - \theta) - \frac{1}{2} \cos(\phi + \theta)}{a^2} \right)$$

$$-b = 2\rho_0 \left( \frac{\cos(\phi - \theta)}{a^2} \right)$$

$$b^2 = 4\rho_0 \frac{\cos^2(\phi - \theta)}{a^2}$$

$$4ac = \rho_0^2 \left( \frac{\cos^2 \phi + \text{sen}^2 \phi}{a^2} \right) \left[ 4 \left( \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\text{sen}^2 \theta}{a^2} \right) \right] - \left[ 4 \left( \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\text{sen}^2 \theta}{a^2} \right) \right]$$

**Aplicando identidad trigonométrica**

$$\cos^2 x + \text{sen}^2 x = 1$$

$$-4ac = -\frac{\rho_0^2}{a^2} \left[ \frac{4}{a^2} \right] + \left[ \frac{4}{a^2} \right] = \frac{4}{a^2} - \frac{4\rho_0^2}{a^4} = \frac{4}{a^2} \left( 1 - \frac{\rho_0^2}{a^2} \right) = \frac{4}{a^2} \left( \frac{a^2 - \rho_0^2}{a^2} \right)$$

$$2a = \frac{2}{a^2}$$

sustituyendo y resolviendo

$$\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{2\rho_0 \left( \frac{\cos(\phi - \theta)}{a^2} \right) \pm \sqrt{\frac{4\rho_0^2 \cos(\phi - \theta)}{a^4} + \frac{4}{a^2} \left( \frac{a^2 - \rho_0^2}{a^2} \right)}}{\frac{2}{a^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{4\rho_0^2 \cos(\phi - \theta)}{a^4} + \frac{4a^2 - 4\rho_0^2}{a^4}} = \sqrt{\frac{4\rho_0^2 \cos(\phi - \theta) - 4a^2 - 4\rho_0^2}{a^4}}$$

$$= \sqrt{\frac{4\rho_0^2 [\cos(\phi - \theta) - 1] + 4a^2}{a^4}} = \sqrt{\frac{4\rho_0^2 [\cos(\phi - \theta) - 1] + 4a^2}{a^2}}$$

$$\rho(\theta) = \frac{2\rho_0 \cos(\phi - \theta)}{a^2} \pm \frac{\sqrt{4\rho_0^2 [\cos(\phi - \theta) - 1] + 4a^2}}{a^2} = \frac{2\rho_0 \cos(\phi - \theta) \pm \sqrt{4\rho_0^2 [\cos(\phi - \theta) - 1] + 4a^2}}{\frac{2}{a^2}}$$

$$\rho(\theta) = \frac{2a^2 \rho_0 \cos(\phi - \theta) \pm a^2 \sqrt{4\rho_0^2 [\cos(\phi - \theta) - 1] + 4a^2}}{2a^2} = \frac{2\rho_0 \cos(\phi - \theta) \pm \sqrt{4\rho_0^2 [\cos(\phi - \theta) - 1] + 4a^2}}{2}$$

$$\rho(\theta) = \rho_0 \cos(\phi - \theta) \pm \sqrt{\rho_0^2 [\cos(\phi - \theta) - 1] + a^2}$$

Caso 3

$$a \neq b \quad x_0 = y_0 = 0 \quad \rho_0 \cos \phi = \rho_0 \operatorname{sen} \phi = 0$$

$$-b = 2\rho_0 \left( \frac{\cos \phi \cos \theta}{a^2} + \frac{\operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \theta}{b^2} \right) = \frac{\rho_0 \cos \phi 2 \cos \theta}{a^2} + \frac{\rho_0 \operatorname{sen} \phi 2 \operatorname{sen} \theta}{b^2} = 0$$

$$b^2 = 0$$

$$4ac = \frac{(\rho_0 \cos \phi)^2}{a^2} + \frac{(\rho_0 \operatorname{sen} \phi)^2}{b^2} \left[ \frac{4 \cos^2 \theta}{a^2} + \frac{4 \operatorname{sen}^2 \theta}{b^2} \right] - \left[ \frac{4 \cos^2 \theta}{a^2} + \frac{4 \operatorname{sen}^2 \theta}{b^2} \right]$$

sustituyendo

$$\rho_0 \cos \phi = \rho_0 \operatorname{sen} \phi = 0$$

$$-4ac = \frac{4 \cos^2 \theta}{a^2} + \frac{4 \operatorname{sen}^2 \theta}{b^2} = 4 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{b^2} \right]$$

$$2a = 2 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{b^2} \right]$$

$$\rho(\theta) = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{0 \pm \sqrt{0 + 4 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{b^2} \right]}}{2 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{b^2} \right]} = \frac{\sqrt{\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{b^2}}}{\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{b^2}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{b^2}}}$$

Caso 4

$$a \neq b \quad x_0 \neq y_0 \neq 0$$

$$-b = 2\rho_0 \left[ \frac{\cos \theta \cos \phi}{a^2} + \frac{\operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi}{b^2} \right] = 2\rho_0 \left[ \frac{\frac{1}{2} \cos(\phi + \theta) + \frac{1}{2} \cos(\phi - \theta)}{a^2} + \frac{\frac{1}{2} \cos(\phi - \theta) - \frac{1}{2} \cos(\phi + \theta)}{b^2} \right]$$

$$-b = 2\rho_0 \left[ \frac{b^2 \frac{1}{2} \cos(\phi + \theta) + b^2 \frac{1}{2} \cos(\phi - \theta) + a^2 \frac{1}{2} \cos(\phi - \theta) - a^2 \frac{1}{2} \cos(\phi + \theta)}{a^2 b^2} \right]$$

$$-b = 2\rho_0 \left[ \frac{(b^2 - a^2) \frac{1}{2} \cos(\phi + \theta) + (b^2 + a^2) \frac{1}{2} \cos(\phi - \theta)}{a^2 b^2} \right]$$

$$-b = 2\rho_0 \left[ \frac{b^2 \cos \theta \cos \phi + a^2 \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi}{a^2 b^2} \right]$$

$$b^2 = 4\rho_0^2 \left[ \frac{b^2 \cos \theta \cos \phi + a^2 \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi}{a^2 b^2} \right]^2$$

$$-4ac = \frac{4 \cos^2 \theta}{a^2} + \frac{4 \operatorname{sen}^2 \theta}{b^2} - \left[ 4\rho_0^2 \left( \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\operatorname{sen}^2 \phi}{b^2} \right) \left( \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{b^2} \right) \right]$$

$$2a = 2 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right]$$

$$\rho(\theta) = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\rho(\theta) = \frac{2\rho_0 \left[ \frac{b^2 \cos \theta \cos \phi + a^2 \sin \theta \sin \phi}{a^2 b^2} \right] \pm 2 \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right]}$$

$$\pm 2 \sqrt{\frac{\rho_0^2 (b^2 \cos \theta \cos \phi + a^2 \sin \theta \sin \phi)^2}{a^4 b^4} + \left[ \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} - \rho_0^2 \left( \frac{\cos^2 \phi}{a^2} + \frac{\sin^2 \phi}{b^2} \right) \left( \frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\sin^2 \theta}{b^2} \right) \right]}$$

$$-4ac = \frac{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta}{a^2 b^2} - \rho_0^2 \left( \frac{b^4 \cos^2 \phi \cos^2 \theta + b^2 a^2 \cos^2 \phi \sin^2 \theta + a^2 b^2 \cos^2 \theta \sin^2 \phi + a^4 \sin^2 \theta \sin^2 \phi}{a^4 b^4} \right)$$

$$-4ac = \frac{(b \cos \theta)^2 + (a \sin \theta)^2}{(ab)^2} - \frac{(\rho_0 b^2 \cos \phi \cos \theta)^2 + (\rho_0 b a \cos \phi \sin \theta)^2 + (\rho_0 a b \cos \theta \sin \phi)^2 + (\rho_0 a^2 \sin \phi \sin \theta)^2}{a^4 b^4}$$

$$= \frac{a^2 b^4 \cos^2 \theta + a^4 b^2 \sin^2 \theta - \rho_0^2 b^4 \cos^2 \phi \cos^2 \theta - \rho_0^2 b^2 a^2 \cos^2 \phi \sin^2 \theta - \rho_0^2 b^2 a^2 \cos^2 \theta \sin^2 \phi - \rho_0^2 a^4 \sin^2 \theta \sin^2 \phi}{a^4 b^4}$$

$$-4ac = \frac{\cos^2 \theta [a^2 b^4 - \rho_0^2 b^4 \cos^2 \phi - \rho_0^2 b^2 a^2 \sin^2 \phi] + \sin^2 \theta [a^4 b^2 - \rho_0^2 b^2 a^2 \cos^2 \phi - \rho_0^2 a^4 \sin^2 \phi]}{a^4 b^4}$$

$$-4ac = \frac{b^2 \cos^2 \theta [a^2 b^2 - \rho_0^2 b^2 \cos^2 \phi - \rho_0^2 a^2 \sin^2 \phi] + a^2 \sin^2 \theta [a^2 b^2 - \rho_0^2 b^2 \cos^2 \phi - \rho_0^2 a^2 \sin^2 \phi]}{a^4 b^4}$$

$$-4ac = \frac{(b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta) (a^2 b^2 - \rho_0^2 b^2 \cos^2 \phi - \rho_0^2 a^2 \sin^2 \phi)}{a^4 b^4}$$

$$b^2 = \frac{\rho_0^2 (b^4 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + 2a^2 b^2 \cos \theta \cos \phi \sin \theta \sin \phi + a^4 \sin^2 \theta \sin^2 \phi)}{a^4 b^4}$$

$$b^2 - 4ac$$

$$\frac{\rho_0^2 (b^4 \cos^2 \theta \cos^2 \phi + 2a^2 b^2 \cos \theta \cos \phi \sin \theta \sin \phi + a^4 \sin^2 \theta \sin^2 \phi)}{a^4 b^4} +$$

$$+ \frac{(a^2 b^2 - \rho_0^2 b^2 \cos^2 \phi - \rho_0^2 a^2 \sin^2 \phi) (b^2 \cos^2 \theta + a^2 \sin^2 \theta)}{a^4 b^4}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{b^2 \cos^2 \theta [\rho_0^2 b^2 \cos^2 \phi] - b^2 \cos^2 \theta [\rho_0^2 b^2 \cos^2 \phi] + a^2 \operatorname{sen} \theta [\rho_0^2 a^2 \operatorname{sen} \theta] - a^2 \operatorname{sen} \theta [\rho_0^2 a^2 \operatorname{sen} \theta]}{a^4 b^4} \\
&+ \frac{2a^2 b^2 \cos \theta \cos \phi \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi + a^2 b^2 [b^2 \cos^2 \theta] - \rho_0^2 a^2 \operatorname{sen} \theta [b^2 \cos^2 \theta] - \rho_0^2 b^2 \cos^2 \phi [a^2 \operatorname{sen} \theta] + a^2 b^2 [a^2 \operatorname{sen} \theta]}{a^4 b^4} \\
&= \frac{a^2 b^2 [b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta] + 2a^2 b^2 \cos \theta \cos \phi \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi - \rho_0^2 a^2 \operatorname{sen} \theta [b^2 \cos^2 \theta] - \rho_0^2 b^2 \cos^2 \phi [a^2 \operatorname{sen} \theta]}{a^4 b^4} \\
&= \frac{a^2 b^2 [b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta + 2 \cos \theta \cos \phi \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \phi - \rho_0^2 \{(\operatorname{sen} \theta \cos \theta) - (\cos \phi \operatorname{sen} \theta)\}]}{a^4 b^4} \\
&= \frac{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta + 2 \left[ \left( \frac{1}{2} \cos(\phi - \theta) - \frac{1}{2} \cos(\phi + \theta) \right) \left( \frac{1}{2} \cos(\phi + \theta) + \frac{1}{2} \cos(\phi - \theta) \right) \right] - \rho_0^2 \{(\operatorname{sen} \theta \cos \theta)^2 - (\cos \phi \operatorname{sen} \theta)^2\}}{a^2 b^2} \\
&= \frac{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta + \cos^2(\phi - \theta) + \cos^2(\phi + \theta) - \cos^2(\phi + \theta) - \cos^2(\phi - \theta) - \cos(\phi + \theta) \cos(\phi - \theta) - \rho_0^2 \{(\operatorname{sen} \theta \cos \theta)^2 - (\cos \phi \operatorname{sen} \theta)^2\}}{a^2 b^2} \\
&= \frac{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta + \cos^2(\phi - \theta) - \cos^2(\phi + \theta) - \rho_0^2 \left[ \left( \frac{1}{2} \operatorname{sen}(\phi + \theta) + \frac{1}{2} \operatorname{sen}(\phi - \theta) \right)^2 - \left( \frac{1}{2} \operatorname{sen}(\theta + \phi) + \frac{1}{2} \operatorname{sen}(\theta - \phi) \right)^2 \right]}{a^2 b^2} \\
&= \frac{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta + \cos^2(\phi - \theta) - \cos^2(\phi + \theta)}{a^2 b^2} \\
\rho(\theta) &= \frac{\rho_0 \left[ \frac{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta}{a^2 b^2} \right] \pm \sqrt{\frac{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta + \cos^2(\phi - \theta) - \cos^2(\phi + \theta)}{a^2 b^2}}}{\frac{\cos^2 \theta}{a^2} + \frac{\operatorname{sen}^2 \theta}{b^2}} \\
\rho(\theta) &= \frac{\rho_0 (b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta) \pm \sqrt{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta + \cos^2(\phi - \theta) - \cos^2(\phi + \theta)}}{b^2 \cos^2 \theta + a^2 \operatorname{sen}^2 \theta}
\end{aligned}$$

Una rueda al ser medida axialmente puede presentar dos casos:

### **CASO 1.**

Debido a la forma en que son ensamblados el centro y el aro es difícil que se presente el alabeo, ya que el centro y el aro están bien centrados, además que es difícil que exista deformación del centro (caso ideal y real).

### **CASO 2.**

Que el centro y el aro de la rueda no están bien centrados, es decir, que existe alabeo y además que exista la deformación del centro (caso difícil que ocurra).

Como ya se vio, en este capítulo hablamos sobre la importancia que tiene la medición, para el control de calidad en la industria, así como específicamente de las variables y métodos de medición que le importan a la empresa, para la cual estamos realizando la reconstrucción de la máquina (INFAS). Es importante hacer notar que las ecuaciones matemáticas que se obtuvieron son de gran importancia, ya que a partir de ellas es que se pueden dar una idea, de la complejidad en la medición; pero para realizar estas mediciones se requieren de dispositivos capaces de censar las variaciones y en el siguiente capítulo mencionaremos algunos de ellos.

# CAPÍTULO IV

## DISPOSITIVOS A USARSE

La mayoría de los fenómenos de interés para los científicos e ingenieros no son realmente eléctricos; sin embargo, casi todos los instrumentos que utilizan dichos profesionales si lo son. Ello se debe a la gran facilidad con que pueden usarse, estudiarse y registrarse las señales eléctricas. Un físico nuclear puede estar interesado en medir las energías de ciertos procesos de desintegración; un químico puede querer evaluar la acidez de una solución, y ambos usarán ampliamente la instrumentación electrónica para hacer sus mediciones. Los parámetros eléctricos de voltaje, corriente, resistencia, capacitancia e inductancia proporcionan un esquema natural para la clasificación de los **transductores** de entrada. La definición establece que "el **transductor** "es un dispositivo que al ser afectado por la energía de un sistema de transmisión, proporciona energía en la misma forma o en otra a un segundo sistema de transmisión". Esta transmisión de energía puede ser eléctrica, mecánica, química, óptica(radiante) o térmica.

Esta definición de un **transductor** incluye, por ejemplo, dispositivos que convierten fuerza o desplazamiento mecánico en una señal eléctrica. Muchos otros parámetros físicos (calor, intensidad luminosa, humedad) se pueden convertir en energía eléctrica por medio de **transductores**.

Los **transductores** se pueden clasificar según su aplicación, método de conversión de energía, naturaleza de la señal de salida, etc. Una distinción y clasificación estricta de los tipos de **transductores** es difícil. Los **transductores** que requieren potencia externa, son **transductores** pasivos, los cuales producen una variación en algún parámetro eléctrico, como resistencia, capacitancia, etc., la cual se puede medir como una variación de voltaje o corriente. La segunda categoría corresponde a **transductores** del tipo de autogeneración, que generan un voltaje o corriente analógica cuando son estimulados por medio de alguna forma física de energía. Los **transductores** de autogeneración no requieren potencia externa.

Dentro de cada categoría, tanto la magnitud del parámetro como el cambio en su magnitud pueden relacionarse con la señal no eléctrica que interesa.

En la automatización y las operaciones de procesos continuos amplían el alcance y el uso de instrumentos tanto en forma individual como en sistemas para control automático y la medición de las variables existentes en las instalaciones de fabricación de proceso.

