



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DE SERVOMOTORES BRUSHLESS

REPORTE PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECATRÓNICO

PRESENTA

FELIPE GONZÁLEZ MONROY

DIRECTOR

M.I. HUMBERTO MANCILLA ALONSO



CIUDAD DE MÉXICO

AGOSTO 2014

“Imagination is more important than knowledge”

- Arlbert Einstein.
German Physiciat 1879 -1955

Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería Mecánica e Industrial

Índice.

Agradecimientos.....	5
Introducción.	6
Capítulo 1. Descripción de la empresa.....	8
1.1 Servicios.....	9
Capítulo 2. Servomotor Brushless.....	10
2.1 Partes internas de un Servomotor (Corte transversal).	11
2.2 Funcionamiento de un servomotor.	12
2.3 Encoder.....	13
2.4 Resolver.	14
2.4.1 Advertencias.	14
Capítulo 3. Tecnologías de diagnóstico.....	15
3.1 Electric Signature Analysis (ESA).	15
3.1.1 Ejemplos de fallas en calidad de energía.	16
3.2 Motor Current Signature Analysis(MCSA).....	18
3.2.1 Conclusión.	19
3.3 Motor Circuit Analysis (MCA).....	20
3.3.1 Características del MCA.	21
3.3.2 Algunas fallas en bobinas.....	22
3.3.3 Tecnología.....	22
3.3.4 MCA Inicial.	23
3.4 Ultrasonido.	25
3.5 Análisis de vibraciones.	25
3.6 Rodamientos.....	26
3.7 Termografía.	27
3.8 Shock Pulse Method (SPM).....	29
Capítulo 4. Ingeniero Mecatrónico Analista dentro de Grupo CM.	30
Capítulo 5. Participación dentro de la empresa.....	31
5.1 Análisis en servomotores.....	32

5.2 Formato de diagnóstico inicial.....	34
5.2.1 Lista de algunos procesos mecánicos.	35
5.3 Instrumentación.	36
5.3.1 Mitchell Electronics, Model TI-5260.	36
5.3.2 Mitchell Electronics, Model TI-5000EX.	38
5.3.3 Problema de señal en resolver.	39
5.4 Asignación de OT.	42
5.5 Inspección visual y auditiva.....	42
5.6 Freno.	44
5.7 Ajuste estático.	45
5.8 Ajuste dinámico.	47
5.8.1 Conexión para pruebas estática y dinámica.	48
5.8.2 Prueba de imanes.	48
5.9 Prueba de conteo en un Encoder.	49
5.10 Máquina dobladora.	52
5.11 Otros daños en componentes.	53
5.12 Ensamble de un servomotor.....	55
5.13 Destapado de chaquetas de enfriamiento.....	55
5.14 Aportaciones.....	56
5.14.1 Balanceadora de rotores.	56
5.14.2 Pantalla y equipo de exposición.....	59
5.14.3 Expos.....	60
Conclusiones.....	60
Referencias.	62

Agradecimientos.

Tengo que dar gracias primeramente a dios que me ha dado la capacidad de salir adelante en cada una de mis metas, me ha dado salud y la sabiduría para resolver mis problemas en los años que estuve como estudiante. Es importante para mí decir que a pesar de que la estancia en ingeniería implica sacrificio, es dejar a un lado muchas actividades que uno desea hacer paralelamente, pero por razones que los que hemos pasado por aquí sabemos no son posibles realizar con el mismo apego de las clases.

Mi familia es parte importante del desarrollo personal cada día, reflejaron la confianza en todo momento de que no era una carrera simple, mis padres siempre me han ofrecido el apoyo necesario para que mis metas y sueños se cumplan, la dedicación esfuerzo y empeño en cada día escolar ha dado frutos por los cuales yo me siento verdaderamente honrado de ser parte de esta hermosa universidad. A mi madre Ma. Julia Monroy que cada mañana aún se preocupaba si me tomaba el tiempo de comer en mis largas jornadas de tiempo completo al estudio, por sus palabras y confianza siempre llenando de amor cada día, por sus apego a mi esfuerzo siempre este logró será mucho por ella. A mi padre José Luis Felipe González que es el reflejo de lo que una persona comprometida con su familia hace día a día, un ingeniero que refleja haber salido de la misma universidad, una persona amorosa que da a su familia lo que necesita siempre, gracias por ser mi ejemplo de trabajo y profesionalismo. A mis hermanos Jorge e Imelda que me dieron aliento en todo momento en los largos días de estudio. Sin duda alguna uno no sabe lo que representa salir triunfante de una carrera como Ingeniería Mecatrónica en la mejor universidad del país, y la mejor de América Latina, es para mí un orgullo ser capaz de llevar alegría a mi familia a sobre todo a mí mismo de conocerme capaz de más, y por fin sentirme Ingeniero.

Gracias a las personas que en los años transcurridos como estudiante de ingeniería estuvieron a mi lado, en especial a dos personas, una estuvo conmigo los primeros semestres los cuales fueron los más difíciles, en los que me encontraba en el dilema si ingeniería en verdad era lo que amaba, me enseñó a no darme por vencido y lo más difícil a creer en mí, se me pusieron pruebas emocionales en todo momento, retos bastante fuertes, enfermedades, lágrimas y alegrías, gracias a ella por su apoyo. La segunda persona estuvo al final de la carrera, con ella llegue a soñar lo que implicaba pensar en un futuro en el cual los dos nos sintiéramos orgullosos de nosotros mismos, así como nuestra familia, gracias a ella por tener tanta fe en que lo que hacía siempre era lo mejor de lo mejor, gracias porque reflejo en mi lo mejor de mi persona, sin duda alguna no sería lo que soy ahora sin el valor que implico cada día a su lado. A los compañeros y amigos que estuvieron alentando, compartiendo tareas y exámenes, aquellos que no veían el egoísmo sino el compañerismo de ayudar, muchos admirados otros no tanto, puedo nombrar muchos compañeros, a mis amigos Christian, Esteban, Waldo, Mario, Héctor, amigos sinceros que fuera de clases siempre estuvieron presentes en todo momento, profesores a ustedes les doy mis respetos y admiraciones dado que sin ustedes la formación no es del nivel que uno espera de esta universidad, gracias a ustedes por sus valores y ética que imparten día a día por solamente amar a su universidad, ayudantes de laboratorio, bibliotecarios, y personas que conforman la Facultad de Ingeniería.

Introducción.

El presente reporte tiene como finalidad lograr el proceso de titulación por la modalidad de trabajo profesional como ingeniero mecatrónico presentando los trabajos y las implementaciones de tecnologías sobre motores industriales; específicamente en Servomotores Brushless durante el periodo que laboré como ingeniero mecatrónico analista.

El desarrollo de las tecnologías de análisis, prevención y corrección de los Servomotores Brushless está relacionado con la necesidad de ayudar a la prevención, en el estricto sentido, de tener mayor seguridad para el operador, así como confiabilidad sobre los procesos industriales en las distintas ramas de la ingeniería. Los trabajos de mantenimiento programados brindan mayor control sobre los componentes ubicados en la maquinaria que utiliza servomotores como pilar en líneas de producción. Desarrollar rigurosos análisis de prevención en los servomotores asegura mayor confiabilidad sobre la vida natural del motor, esto no es fácil de implementar porque las tecnologías de prevención aún son desconocidas por empresas que manejan este tipo de Servomotores Brushless, por lo que, como proveedor de servicios en el giro se debe brindar difusión y asesoría en la cultura de la prevención; Grupo CM aplica esto con el apoyo directo de sus ingenieros.

Los equipos de instrumentación y el uso correcto de las tecnologías son cruciales para que el ingeniero mecatrónico haga un diagnóstico correcto del Servomotor Brushless. Hay que tomar en cuenta que cada motor tiene características específicas que lo hacen diferente al resto, estos motores se pueden considerar similares pero jamás iguales por los componentes de su fabricación, ya que están implementados para funciones especializadas. Cada análisis está enfocado a dar calidad y servicio a los clientes, de manera que se brindan distintos esquemas de confiabilidad sobre el trabajo realizado.

El ingeniero mecatrónico tiene la capacidad de relacionarse fácilmente con los trabajos que se desarrollan dentro de Grupo CM gracias a las bases teóricas y prácticas que adquiere en las aulas y laboratorios de la facultad, estas últimas, le permiten ver más de cerca la realidad a la que se enfrentará en el ámbito laboral. A diferencia de otras ingenierías, el egresado en mecatrónica tiene mejor desempeño en el área de diagnóstico y análisis de los motores, ya que comprende fácilmente las funciones que realiza cada uno de los componentes de un servomotor: mecánica y eléctricamente, así como los materiales en relación a sus comportamientos, lo que a un electrónico, dentro de la empresa, puede llevarle más tiempo resolver por no tener el conjunto asociado a los demás lazos teórico - prácticos. De esto se habla en el apartado del Mecatrónico dentro de la empresa.