#### 4.1. - SENSORES DE DESPLAZAMIENTO LINEAL

La diferencia que existe entre un sensor y un **transductor**, es que el **transductor** como lo dice la definición anterior, es un aparato capaz de transformar la energía, y el sensor es un dispositivo que capta un cambio en la cantidad física de una magnitud, tal como temperatura, intensidad de luz, etc.

Se puede usar casi cualquier propiedad física de un material que varía en respuesta a alguna excitación para producir un sensor.

Un sistema electrónico debe comunicarse con el mundo exterior. A fin de lograr esto se utilizan sensores para percibir estas magnitudes externas. Hay una amplia gama de magnitudes diferentes que es necesario medir para distintas aplicaciones. Entre las más comunes están la temperatura, el desplazamiento, la deformación, la fuerza y el tiempo.

Los sensores de desplazamiento pueden ser de desplazamiento **lineal** o desplazamiento **angular**. En esta parte del capítulo estamos interesados en mencionar y definir sensores de desplazamiento **lineal**.

##### 4.1.1. - TRANSFORMADOR DIFERENCIAL DE VARIACIÓN LINEAL (LVDT).

La inductancia de una bobina se ve afectada por la proximidad de materiales ferromagnéticos, efecto que se utiliza en varios sensores de posición.

Uno de ellos es el transformador lineal diferencial variable (LVDT *linear variable differential transformer*) que usa tres bobinas. Las tres bobinas están enrolladas sobre un tubo hueco y acomodadas para producir un transformador, con una bobina formando el primario y las otras dos formando secundarios idénticos colocados en forma simétrica a cada lado del primario.

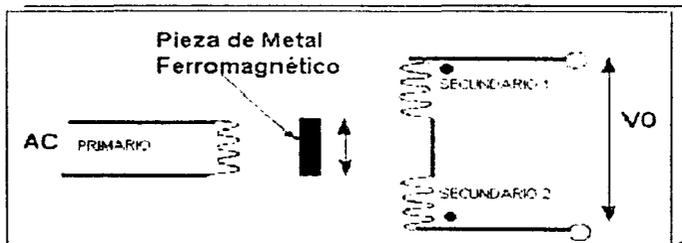
Las dos bobinas secundarias están conectadas en serie de tal manera que sus voltajes de salida quedan en oposición de fase. Si se aplica un voltaje senoidal al primario, los voltajes inducidos en las bobinas secundarias se cancelarán entre sí y la salida resultante será cero. Esta disposición se convierte en un útil **transductor** mediante la adición de una pieza móvil de material ferromagnético, como hierro dulce, dentro del tubo. La presencia del material ferromagnético aumenta la inductancia mutua entre la bobina primaria y alguna de las secundarias, aumentando así la magnitud del voltaje inducido en una de estas.

Si la pieza de metal móvil se coloca en el centro con respecto a las bobinas, afectará por igual a las secundarias y los voltajes de salida continuarán cancelándose entre sí. Sin embargo, si la pieza de metal se mueve ligeramente a un lado u otro, aumentará el acoplamiento a un secundario más que al otro. El conjunto estará ahora fuera de equilibrio y se producirá un voltaje de salida.

A mayor movimiento de la pieza de metal con respecto a su posición central, mayor será la señal de salida resultante. Esta señal de salida tiene la forma de una señal alterna cuya magnitud representa el desvío de la posición central y cuya fase indica la dirección en que se ha producido el desvío de la pieza de metal móvil. Se puede usar un circuito sencillo para convertir esta señal alterna en una señal de DC más conveniente.

Los LVDT se pueden construir en un intervalo muy amplio. Por lo general tienen una definición de alrededor de 0.1% de su intervalo total (o mejor aun si se usan bobinas múltiples) y buena linealidad. A diferencia de los potenciómetros resistivos, no requieren un contacto con fricción, y por lo tanto necesitan una fuerza muy baja para su funcionamiento, y tienen una larga vida.

El LVDT es un sensor de desplazamiento sin contacto y por ello de alta fiabilidad, vida y robustez. Se caracteriza por ser CA/CA sin electrónica



incorporada, el cual, normalmente, se le excita con una tensión de 2,2 Vrms a una frecuencia de 400Hz a 15,000Hz. Muchos de ellos pueden venir equipados con muelle de retorno y punta palpadora, algunos otros modelos tienen certificados Ex y sirven para aplicaciones de altas temperaturas (600°C) y altas presiones (hasta 600 bar). Y algunos otros son inmunes a campos magnéticos exteriores.

#### 4.1.2. - (DCDT).

Este tipo de sensores se basan en el principio electromagnético que vemos en los sensores de posición LVDT y se diferencia por ser CD/CD con electrónica incorporada



El DCDT es un sensor de desplazamiento inductivo con medida de desplazamiento desde  $\pm 0,5\text{mm}$  hasta 2m, sin contacto y por ello de alta fiabilidad, vida y robustez, con salida de 0 a 10Vcd ó 4-20mA.

#### 4.1.3. - POTENCIÓMETROS LINEALES.

Un gran número de **transductores** de entrada resistiva operan mediante la variación de la longitud o el espesor ( $l$ ), área ( $A$ ) o resistividad ( $p$ ).

Los potenciómetros resistivos se encuentran entre los **transductores** de posición más comunes y la mayoría de la gente se habrá topado con ellos en los mandos de control de las radios y otros equipos electrónicos.

Los potenciómetros pueden ser angulares o lineales, consisten en un trozo de material resistivo con una terminal en cada extremo y una tercera terminal conectada a un contacto deslizante sobre la huella resistiva. Cuando se utiliza como **transductor** de posición, se coloca un potencial a través de las dos terminales de los extremos y se toma la salida de la terminal conectada al contacto deslizante.

Al moverse el contacto deslizante cambia el voltaje de salida entre los potenciales de cada extremo de la huella. En general, existe una relación lineal entre la posición del deslizador y el voltaje de salida.

Los tipos más antiguos de potenciómetro usan una película de carbón como huella resistiva, pero presentan el problema de ruido eléctrico, mala linealidad y corta vida.

Otros dispositivos usan alambre resistivo como huella, ya sea como un alambre recto (potenciómetro de alambre deslizante) o enrollado alrededor de un soporte aislante (potenciómetro de alambre en bobina). Los dispositivos de alambre resistivo tienen buena linealidad pero vida limitada, y en general son eléctricamente ruidosos.

En general, las técnicas de alambre deslizante sólo son adecuadas para medir distancias largas, mientras que los dispositivos de alambre en bobina carecen de definición ya que el deslizador salta de una vuelta del devanado a la siguiente. En años recientes se han utilizado para los potenciómetros plásticos conductores que producen una huella lisa, de baja fricción, con poco ruido, excelente definición y larga vida. Los primeros dispositivos de plástico conductor presentaban poca linealidad, pero los más modernos combinan las técnicas de plástico conductor y alambre en bobina para producir potenciómetros que combinan las mejores propiedades de ambos métodos.

#### 4.1.4. - SENSORES DE DESPLAZAMIENTO INDUCTIVO.

Los elementos de **transducción** inductiva convierten un cambio de la magnitud en un cambio de la autoinductancia de un devanado único. Los cambios de inductancia pueden efectuarse mediante el movimiento de un núcleo ferromagnético interior al devanado o mediante cambios de flujo introducidos externamente en un devanado con un núcleo fijo. Por la ley de Faraday, en las espiras se desarrolla una diferencia de potencial proporcional al cambio en el campo magnético al que están sometidas. Puesto que el núcleo es un imán permanente, el cambio en el campo sólo puede estar provocado por el movimiento de dicho núcleo. Así, si medimos la diferencia de potencial en las espiras se obtendrá la posición a la que se ha movido el núcleo

#### 4.2. - SENSORES DE DESPLAZAMIENTO ANGULAR

Desde la invención de los robots móviles, muchos cuentan con alguna variación de desplazamiento por ruedas. El entendimiento básico de sensores que con precisión cuantifican la posición angular es un importante requisito para determinar cual será la elección que se ajuste mejor a las necesidades requeridas. Sabemos que existen diferentes tipos de sensores de desplazamiento rotacional que se usan hoy en día.

- **Encoders** de Escobillas
- Potenciométricos
- Synchros
- **Resolvers**
- **Encoders** Ópticos
- **Encoders** Magnéticos
- **Encoders** Inductivos
- **Encoders** Capacitivos

Se menciona en Aviolió (1993) que más de 17 millones de distintas variaciones de **encoders** rotatorios son ofrecidos por una sola compañía.

Nosotros debemos examinar en mayor detalle los tres tipos más comunes usados para la medición angular que son:

- Potenciómetros
- **Resolvers**
- **Encoders** Ópticos

##### 4.2.1. – OPTICOS.

El primer **encoder** óptico fue desarrollado a mediados de 1940 por la compañía Baldwin Piano para ser usadas en ruedas de tonos que permiten a los órganos eléctricos tratar de igualar los sonidos de otros instrumentos musicales.

Hoy en día los instrumentos contemporáneos básicamente están incorporados a versiones miniaturizadas del sensor de proximidad de modo opuesto. Un rayo de luz enfocado y apuntando hacia el foto detector que se encuentra en pareja con el rayo es interrumpido periódicamente por un patrón codificado de opacidad/transparencia en un disco rotatorio intermedio pegado a la flecha de interés.

El disco rotatorio puede estar elaborado con: cromo en vidrio, metal grabado, o fotoplástico como el *Mylar*. Relativo a los **encoders** más complejos de corriente alterna en su esquema de codificación directa e inherentemente de su salida digital resulta ser un instrumento confiable de bajo costo y con buena inmunidad al ruido.

Hay dos tipos básicos de **encoder** ópticos, los incrementales y los absolutos. La versión incremental mide la velocidad rotacional y puede deducir la posición relativa mientras el modelo absoluto directamente mide la posición angular y deduce la velocidad. Si la información no volátil de la posición no es una consideración, los **encoders** incrementales generalmente son más fácil de conectar y proveen una resolución equivalente a un costo mucho menor al de los **encoders** ópticos absolutos.

### ENCODER OPTICOS INCREMENTALES

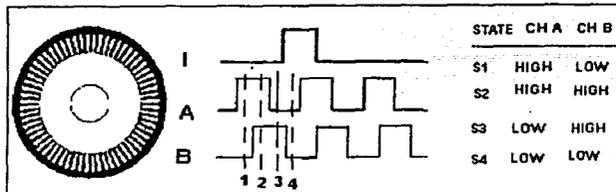
El tipo más simple de **encoder** incremental es un tacómetro de un solo canal, que produce un cierto número de ondas senoidales o cuadráticas pulsantes por cada revolución dada. El gran número de pulsos, la más alta resolución (subsecuentemente el costo) de la unidad caracteriza este tipo de **encoders**.

Estos **encoders** relativamente baratos son perfectamente adaptables para la retroalimentación de los sensores de velocidad en sistemas de control de media a alta velocidad, pero tienen el problema de ruido y estabilidad a velocidades extremadamente bajas; apto para la cuantificación de errores.

Una limitación típica para un **encoder** incremental que posee un disco con un diámetro de 2 pulgadas es que solo tiene 2540 líneas.

Adicionalmente a la inestabilidad para bajas velocidades, el tacómetro de un solo canal es también incapaz de determinar el sentido de giro y por ello no puede ser usado como sensor de posición.

Los **encoders** incrementales de cuadratura de fase superan este problema adicionando un segundo canal y desviando los detectores por lo tanto el tren de pulsos resultante está 90 grados fuera de fase como se muestra en el esquema siguiente.



Esta técnica permite decodificar electrónicamente para determinar cual canal está guiando al otro y en consecuencia permite averiguar la dirección en que se está girando, con el beneficio adicionado de que se incrementa la resolución.

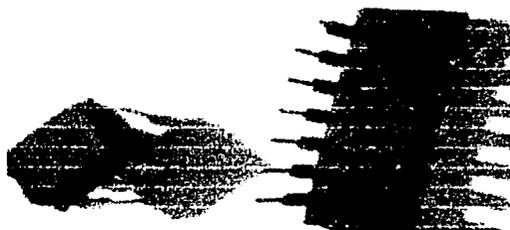
*Holle* provee una profunda discusión de las opciones de las salidas (*TTL* o controladores diferenciales) y varios diseños de emisiones (por ejemplo: resolución, ancho de banda, faseo, filtrado) por consideraciones al conectar el **encoder** incremental de cuadratura de fase al sistema de control digital.

La naturaleza del **encoder** incremental de cuadratura de fase en sus señales de salidas dictan que cualquier resolución de la posición angular puede ser solo relativa a una referencia específica, que es lo opuesto al absoluto, se puede hacer de diferentes maneras para establecer tal referencia para aplicaciones en las que la rotación es continua de 360 grados. Muchos **encoders** incrementan en un tercer canal una salida con índice que da un valor diferente a cero para cada revolución completa de la flecha (como se ve en el esquema anterior). La posición intermedia es entonces especificada por el número de la cuenta que lleva el **encoder**, ya sea para arriba o para abajo y así conocer por el índice la posición. Una desventaja de esta aproximación es que toda la información relativa a la posición se pierde si ocurre una interrupción en la energía eléctrica o suministro que lo alimenta.

En el caso de una rotación limitada, tal como un movimiento atrás - adelante de una paila o el voltear un eje, los interruptores eléctricos de límites y/o altos mecánicos pueden ser usados para establecer una posición de inicio como la referencia. Para mejorar la repetibilidad de esta acción de llegar al inicio es a veces dividido en dos pasos. El eje es girado a baja velocidad en la dirección apropiada hasta que el mecanismo de alto es encontrado, sobre lo cual el giro es revertido por un corto intervalo predeterminado. La flecha es entonces girada lentamente de regreso dentro del alto a una baja velocidad específica desde el punto de inicio designado, de esta manera eliminando cualquier variación en la carga inercial que pudiera influir en la llegada a la posición inicial. Esta aproximación en dos pasos puede ser vista comúnmente al comenzar la iniciación del posicionamiento del motor de pasos de las cabezas de una impresora de matriz de puntos.

Un número creciente de componentes baratos ha contribuido para hacer a los **encoder** incrementales la mejor opción en sensores rotacionales dentro de la

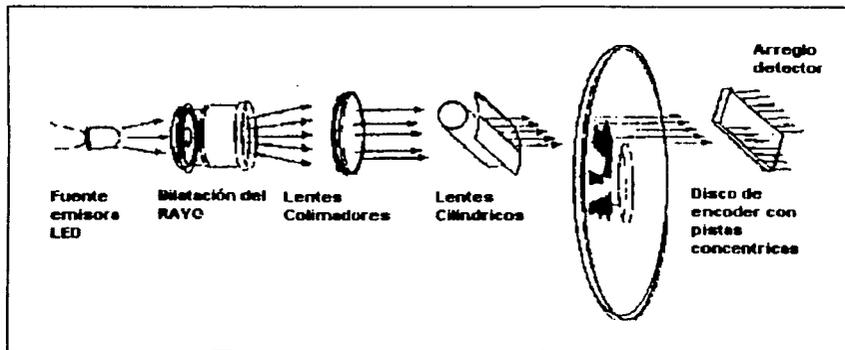
investigación y desarrollo de la robótica. La ilustración que enseguida se ve nos muestra un **encoder** óptico incremental, un **chip PID** del controlador de un motor, hecho por **Hewlett Packard**, solo con un amplificador de puente "H" que en conjunto forman la base de un sistema de control digital el cual tiene un precio como un paquete total de bajo costo para proyectos de gran inversión. Muchos fabricantes ahora ofrecen pequeños motores engranados de DC con **encoders** incrementales ya adheridos a la armadura de la flecha.



Dentro de la industria de los vehículos guiados automáticamente (AGV) de los Estados Unidos, sin embargo, los **resolvers** aún son generalmente preferidos sobre los **encoders** ópticos por su superioridad sobre condiciones de operación rudas y difíciles, pero la comunidad europea de (AGV) parece claramente favorecer al **encoder**.

### ENCODERS OPTICOS ABSOLUTOS

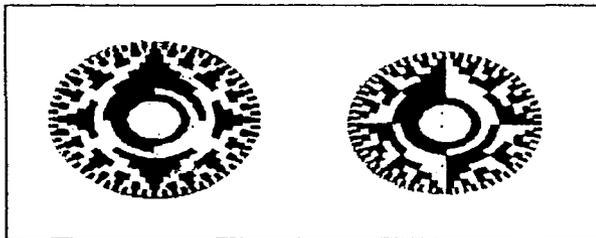
Los **encoders** absolutos son típicamente usados para aplicaciones en donde la rotación sea lenta, además cuando no puede ser tolerada la pérdida de información de la posición, la cual debe mantenerse aun cuando la referencia pierda potencial a causa de una interrupción en la alimentación.