Los mantenimientos preventivos y correctivos están directamente relacionados a los servomotores. Dependiendo de la dimensión de la empresa es el tamaño y potencia de los motores, así mismo cada motor forma parte de la cadena de procesos que deben estar en constante funcionamiento, dado que es prescindible que los servomotores no paren dicha producción; sin embargo se aplica el mismo

criterio de calidad en análisis y reparaciones sin hacer exclusividad por alguna de ellas. Mismo tipo y calidad de servicio para todos los clientes.

Los procesos actuales demandan el uso de los servomotores, la precisión extraordinaria que se tiene con ellos es algo que los caracteriza. La industria se moderniza a un paso acelerado, hace que el uso de los servomotores sea prácticamente cotidiano. Los servos son capaces de hacer tareas sumamente detalladas y de gran precisión, paralelamente tienen un sistema de control y una fase de potencia independiente, capacidades técnicas de placa como corriente nominal, voltaje nominal, conexiones estrella-gama, revoluciones por minuto, entre otras características que lo hacen distinto a los convencionales. La industria los implementa por la velocidad de respuesta que tienen, la durabilidad y el alto par que manejan; son requeridos por su respuesta de movimiento en distintos puntos específicos sobre la rotación angular.

En los siguientes capítulos se explica a detalle el concepto básico de un servo, servo control, conceptos de tecnologías para diagnósticos, los procesos de dichos mantenimientos, pruebas, mediciones e interpretaciones de gráficas, así como descripciones básicas del uso de la instrumentación aplicada, todas las anteriores enfocada a los Servomotores Brushless específicamente. Todo lo anterior, con la finalidad de explicar las labores que desarrollé como ingeniero de la empresa Grupo CM.

Importante.

El reporte esta modificado a los términos convenidos por la empresa Codition Monitoring Technologies SA de CV debido a la política de uso de información que el contrato demanda. Que dictamina el no uso de descripciones sumamente descriptivas de la instrumentación utilizada, procesos y tecnologías desarrolladas por la misma empresa, para la realización de este reporte profesional.



1. Servomotores Siemens.

Capítulo 1. Descripción de la empresa.

Codition Monitoring Technologies S.A. de C.V. o Grupo CM es una empresa dedicada al mantenimiento preventivo y correctivo de servomotores, motores convencionales y variadores de frecuencia, cuenta con más de 10 años de experiencia en ofrecer diagnósticos oportunos centrados en la confiabilidad eléctrica y mecánica de motores a través del monitoreo de sus distintas condiciones de funcionamiento, empleando herramientas multitecnológicas, así también capacitaciones enfocadas a la problemática de cada planta. Siendo una empresa mexicana tiene el compromiso de brindar servicios exclusivos, servicios tecnológicos de punta que destacan en la industria del monitoreo temprano sobre los motores; lo que la lleva a hacer la diferencia puesto que cuenta con la participación de ingenieros altamente capacitados en los diagnósticos; Grupo CM busca día a día el desarrollo e implementaciones tecnológicas, para competir con empresas extranjeras. El crecimiento de Grupo CM tiene la confianza de sus clientes y busca abrir mercado en zonas estratégicas como el estado de Querétaro, donde la alta rentabilidad de fábricas ha hecho de éste un estado en desarrollo y un lugar de trabajo.



2. Logo de la empresa.

Uno de los servicios principales es evitar la falla, para lo cual se ofrecen servicios predictivos como:

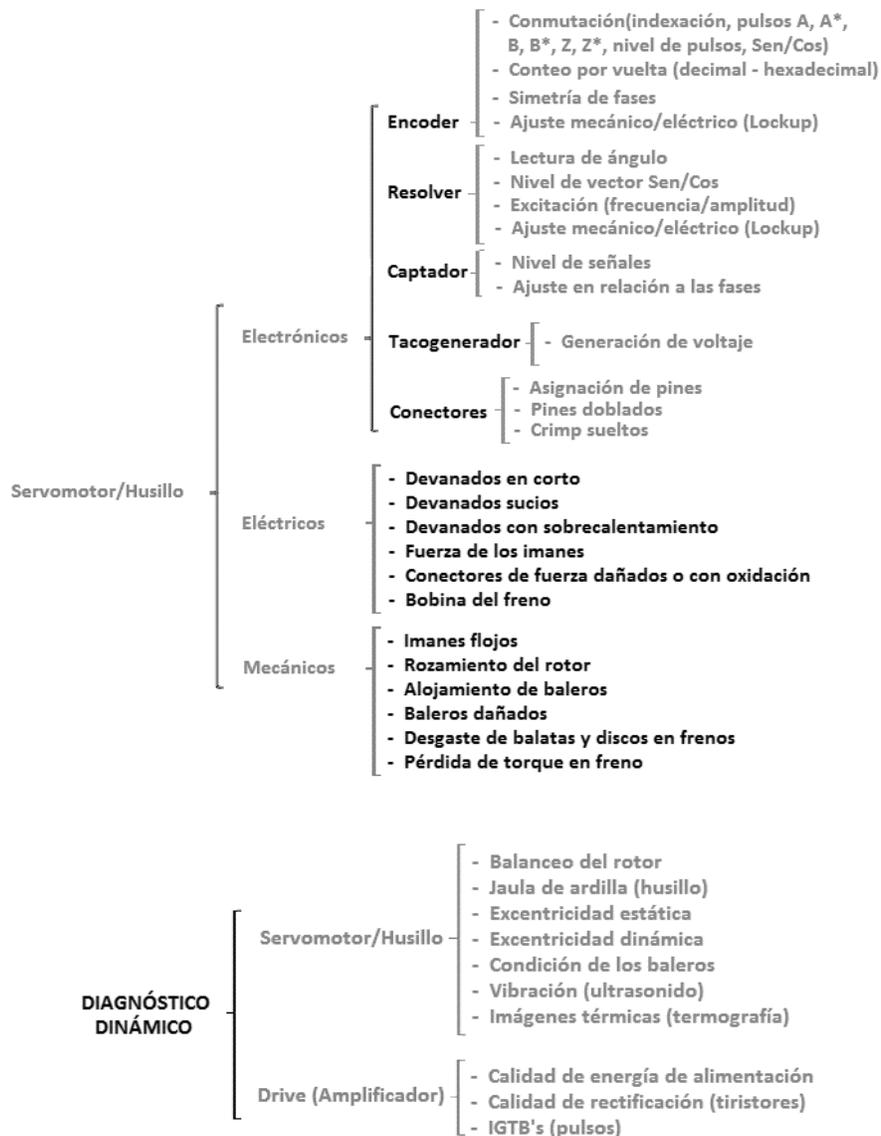
- **ESA:** (Electric Signature Analysis) Calidad de energía.
- **MCSA:** (Motor Current Signature Analysis) Comportamiento Dinámico del Sistema.
- **MCA:** (Motor Circuit Analysis) Condición de las bobinas.
- **SPM:** (Shock Pulse Method) Condición de los baleros.
- **Ultrasonido:** Análisis de vibraciones.
- **Termografía:** Medición de radiación.

Cuando la falla está presente en el motor, se recurre a un servicio correctivo como:

- Embobinado.
- Reparaciones mecánicas.
- Reparaciones eléctricas.
- Cambio de partes.
- Ajuste de dispositivos de retroalimentación.

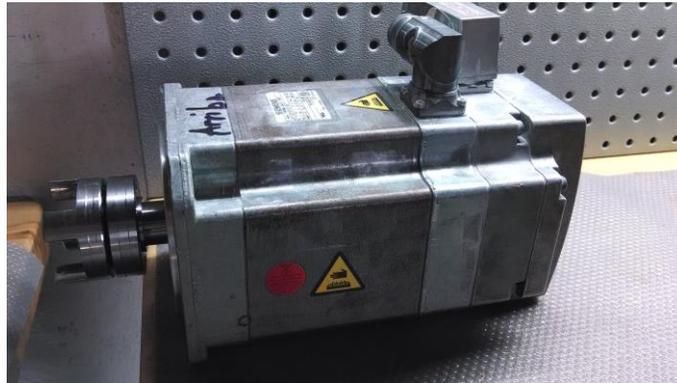
Grupo CM está comprometido en ofrecer un servicio de la mejor calidad, existe una amplia experiencia de trabajo con importantes empresas nacionales e internacionales, un ejemplo de la capacidad, compromiso y eficacia es que es la única empresa que ofrece este tipo de servicios a BANXICO (Banco de México). Grupo CM, es una empresa responsable y está comprometida con la satisfacción de los clientes en todos los servicios, comprende la importancia de dar solución a los problemas que puede detener la producción de la empresa a la cual brinda sus servicios, la finalidad es hacer una inversión de prevención.

1.1 Servicios.



Capítulo 2. Servomotor Brushless.

También conocidos como Servomotores Brushless o de imán permanente, un Servomotor podría definirse, genéricamente, como un motor utilizado para obtener una salida precisa y exacta en función del tiempo, dicha salida esta expresada habitualmente en términos de *posición, velocidad y/o torque*.



3. Servomotor Siemens.

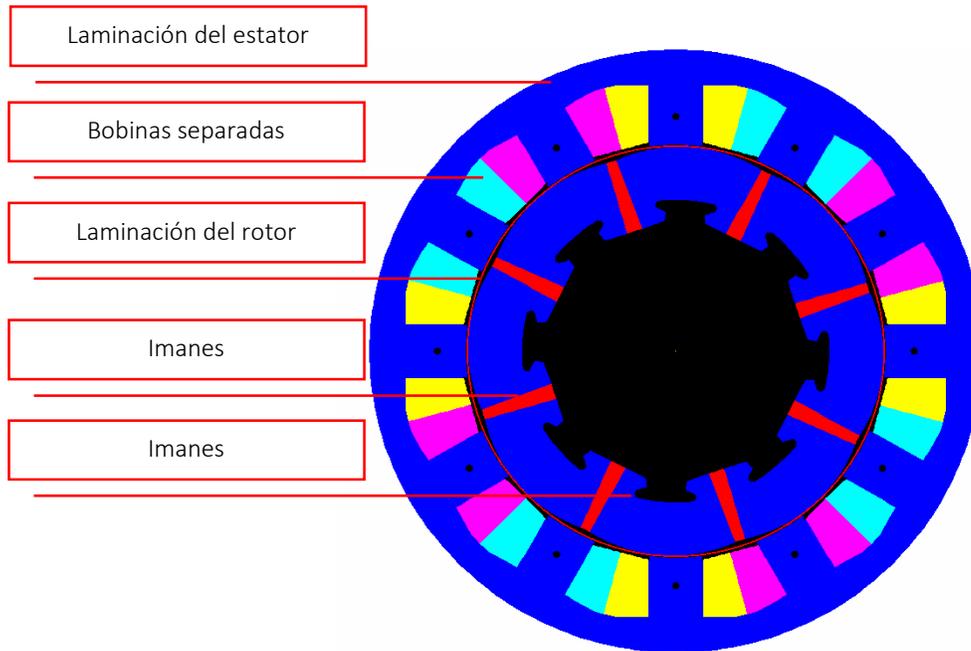
Un Servomotor Brushless o de imán permanente es una máquina sincrónica, que con la frecuencia de alimentación es capaz de desarrollar altos torques en forma transitoria para oponerse a todo esfuerzo que trata de sacarla de sincronismo. La denominación brushless viene del hecho de que no posee escobillas.

En comparación con motores asíncronos a jaula de ardillas (convencionales) la inercia de un Servomotor Brushless es sustancialmente menor. Ambas características, alto torque e inercias reducidas, son apreciadas y útiles para el control del movimiento dado que permiten rápidas aceleraciones y desaceleraciones así como un control preciso de posición en altas velocidades.

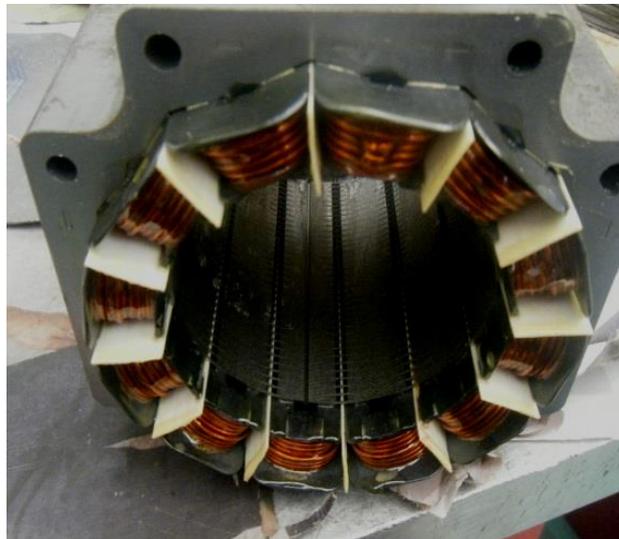
Constructivamente, el Servomotor Brushless posee un estator parecido al de un motor de jaula de ardilla con un núcleo laminado y un bobinado trifásico uniformemente distribuido. El rotor está constituido por un grupo de imanes permanentes fijados en el eje de rotación, la forma de los rotores de imanes permanentes varía de acuerdo al diseño y pueden clasificarse en: cilíndricos o de polos salientes.

La fijación de los imanes al rotor ha sido uno de los puntos críticos en la construcción de estos motores, debido a las altas fuerzas centrífugas a las que se encuentran sometidos durante los procesos de aceleración y frenado, actualmente se combinan fijaciones mecánicas de diferentes tipos con un pegado para el que se utilizan adhesivos especiales.

2.1 Partes internas de un Servomotor (Corte transversal).



4. Corte transversal estator.



5. Estator (bobinas y laminaciones).

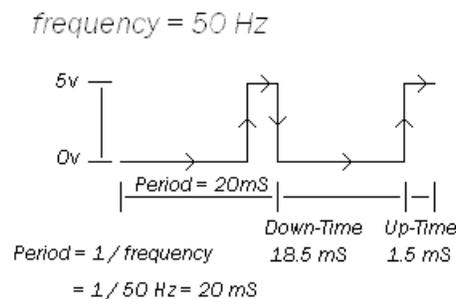
2.2 Funcionamiento de un servomotor.

El funcionamiento de un servomotor consiste en hacer circular corriente alterna en las fases del bobinado de estator, produciendo un campo magnético rotante en el entrehierro del motor. Si en cada instante el campo magnético generado en el estator interseca con el ángulo correcto al campo magnético producido por los imanes del rotor, generamos torque para lograr el movimiento del motor y la carga acoplada a él.

La utilización de un dispositivo electrónico denominado *servodrive* para alimentar el estator con la tensión y frecuencia correcta, permite en cada instante, generar un campo magnético estático de magnitud y posición correctamente alineada con el campo magnético de rotor. De esta forma se obtiene el torque necesario para mantener la velocidad y posición deseada del eje del motor. Contar con un servomotor implica conocer en todo instante la posición del rotor, para lo cual se equipan los servomotores con dispositivos llamados “feedbacks” como resolver o encoder, entre otros. Éstos rotan en sincronía con el eje del servomotor e informan al servodrive la posición del rotor. Dichos dispositivos de posición se diferencian en la resolución del conteo, memorias, cortes de alimentación y número de conexiones necesarias, etc.

Actualmente los servodrive operan por técnicas de modulación de ancho de pulso (**PWM**¹) con configuraciones de hardware (básicamente en la parte de potencia) parecidas a los inversores para el control de motores asíncronos. En el mercado, existen drives que permiten controlar ambos tipos de motores. Cabe puntualizar que para la operación normal de un servomotor, necesitamos un servodrive, ya que el motor no puede ser operado directamente de la red de suministro.

En resumen, el feedback es la parte del control que modula las señales en cuestión de posicionamiento y energía necesaria para generar el campo magnético, así como la velocidad que debe tener el rotor en determinado tiempo o ángulo de posicionamiento.



6. PWM.

¹ *Pulse-Width Modulation*. La modulación por ancho de pulsos es una técnica utilizada para regular la velocidad de giro de los motores eléctricos de inducción o asíncronos. Mantiene el par motor constante y no supone un desaprovechamiento de la energía eléctrica. Se utiliza tanto en corriente continua como en alterna.

2.3 Encoder.

Generalmente utilizamos el término inglés “encoder” para referirnos al sistema de retroalimentación. La diferencia fundamental entre *encoder* y *resolver* es que el primero refiere a un sistema digital y el segundo a un sistema análogo.

El encoder es un transductor rotativo, que mediante una señal eléctrica-normalmente un pulso o una señal senoidal, nos indica el ángulo girado. Si este sensor rotatorio lo conectamos mecánicamente con una rueda o un husillo, también nos permitirá medir distancias lineales.

Clasificación de un *encoder* según el tipo de información sobre la posición que generan:

- *Encoder incremental*: La señal de salida pasa por un hilo que transmite un pulso por cada ángulo girado, de tal forma que si tenemos un encoder de 1000 ppr, tendremos un pulso por cada $360^\circ/1000 = 0,360^\circ$. El inconveniente es que no disponemos de una referencia absoluta de la posición en la que se encuentra el eje.
- *Encoder absoluto*: La posición se da en valor absoluto mediante un bus paralelo. Es decir, si tenemos un encoder de 256 posiciones, tendremos un bus de 8 líneas que nos indicaran en binario su posición-normalmente estos transductores codifican la posición en código gray² para evitar errores. El inconveniente de estos encoders es la cantidad de líneas que necesitamos leer y conectar y que debido a la complejidad del disco óptico que codifica las posiciones, la resolución no suele ser muy elevada.

El feedback es parte crucial para el buen funcionamiento del motor, pueden presentarse error dentro del mismo por estar contaminado, para ello se realizan limpiezas ultrasónicas como proceso preventivo para obtener bien las señales de control.



7. Encoder tipo absoluto.

² El **código binario reflejado** o **código Gray**, nombrado así en honor del investigador Frank Gray, es un sistema de numeración binario en el que dos valores sucesivos difieren solamente en uno de sus dígitos.