Los elementos discretos de un detector en un arreglo fotovoltaico son individualmente alineados en la forma de la abertura del rayo de luz con un **encoder** de pistas concéntricas como se ve en el esquema, creando en efecto una implementación de no contacto del primer cepillo conmutante del **encoder**. La asignación de una pista dedicada para cada *bit* de los resultados de la resolución en discos de gran tamaño (relacionado a los diseños incrementales) con una correspondiente disminución en el choque y en la tolerancia de la vibración. Una regla general es que cada pista adicional en el **encoder** dobla la resolución pero cuadruplica el costo.

En lugar del flujo serial de bits de los diseños incrementales, el **encoder** óptico absoluto provee una palabra de salida paralela con un patrón codificado único para cada posición cuantificada de la flecha. Los códigos más comunes son el código **Gray**, binario natural, y decimal codificado a binario. El código **Gray** (inventado por **Frank Gray** de los laboratorios **Bell**) esta caracterizado por el hecho de que un solo bit puede cambiar en un tiempo, una ventaja decidida en la eliminación de ambigüedades asincrónicamente causadas por las tolerancias de los componente electrónicos y mecánicos. El código binario por otro lado involucra el cambio de muchos bits rutinariamente cuando incrementa o decremento la cuenta en uno. Por ejemplo yendo de la posición cuantificada 255 a la posición 0, ocho bits cambiarán de unos a ceros. Puesto que no hay garantía de que todos los umbrales de los detectores que rastrean a cada bit cambiarán al mismo tiempo; puede existir una ambigüedad considerable durante el estado de transición con un esquema de codificación de esta forma.

Los **encoders** absolutos son los más adecuados para giros lentos y/o infrecuentes tal como la codificación de la dirección del ángulo, no así para medir giros continuos a gran velocidad. Aunque no es tan robusto como el **resolver** para altas temperaturas y para aplicaciones de alto impacto, es posible una operación a temperaturas de 125 grados centígrados, y una resolución media; (1000 cuentas por revolución) los diseños con metal o discos **Mylar** como se muestran en la siguiente figura; pueden competir favorablemente con los **resolvers** en términos de resistencia a choques.



Supone una desventaja potencial la conexión de las salidas pues se vuelve compleja debido al gran número de guías asociadas con las salidas paralelas. Por ejemplo: un **encoder** absoluto de 13 bits usando salidas de señal complementarias para la inmunidad del ruido requerirán un cable conductor de 28 hilos (13 pares de señal mas la alimentación y tierra), contra solo seis del **resolver** o del **encoder** incremental.

#### 4.2.2. – MAGNÉTICOS.

### SYNCHROS Y RESOLVERS

**Synchros** son instrumentos rotatorios electromecánicos usados para transmitir eléctricamente información angular de un lugar a otro con gran precisión.

En esencia el **synchro** está formado por la unión variable de un transformador consistente en un **rotor** en espiral (primario) con excitación de AC y dos o más **estatores** en espiral (secundarios) simétricamente orientados al\_ rededor del **rotor**.

El efectivo acoplamiento magnético entre la espiral del **rotor** y las espirales del **estator**, que se encuentran a su alrededor está en función de la orientación del **rotor**, donde el máximo acoplamiento ocurre cuando los campos están paralelos, por lo que el acoplamiento es mínimo cuando el campo del **rotor** se encuentra ortogonalmente alineado con respecto a la espiral de un **estator** en particular.

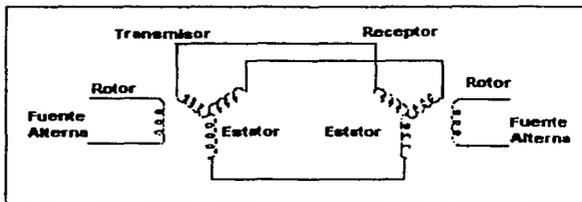
Como consecuencia las salidas del **estator** forman un grupo de señales de AC cuyas respectivas magnitudes definen el ángulo del **rotor** en cualquier punto dado en el tiempo.

Existe una amplia variedad de **synchro**:

- Transmisores
- Diferenciales
- Receptores
- Transformadores de Control
- **Resolvers**
- **Resolvers** diferenciales
- Transformadores Lineales
- **Transolvers**

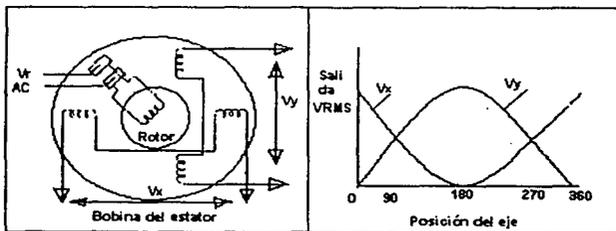
La configuración de **synchro** más conocida es probablemente el par transmisor/receptor trifásico comúnmente usado para la indicación remota de la flecha angular. El esclavo **synchro** receptor es eléctricamente igual al maestro transmisor y conectadas en paralelo las espirales del **estator** de ambos instrumentos como se muestra en la figura. Los devanados de los **rotos** en ambos, el transmisor y el indicador remoto receptor son excitados por una

corriente de AC (400Hz a varios kHz) típicamente alimentados a través de anillos deslizantes. Cuando el **rotor** del transmisor y del receptor se encuentran alineados idénticamente con sus respectivos devanados del **estator**, las salidas individuales del **estator** estarán igual en ambos instrumentos y consecuentemente no habrá un flujo de corriente.



Si la flecha del **rotor** del transmisor es girada por alguna fuerza externa la condición de equilibrio se verá trastornada y la diferencia de voltaje resultante generará un flujo de corriente en ambos grupos de los devanados del **estator**, este flujo de corriente induce un **torque** idéntico en ambos **rotores**, mientras que es girado el **rotor** del transmisor, en el **rotor** receptor el **torque** actúa para restaurar la alineación y por consiguiente el equilibrio. El efecto observado es en la flecha de la salida del receptor la cual rastreará cualquier desplazamiento rotacional que este viendo la entrada de la flecha remota. Más de un receptor puede ser controlado por un transmisor común.

El **resolver** como se ve en la figura es una configuración especial del **synchro**, el cual desarrolla un voltaje proporcional al seno y coseno del ángulo del **rotor** y de esta manera es comúnmente usado para descomponer un vector en sus componentes asociadas.



La salida individual del **estator** esta en función de la excitación de entrada y la posición angular del **rotor** esta dada por las siguientes ecuaciones:

$$V_x = K_x \sin\theta \sin(\omega t + \alpha_x)$$

$$V_y = K_y \cos\theta \sin(\omega t + \alpha_y)$$

Donde:

$\theta$  = Angulo de la entrada del **resolver**

$\omega = 2\pi f$ , donde  $f$  es la frecuencia de excitación

$K_x$  y  $K_y$  son constantes ideales de la función de transferencia

$a_x$  y  $a_y$  son el cero ideal en el cambio tiempo-face del **rotor** y **estator**

La relación matemática inherente en las señales de salida del **resolver** nos dan como resultado que al utilizar en forma individual al transmisor puede usarse como un **transductor** de entrada en un sistema de control digital. En lugar del receptor, un **resolver** puede utilizarse como un convertidor digital (**RDC**) para transformar las señales de salida en un formato apropiado para la conexión de la computadora. Esta conversión es hecha regularmente en una de estas 3 maneras:

- 1) Aproximación por cambio de fase,
- 2) Aproximación por razón de amplitud, o
- 3) Aproximación multiplexada.

Resumiendo, los **resolvers** ofrecen una operación confiable en un medio áspero para cuantificar la posición angular absoluta, que es exacto, moderadamente barato y medianamente pequeño en término del tamaño físico.

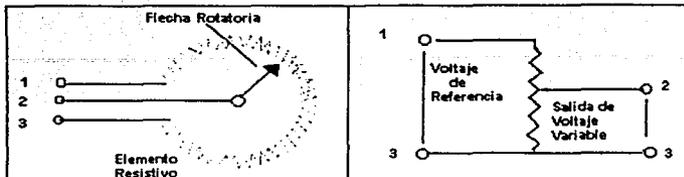
Teniendo ahora la facilidad de adquirir y utilizar los circuitos integrados (**LSI large-scale integrated**), a costos reducidos, haciendo los **resolvers** competitivos frente a otras alternativas.

Las versiones sin cepillos emplean un transformador cilíndrico especial en lugar de anillos deslizantes para acoplar la excitación de AC al **rotor**. Esta configuración no tiene esencialmente desgaste y por consecuencia un mantenimiento nulo, pero a expensas de un consumo adicional de potencia y aumento en su tamaño.

#### 4.2.3. – POTENCIOMÉTRICOS.

Potenciómetros o también llamados **pots** en forma abreviada sabemos que son usados comúnmente como sensores de desplazamiento rotacional de bajo costo en baja velocidad, con una exactitud media en aplicaciones que no involucren una rotación continua.

El principio de operación es un divisor de voltaje por medio de una resistencia variable donde el **tap** central es un limpiador acoplado mecánicamente que se desplaza a través de un elemento resistivo en conjunto con una flecha rotatoria, como se ve en la figura.



Una variedad de divisores de voltaje diferentes (*tapers*) y de diferentes resistencias en función del desplazamiento de la flecha que son usadas en la fabricación de los potenciómetros (por ejemplo audio, logarítmicos, senoidales, lineales) con un *taper* lineal son los más comunes en las aplicaciones para sensar la posición.

Una ventaja de los sensores potenciométricos es que son de bajo costo y de una fácil conexión con el sistema. Un voltaje regulado de DC es aplicado a través de toda la resistencia R como se muestra. El voltaje de salida está dado por la ecuación:

$$V_o = V_{ref} \frac{r}{R}$$

Donde:

$V_o$  = Voltaje de salida de la escobilla

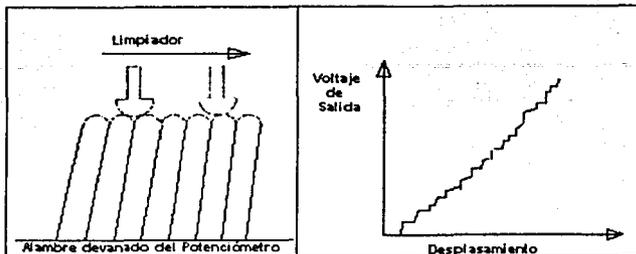
$V_{ref}$  = Voltaje de referencia a través del pot

$r$  = Resistencia que hay entre la escobilla y tierra

$R$  = Resistencia total del potenciómetro

Para instrumentos con un *taper* lineal el cociente  $r/R$  es precisamente igual a la verdadera proporción del desplazamiento de la escobilla por la escala completa asumiendo que los efectos de la carga son insignificantes. Puesto que el voltaje de salida está en función lineal del voltaje de referencia  $V_{ref}$  debe tenerse cuidado de usar una fuente bien regulada y libre de ruido.

Los *pot* que están hechos de alambre devanado pueden manifestar una cuantificación en parte discreta de la forma en que esta ilustrado, a causa de que la resistencia no tiene una variación continua en lugar de ello tiene un incremento paso a paso como resultado de su diseño en espiral. En adición a lo antes mencionado la escobilla temporalmente tocará al mismo tiempo los devanados que se encuentran adyacentes cambiando la resistencia total efectiva.



El mejor potenciómetro de precisión utilizado entonces es el que emplea una película resistiva continua fabricada de carbón, plástico conductor, o una mezcla entre cerámica y metal conocida como **cermet**. Mientras que un buen **pot** de alambre devanado puede proveer una resolución de 0.1 % de la escala completa, los instrumentos que poseen la película resistiva por su alta calidad generalmente están limitados solo por las tolerancias en su manufactura controlando la uniformidad del elemento resistivo.

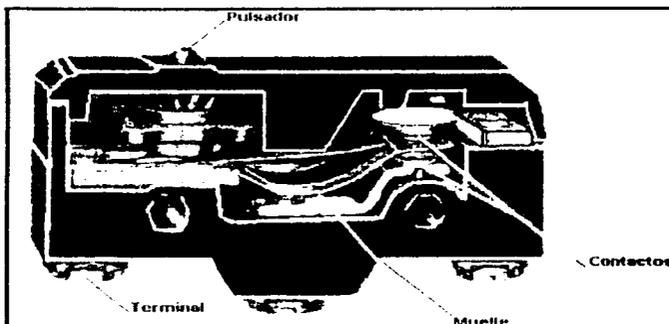
En adición a la significativa fricción que sufre la flecha, la desventaja fundamental de los potenciómetros es su relativa pobre confiabilidad debido a las impurezas en su construcción y al inevitable desgaste de la flecha por su uso, lo que resulta en ruido y en una operación errática. Otros errores pueden ser introducidos por la débil y/o elástica correa de transmisión, si no está directamente acoplado a la flecha, y el ruido eléctrico introducido en la línea de la salida analógica. Por estas razones, el uso de potenciómetros como instrumentos para sensar el movimiento rotatorio ha caído en los últimos años ante los más versátiles **encoders** ópticos incrementales.

### 4.3. - SENSORES DE LÍMITE DE CARRERA

Los sensores de límite de carrera tienen un amplio margen de aplicaciones tanto en la versión de actuación directa como en la de sin contacto. Algunos de ellos usan principios operativos como (inductivo) y (electro\_ópticos)

#### 4.3.1. – MECÁNICOS.

El dispositivo más popular es el interruptor electromecánico, mostrado en la figura. Se trata básicamente de un pulsador de contacto momentáneo de un circuito de dos posiciones. Cuando se presiona la varilla, ésta actúa sobre un sistema elástico que causa que el contacto se cierre (en los normalmente abiertos) o se abra (en los normalmente cerrados). El interruptor se instala de tal manera que actúe sobre la varilla cuando el objeto se coloca en la posición deseada.



Los interruptores de este tipo presentan diversas formas de actuadores: de rodillo, de presión, de nivel y varillas de extensión de varias longitudes, algunas especiales para trayectorias grandes, para inmersión en líquidos o con rodillo en la punta. Estos pueden formar parte integrante del interruptor o forman parte como accesorio. También existen versiones herméticas o sumergibles. La mayoría de estos interruptores están diseñados en versiones robustas con un número de actuaciones elevado.

Los muelles están fabricados típicamente de cobre y berilio y los contactos de oro o plata. Los terminales de conexión pueden ser del tipo tornillo, fastón o de soldadura.

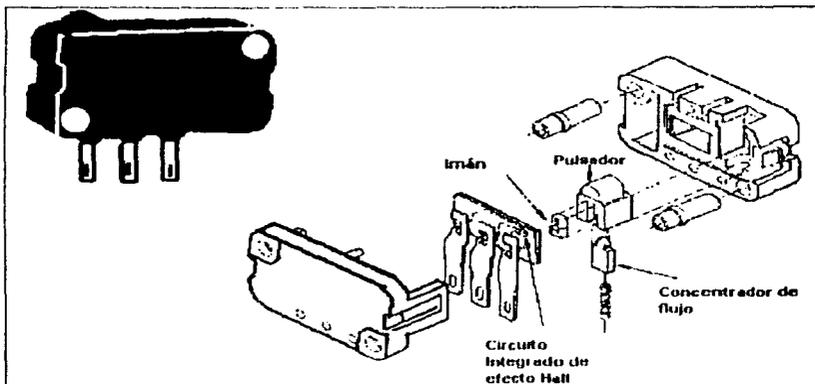
#### 4.3.2. – INDUCTIVOS.

Existen diseños de interruptores que no se basan en un cierre o apertura de contactos. Uno de ellos es el interruptor por efecto Hall. Este efecto fue descubierto en 1879 por Edward H. Hall en la Universidad de Johns Hopkins. Comprobó que aparece una diferencia de potencial entre las dos caras opuestas de un prisma delgado de oro a través del cual circula una corriente al aplicársele un campo magnético perpendicular a las caras en cuestión.

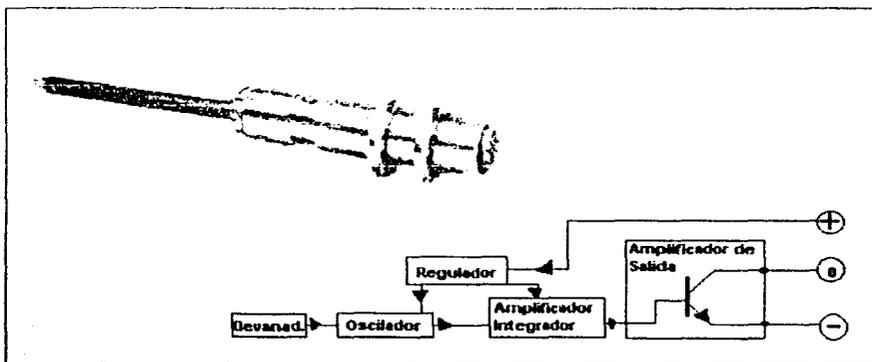
Este efecto, más tarde se aplicaría a los semiconductores en vez de a prismas de oro, produciendo tensiones Hall más elevadas y amplificando considerablemente el número de aplicaciones. Por ejemplo la diferencia de tensión es proporcional a la corriente. Este efecto sirve también para medir corrientes. Como la tensión es también proporcional a la densidad de flujo magnético, puede utilizarse para medir la intensidad de campos magnéticos o para determinar la proximidad de un campo mediante la tensión indicada.