2.4 Resolver.

Un *resolver* es un sensor analógico de posición rotatoria, a diferencia del encoder que realiza sus lecturas por medio de pulsos digitales. Este tipo de dispositivos son la parte principal de un servomotor, lo mismo para los motores que manejan encoder. Es importante asegurar el correcto funcionamiento del sistema, determinando la señal adecuada para la excitación suministrada y se ajusta de acuerdo a las especificaciones del fabricante. Como parte del motor, el resolver tiene la finalidad de relacionarse con la posición del rotor y maneja independientemente el conector para dicha función.



8. Resolver en Servomotor.

Los dispositivos feedback tipo resolver son más versátiles que un encoder. Dependiendo del proceso a realizar se puede determinar qué tipo de feedback, resolver o encoder conviene más para el control, sin embargo el resolver es más duradero porque su construcción, similar a un motor, cuenta con un estator y un rotor que funciona como núcleo del resolver.



9. Núcleo.

2.4.1 Advertencias.

- Un mal ajuste resulta en la pérdida de torque, exceso de consumo de corriente, sobrecalentamiento en los devanados, y/o una falla en el drive.
- Los devanados sucios provocan el sobrecalentamiento, desbalance y corto circuito en las fases.
- La pérdida de fuerza en los imanes permanentes es la causa de la pérdida de torque.
- Algunos de los problemas mecánicos pueden resultar en la pérdida total del motor.

Capítulo 3. Tecnologías de diagnóstico.

Un *servomotor* es un dispositivo conformado por un motor con la capacidad de controlar su posición, dirección de giro y velocidad mediante un sistema de control, llamado comúnmente 'feedback', que puede ser un *encoder*, *resolver*, *tacogenerador*³ o *hall switch*. Su principal ventaja reside en el hecho de que consume energía únicamente en el momento en que realiza una tarea programada.

Los problemas que llega a presentar un servomotor son: defectos en los devanados; desalineación; excentricidad estática o dinámica; suciedad; daño en los rodamientos; entre otros. Existen diferentes tipos de tecnologías de diagnóstico, que sirven de herramienta, por ejemplo, en caso de que se presente una situación en la que el motor esté en funcionamiento y sea difícil desmontarlo sin parar la línea de trabajo y nos interese determinar el estado del motor.

A continuación se dará una breve explicación de algunas tecnologías empleadas:

3.1 Electric Signature Analysis (ESA).

*Calidad de energía.

Es una técnica para el análisis de motores, generadores, alternadores, transformadores y otros equipos eléctricos. Esta tecnología se puede utilizar mientras la máquina esté funcionando, a este análisis se le denomina *online*, asimismo ayuda a identificar los problemas mecánicos y eléctricos dentro del motor. Las mediciones se realizan vía remota, no son invasivas, e incluso son invisibles para el equipo monitoreado. La adquisición de datos toma menos de 2 minutos por motor, se hace una grabación de parámetros que después son vaciados en una interfaz computacional y analizados por el ingeniero que realizó la grabación.

Para hacer uso correcto del dispositivo se debe tener previamente contemplada la capacidad de corriente a manejar, porque la captación de información se realiza mediante pinzas de corriente y, el uso de las pinzas correctas es crucial para no dañar el dispositivo de adquisición de datos, en este caso el Alltest Pro II.

Se utiliza la calidad de energía como punto de partida para un buen funcionamiento del motor, y se compara con los datos de placa del motor; sin embargo podemos descartarlo si la corriente nominal es correcta para cada fase.



10. Alltest Pro II

³ El tacogenerador fue proyectado para ser aplicado al servocontrol de máquinas de control. El tacogenerador da una señal de tensión continua correspondiente al valor real de velocidad de la máquina eléctrica a la cual está acoplado. Posee imanes permanentes en el estator, con la función de producir un campo magnético. En el rotor bobinado es generada una tensión continua de amplitud proporcional a la rotación y polaridad que depende del sentido de giro.

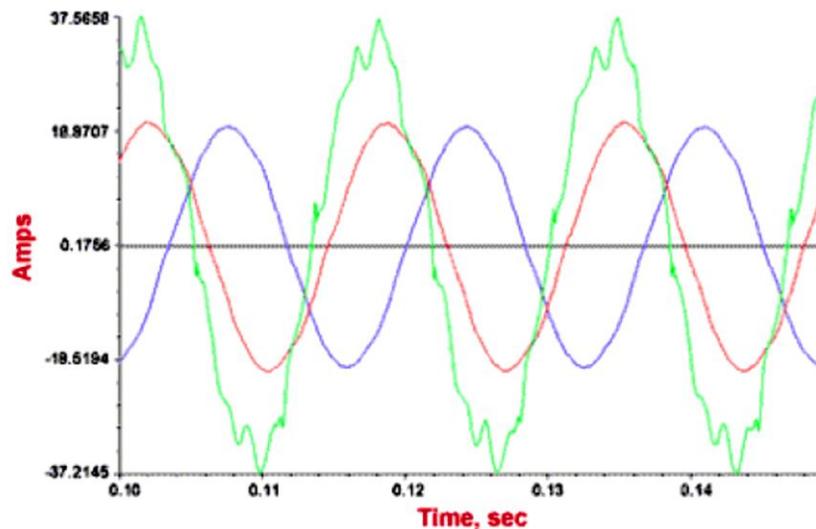
Dentro de las mediciones para Análisis de Energía están:

- Línea de frecuencia y velocidad de operación.
- Patrones entre ranuras del estator y la frecuencia de falla del rotor.
- Detección automática de fallas: excentricidad dinámica o estática.
- Evaluación de energía a la entrada, incluyendo armónicos.
- Eficiencia en motores de inducción en CA y motores de CD.
- Detección de transientes.
- Registro del consumo de energía.

3.1.1 Ejemplos de fallas en calidad de energía.

Hay muchos tipos de combinaciones dentro de las fallas encontradas en un motor, a continuación se muestran algunos ejemplos de un análisis de energía.

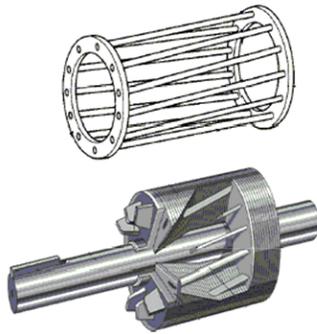
- 1) Un motor trifásico de ondas senoidales, de 15 Hp con un severo giro para accionar una bomba tiene un desequilibrio de la corriente de 38%, aproximadamente, superior al admisible para continuar la ejecución de este motor, es decir; que el motor no puede estar sometido más tiempo a dicho esfuerzo ya que demanda más corriente por lo que se calienta excesivamente. Cuando se revisó el motor para servicio observamos un cambio de sentido en el giro del motor, a su vez, este cambio corta casi a la mitad de una fase, por lo que hay un desfase, como se muestra en la gráfica, esto quiere decir que el embobinado de una de las fases sufrió un sobrecalentamiento, de modo que requiere embobinado nuevo.



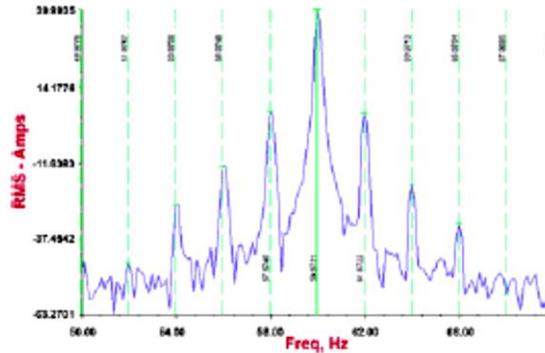
11. Señal de fase.

- 2) Tenemos el espectro actual de la fase de un motor de 300 Hp que acciona un compresor. El rotor ha fracturado sus propias barras por la amplitud de las bandas laterales de paso de polo alrededor del pico de la frecuencia de línea en casi 60 Hz.

Si las bandas laterales están a una distancia de 55 a 60 dB del pico de 60 Hz, se considera que las barras del rotor son buenas, pero si se incrementan a 40 dB, abajo del pico de 60 Hz, es un indicio de que algunas barras están fracturadas.

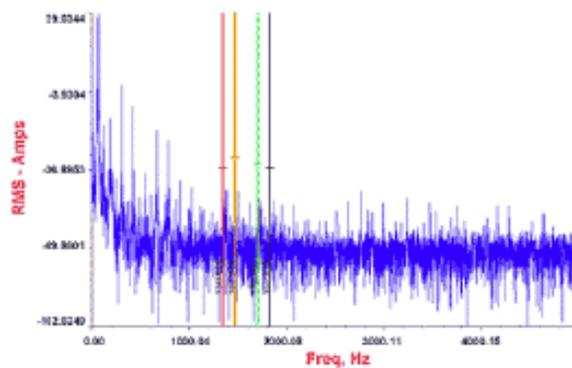


12. Barras de rotor.



13. Barra de rotor dañada

- 3) Cojinete o balero dañado: En el espectro se muestra los picos de un motor de 200 Hp que tiene un cojinete (balero) roto, los picos resaltados por los cursores de colores son resultado de la modulación del consumo de corriente del motor por el cojinete roto, a veces eso causa vibraciones considerables que pueden ocasionar daños de mayor importancia. Esto crea muchos problemas mecánicos, fátiga mecánica a lo largo de los componentes, es por ello que se reporta un inmediato cambio de baleros.



14. Señal de balero dañado.

Aquí se muestra el rotor de un servo completamente desmontado, únicamente con un anillo de alineamiento para el balero de lado derecho, en el que se encuentra el lado carga, que es la flecha que está en contacto con la máquina, acople, o herramienta y del lado izquierdo la parte que va montada al feedback. Estos rotores son sometidos a un proceso de limpieza en cuando son retirados para cambiar los baleros por unos nuevos, se les retira todo componente contaminante y cuando se acoplan los nuevos baleros, se emplea para mantenerlo limpio de cualquier agente contaminante que pueda afectar posteriormente.



15. Baleros en rotor.

3.2 Motor Current Signature Analysis(MCSA).

*Comportamiento Dinámico del Sistema

Es una técnica de monitoreo usada para diagnosticar problemas en los motores de inducción de tres fases. Con esta tecnología es posible detectar problemas antes de la falla y así prevenir paros catastróficos, es parte de la cultura preventiva que Grupo CM imparte a los ingenieros de mantenimiento para sus motores, de esta forma se evitan altos costos de mantenimiento y pérdidas imprevistas. El MCSA es simplemente un proceso por el cual las lecturas de corriente del motor se registran y analizan en el dominio de la frecuencia.



16. Señal de MCSA.

Esta tecnología permite la inspección técnica del equipo de operación para identificar barras del rotor y de alta resistencia a problemas en las articulaciones. Como una herramienta de mantenimiento preventivo, MCSA se puede utilizar para efectuar una prueba o, pruebas periódicas para realizar un seguimiento y tendencias de rendimiento del motor. MCSA permite ejecutar pruebas a distancia no intrusiva de los equipos que se controle. La prueba analiza la forma de onda actual con las matemáticas complejas.

Cuando uno está tratando de tomar decisiones acerca de si debía o no continuar operando motores críticos, ahora puede hacer uso de la herramienta, además de análisis de la vibración con la que no sólo se puede confirmar la presencia de problemas principalmente en baleros sino también evaluar su severidad. Debemos señalar que los problemas mecánicos pueden causar unos problemas eléctricos importantes cuando se evalúa por cualquiera de calidad de energía o análisis de vibración. Un ejemplo de un eje severamente desalineado puede crear un espacio de aire variable entre el rotor y el estator que afecta a ambos análisis por lo tanto cuando dichas pruebas no indican problemas eléctricos, siempre es una buena idea para llevar a cabo primero un análisis detallado de vibración, para comprobar si hay problemas mecánicos, antes de enviar el motor para las reparaciones.

El análisis de vibración y un desequilibrio de corriente sencillo superior al 3% pueden indicar problemas en el estator. Los problemas de rotor a veces se ven mejor con el análisis de la firma actual (ESA). Se recomienda un programa de vibración con corriente de análisis de firmas para confirmar y verificar problemas de motor. Cuando se prueba un motor de alta vibración, si es posible, es una buena idea detener el motor cuando se toma el análisis de vibraciones y ver si la vibración desaparece indicando inmediatamente problemas eléctricos o una disminución de la amplitud que indica problemas de vibraciones puras.

3.2.1 Conclusión.

El Análisis de la Firma de Corriente del Motor es una herramienta muy eficaz para el seguimiento y la tendencia a la degradación de los rotores de motores de CA. El MCSA también puede proporcionar un ahorro en el consumo de energía, proporcionando los motores más eficientes, que cuestan menos para operar. La certificación MCSA es un programa de muy bajo costo y ayudar a proporcionar una gestión de mantenimiento con un mejor programa de mantenimiento basado en fiabilidad.

3.3 Motor Circuit Analysis (MCA).

*Condición de las bobinas.

Es una técnica que utiliza resistencia, impedancia⁴, inductancia⁵, ángulo de fase, factor corriente/frecuencia y la resistencia de armadura, todo esto para la detección de defectos en los devanados del motor y deficiencias del rotor. El dispositivo es una herramienta muy versátil, de fácil uso, el All Test Pro MCA detecta fallas en su etapa más temprana, antes de que el motor falle. Detecta fallas “profundas” en los devanados que aún una prueba de aislamiento omitiría. Usando MCA se detectó una falla de controlador en un motor crítico, debido a malas conexiones por dar un ejemplo de la comodidad en el uso del dispositivo electrónico.

Las mediciones se realizan con motor cerrado, sin rotor y después de ensamble o bien después de algún mantenimiento o reparación, cada medición puede tener su intervalo de errores si es que no se realiza el proceso de medición adecuadamente. En ocasiones algunas mediciones pueden estar sujetas a la experiencia del ingeniero, dado que pueden marcar datos que confunden al analista, básicamente el motor puede marcar datos fuera de rango pero cuando se retira el rotor del motor los datos están dentro del rango, estos son casos particulares en esta medición de MCA. También se llegan a indicar conexiones en mal estado, flojas, o quemadas en las terminales del motor. Se hace la predicción de que estas conexiones se habrían deteriorado hasta el punto de falla en unas cuantas semanas. Se llevaron a cabo reparaciones pro-activas así como la reducción de costos de reparaciones y tiempo con el “hallazgo”.



17. All Test Pro (MCA).

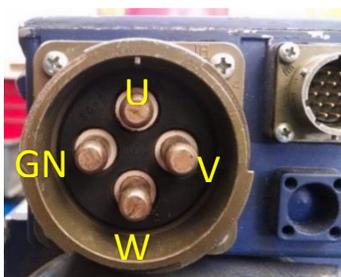
⁴ La **impedancia** es la medida de oposición que presenta un circuito a una corriente cuando se aplica un voltaje

⁵ La **inductancia**, es una medida de la oposición a un cambio de corriente de un inductor o bobina que almacena energía en presencia de un campo magnético, y se define como la relación entre el flujo magnético y la intensidad de corriente eléctrica que circula por la bobina y el número de vueltas del devanado.

3.4 Proceso de medición del MCA.

La medición se hace por medio de dos caimanes – banana, estas últimas van al MCA, y los caimanes van específicamente a las terminales de cada fase de potencia haciendo unas simples combinaciones, el proceso es sencillo, primero al hacer estas pruebas se resetea o calibra haciendo corto caimán y caimán, para realizar las mediciones se hace una prueba en cada combinación de las fases; puede ser las siguientes: U - V, U - W, y finalmente V - W.

El dispositivo AllTest Pro MCA marca los pasos cuando debes de hacer el cambio de caimanes, así mismo el tiempo que debes esperar antes de hacer algún cambio, debes estar seguro, antes de accionar la medición semiautomática, que las conexiones de la fase con el caimán estén bien tensas o apretadas, de no ser así, marcará un dato erróneo al momento de leer la información en la PC; hay ocasiones en que el conector o el pin del conector como en el caso de la imagen es demasiado grande para el caimán, entonces se puede recurrir a destapar la tapa del conector y ponerlo directamente con el cable de donde exista continuidad, de esta forma tenemos los datos correctos. Para hacer la parte de puesta a tierra y que el motor no marque corto en alguna de las fases con la carcasa del motor, es decir: que esté en perfecto aislamiento cada una de las fases, determinamos un “insulation” que únicamente consiste en poner a prueba una de las fases con tierra, también podremos usar el pin de GND o simplemente la carcasa que debe tener continuidad de tierra; hay que tener en cuenta si el motor fue pintado para buscar un punto donde haya contacto metálico.



18. Conector de potencia.

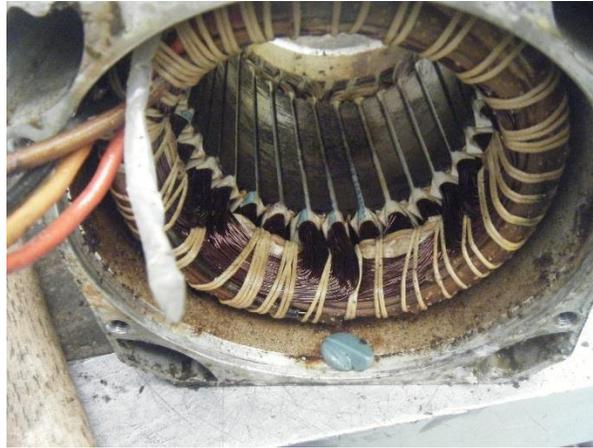
3.3.1 Características del MCA.

- Versátil – trabaja con todo tipo y tamaño de motores, síncronos⁶, servos, de CD y más.
- Sensible – detecta fallas en su etapa más temprana, antes de que el motor falle. Detecta fallas “profundas” en los devanados que aún una prueba de aislamiento omitiría.
- Rápido – La mayoría de las pruebas toma tan sólo un minuto y proporcionan una imagen completa de la salud del motor.
- Conveniente – Se pueden hacer las pruebas desde el centro de control de motores, a través de cientos de metros de cable.
- Fácil de usar – Menú amigable con lecturas para consulta rápida.