En el interruptor mostrado la actuación sobre la varilla o émbolo ocasiona el desplazamiento de una magneto aproximándolo a un generador Hall. Se utiliza un

concentrador de flujo para concentrar el flujo magnético existente sobre el sensor. Un circuito integrado, asociado con el generador Hall proporciona el acondicionamiento de la señal, generando una señal de salida con un circuito con histéresis para evitar errores debido a ruidos o vibraciones.



Como se ve en la figura también existen interruptores sin contacto, precisándose que el objeto a medir sea magnético (o equipado con un imán). El objeto a medir tiende a absorber el campo electromagnético generado en el devanado sensor representando una carga para el oscilador que reduce su nivel. Este cambio de nivel es amplificado y actuando sobre un comparador de Schmitt acoplado a un transistor de salida que realiza la acción interruptora. Un LED colocado en un lugar visible proporciona una indicación. La unidad presentada está totalmente blindada, existiendo también versiones no blindadas.



### 4.3.3. - ÓPTICOS

Los sensores de posición fotoeléctricos emplean una fuente de luz y un sensor de luz para detectar la presencia o ausencia de objetos que bloqueen o no el camino de luz u ocasionen la reflexión del haz de luz sobre el elemento sensor.

Los dos métodos utilizados son la exploración directa y la exploración retrorreflexiva.

En la exploración directa una fuente de luz y un sensor de luz (fotorreceptor) se colocan en oposición con el fin de detectar el paso de un objeto entre ellos. El objeto debe ser suficientemente opaco como para bloquear la luz, de manera que el circuito sensor conmute. Puede usarse una colimación cuando se trate de objetos pequeños.

En la exploración reflexiva la fuente de luz y el sensor se colocan del mismo lado del objeto a detectar de manera que el haz de luz se refleja sobre el objeto a detectar, o sobre una pantalla adherida a él.

Existen tres tipos de exploración reflexiva:

1. Retrorreflexiva,
2. Especular
3. Difusa.

En la exploración retrorreflexiva, la fuente de luz y el sensor están ubicados en una misma caja. La luz actúa sobre el objeto reflectante que devuelve la luz por el mismo camino. Discos o cintas acrílicas, incluso yeso, se usan como reflectores; el reflector de una bicicleta es un ejemplo. Cuanto mayor es el reflector mayor puede ser la longitud del camino. La falta de alineación y las vibraciones no acostumbran ser críticas. También son utilizables cuando los objetos son algo traslúcidos, perdiéndose parte de la intensidad de luz emitida.

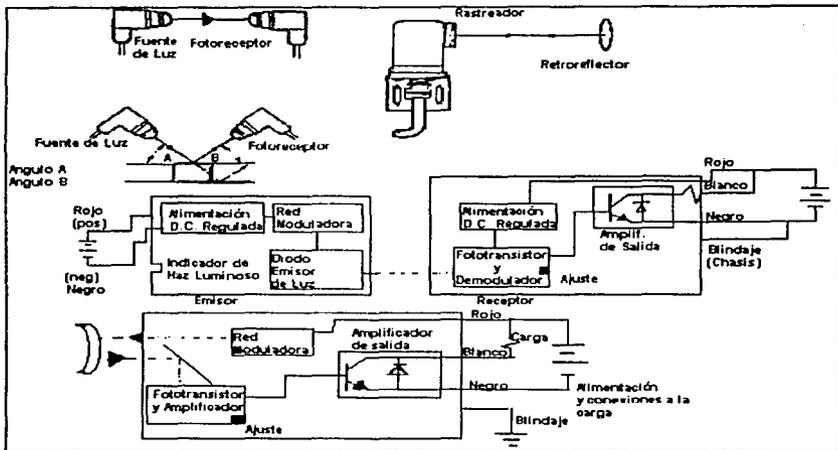
En la exploración especular el objeto debe ser altamente reflexivo (de metal pulido, plástico brillante, espejos o superficies especulares). Como se ilustra en la figura, el ángulo incidente es igual al ángulo reflejado, por lo que las posiciones del sensor y la fuente, así como las distancias al objeto deben ser cuidadosamente controladas.

En la exploración difusa los objetos deberán estar en color mate en vez de brillantes, a fin de que el sensor pueda detectar la radiación difusa o esparcida.

En los sistemas interruptor por sensores de posición fotoeléctricos, se usan muy comúnmente diodos emisores de luz (LED) como fuentes de luz. El uso de luz infrarroja, especialmente si es modulada, junto a sensores de luz sintonizados a la frecuencia modulada, es muy eficaz para minimizar efectos indeseables

debidos a la luz ambiental. La modulación se realiza en forma de pulsos, proporcionando pulsos infrarrojos de alta intensidad provenientes de un LED.

En la figura también se muestra el diagrama de bloques para sistemas con sensores de posición con luz modulada.



#### 4.4. - DISPOSITIVO DE CONVERSIÓN ANALÓGICO DIGITAL Y DIGITAL ANALÓGICO.

Temperatura, presión, velocidad, humedad, etc. Todas estas son variables continuas y son catalogadas como variables analógicas. Las variables analógicas son antagónicas a las variables digitales las cuales son variables discretas en el tiempo. La información en forma digital se puede procesar, almacenar, comunicar y presentar con facilidad y sin errores.

Para que se pueda implementar cualquier tipo de aplicación de control o medición, con ayuda de sistemas computarizados, hay que contar con circuitos especiales, esto es, **convertidores** análogo / digital, que se encargan de convertir variables eléctricas analógicas a variables discretas, que pueden ser interpretadas por los sistemas digitales.

Este tipo de conversión se basa en cuantificar la amplitud de una señal de voltaje y representarla de una forma binaria, por lo que los datos que produce un **convertidor A / D** son totalmente disponibles para poder ser manipulados y analizados por cualquier equipo de cómputo. El proceso de tomar información analógica, a menudo de varias fuentes, y convertirla a una forma digital recibe con frecuencia el nombre de adquisición de datos; ésta consiste en varias etapas.

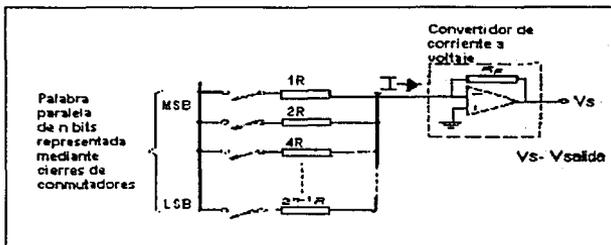
Estas operaciones se efectúan mediante convertidores de datos, que se pueden dividir en convertidores digitales analógicos (**DAC, digital to analog converters**) y convertidores analógicos digitales (**ADC, analog to digital converters**). Existe una diversidad de convertidores y cada uno proporciona conversión con una definición (resolución) particular. Esto determina el número de pasos o niveles de cuantificación que se usan. Un convertidor de *n bits* produce o acepta una palabra en paralelo de *n bits* y usa  $2^n$  pasos discretos. Entonces, un convertidor de **8 bits** utiliza **256 niveles** y uno de **10 bits** utiliza **1024 niveles**

## CONVERTIDORES DIGITALES ANALÓGICOS

Hay dos formas de realizar esta conversión:

### 1. MÉTODO DE RESISTENCIAS PONDERADAS

Esta forma de **DAC** es un desarrollo del convertidor de corriente a voltaje. La figura muestra una forma simple del convertidor.



Cada entrada controla un conmutador que conecta a una resistencia con un voltaje de referencia  $-V_{ref}$ . Estos conmutadores se encuentran cerrados cuando el bit correspondiente se pone a uno. Si el conmutador conectado al bit más significativo (MSB, most significant bit) de la palabra digital de entrada está cerrado mientras todos los demás están abiertos, entonces el voltaje de referencia se conecta a un extremo de la resistencia  $R$ . El otro extremo de esta resistencia está conectado a la entrada inversora del amplificador operacional, que es un punto de tierra virtual y por lo tanto está a  $0\text{ V}$ . El voltaje que cruza la resistencia es entonces igual al voltaje de referencia y la corriente que fluye hacia el punto de tierra virtual está dada por:

$$I = \frac{-V_{ref}}{R}$$

Si se pone en 1 el siguiente bit más significativo mientras todos los demás están en 0, el voltaje de referencia se aplica a través de la resistencia  $2R$ . Esto produce una corriente hacia el amplificador de:

$$I = \frac{-V_{ref}}{2R}$$

que es la mitad de la producida por el MSB. Esta progresión continúa y cada entrada produce a su vez la mitad de la corriente que la entrada anterior. Por lo tanto, las entradas están ponderadas.

Como la entrada del amplificador operacional es una tierra virtual, su voltaje no cambia con la corriente que fluye hacia él. Entonces el hecho de que se cierre un conmutador no afectará la corriente inyectada por otro conmutador. Por lo tanto, las corrientes se suman para dar un valor que representa la combinación de conmutadores que se han cerrado. El convertidor de corriente a voltaje convierte entonces esta corriente de entrada  $I$  en un voltaje de salida de acuerdo con la expresión:

$$V_0 = -IR_F$$

Donde  $R_F$  es la resistencia de realimentación.

Solo cuando el LSB se pone a 1 la corriente  $I$  estará dada por:

$$I = \frac{-V_{ref}}{2^{n-1}R}$$

Y por lo tanto el voltaje de salida será:

$$V_0 = -IR_F = \frac{V_{ref} R_F}{2^{n-1}R}$$

Esto representa el voltaje de salida para un número de entrada de 1. Para un número de entrada de  $m$  la salida será entonces:

$$V_0 = m \times \frac{V_{ref} R_F}{2^{n-1}R}$$

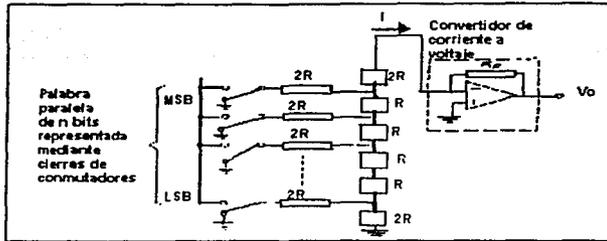
Donde  $m$  es la palabra digital

El método de conversión de resistencias ponderadas utiliza un pequeño número de resistencias, pero requiere que éstas tengan una amplia variedad de valores (un intervalo de  $R$  a  $2^{n-1}R$ ).

Una desventaja es que las resistencias de valores en extremo diferentes tienden a presentar coeficientes de temperatura de resistencia desiguales, lo cual significa que las relaciones entre ellos cambiarán con la temperatura. Esto limita la estabilidad de temperatura de esta técnica.

## 2. MÉTODO DE LA CADENA DE RESISTENCIAS R-2R

El método R-2R también utiliza el circuito del convertidor de corriente a voltaje, aunque no requiere una amplia variedad de valores de resistencia. La siguiente figura ilustra el circuito.



La diferencia en este caso es que todas las resistencias conectadas a los conmutadores tienen el mismo valor. El otro extremo de la resistencia en cada caso está unido a una cadena de resistencias, que va de la entrada inversora del amplificador operacional a tierra. El circuito está dispuesto de manera que las corrientes que fluyen a través de cada una de las resistencias conectadas a los conmutadores encuentren una resistencia de  $2R$  hacia uno y otro extremos a lo largo de la cadena de resistencias. Por lo tanto, la mitad de la corriente se irá en cada dirección, y las corrientes que fluyen por la cadena encuentran resistencias iguales hacia una u otra dirección en cada nodo y de nuevo se dividen.

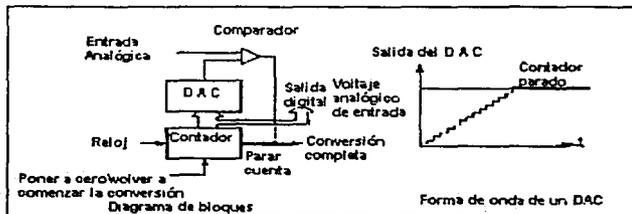
Por lo tanto, cada conmutador proporciona la mitad de la corriente que el conmutador anterior y las corrientes generadas por los conmutadores están ponderadas, al igual que en el método anterior, pero sin el uso de una amplia gama de valores de resistencia. Esto permite el uso de resistencias de temperatura apareadas para proporcionar una estabilidad de temperatura mejorada.

### CONVERTIDORES ANALÓGICOS DIGITALES

Hay varias técnicas para la conversión de analógico a digital. De éstas, cuatro son las más utilizadas.

#### 1. Contador o servo

El método contador de conversión proporciona una de las formas de ADC más sencillas. Su principio se ilustra en la figura.



TESIS CON  
 FALTA DE ORIGEN

En el corazón del convertidor se encuentra un DAC conectado a las salidas paralelas de un contador ascendente. La salida del DAC se compara con la señal analógica de entrada por medio de un comparador (un comparador es un dispositivo que produce una salida de 0 o 1 dependiendo de cuál de sus dos entradas sea más positiva). La salida del comparador se usa para generar un control de "paro" para el contador. En principio el contador se pone en cero y empieza a contar; conforme lo hace, aumenta la salida del DAC. Cuando el voltaje del DAC se hace igual a la señal analógica de entrada, la salida del comparador cambia de estado y el contador se detiene. Esta señal también se usa para generar una señal de control de "conversión completa". En esta etapa, el equivalente digital de la señal analógica de entrada se puede encontrar mediante la lectura de la salida paralela del contador.

Cuando un equipo externo ha recibido este valor, el contador se pone en cero y el proceso comienza de nuevo.

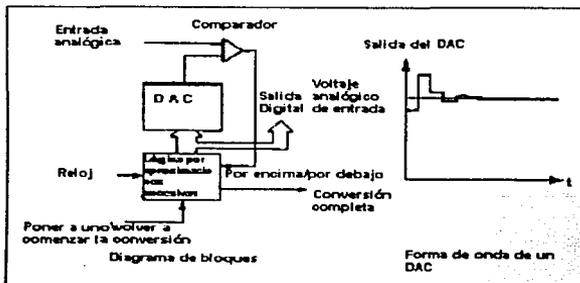
Por cada conversión el contador debe avanzar a partir de cero dejando tiempo suficiente después de cada cuenta para que tanto el DAC como el comparador se asienten.

Para una conversión de  $n$  bits, el tiempo de asentamiento será de 2 a la  $n$  veces.

Una modificación del contador ADC se forma mediante el reemplazo del contador ascendente con un contador ascendente / descendente. La salida del comparador se usa ahora como una señal de control ascendente / descendente, forzando al contador a que siga a la señal analógica de entrada. Este circuito recibe el nombre de servo ADC (*tracking*).

## 2 Aproximaciones sucesivas

El contador ADC es de funcionamiento lento pues utiliza un método muy ineficiente de búsqueda del valor correcto. El ADC por aproximaciones sucesivas es similar en muchos sentidos al ADC por contador, excepto en el hecho de que el contador sencillo se reemplaza con circuitos lógicos. En la figura se muestra este sistema.

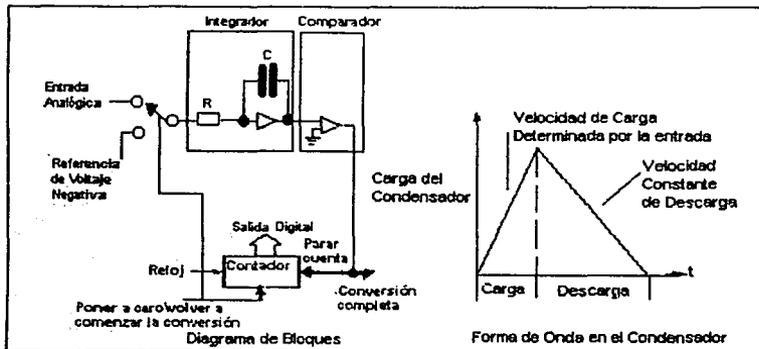


El DAC funciona a partir de una palabra digital producida por la aproximación lógica sucesiva. En principio todos los bits de esta palabra se ponen a 0 y luego el bit más significativo (MSB) se pone a 1. Esta palabra de entrada se convierte mediante el DAC en una señal analógica que corresponde a la mitad de la gama total del DAC. Este valor se compara con la señal analógica de entrada mediante un comparador y el resultado se devuelve a la lógica de control. Si la comparación muestra que la salida del DAC es menor que la de la entrada analógica, el MSB se queda en 1; si no, se pone a 0. En cualquier caso, la lógica pone entonces a uno el siguiente bit más significativo y de nuevo compara la salida del DAC con la señal de entrada. De esta manera, cada bit de la entrada al DAC se pone a su vez a uno y se determina su estado correcto. La conversión se completa cuando todos los bits de la entrada DAC se han puesto de manera correcta. Por lo tanto, para una conversión de  $n$  bits esto llevará  $n$  veces el tiempo de asentamiento del DAC y del comparador.