⁶ Los motores síncronos son naturalmente motores de velocidad constante. Operan en sincronismo con la línea de frecuencia y comúnmente se utilizan donde se necesita una velocidad constante.

3.3.2 Algunas fallas en bobinas.

- Generalmente empiezan en las terminales de las bobinas, en donde el estrés es mayor y el sistema de aislamiento es más débil.
- Comienzan ligeramente y se incrementan con el tiempo.
- Algunas veces se convierten en falla a tierra.
- Siempre terminan en una falla de motor.



19. Bobinado de motor servo.

3.3.3 Tecnología.

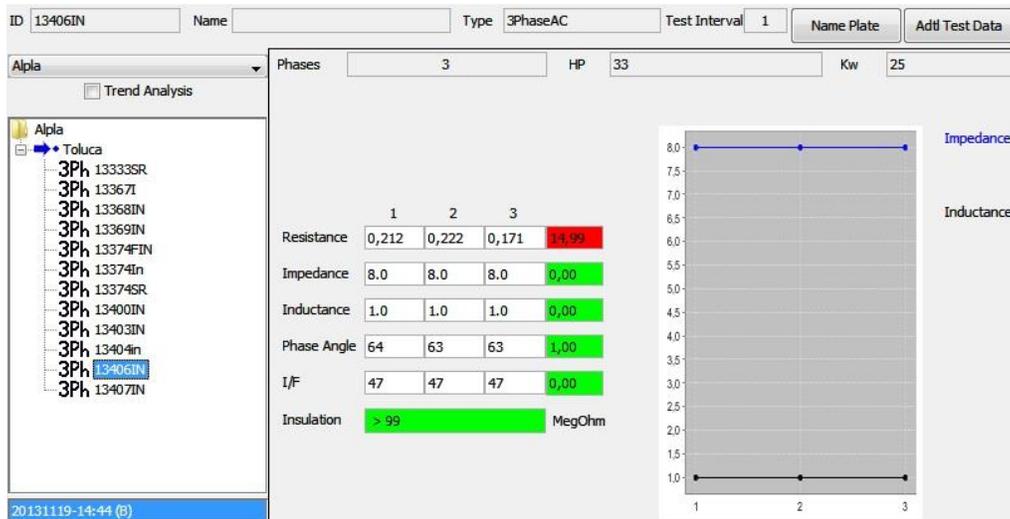
MCA es una tecnología que permite examinar la salud eléctrica de un motor a través de la medición de varias propiedades eléctricas en las bobinas, como anteriormente se mencionó. El Analizador del Circuito del Motor realiza 5 mediciones en cada una de las bobinas de cada fase:

- Tres puentes separados de gran precisión miden la resistencia, impedancia e inductancia de las bobinas.
- Se aplica una señal de bajo voltaje AC y el resultado del ángulo de fase es medido.
- Se realiza una prueba de respuesta corriente frecuencia múltiple (I/F).
- Se mide la resistencia de aislamiento a tierra entre 500 o 1000V.

A continuación se ejemplifica la gráfica y los datos obtenidos con la medición, se muestran ejemplos de cómo determinamos el estado inicial del motor con la medición del MCA.

3.3.4 MCA Inicial.

En un motor sano, todas estas mediciones están balanceadas, que una o más no lo estén, indica donde se puede encontrar la falla, por ejemplo, si todas las mediciones, excepto la resistencia están balanceadas, el problema radica en las conexiones, pues estas se encontrarán flojas. La media, en las pruebas del ángulo de fase o I/F indica la existencia de un corto circuito entre las vueltas de las bobinas, también puede aislar e identificar fallas en rotor y excentricidades en motores ensamblados sin correr una prueba bajo carga.



20. MCA Conexiones flojas.

En la imagen anterior podemos observar el software; de lado izquierdo tenemos un historial organizado por carpetas que usamos dependiendo el cliente, y una lista de los OT (orden de trabajo) que previamente ya fueron analizados, por ejemplo: el que está seleccionado es de un motor de Alpa Toluca con OT 13406 IN que representa el primer MCA, es decir: el Inicial en la parte central están los parámetros que se obtuvieron, el programa automáticamente marca con colore (verde, ámbar y/o rojo) el estado general del motor.

El uso de este instrumento es realmente valioso, pues desde que se hace la medición se crea una idea de lo que el motor presenta; en oposición, hay motores que marcan fallas, pero esto está ligado directamente con los imanes permanentes y el rotor, por lo que se hace una segunda medición sin el rotor. Los resultados de la prueba de MCA sin rotor se comparan con el inicial.

A continuación se muestra la tabla de las tolerancias que se permiten en cada una de las mediciones, comparándolas con las fases de potencia que se tienen en un motor trifásico, por lo que si están dentro de los parámetros de la tolerancia, se marcará una celda en color verde.

Tolerancias IEEE 1415		Tolerancia	
Resistencia (R)	$>0.001\Omega$	5%	
Impedancia (Z)	$>3\ \Omega$	$\sim 5\%$	
Inductancia (L)	$>1\ \text{mH}$	$\sim 15\%$	
Ángulo de fase (φ)	$0-90^\circ$	± 1	
Corriente/frecuencia (I/F)		± 2	
Resistencia de aislamiento	0 a $>99\ \text{M}\Omega$	> 99	

Devanados en buenas condiciones



21. Tabla de tolerancias

Todas las pruebas son de bajo voltaje y no destructivas, por lo que no hay peligro de dañar equipo sensible. Una prueba toma menos de 5 minutos y muestra desde un motor en perfectas condiciones hasta fallas como: fases abiertas; conexiones flojas; bobinas quemadas o contaminadas; bobinas a tierra.

El MCA es una de las herramientas más eficaces para la evaluación eléctrica de un motor. A continuación se muestra lo que podemos encontrar en las mediciones.

		Tolerancia	
Resistencia (R)	$>0.001\Omega$	5%	
Impedancia (Z)	$>3\ \Omega$	$\sim 5\%$	
Inductancia (L)	$>1\ \text{mH}$	$\sim 15\%$	
Ángulo de fase (φ)		± 1	
Corriente/frecuencia (I/F)		± 2	
Resistencia de aislamiento	0 a $>99\ \text{M}\Omega$	> 99	

punto caliente en conexiones entre bobinas

		Tolerancia	
Resistencia (R)	$>0.001\Omega$	5%	
Impedancia (Z)	$>3\ \Omega$	$\sim 5\%$	
Inductancia (L)	$>1\ \text{mH}$	$\sim 15\%$	
Ángulo de fase (φ)		± 1	
Corriente/frecuencia (I/F)		± 2	
Resistencia de aislamiento	0 a $>99\ \text{M}\Omega$	> 99	

desbalance de impedancia mal embobinado o sobrecalentamiento

		Tolerancia	
Resistencia (R)	>0.001Ω	5%	
Impedancia (Z)	>3 Ω	~5%	
Inductancia (L)	>1 mH	~15%	
Ángulo de fase (φ)	0-90°	± 1	
Corriente/frecuencia (I/F)		± 2	
Resistencia de aislamiento	0 a >99 MΩ	> 99	

		Tolerancia	
Resistencia (R)	>0.001Ω	5%	
Impedancia (Z)	>3 Ω	~5%	
Inductancia (L)	>1 mH	~15%	
Ángulo de fase (φ)	0-90°	± 1	
Corriente/frecuencia (I/F)		± 2	
Resistencia de aislamiento	0 a >99 MΩ	> 99	

		Tolerancia	
Resistencia (R)	>0.001Ω	5%	
Impedancia (Z)	>3 Ω	~5%	
Inductancia (L)	>1 mH	~15%	
Ángulo de fase (φ)	0-90°	± 1	
Corriente/frecuencia (I/F)		± 2	
Resistencia de aislamiento	0 a >99 MΩ	> 99	

		Tolerancia	
Resistencia (R)	>0.001Ω	5%	
Impedancia (Z)	>3 Ω	~5%	
Inductancia (L)	>1 mH	~15%	
Ángulo de fase (φ)	0-90°	± 1	
Corriente/frecuencia (I/F)		± 2	
Resistencia de aislamiento	0 a >99 MΩ	> 99	

		Tolerancia	
Resistencia (R)	>0.001Ω	5%	
Impedancia (Z)	>3 Ω	~5%	
Inductancia (L)	>1 mH	~15%	
Ángulo de fase (φ)	0-90°	± 1	
Corriente/frecuencia (I/F)		± 2	
Resistencia de aislamiento	0 a >99 MΩ	> 99	

22. Interpretación de MCA.

3.4 Ultrasonido.

Es una técnica de inspección a equipos eléctricos y mecánicos, permite la detección de discontinuidades superficiales de los materiales y fallas en los rodamientos. Se cuenta con equipo especializado para la evaluación del estado de los baleros, rotor, entre hierros, etc. Al realizar las mediciones, hacemos la captura de audio con ultrasonido para dar un diagnóstico exacto.