### 3. Doble rampa

Se usa un amplificador operacional para integrar la señal de entrada durante un periodo fijo de tiempo, produciendo una carga en el condensador del integrador que es proporcional al voltaje de entrada. Entonces se conecta el integrador a una fuente de corriente constante que descarga el condensador a velocidad constante. El tiempo que se requiere para reducir la carga a cero se mide contando los ciclos de un reloj estable; este tiempo es proporcional a la carga del condensador y por ende al voltaje de entrada.

La técnica de doble rampa tiene las ventajas de la alta precisión y el bajo costo, y se usa a menudo en aplicaciones como los medidores de panel digitales; también se usa cuando se requiere una resolución muy alta.

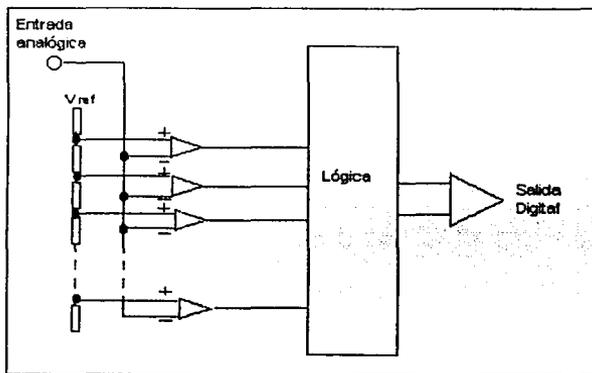


#### 4. Paralelo o flash

El convertidor paralelo, o flash, es el más rápido de los diversos tipos de ADC. Funciona mediante un comparador separado para comparar el voltaje de entrada con cada uno de los escalones de voltaje discernibles dentro del intervalo del convertidor. La figura muestra este circuito.

Los diversos escalones de voltaje se producen usando una cadena de resistencias de precisión a partir de una fuente de voltaje de referencia. Cada incremento de voltaje se conecta a un comparador diferente que lo compara con el voltaje de entrada. El resultado es que todos los comparadores conectados a los contactos a lo largo de la cadena de resistencias que tienen voltajes mayores que el voltaje de entrada producirán una salida de una polaridad, mientras que los que están conectados a voltajes por debajo del voltaje de entrada producirán voltajes en el sentido opuesto. Entonces se usa la lógica combinacional para determinar el valor del voltaje de entrada a partir de este patrón.

La gran ventaja de este método es su alta velocidad de conversión, pues todas las comparaciones se hacen de manera simultánea. Sin embargo, como un convertidor de  $n$  bits requiere 2 a la  $n$  comparadores, el hardware es bastante más complejo, y por lo tanto más caro, que con las otras técnicas.



#### 4.5. - DISPOSITIVOS DE ENTRADA Y SALIDA DIGITALES

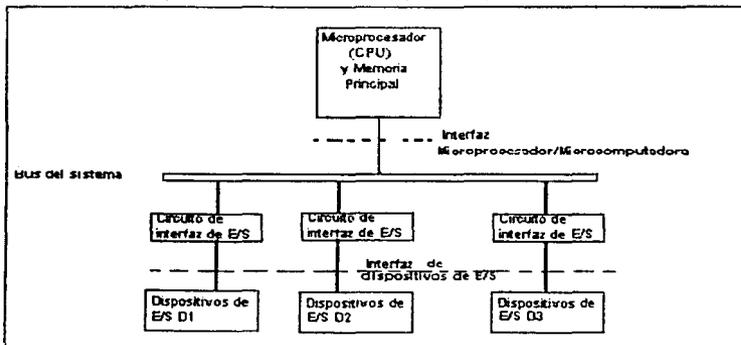
El proceso de unir un dispositivo de E/S a un sistema con una CPU (microprocesador) se denomina *interfaz*, e implica una fuerte interacción entre hardware y software. Aquí examinaremos las características generales de *interfaz* de dispositivos de E/S digitales.

El nombre «*interfaz*» es un término general para especificar la frontera o punto de contacto entre dos partes de un sistema. En sistemas digitales usualmente con él se hace referencia al conjunto de puntos de conexión de señales que el sistema o cualquiera de sus componentes presenta al exterior.

El verbo «interconectar» o la frase «realizar una *interfaz*» significa enlazar dos o más componentes o sistemas a través de sus respectivos puntos de *interfaz*, de forma tal que entre ellos pueda transferirse información. En un sistema con CPU (microprocesadores) hay principalmente dos tipos de *interfaces*: la *interfaz* CPU corresponde al *bus* del sistema; y las *interfaces* presentadas por los dispositivos de E/S del sistema. La última depende de los dispositivos de E/S con que están asociadas y varían en complejidad.

Como se muestra en la figura, para conectar un dispositivo de E/S a una CPU, normalmente entre el dispositivo y el *bus* del sistema se incluye un circuito de *interfaz* de E/S. La tarea global de enlazar una CPU y dispositivos de E/S se denomina interconexión o realización de una *interfaz*.

El problema de la interconexión con una CPU tiene dos aspectos principales hardware y software. Sabemos que los problemas relacionados con la



*interfaz* hardware consisten en relacionar los circuitos más adecuados, interconectar los hilos y asegurar que todas las señales tienen las características eléctricas pertinentes (nivel de onda, etc.). El aspecto software de la *interfaz* implica la redacción de programas, denominados programas de E/S, que controlan la transferencia de información hacia y procedente de los dispositivos de E/S. Este flujo de información puede ser entre los dispositivos de E/S y la CPU.

Las operaciones de E/S llevan consigo la transferencia de datos entre los dispositivos de E/S y la memoria principal. Algunas CPU, disponen de instrucciones especiales, colectivamente denominadas instrucciones de E/S, que tratan de facilitar la construcción de programas de E/S.

Las características de **interfaz** de un dispositivo de E/S, tal como la longitud de palabra usada para transferencia de datos al exterior y la máxima velocidad de transferencia de datos, con frecuencia son significativamente diferentes de las del CPU al que es conectado. Como muchas de las variables físicas con las que una CPU debe interactuar no son de naturaleza eléctrica, y puede tomar valores analógicos (continuos) en vez de valores digitales (discretos). La velocidad máxima a la que pueden producirse nuevos datos o ser aceptados por el dispositivo de E/S a menudo difieren extraordinariamente de la del CPU. En particular, los dispositivos de E/S en los que estén implicados movimientos mecánicos operan a unas velocidades mucho menores; si se interconectan a una misma CPU varios dispositivos de E/S, deben preverse medios para seleccionar sólo un dispositivo en el momento de efectuarse la operación de E/S, así se previenen conflictos en el uso del **bus** del sistema.

Las consideraciones precedentes implican que los circuitos de **interfaz** de E/S deben realizar las siguientes funciones:

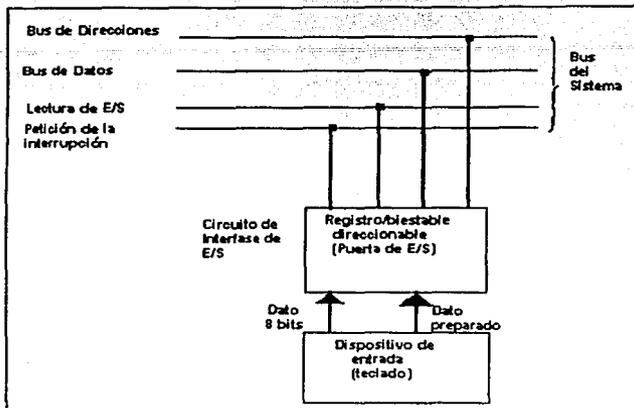
1. Conversión de datos.
2. Sincronización.
3. Selección del dispositivo.

La conversión de datos se refiere al acoplo de las características físicas y lógicas de las señales de datos empleadas por el dispositivo de E/S a las empleadas por el **bus** del sistema. Esto incluye una conversión de señales entre las formas analógica y digital y la conversión entre el formato de transmisión de datos serie (bit a bit) utilizado por algunos dispositivos de E/S y los formatos paralelo (palabra a palabra) usados por la mayoría de las CPU.

La sincronización se necesita para acomodar las diferentes velocidades operativas de la CPU, memoria principal y dispositivos de E/S. Esto usualmente requiere la inclusión en el circuito de **interfaz** de una o más palabras de memoria temporal o intermedia. Los dispositivos de E/S y la CPU funcionan independientemente en el sentido de que sus relojes internos no están sincronizados uno con otro. Por ello deben intercambiarse señales de control de conformidad (listo, petición, reconocimiento, etc.) a través de los circuitos de **interfaz** para iniciar o terminar las operaciones de E/S.

La selección de dispositivo también implica el intercambio de señales de control. La selección de un dispositivo de E/S por la CPU puede realizarse de la misma forma que una operación de lectura o escritura en memoria. La CPU sitúa una palabra de dirección asociada con el dispositivo en cuestión en el **bus** de direcciones del sistema, y activa las líneas adecuadas de control de disponible para entrada (leer) o salida (escribir).

La figura muestra la estructura del circuito de **interfaz** necesario para interconectar un dispositivo de entrada específico, un teclado tipo teletipo, a un microprocesador de 8 bits.

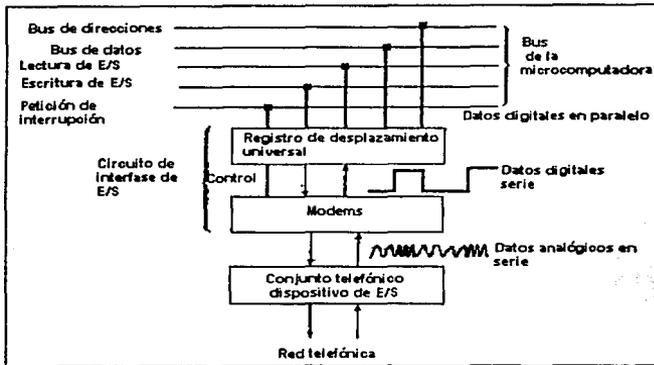


Aquí se supone que el teclado genera una palabra única de 8 bits (por ejemplo, un código ASCII) por cada tecla pulsada. También indica la disponibilidad de una nueva palabra activando una línea de control «dato listo». La conexión directa de las líneas de *interfaz* del teclado con el *bus* del sistema no es posible a causa de que es imprevisible el instante de tiempo en el que las teclas son pulsadas y se produce un nuevo dato. Un circuito de *interfaz* tiene como objetivo, por tanto, actuar como memoria intermedia entre el teclado y el *bus* del microprocesador. Este es básicamente un registro o conjunto de biestables de 8 bits direccionable con algunas señales de control lógico adicionales, y se denomina puerta de E/S (entrada). Realiza las siguientes funciones:

1. Recibe y almacena palabras de datos, una a una, procedentes del teclado; cada nueva palabra de datos reemplaza a la precedente.
2. Indica la presencia de un nuevo dato en la puerta de E/S enviando una señal de petición de interrupción a la CPU a través de una línea de control del *bus* del sistema.
3. Responde a una orden de E/S procedente de la CPU transfiriendo su palabra de datos almacenada al *bus* de datos del sistema, esto permite llevar el dato para ser leído a la CPU.

Un problema de *interfaz* de E/S más complicado se ilustra en la figura. Aquí la CPU se conecta a dispositivos de E/S remotos, con los que se comunica (a larga distancia) a través de una línea de teléfono; la última, por tanto, define la *interfaz* de E/S local. La transmisión de datos a través de líneas telefónicas es serie, ya que únicamente se dispone de dos hilos, y se utilizan señales analógicas

para representar los datos. Normalmente se utiliza una señal eléctrica (senoidal) llamada portadora.



La portadora es modulada para tener dos frecuencias distintas que representa el 0 y el 1 lógicos. Cuando se utilizan líneas de teléfono convencionales (audio), estas frecuencias pueden ser oídas como tonos o zumbidos de diferente agudeza. La transmisión de datos, por tanto, utiliza secuencias de zumbidos. Un dispositivo electrónico denominado **modem** (modulador-demodulador) sirve para convertir los datos del formato de pildos al formato normal de pulsos digitales utilizado en el interior de la CPU, y viceversa.

La transmisión de datos a través del **modem** es serie, mientras que la transmisión de datos sobre el **bus** del sistema es paralelo. De aquí que sea necesario un circuito que convierta datos de tipo serie a tipo paralelo durante las operaciones de entrada, y de paralelo a serie durante las operaciones de salida.

Para realizar esta tarea puede adaptarse fácilmente un registro de desplazamiento universal, y puede también servir de puerta de E/S para **modem**.

| TIPO           | DESCRIPCIÓN   |
|----------------|---|
| ENTRADA        | CONMUTADOR conectado/desconectado<br>TECLADO<br>TRANSDUCTOR (sensor)  |
| SALIDA         | VISUALIZADOR LED<br>PANTALLA (CTR)<br>MOTOR/ACTUADOR ELÉCTRICO<br>IMPRESORA   |
| ENTRADA/SALIDA | TERMINAL INTERACTIVO<br>MEMORIA SECUNDARIA<br>UNIDAD DE DISCO<br>MAGNÉTICO<br>REGISTRO DE CINTA<br>(CASSETTE)<br>ENLACE DE COMUNICACIONES<br>BUS CONVENCIONAL<br>LINEA TELEFÓNICA |

En la tabla anterior se enumeran algunos de los dispositivos de E/S más frecuentemente utilizados en la CPU.

Entre los dispositivos de entrada más sencillos se encuentran los conmutadores conectado/desconectado y los teclados que consisten en conjuntos de pulsadores denominados teclas.

Los conmutadores son dispositivos inherentemente digitales que generan señales eléctricas binarias que pueden ser fácilmente interconectadas con una CPU, en donde esta es frecuentemente utilizada para captar o medir variables no eléctricas tales como temperatura, posición, velocidad e intensidad de luz. Para este objetivo se necesita un **transductor** o un sensor para detectar la variable física en cuestión y generar una señal eléctrica proporcional; la conversión de parámetros físicos no eléctricos a eléctricos se denomina transducción y a la capacidad de respuesta de un instrumento ante determinados estímulos se denomina sensibilidad.

Un **transductor** típico produce una señal de datos que es analógica en vez de digital. Esta señal debe convertirse a forma digital antes de poder enviarse a la CPU. Por tanto, asociados con la mayoría de los **transductores**, debe darse un proceso de conversión analógica a digital.

En muchas CPU's hay dispositivos de salida que visualizan la información digital, por ejemplo:

Para dar salidas con poca información numérica se utilizan visualizadores LED de siete segmentos.

Para salidas de gran cantidad de datos alfanuméricos puede utilizarse una pantalla CRT («Cathode Ray Tube») del tipo de las utilizadas en TV, para visualizarlos convenientemente. Un CRT es también útil para visualizar imágenes gráficas que son procesadas por la computadora.

Cuando la computadora debe controlar un movimiento mecánico, frecuentemente se utilizan motores eléctricos como dispositivos de salida. Los motores también pueden incorporarse en dispositivos de salida más complejos tales como impresoras y brazos de robots.

Dispositivos de entrada y salida del tipo de los anteriores pueden combinarse en una unidad única para formar un dispositivo con funciones tanto de entrada como de salida.

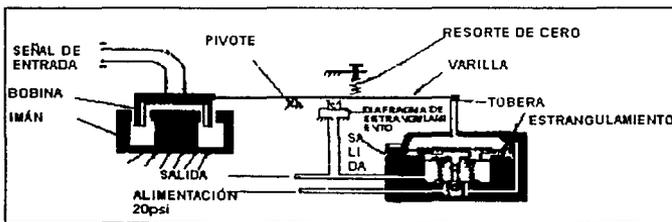
La combinación de un teclado y una pantalla CRT constituye un vídeo terminal, un dispositivo de E/S convencional para que el usuario interactúe con la computadora.

Otra importante clase de dispositivos de E/S son las memorias secundarias, tales como dispositivos magnéticos de memoria de cinta y de disco. Estas memorias utilizan soportes magnéticos para memorizar y mecanismos de lectura/escritura electromecánicos. Proporcionan una gran capacidad para almacenamiento a un costo relativamente bajo, pero son mucho más lentos que la memoria principal construida por semiconductores RAM y ROM.

Cuando una computadora se enlaza a un dispositivo relativamente lejano, la línea de comunicación es vista como un dispositivo de E/S local de la computadora a los efectos de **interfaz**. Para simplificar las **interfaces** en ciertas áreas de aplicación se han definido diversos **buses** normalizados, que facilita la interconexión de instrumentación a una computadora (CPU).

#### 4.6. - ACTUADORES NEUMÁTICOS

Con el fin de utilizar las válvulas accionadas por **diafragma** y por pistón desde controladores electrónicos, la señal eléctrica se debe convertir en una presión **neumática**. Los **transductores electroneumáticos** y **posicionadores** sirven para este propósito.



#### TRANSDUCTORES ELECTRONEUMÁTICOS

Los componentes principales son el conjunto de la bobina móvil, que consta de la bobina, el imán y el relevador, el cual regula la salida de la presión de aire.

La línea de salida se conecta al **diafragma** de una válvula de control, así que el aire fluye sólo cuando aumenta o disminuye la señal de presión.

El relevador contiene dos diafragmas conectados rígidamente uno con el otro, por lo tanto, siempre se mueven juntos. El espacio entre los **diafragmas** está abierto a la atmósfera por un orificio.

La superficie libre del **diafragma** superior es mayor que la del **diafragma** inferior así que una presión menor, en el **diafragma** superior puede compensar una presión de aire mayor contra el **diafragma** inferior. Cuando el conjunto del **diafragma** superior baja, se coloca en posición una válvula de entrada admitiendo presión de aire desde la alimentación a la salida. Por el contrario, cuando se

mueven hacia arriba, cierran la válvula de entrada, abriendo otra entre la salida y la atmósfera para la evacuación.

Un aumento en la señal de entrada a la bobina móvil la eleva, y hace que la varilla se acerque a la **tobera**. La reducción que resulta en la **tobera**, produce un aumento en la presión de ésta y en la cámara superior del relevador. El conjunto del **diafragma** relevador bajará, abriendo la válvula de entrada. El aire fluirá a la cámara central, aumentando la presión de salida hasta que el conjunto del **diafragma** relevador retroceda a su posición original, y la válvula de entrada cierre de nuevo.

La salida aumentada desde el relevador, va a la válvula de control y al **diafragma** de realimentación. La fuerza de la presión de este último actúa sobre la varilla. Cuando la fuerza de realimentación compensa la de la bobina, el sistema queda en equilibrio y la presión de salida del relevador es exactamente proporcional a la corriente de entrada.

Una disminución en la señal de entrada a la bobina, la mueve hacia abajo y deja al descubierto la **tobera**, disminuyendo la presión en ésta. Las presiones descompensadas en los **diafragmas**, fuerzan al conjunto hacia arriba abriendo el orificio de entrada. La presión de aire desde la válvula de control y el **diafragma** de realimentación, es desechada por el orificio de salida hasta que el conjunto del **diafragma** vuelve a su posición primitiva.

Un **posicionador electroneumático** difiere del **transductor electroneumático**, en que no tiene **diafragma** de realimentación. En su lugar se conecta un resorte de realimentación.

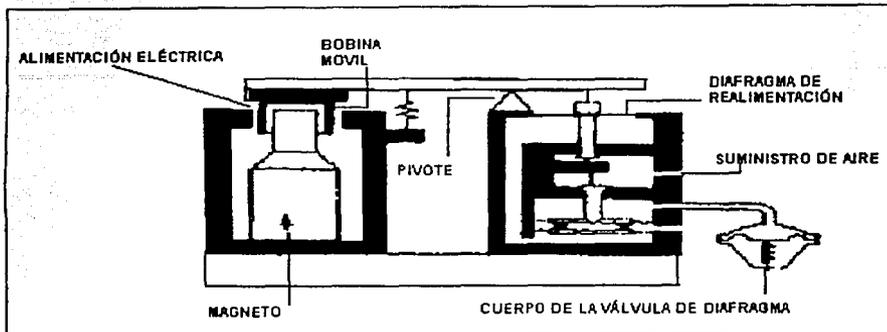
## RELEVADOR ELECTRONEUMÁTICO

Una bobina móvil que recibe la señal de alimentación, es posicionada en un campo magnético. El brazo de palanca se mueve en respuesta a esta fuerza.

Una señal para aumentar la presión de salida fuerza a la válvula piloto hacia abajo aumentando el suministro de aire al **diafragma** del relevador amplificador de señal.

El vástago de la válvula amplificadora sube y admite más aire hacia la válvula de control. Cuando la presión de salida se estabiliza en una nueva posición, la válvula amplificadora cierra la admisión hacia el **diafragma**, y el **diafragma** de retroalimentación se aleja del vástago de la válvula piloto. El sistema entonces se encuentra en equilibrio bajo la presión requerida.

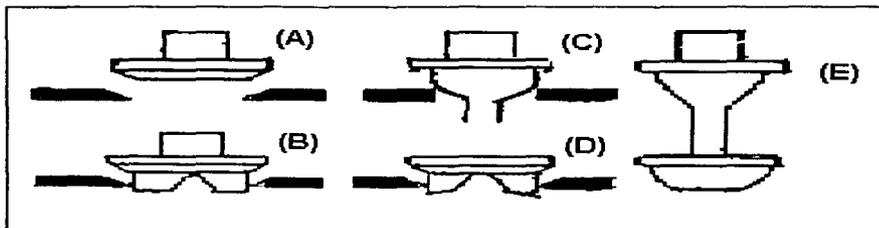
Más comúnmente, el elemento de control final en un sistema de control industrial es una válvula, como un fluido es casi siempre el medio de control.



### CARACTERÍSTICAS DE LAS VÁLVULAS

Las válvulas de control son de muchos diseños, pero en general sus características pueden ser descritas como de disco biselado, con puerta en V, de taponamiento de igual porcentaje, de compuerta en V de igual porcentaje y de taponamiento lineal. Para servicio de estrangulamiento, las válvulas de control son generalmente de doble asiento, de tal manera que estén lo suficientemente balanceadas contra la presión de la línea. Las válvulas pueden abrir si aumenta la presión del medio de control o pueden cerrar con aumentos en la presión del mismo.

La Figura muestra los principales tipos de interiores de válvulas: (A) es el tipo disco biselado, (B) es una de compuerta en V, (C) y (D) del tipo de tapón de igual porcentaje y compuerta en V, y (E) una de tapón lineal.



En este capítulo, hablamos de los diferentes dispositivos para sensor, ubicar, limitar, así como los elementos para comunicar estos fenómenos físicos (analógicos) a un mundo digital, esto con la finalidad de poder tener un control de la medición, que sea eficiente por lo que necesitamos de un dispositivo que lo realice y sobre cual es la mejor opción y la manera en que se puede realizar es que trata el siguiente capítulo y la aplicación en la reconstrucción de la máquina (INFAS), la mencionaremos en el capítulo 6

# **CAPÍTULO V**

## **LA PROGRAMACIÓN**

La programación puede realizarse en un Controlador Lógico Programable (PLC), en una Computadora Industrial o en una Computadora Personal (PC)

En un PLC se tiene que la programación del mismo es complicada además de que el hardware necesario para que el PLC se comunique con el exterior normalmente deben ser comprados en la misma empresa que lo fabricó, ya que existe poca compatibilidad con otros productos en el mercado, creándose una dependencia con el fabricante y de esa manera se vuelve complicado el uso de otro tipo de equipo, aunado a esta limitante está la poca interacción que puede tener el usuario con el mismo

Con una computadora industrial el problema sería el costo, ya que la relación costo – beneficio estaría desbalanceada.

Con una Computadora Personal, se tienen varias ventajas comenzando por la relación costo – beneficio en donde el costo de una PC es menor con respecto al beneficio que se obtiene, en cuanto a la interacción con el usuario es más amigable y sencilla, con lo cual se pueden desplegar en su monitor gráficas, advertencias, análisis, etc., con la programación se puede elegir un lenguaje de fácil programación y con respecto al hardware que se puede utilizar no estamos supeditados a un solo fabricante, es decir, que podemos utilizar diferentes equipos, tarjetas, etc. que nos facilitarán la comunicación de los eventos exteriores con la PC.

## **LENGUAJES DE PROGRAMACIÓN**

### **LENGUAJE DE ALTO NIVEL PARA USO GENERAL.**

La mayoría de los programas se escriben en lenguajes de alto nivel, independientemente de la computadora utilizada. Una dificultad con muchas Unidades Centrales de Procesamientos (CPU), es que se necesita un gran número de instrucciones para implantar tareas de cómputo que en los lenguajes de alto nivel poseen expresiones cortas.

Una CPU requiere mínimo de tres características para facilitar el implante de programas en lenguaje de alto nivel.

La primera.- Es la definición de datos, (enteros, número de punto flotante y cadenas de caracteres) para la representación de nombres y textos. Además de los esquemas usuales de representación de números en binario, también resulta muy útil tener una representación de números decimales. Deben considerarse dos aspectos importantes en los datos numéricos. Primero, el tamaño de los números que pueden manejarse debe abarcar la gama de valores que se encuentran en cálculos científicos y de negocios. En segundo lugar, debe incluir instrucciones para cada una de las operaciones aritméticas básicas con cada tipo de números. En el caso de cadena de caracteres, el conjunto de instrucciones debe facilitar operaciones tales como la traducción entre distintas representaciones de caracteres.

La segunda característica es incluir modos de direccionamiento, y tal vez incluso algunas instrucciones especializadas en el manejo de arreglos. En este aspecto una tarea básica es el cálculo de direcciones de la memoria principal.

Por último, es conveniente tener las tres operaciones de control de terminación de ciclos: Manejo de variables de control de ciclo, prueba y ramificación, proporcionadas en una sola instrucción.

Otras características que también resultan útiles son por ejemplo:

1. Eficientes instrucciones de llamada a procedimientos (subrutinas), incluyendo operaciones de paso de parámetros y de guardado y restauración de registros.
2. Representación eficiente y manipulación de pilas para dar apoyo a llamadas anidadas de procedimiento.
3. Implante de tareas comunes en instrucciones solas, tales como la búsqueda del patrón de una cadena de caracteres.

Los proveedores de sistemas y servicios de computación son responsables de proporcionar este tipo de programas, conocidos en forma colectiva como programas del sistema de cómputo o software del sistema. El software del sistema incluye traductores para convertir los programas a lenguaje de máquina. Se utilizan otros programas de sistema para cargar estos programas traducidos del almacenamiento secundario a la memoria principal antes de su ejecución. Un componente importante del software de sistema es el conjunto de rutinas que se utilizan para manejar la operación de los recursos físicos (CPU, memoria principal, almacenamiento secundario, dispositivos de E/S, etc.), en un sistema completo de cómputo. Estas rutinas abarcan los programas del sistema operativo.

### ***LENGUAJE DE ALTO NIVEL DE APLICACIÓN***

El lenguaje más básico es el lenguaje de máquina, en el cual los programas se representan por medio del listado de los patrones binarios de las instrucciones de máquinas y de los datos. Un programa en lenguaje de máquina para una computadora específica puede ejecutarse en esa computadora sin la

ayuda de otro programa. Sin embargo, ya que programar en lenguaje de máquina es un proceso muy complicado para nosotros, los humanos, por lo general los programas se escriben en algún lenguaje que nos sea fácil de comprender. Los más simples de éstos son los lenguajes de ensamble.

Los lenguajes orientados a problemas, como el BASIC, el FORTRAN, el PL/I, el COBOL, el ALGOL, el PASCAL, el APL, el LABVIEW, etc., a menudo se conocen como lenguajes de alto nivel de aplicación o de usuarios.

Tienen un conjunto de instrumentos de operación y de control que son sustancialmente más poderosos que los en los lenguajes de ensamble.

Las instrucciones de un programa escrito en cualquier lenguaje se le denomina programa fuente. Los programas del sistema denominados traductores traducen los programas fuente a lenguaje de máquina. En el caso de lenguajes de ensamble, estos traductores se les llama ensambladores. Cuando el programa fuente ésta en un lenguaje de alto nivel, al traductor se le denomina compilador. La salida del proceso de traducción de lenguaje se conoce como *programa objeto* o *código objeto*. En la situación más simple, el programa objeto está en lenguaje de máquina y puede cargarse directamente en la memoria principal y ejecutarse.

Estos programas de aplicación contienen los pasos necesarios que debe ejecutar la computadora para llegar a la solución del problema. El programa es una serie de instrucciones que la computadora entiende por medio de los lenguajes ensamblador o compilador. Cada instrucción es un comando para la computadora que llevará acabo una operación sencilla. Combinaciones de estas instrucciones se vuelven programas. La preparación de un programa específico requiere de cuatro pasos básicos, que son:

1. Definición del problema.
2. Preparación de un diagrama de flujo del programa.
3. Escribir el programa en lenguaje de máquina, lenguaje de ensamble o lenguaje compilador.
4. Traducir el programa al lenguaje de máquina, si el programa está escrito en lenguaje ensamblador o compilador.

Como se mencionó anteriormente hay tres tipos de lenguaje en que se puede programar: Lenguaje de máquina, lenguaje de ensamble y lenguaje compilador. Sin embargo muchos programas son escritos hoy en día en lenguajes artificiales, las computadoras no entienden estos lenguajes y un programa escrito en este lenguaje debe traducirse al lenguaje de máquina antes de que se ejecute.

En este capítulo hablamos de algunas opciones para realizar un control eficiente sobre los sistemas, así como una relación costo - beneficio balanceada, y la manera en que se puede desarrollar la misma; en el siguiente capítulo, hablaremos sobre esta opción, para la implementación en la reconstrucción de la máquina (INFAS).

# CAPÍTULO VI

## IMPLEMENTACIÓN Y DESARROLLO

En este capítulo hablaremos de cómo se desarrolló el proyecto sobre el cual versa esta tesis, primeramente mencionaremos que la máquina de evaluación de uniformidad (*INFAS*) originalmente fue desarrollada en Argentina y estuvo operando en Chihuahua durante unos 6 años, después de lo cual salió de operación por considerarse obsoleta. Sin embargo mecánicamente la máquina era funcional y podría ser reconstruida, con lo cual se lograría un ahorro substancial.

El criterio que se utilizó en este análisis fue el ver si las piezas mecánicas estaban en buenas condiciones, (sin desgaste excesivo) para funcionar. Si es que cumplían con esta primera revisión, verificábamos la existencia de refacciones en el mercado nacional a fin de obtenerlas fácilmente; una vez terminada esta revisión se procedió a retirar todos los componentes obsoletos, debido a que la computadora y el sistema de adquisición de datos, estaban ensamblados en el gabinete principal se contempló la reconstrucción de éste.

Los sistemas de protección fueron revisados y mejorados o bien reemplazados por otros, pues se requería que la máquina fuera segura además de proteger los nuevos componentes.

Hasta ahora hemos visto diferentes tipos de *transductores*, sensores, *actuadores*, dispositivos digitales, dispositivos analógicos, y *software*, así como sus modos de operación. En este capítulo se hablará en particular de los dispositivos que se seleccionaron para la reconstrucción de la máquina de evaluación de uniformidad (*INFAS*).

Los sensores seleccionados cumplen las siguientes características:

El LVDT tiene un rango de desplazamiento de  $\pm 0.5\text{mm}$ , alta fiabilidad y robustez. Con lo cual podemos asegurar que las pequeñas variaciones que tiene la rueda pueden ser sensadas, y la robustez es importante, ya que el medio ambiente es agresivo. Además se caracteriza por ser CA/CA sin electrónica incorporada, con lo cual se reducen los gastos, ya que si se daña el sensor no hay que reemplazar la etapa de acondicionamiento de la señal (para más detalle ver el capítulo 4).

Los *encoders* son absolutos, ya que cumplen con estabilidad cuando la rotación es lenta, además de determinar el sentido de giro y por ello puede ser usado como sensor de posición angular además puede ser tolerada la pérdida de información de la posición, la cual se mantiene aun cuando la referencia se pierda a causa de una interrupción en la alimentación. En lugar del flujo serial de bits de

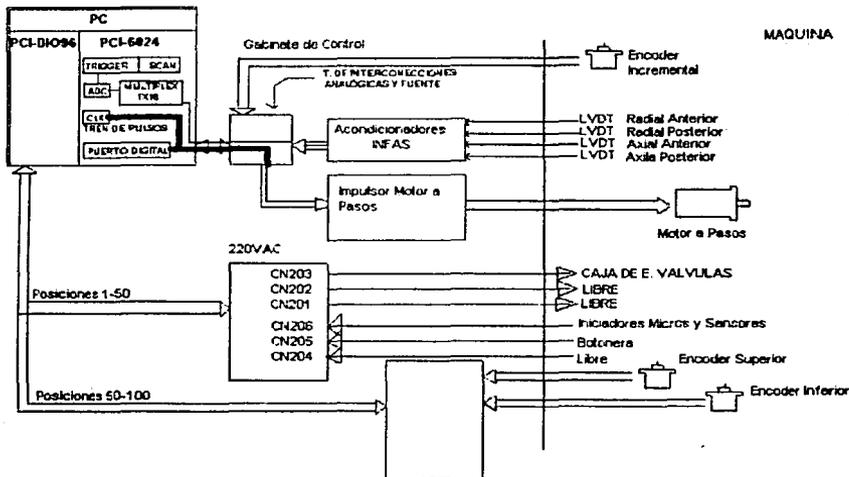
los diseños incrementales, el **encoder** absoluto provee una palabra de salida paralela con un patrón codificado único para cada posición cuantificada de la flecha. Los códigos más comunes son el código **Gray**, binario natural, y decimal codificado a binario. El código **Gray** está caracterizado por el hecho de que un solo bit puede cambiar en un tiempo, una ventaja decidida en la eliminación de ambigüedades causadas asincrónicamente por las tolerancias de los componente electrónicos y mecánicos con lo cual nos aseguramos que siempre estará dando la posición correcta en que se encuentre.