3.5 Análisis de vibraciones.

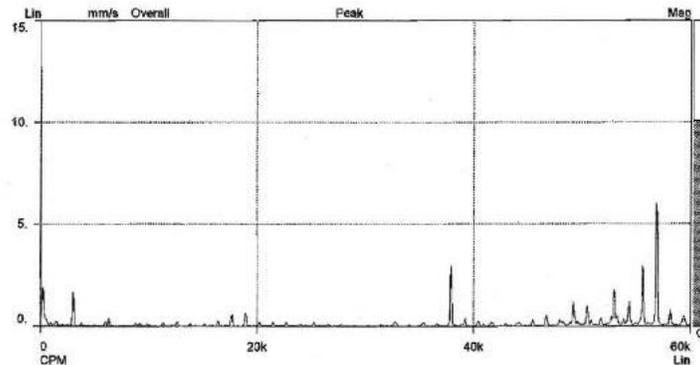
La vibración es el movimiento de vaivén de una máquina o elemento de ella en cualquier dirección del espacio, desde su posición de equilibrio. Generalmente, la causa de la vibración reside en problemas mecánicos como: desequilibrio de elementos rotativos; desalineación en acoplamientos; engranajes desgastados o dañados; rodamientos deteriorados; fuerzas aerodinámicas o hidráulicas y problemas eléctricos. Las características más importantes del análisis de vibraciones son: frecuencia, desplazamiento, velocidad, aceleración, spike energy (energía de impulsos).

Cada problema muestra una frecuencia de vibración distinta. La amplitud de la vibración indica la importancia o gravedad del problema; esta característica ofrece una idea de la condición de la máquina. No es la intención hacer énfasis en esta sección pero sí mencionar el uso de esta tecnología.

3.6 Rodamientos.

Las fallas en elementos del rodamiento dan vibración a frecuencias altas no relacionadas con la velocidad de rotación y de amplitud también aleatoria. En las gráficas siguientes observan los espectros de velocidad y aceleración, respectivamente, de un rodamiento de bolas defectuoso.

Es relativamente fácil reconocer este fallo al ver la gráfica de amplitud-frecuencia, ya que se caracteriza por tener muchos picos juntos a altas frecuencias y de amplitud variable que dependerá de la gravedad del problema. La frecuencia a la que se produce la máxima amplitud puede dar una idea del elemento defectuoso del rodamiento. Los deterioros en elementos rodantes, pistas de rodamiento o jaula de retención, generan fuerzas que se transmiten al alojamiento y estructura que los rodea.



23. Espectro de velocidad de un rodamiento defectuoso.

El fallo de un rodamiento se detecta sólo en la medida en la que se le hacen pruebas, es decir, no se transmitirá al resto de los puntos de la máquina, exteriormente el rodamiento defectuoso se notará por el exceso de ruido.

Los rodamientos son elementos importantes en la máquina, que al fallar puede dar problemas más graves, por eso es necesario tener especial cuidado con ellos. Las fallas pueden ser ocasionadas por errores en el montaje, lubricación inadecuada, defectos internos en la fabricación, corriente eléctrica, desalineación, rodamiento no preparado para la carga que soporta estas son las causas más comunes de fallo.

3.7 Termografía.

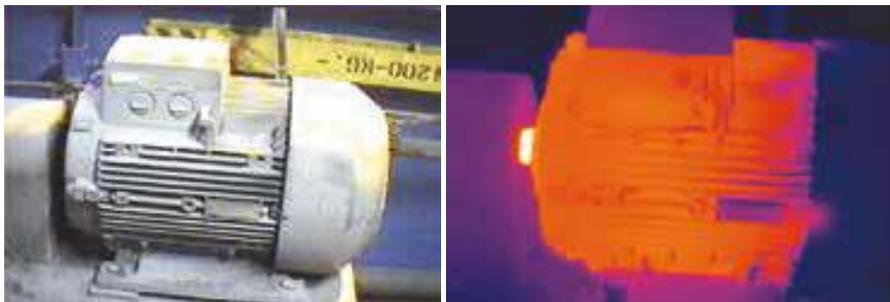
Es la técnica predictiva más rápida, con ella se puede recolectar mucha información en cuestión de segundos. Las imágenes térmicas muestran las condiciones de funcionamiento a través de la temperatura superficial, que nos da una estimación de la temperatura interna. Las mediciones deberán realizarse cuando los motores están trabajando en condiciones normales. Al detectar anomalías invisibles a simple vista, la termografía permite realizar correcciones antes de que se produzcan costosos fallos en el sistema.

Las cámaras termográficas son una herramienta única que sirve para determinar cuándo y dónde se necesita mantenimiento, puesto que las instalaciones eléctricas y mecánicas suelen calentarse antes de fallar. Al descubrir estos puntos calientes con una cámara termográfica, se puede llevar a cabo una medida preventiva. De este modo, es posible evitar costosas averías o, peor aún, incendios.



24. Cámara termografía.

Los fallos en el motor, como los signos de desgaste en el contacto de las escobillas y los cortocircuitos en los armazones, suelen producir un calor excesivo antes de fallar, sin embargo, son imposibles de detectar mediante un análisis de vibraciones puesto que, con frecuencia generan poca o ninguna vibración. La termografía ofrece una visión completa y permite comparar las temperaturas de distintos motores.

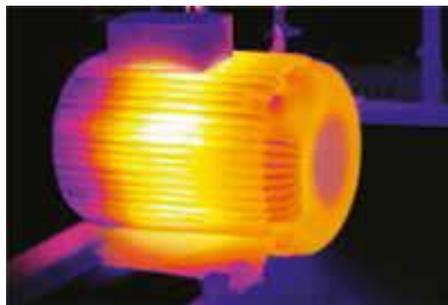


25. Esta termografía muestra un motor eléctrico en modo normal de funcionamiento.

Ejemplos de averías mecánicas que se pueden detectar con la termografía:

- Problemas de lubricación
- Errores de alineación
- Motores recalentados
- Rodillos sospechosos
- Bombas sobrecargadas
- Ejes de motor recalentados
- Rodamientos calientes

Estos y otros problemas se pueden detectar en una fase temprana mediante una cámara termográfica que ayudará a evitar se produzcan daños costosos y a garantizar la continuidad de la producción.



26. Motor: problema de bobinado interno.

Se realizó una prueba llamada Toroide que consiste en hacer circular corriente por medio de un transformador de 5KVA. La circulación de corriente por el cable de cobre provoca la elevación de temperatura del estator, este mostrará calentamiento en sus bobinas y representará los puntos más fuertes de temperatura en donde existe un daño, este proceso es extremadamente peligroso por esa razón sólo se hace cuando no se está completamente seguro de cambiar el embobinado del motor.



27. Prueba Toroide.

3.8 Shock Pulse Method (SPM).

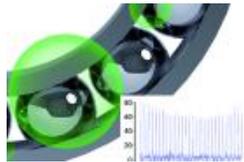
SPM es la abreviatura para el método de pulso de choque, técnica patentada para el uso de señales que consiste en girar los rodamientos para el monitoreo de la condición eficiente del motor. A partir de la renovación de la práctica, en 1969, este método se ha desarrollado y ampliado, ahora es una filosofía en todo el mundo, pues se ha aceptado para monitoreo de condición de los rodamientos y mantenimiento de la máquina.

Condición de los baleros. Es un método cuantitativo usado ampliamente para monitorear los rodamientos de los motores, esta tecnología mide el choque de impulsos en una escala en decibeles. Un SPM entonces evalúa la señal y así se define el tipo de rodamiento y la velocidad de rotación en RPM, así como el diámetro del cojinete. Los valores de los impulsos indicarán en las mediciones cualquier daño superficial en los cojinetes y hará la evaluación de los mismos.

Los rodamientos generan perturbaciones en la interfaz entre el elemento rodante cargado y la pista de rodadura. Estos choques llegan al transductor SPM que emite impulsos eléctricos proporcionales a la magnitud de choque. A diferencia de los transductores de vibración, el transductor de impulsos de choque responde a su frecuencia de resonancia cuidadosamente afinada, lo que permite una medición calibrada de las amplitudes de impulsos de choque.

La amplitud de impulsos de choque se debe a tres factores básicos:

- La velocidad del balanceo (tamaño del rodamiento y rpm).
- Espesor de la película de aceite (separación entre las superficies metálicas de la interfaz de rodadura). La película de aceite depende de la oferta de lubricante y también de la alineación y la pre-carga.
- El estado mecánico de las superficies de apoyo (aspereza, tensión, daño, partículas de metal sueltas).



28. Balero.

Las tecnologías alternas siempre serán estudiadas y rediseñadas para hacer más fácil el entendimiento de porqué son tan importantes los motores, a la larga habrá periodos en los que solamente se cambie el motor para un preventivo y no toda una cadena de reparaciones sólo por el entendido de que la falla tenía que suceder.

Capítulo 4. Ingeniero Mecatrónico Analista dentro de Grupo CM.