Los sensores de límite de carrera usados son sin contacto, con lo cual se asegura que el mismo tendrá una vida útil larga pues no hay desgaste mecánico, se usa este tipo de sensor ya que el objeto es metálico con lo cual este tiende a absorber el campo electromagnético generado en el devanado del sensor representando una carga para el oscilador que reduce su nivel, este cambio de nivel realiza la acción interruptora. Cuenta el sensor con un led ubicado en un lugar visible proporcionando una indicación

Este es uno de los puntos importantes pues de la adecuada selección de dispositivos repercutirá en una operación eficiente de la máquina ya que serán controlados por una computadora y en su caso para la transferencia de datos a una tarjeta de adquisición de datos.

#### 6.1. - CONSTRUCCIÓN DE TARJETAS ANALÓGICAS Y DIGITALES.

De la amplia gama de tarjetas de adquisición de datos, se seleccionaron dos de ellas, una para controlar las válvulas solenoides y microinterruptores. La segunda para el control del motor a pasos y adquisición de datos, la tarjeta para la adquisición de datos y control del motor a pasos es una **PCI-6024** que es una tarjeta de entradas y salidas analógicas, donde cuenta con un convertidor analógico digital (ADC), al cual se le conectan las señales de disparo (trigger) que sirve para indicar el punto en el cual se comenzará con la adquisición de datos y de muestreo (scan) que nos indica cada cuantos grados se estará adquiriendo datos; del mismo ADC se conecta a un multiplexor de 1x16 de los cuales sólo se están usando cuatro canales para los sensores axiales y radiales, los demás canales están libres; esta misma tarjeta cuenta con dos relojes y solo se está usando uno de ellos que es donde se conecta la señal de reloj para que genere un tren de pulsos el cual servirá para el control del motor a pasos, por último esta tarjeta analógica cuenta con un puerto digital de ocho bits el cual se utilizará para el control de encendido del motor a pasos, ya que este cuenta con un imán permanente y al realizar la rotación de la rueda, si este queda energizado se dañaría.

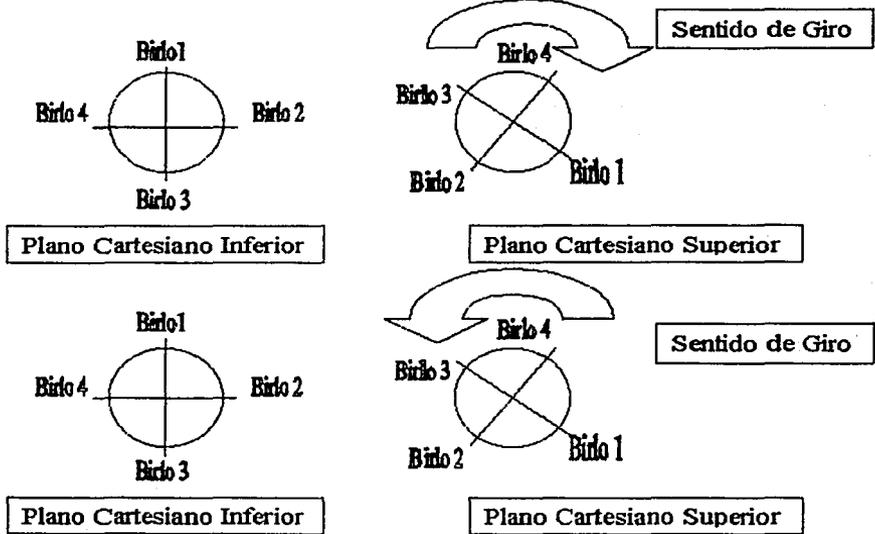


La tarjeta para el control de la máquina (control de los dispositivos encendido apagado de la máquina) es una **PCI-DIO-96**, que es una tarjeta con **bus PCI** de 96 líneas de entradas y/o salidas digitales; conjuntamente con las tarjetas que se adquirieron fue necesario elaborar tres modelos adicionales de tarjetas para el control de la máquina, en donde el primer modelo sirve para el control de las variables digitales en donde tiene 24 líneas de entradas y 24 líneas de salidas, acopladas ópticamente, en donde las salidas son colector abierto y sirven para mover las válvulas solenoides y cualquier otro dispositivo de encendido/apagado, funcionando con 24 **VDC**, a 500 **mA**, de este modelo se armaron dos tarjetas; el segundo modelo es para la salida de relevadores; sirve para controlar algunos dispositivos que funcionan con 120 **volts**, se armaron dos tarjetas las cuales funcionan con un voltaje **TTL** adicionando led's indicadores con la finalidad de observar si está en operación el relevador, el tercer modelo es una tarjeta analógica la cual sirve para el control de las variables analógicas y básicamente es un filtro que acopla la señal y los dispositivos analógicos

## 6.2. - OPERACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE LOS ENCODERS.

Como ya se mencionó, los encoders son de tipo absoluto, con lo cual se tiene una gran ventaja, ya que no es necesario tener un índice predeterminado en la orientación de los encoders añadiendo a esto que si tenemos fallas de energía o al iniciar la operación de la máquina no nos importa saber exactamente en donde esta la flecha del encoder, esto es su ubicación, ya que lo único que se realiza es una comparación del encoder inferior con el encoder superior, es decir, se forma un plano cartesiano del encoder inferior, el cual se compara con el plano cartesiano del encoder superior, dando así una posición, la cual verifica cual es la

distancia mínima a recorrer en grados ya sea en sentido horario o en sentido antihorario para igualar los planos cartesianos, si se diera el caso en el que esta a la mitad del recorrido, por determinación en el software el movimiento será en sentido horario.



### 6.3. - PROGRAMA

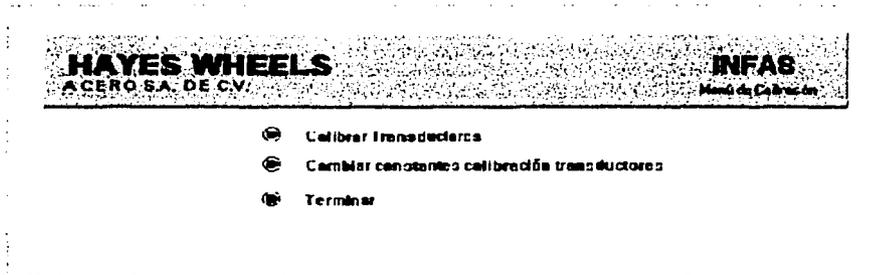
Como plataforma de desarrollo se utilizó una computadora personal estándar con capacidad para soportar el **hardware** y el **software** seleccionados.

El **software** seleccionado fue **Labview**, que es un lenguaje de programación gráfica para adquisición, control, análisis y presentación de datos, sin embargo tiene todas las capacidades de cualquier lenguaje. Proporciona una amplia flexibilidad de cualquier lenguaje de programación sin dificultad y complejidad. **Labview** fue diseñado para generar pantallas gráficas interactivas con el usuario, por lo que le será muy fácil de usar requiriendo una capacitación mínima (recordemos que una imagen vale más que mil palabras). Dispone de múltiples opciones para el manejo de datos. Adicionalmente el modo de programación en **Labview** es gráfico, es decir, prácticamente se diseña un diagrama de flujo, todas las instrucciones son representadas por iconos por lo cual es muy rápida la programación además de ser fácil de entender.

Sin embargo el principal problema surge con el choque cultural ya que estamos acostumbrados a programar en modo texto.

Las características antes mencionadas, fueron los principales elementos que determinaron su selección. Otro aspecto importante en comparación con los otros paquetes fue en relación costo - beneficio; ya que definitivamente **Labview** resulta ser un lenguaje que permite desarrollos en poco tiempo y con una alta calidad, debido a esto, los costos en el desarrollo bajan notablemente.

### 6.3.1. - MÓDULO DE CALIBRACIÓN



El módulo de calibración lo requerimos a fin de determinar si el **transductor** a utilizar, en este caso el LVDT, es lineal en su rango de operación, ya que al no darnos cuenta si el **transductor** opera correctamente se estarían evaluando incorrectamente las ruedas; ya que cualquier **transductor** tiene la posibilidad de fallar por alguna operación incorrecta por parte de los usuarios o por el término de su vida útil, este necesitará de un reemplazo, por lo cual deberá ser calibrado nuevamente, a fin de garantizar una adecuada evaluación de las ruedas

Para realizar la calibración de la máquina de evaluación de uniformidad (**INFAS**) es necesario hacerlo en conjunto con el **transductor** (LVDT en este caso), el acondicionador y la tarjeta de adquisición de datos; para acceder a esta parte, es necesario hacer doble click con el botón izquierdo del ratón en el icono Calibración; al abrir esta opción, aparecerá en la pantalla la ventana principal de calibración que está compuesta por tres opciones:

- **Calibrar Transductores.**
- **Cambiar constantes calibración Transductores.**
- **Terminar.**

Al seleccionar la opción Calibrar Transductores se desplegará la siguiente ventana:

**HAYES WHEELS**  
ACERO S.A. I.E.C.V.

**INFAS**  
Consultas de  
calibración transductores

Transductor

|                 |
|-----------------|
| Transductor     |
| Todal Posterior |
| Axial Anterior  |
| Axial Posterior |

Pendiente

10.0000E+0

Ordenada

100.0000E-3

Unidades

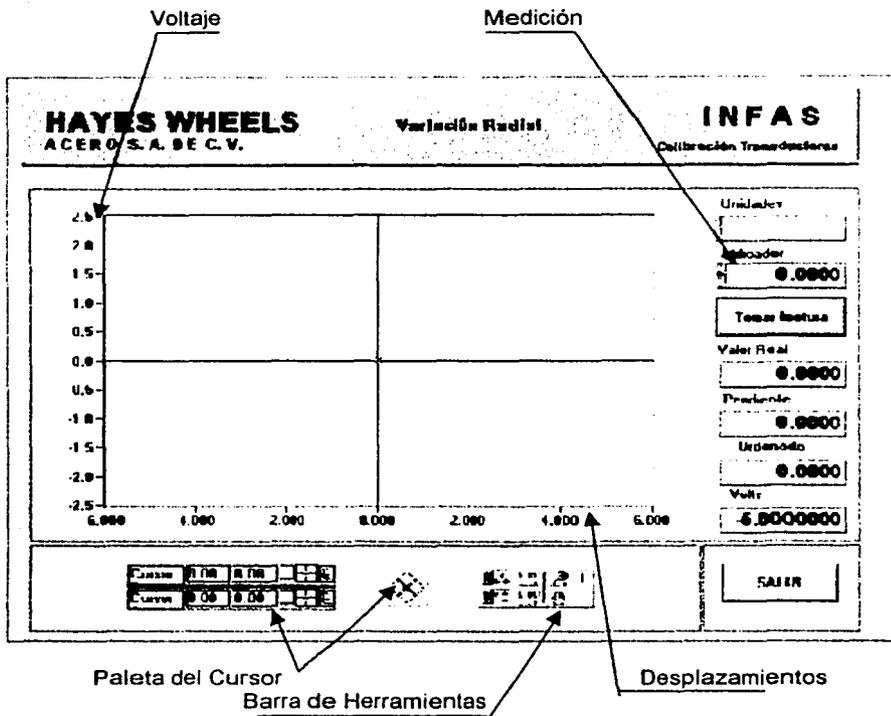
TERMINAR

Existen cuatro parámetros a definir en este menú

1. **Transductor.** La máquina opera con cuatro diferentes **transductores**, los cuales deben ser calibrados.
2. **Unidades.** Permite fijar la ubicación del Instrumento de Calibración en unidades del Sistema Internacional (mm, cm, m) o bien, del Sistema Inglés (pulgadas).
3. **Pendiente.** Es la Constante de Calibración, es decir, es el valor que hay que multiplicar para obtener la unidad deseada.
4. **Ordenada al Origen.** Es la unidad que se tomará como referencia (cero) para realizar las mediciones.

Al acabar de acceder los parámetros anteriores se debe hacer un click en el botón Terminar y aparecerá la siguiente ventana

En la parte superior se indica que se están Calibrando a los **Transductores**, en la parte central se muestra la gráfica de la Magnitud del **Desplazamiento** contra la Magnitud del Voltaje del LVDT.

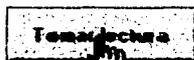


En la parte derecha de la ventana, se tienen los siguientes parámetros:

**Unidades.** Despliega la información proporcionada anteriormente por el usuario.

**Indicador.** Es el valor que muestra el dispositivo usado para calibrar los LVTD.

**Tomar lectura.** Cada vez que se pulsa esta opción con el botón izquierdo del ratón, la computadora graficará un punto en la pantalla.



Para considerar que el **transductor** esté bien calibrado, la gráfica final al unir los puntos debe ser una recta. En caso contrario, si la gráfica es una curva, se tienen diversas causas que no permiten la adecuada calibración del instrumento, algunas de estas pueden ser:

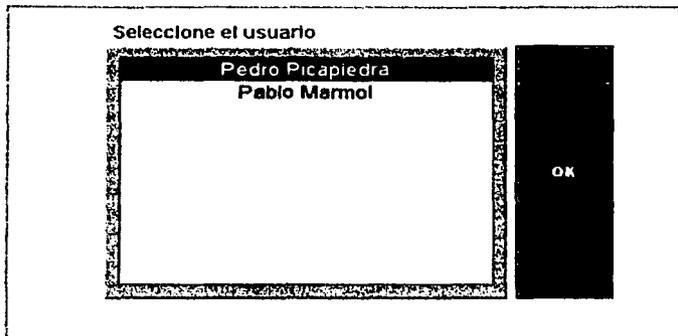
- El acondicionador no está debidamente ajustado.
- Se requiere ajustar mecánicamente al LVDT.
- Se encuentra dañado el LVDT.

Al elegir la opción Salir, aparecerá un mensaje en la pantalla indicando si se desea guardar la información, si la respuesta del usuario es negativa, el programa regresa a la ventana Principal de Calibración, sin guardar información alguna, si la respuesta es afirmativa, crea un programa de calibración llamado **Cal\_Trans.bin**

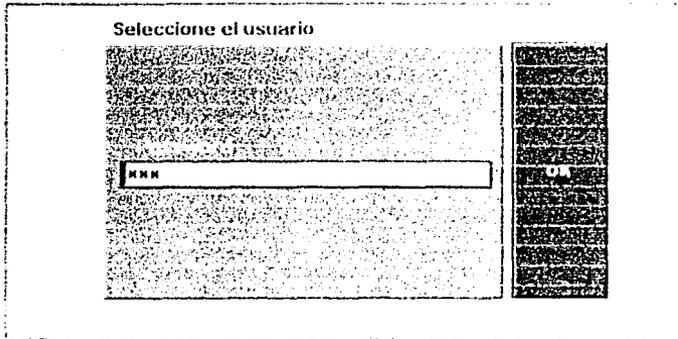


### 6.3.2. - MÓDULO DE OPERACIÓN

Para iniciar la opción de Operación, es necesario hacer un click en el icono con este nombre; a continuación, aparecerá la siguiente pantalla

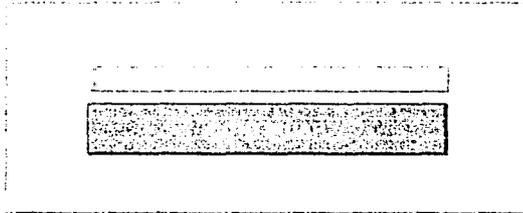


Primeramente, se necesita seleccionar el Nombre del Usuario mediante las flechas del teclado o usando el ratón; cuando se haya elegido el usuario correcto se puede presionar la tecla "Enter", o bien hacer click con el botón izquierdo del ratón sobre la tecla "OK"; inmediatamente aparecerá la próxima pantalla

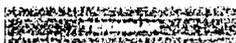
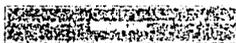
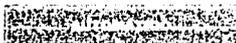
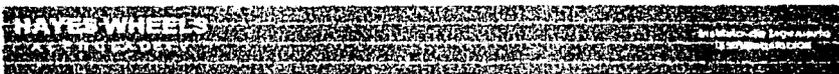


En este momento el usuario debe introducir su *password* y presionar la tecla "Enter", o bien hacer click con el botón izquierdo del ratón sobre la tecla "OK". Si el *password* es incorrecto, existe la posibilidad de reintentar el proceso. En caso de que el *password* sea correcto, el programa inicia su operación.

A fin de almacenar los resultados y poder realizar la estadística correspondiente del proceso, será necesario definir un nombre al lote, el cual solicitará la computadora automáticamente presentando la pantalla.



El sistema generará un archivo con el mismo nombre del lote. Al finalizar se oprime el botón de Continuar o se presiona la tecla "Enter". En caso de que no se haya especificado el lote (espacios en blanco, caracteres no válidos: %, ", etc.) aparecerá un caja de diálogo cuestionando si se desea Reintentar. Si la respuesta es afirmativa, se deberá introducir el nombre en el espacio correspondiente. Si la respuesta es "No", la computadora no almacenará los datos y el programa desplegará la ventana Principal de Operación.



La Ventana Principal de Operación está compuesta por las siguientes opciones:

- AUTOMÁTICO
- MANUAL
- TERMINAR

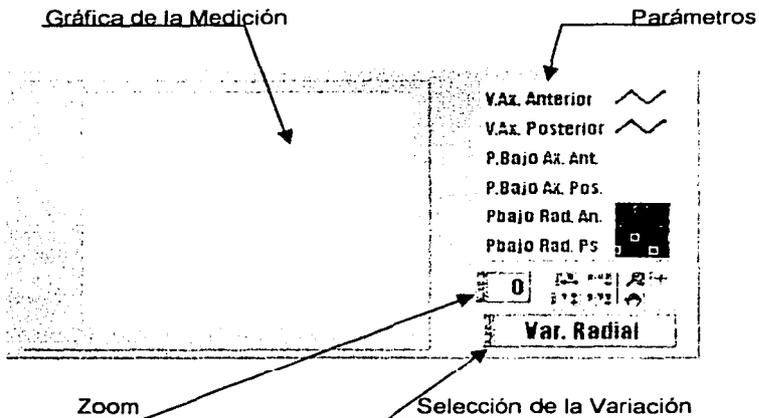
Es importante hacer notar que la máquina puede operar en dos modos: Manual y Automático. El Modo Manual permite realizar los ajustes mecánicos así como probar los diferentes dispositivos, mientras que el Modo Automático permite operar la máquina sin interrupciones. La activación de estas opciones se realiza con el ratón directamente en la computadora.

### **MODO DE OPERACIÓN MANUAL**

Para tener acceso a la operación manual, es necesario hacer un click con el ratón en el botón de Manual



En la parte superior derecha de la pantalla se desplegará la gráfica de la rueda. Como se muestra en la siguiente gráfica.



Los resultados que desplegará la computadora instantáneamente en la parte inferior derecha de la Ventana del Modo Manual, después de realizar la medición Radial y Axial de la rueda son los siguientes:

| Resultados     | Variación | 1a.Ar.   | 2a.Ar. |
|----------------|-----------|----------|--------|
| Rad. Anterior  | 0.00      | 0.000    | 0.000  |
| Rad. Posterior | 0.00      | 0.000    | 0.000  |
| Ax. Anterior   | 0.00      | 0.000    | 0.000  |
| Ax. Posterior  | 0.00      | 0.000    | 0.000  |
| Vrad.Prom      | 0.00      | Vax.Prom | 0.00   |

**Variación.** Se obtiene como la diferencia entre el punto más alto y el más bajo.

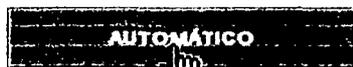
**1a. y 2a. Armónica.** Extraída de la serie de Fourier.

**Variación Radial Promedio.** Es la suma total de la medición radial punto a punto dividido entre dos.

**Variación Axial Promedio.** Es la suma total de la medición axial punto a punto dividido entre dos.

## MODO DE OPERACIÓN AUTOMÁTICO

Para tener acceso a esta opción, es necesario hacer un click en el botón de automático



Enseguida aparecerá la Ventana del Modo Automático:

Gráfica de la Medición

Parámetros

Resultados

**HAYES WHEELS**
**INFAS**

|             |             |
|-------------|-------------|
| Total Pzas. | 01          |
| Pzas. racha | 01          |
| Prac. Qm    | 01          |
| Vrad. Sup.  | 0.000 0.000 |
| Vrad. Inf.  | 0.000 0.000 |
| Vac. Sup.   | 0.000 0.000 |
| Vac. Inf.   | 0.000 0.000 |

Radial

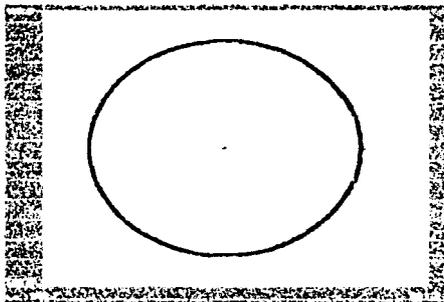
**Resultados**      Modelo C5W-27    Tamaño 14X15

| Verticales Hacia el |                  | Verticales Hacia el |                   | Verticales Hacia el |                  |
|---------------------|------------------|---------------------|-------------------|---------------------|------------------|
| 1º Rad. Anterior    | 2º Rad. Anterior | 1º Rad. Posterior   | 2º Rad. Posterior | 1º Rad. Anterior    | 2º Rad. Anterior |
| 0.000               | 0.000            | 0.000               | 0.000             | 0.000               | 0.000            |
| 0.000               | 0.000            | 0.000               | 0.000             | 0.000               | 0.000            |
| 0.000               | 0.000            | 0.000               | 0.000             | 0.000               | 0.000            |
| 0.000               | 0.000            | 0.000               | 0.000             | 0.000               | 0.000            |
| 0.000               | 0.000            | 0.000               | 0.000             | 0.000               | 0.000            |

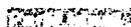
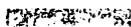
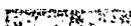
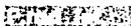
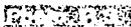
En el Modo Automático, la máquina comienza el proceso después de pisar el pedal, evaluando primeramente con respecto a **birlos** e inicia girando el cabezal superior, a fin de ubicar los **birlos** de la rueda en el sentido que recorra una menor distancia en grados, posteriormente bajará el cabezal superior para embonar los mismos y girará en sentido horario, después levantará el cabezal superior e

iniciará la evaluación con respecto a piloto, sujetando la rueda con el expander que se encuentra ubicado en el cabezal inferior y rotará en sentido antihorario, (en ambos casos la rotación de la rueda será hasta que la adquisición de datos haya terminado), al finalizar la evaluación se desplegarán los resultados obtenidos con respecto a *birlos* y con respecto a *piloto*; quedando ubicados de la siguiente manera:

En el extremo superior izquierdo de la pantalla, se observan las Gráficas de la Variación Radial y Axial obtenidas al realizar la medición de la rueda



Cada una de las gráficas representa uno de los siguientes parámetros:

-  **Perfil Ideal de la Rueda.**
-  **Perfil Radial Superior.**
-  **Perfil Bajo Radial Superior.**
-  **Perfil Radial Inferior.**
-  **Perfil Bajo Radial Superior.**

**Radial**

**Radial, Axial:** Despliega la gráfica de la medición seleccionada después de medir la pieza.



**Control de Movimiento del Cursor y Barra de Herramientas:** Permite manipular a la gráfica de una forma más útil.

Los Resultados de la Medición están en la parte superior derecha de la Ventana del Modo Automático.

|               |   |
|---------------|---|
| Total Piezas  | 0 |
| Pzas. Rechaz. | 0 |
| Pzas. OK      | 0 |

**Total de Piezas.  
Piezas Rechazadas.  
Piezas O.K. (Correctas)**

|              |       |      |
|--------------|-------|------|
| Variad. Sup. | 0.000 | 0.00 |
| Variad. Inf. | 0.000 | 0.00 |
| Variad. Sup. | 0.000 | 0.00 |
| Variad. Inf. | 0.000 | 0.00 |

**Variación Radial Superior.  
Variación Radial Inferior.  
Variación Axial Superior.  
Variación Axial Inferior.**

Localización

| Resultados        |          | ARMÓNICO RADIALES |          | ARMÓNICO AXIALES |          |
|-------------------|----------|-------------------|----------|------------------|----------|
| Variación Radial  | Positivo | Positivo          | Positivo | Positivo         | Positivo |
| ✓ Rad. Anterior   | 0.000    | 0.000             | 0.000    | 0.000            | 0.000    |
| ✓ Rad. Posterior  | 0.000    | 0.000             | 0.000    | 0.000            | 0.000    |
| ✓ Rad. Perimetral | 0.000    | 0.000             | 0.000    | 0.000            | 0.000    |
| ✓ Ax. Anterior    | 0.000    | 0.000             | 0.000    | 0.000            | 0.000    |
| ✓ Ax. Posterior   | 0.000    | 0.000             | 0.000    | 0.000            | 0.000    |
| ✓ Ax. Perimetral  | 0.000    | 0.000             | 0.000    | 0.000            | 0.000    |

En la parte inferior se despliegan los Resultados y los cálculos efectuados después de realizar la medición.

Si se desea salir de la Ventana del Modo Automático, es necesario hacer click en el botón con la leyenda Terminar Operación.



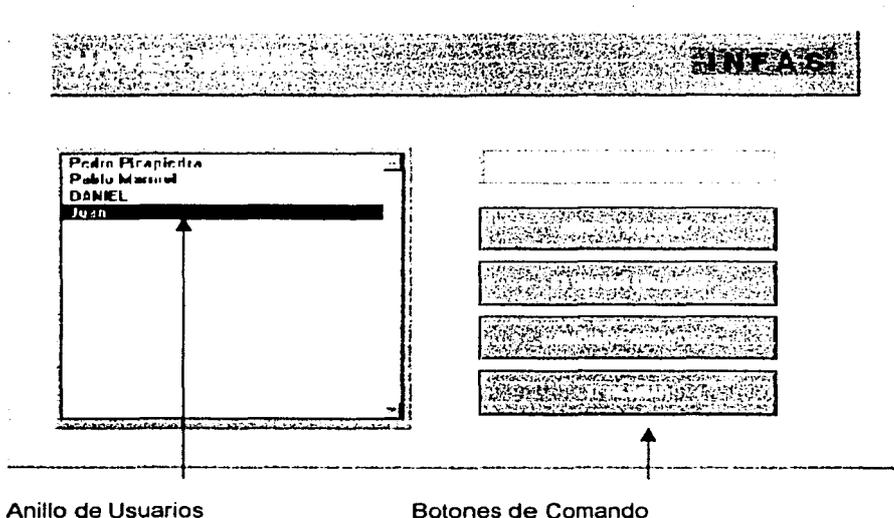
El programa regresará a la Ventana Principal de Operación

Para terminar el proceso de Operación, es necesario hacer un click en el último botón de la Ventana Principal de Operación.



### 6.3.3. - MÓDULO DE USUARIOS.

A través de esta opción es posible añadir y eliminar nombres de Usuarios, así como realizar el cambio de la Clave de Acceso de los mismos. Al iniciar, aparecerá la siguiente pantalla



La Ventana de Usuarios está dividida en dos secciones. En la parte izquierda de la pantalla se muestra al Anillo de Usuarios, es decir, los nombres que ya están almacenados en la base de datos. En la parte derecha se encuentra un conjunto de Botones de Comando.

#### **AÑADIR USUARIOS.**

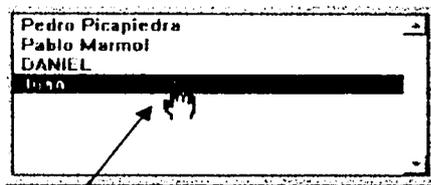
Para iniciar esta opción es necesario hacer click en el botón de Añadir Usuario.



Posteriormente el programa preguntará por la Clave de Acceso. El usuario deberá introducir la clave elegida por él mismo.

## ELIMINAR USUARIOS.

Primeramente, se requiere seleccionar al usuario en el menú desplegable mediante las flechas del teclado o mover el cursor del ratón hasta el nombre deseado y dar un click en este mismo.



Usuario Seleccionado

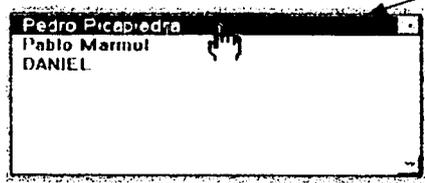
Después, es necesario hacer click en el botón de Eliminar Usuario.



## CAMBIAR CLAVE DE ACCESO. (Password)

Inicialmente, se requiere seleccionar el nombre del usuario en el Anillo de Usuarios mediante las flechas del teclado o moviendo el cursor del ratón hasta el nombre deseado.

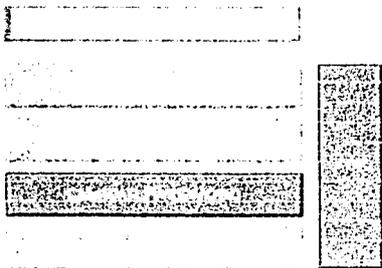
Usuario seleccionado



Para activar esta opción se requiere hacer un click en el botón de comando Cambiar Password.



Aparecerá un nuevo botón de comando "OK" y se deshabilitarán los restantes.



El usuario deberá introducir la nueva Clave de Acceso, a continuación, se puede presionar la tecla Enter, o bien hacer click con el botón izquierdo del ratón sobre la tecla "OK", el programa preguntará si se desea realizar el cambio de la Clave de Acceso, si la respuesta es afirmativa, el sistema hará el cambio del mismo, en caso de una respuesta negativa, el programa lo conservará; para salir de la Ventana de Usuarios, se debe hacer click en el botón con la leyenda Terminar.



#### 6.4. - PRUEBAS DEL SISTEMA.

En esta parte se realizan las pruebas de la máquina de evaluación de uniformidad (**INFAS**) y esta conformada por la prueba de sensores, preparación de la prueba e impresión o almacenamiento de resultados.

La primera parte permite probar a los sensores con que se cuentan, en donde se tiene la posibilidad de observar el funcionamiento de los mismos.

La segunda parte es la preparación de la prueba y le permite al usuario establecer los parámetros generales y particulares de las pruebas que vayan a realizarse, además de observar si la automatización realizada opera correctamente, es decir, que el movimiento de las partes mecánicas sea el requerido.

La tercera parte que consta de la impresión o almacenamiento permite desplegar en papel o guardar en un archivo compatible con Excel las pruebas, a fin de poder analizar posteriormente los resultados obtenidos o en su defecto para poder guardarlos en unidades de almacenamiento temporal como los **discos flexibles** de 3.5 ", y todo esto es con la finalidad de comprobar si las mediciones tienen repetibilidad además de que sean coherentes los resultados adquiridos en el proceso de medición.

En este capítulo, se menciona la manera en que se implementaron los dispositivos, que satisfacían los requerimientos, para una eficiente reconstrucción; también se dijo cual fue el elemento de control que se eligió, su programación, interacción con los usuarios, y su modo de operación, así como las pruebas del sistema, lo que nos lleva al siguiente capítulo en el cual haremos mención de las ventajas y beneficios que se obtuvieron, a los problemas que no estaban contemplados y si fueron cubiertas las expectativas y necesidades de la empresa

# CAPÍTULO VII

## CONCLUSIONES

El sistema desarrollado en la reconstrucción de la máquina de evaluación de uniformidad (**INFAS**), tiene las siguientes ventajas:

Un nuevo y mejorado sistema de adquisición de datos y control de la máquina.

Se añadió la posibilidad de realizar las mediciones con respecto a **piloto y a birlos**, ya que una de las exigencias en el mercado de las ruedas es que se realicen este tipo de mediciones.

Se logró también reducir el trabajo para el usuario, ya que se automatizó el cabezal de medición con un costo razonable.

Otra ventaja fue que el programa generará un archivo donde se pueden cambiar (revisar) los parámetros de la prueba.

Durante la reconstrucción de la máquina nos enfrentamos a problemas no contemplados en el inicio, pues la máquina no estaba aislada del área de producción, con lo cual tuvimos que lidiar con la dificultad de que algunas personas no capacitadas en la operación de la máquina movían o alteraban el funcionamiento de la misma, también se observó que en el área de producción en donde se colocó la máquina no era el adecuado, ya que el medio ambiente es agresivo para los componentes de la máquina así como para la computadora como por ejemplo podemos mencionar el deterioro de los cables que conectan los **encoders** o el deterioro del teclado; otro de los contratiempos no contemplados, fue que las herramientas diseñadas y fabricadas por la empresa contratante no estaban correctamente maquinadas, es decir, que tenían imperfecciones que afectaban en la medición al igual que en el tiempo estimado para la finalización del proyecto de reconstrucción.

Por último mencionaremos que se realizó la reconstrucción de la máquina con la completa satisfacción de la empresa, ya que sus expectativas y necesidades del proyecto fueron cumplidas.

# **BIBLIOGRAFÍA**

1. Werner G. Holzboc; Instrumentos para Medición y Control.  
2da Edición Compañía Editorial Continental S.A. de México.
2. Douglas M. Considine; Manual de Instrumentación Aplicada.  
Tomo I Compañía Editorial Continental S.A. de México.
3. Gene E. Tobey; Organización de Computadoras.  
McGraw Hill
4. Richard N. Schmidt and William E. Meyers; Introduction to Computer Science  
and Data Processing.  
2<sup>nd</sup> Edition.
5. Ramón Pallas Areny; Sensores y Acondicionadores de Señal.
6. Neil Storey; Electrónica de los Sistemas a los Componentes.  
Addison-Wesley Iberoamérica.