El rol que desempeñé en el trabajo fue: ingeniero mecatrónico de análisis; consistió en un proceso previo de capacitación y entendimiento práctico de los conceptos dentro del entorno de la cultura en mantenimientos preventivos y correctivos para los motores servo; corriente directa y alterna. La capacitación es vital para que la relación de procesos y los sistemas sean mejorarlos; la calidad en el mantenimiento de los servicios; así como tener la capacidad de implementar la ingeniería para evitar los costos de un trabajo correctivo empleando una programación oportuna en la verificación de los sistemas.

Parte de las funciones que realicé consistieron en generar una planeación de los procesos, de tal forma que sean implementados y funcionen más allá de las personas, esto mediante los análisis antes mencionados y a partir de la generación de material de capacitación y documentación de los procesos.

La persona que se desempeña como ingeniero mecatrónico de análisis, debe contar con habilidades para mejorar, generar e interpretar la información que se obtenga desde la operación en los procedimientos aplicados con cada tecnología implementada, para hacer buen uso de los datos recabados, siendo una persona competente y proactiva dado que estará en contacto con sistemas de varias naturalezas, como los mecánicos, eléctricos, electrónicos e informáticos.

Es necesario contar con alternativas de solución para presentar ante los clientes, todo respaldado con la información analizada y procesada, de manera que el diagnóstico sea lo más exacto. La persona a cargo de ésta labor, debe contar con la habilidad de tomar decisiones bajo la presión de no cotizar trabajos y refacciones innecesarios para una reparación, así como poseer habilidades de liderazgo, ya que es responsable del proceso que llegue a la planta. Se desarrolla un ambiente competitivo fundamentado en hacer las cosas una vez y bien.

Por lo anterior, al asumir la responsabilidad como ingeniero a cargo del motor, se debe contar con la información que relaciona la interpretación de la misma, para ello se usan los conocimientos base de la carrera de ingeniería mecatrónica de manera continua, apegada a los manuales del uso correcto de la instrumentación; hablamos de las conexiones, las señales, mediciones, conceptos base que sumados dan un resultado claro en combinación con el juicio de un buen analista.

La información cambia con el tiempo en relación con los distintos tipos de implementaciones que se presentan, la calidad de un trabajo depende específicamente de quién tiene y quién cumple con las habilidades para desempeñar estas labores. Una correcta soldadura puede hacer la diferencia en un conector que a su vez transmite los pulsos y/o señales de control que tiene la comunicación con el feedback (encoder, resolver, etc.) y a su vez, es enlazado con la parte de potencia; en resumidas cuentas, puede o no funcionar de acuerdo a las condiciones de fábrica.

Capítulo 5. Participación dentro de la empresa.

Las actividades que desempeñé en la empresa Grupo CM, los trabajos logrados, análisis profesionales, mantenimientos preventivos y/o correctivos de servomotores, estudio de conceptos mecánicos y eléctricos se mencionan a continuación. Se emprendieron distintas actividades relacionadas al estudio de mercado y visitas a plantas industriales; involucraron responsabilidades importantes como el trato directo con jefes de las áreas de compras, mantenimiento, bodega asimismo proyectos extras a las labores comúnmente desarrolladas.

A diferencia de otros ingenieros, la empresa opta por ingenieros mecatrónicos, puesto que son más eficientes, en relación al entendimiento de los procesos y no necesitan una ardua capacitación para comprender lo que la empresa hace, contrario al proceso de 3 meses que se requiere para un ingeniero electrónico o mecánico, simplemente porque el mecatrónico está más familiarizado con los servomotores, desde sus clases en la universidad hasta los proyectos finales del mismo, comúnmente es mejor traductor de sus funcionamiento.

El ingeniero mecatrónico tiene como meta hacer buen uso del equipo con el que cuenta, es importante conocer la instrumentación bastante bien para no cometer errores; puede desarrollar el dominio en el uso de todas estas ramas, hablando de control, mecánica, eléctrica, electrónica y conceptos relacionados de manera muy muy amigable; el uso de la mayoría de los dispositivos para diagnosticar y conocer el estado de todas las características antes mencionadas, así como el uso correcto de un multímetro, amperímetro, fuentes de energía, implementación de drives, aplicación de soldadura con cautín, uso de herramientas mecánicas: machuelos, desarmadores, llaves españolas, llaves torx, cortadores, llaves allen, brocas, taladro de banco, soldadora eléctrica, etc.

Dentro de la empresa desarrolle capacidades que pocas veces me puse a prueba como tolerancia a la frustración: esto porque procesos simples los vuelves complejos cuando te cierras a las alternativas o el desconocimiento de herramienta adecuada; sin embargo la experiencia de la repetición hace claro que nunca entenderás sin error usa sola vez. Aprender de ello te lleva a la madurez profesional, luchar contra ti mismo siempre será el mejor punto de partida para superarte.

Se dará una breve descripción del uso de los dispositivos tomando como ejemplo un servomotor con feedback resolver. Esto ejemplificará detalladamente el proceso de análisis que se efectúa dentro de la empresa, respetando la privacidad de la empresa, algunos procesos o descripciones no serán explicados o serán anulados.

En la imagen se tiene una muestra de un servomotor de tamaño relativamente grande sobre el soporte utilizado en el laboratorio para este tipo de motores, el diagnóstico se hace en tiempo real. Se monta sobre un soporte, sobre el cual se determina la relación de sentido de giro del rotor, sentido de giro del feedback, número de polos, número de bloqueos, número de *speeds*, entre muchos más que entran en el diagnóstico inicial.



29. Análisis de servomotor MOOG.

5.1 Análisis en servomotores.

El diagnóstico a servomotores no se podría realizar sin el uso de instrumentos de medición especializados, tecnología de *Mitchell Electronics* es la principal herramienta de diagnóstico para Grupo CM; tiene tres o cuatro módulos (dependiendo el motor), usados para comprobar condiciones importantes en los servomotores, la adquisición de información en las pruebas son de gran importancia porque son datos obtenidos son comprobados con los del fabricante. Importante llevar un control fotográfico de los trabajos realizados con el motor. Después de ser revisado mecánicamente (motor desarmado), rigurosamente el motor tiene conservar con las condiciones de ajuste con las que llega a servicio.

Cuando se recibe un servomotor en Grupo CM, la mayoría de las circunstancias el cliente no tiene idea de por qué fallo el servomotor: se paró, le salió humo, se calienta, entre otros problemas visibles que el cliente detecta al desmontar el servo. Los síntomas que pueda presentar un motor pueden ser considerados normales para algunos técnicos, esto porque el motor está funcionando, aunque el motor ya está fallando realmente. Algunos ingenieros también son de su desconocimiento total como es que se repara, ajusta y analiza un servo.

El ingeniero mecatrónico tiene como meta erradicar los problemas del servomotor en su totalidad. Parte crucial en los diagnósticos e interpretación de resultados como ingeniero mecatrónico es correr en vacío en la planta, para ello transporta el material necesario a utilizar a la planta. Como responsable del motor así mismo de los análisis la meta de es crear confianza dentro de los ingenieros de mantenimiento y ventas a los que se les venden los servicios de Grupo CM. Tuve la oportunidad de viajar a distintas partes en México, visite la Irapuato, León, Querétaro y puntos del Estado de México para dar servicios, correr motores en entregas de motores o solo presentación formal como parte del equipo.

Los motores pueden llegar a Grupo CM en las peores de las condiciones, mecánicas, eléctricas y de complementos, en ocasiones el cliente comete el grave error de intervenir en los servomotores sin tener conocimiento necesario e indispensable de lo que involucra incurrir en un servomotor. Por lo que hay clientes que mandan sus motores en condiciones prácticamente de desecho, sin embargo el ingeniero mecatrónico brinda un buen servicio capaz de analizar y rescatar los motores para que logren realizar su trabajo eficientemente. Existe documentación e historiales anteriores del tipo de motor que son usados como procedimientos, procesos que son desarrollados con los años para el mejor desempeño de los análisis.



30. Laboratorio de diagnósticos.

Parte del proceso involucra hacer un histórico fotográfico del motor, tomar las fotografías necesarias para tener un control del proceso, justificar cambios de piezas, y si se tiene la duda de algún aditamento cómo o dónde debe ser colocado, es preciso decir que esto sirve para llenar el formato de cotización que se le manda al cliente como previo a su reparación. El formato en Excel tiene puntos clave de análisis se dará una explicación de cada uno de ellos, sin embargo por políticas no me fue permitido poner el formato de cotización muy detallado.

Para ello solo se mostrara un formato sin datos de alguna empresa a la que se le haya brindado algún tipo de servicio.

5.2 Formato de diagnóstico inicial.

Este es el formato de un diagnóstico inicial del servomotor de un cliente, se encuentra el precio de la reparación si es autorizado, la cotización es enviada junto con una galería fotográfica de las fallas encontradas durante el proceso de diagnóstico. Si el cliente acepta los términos se autoriza la orden de compra del servicio. Los procesos urgentes se dejan a la confianza de Grupo CM y se entrega el motor junto con el diagnóstico inicial y final al cliente en la puerta de su planta, para que solamente se haga el pago sin presentar tiempo de espera en la autorización.

CERTIFICADO DE SERVICIO

OT: 13 - 439

Servo Marca/Mod : **Moog Brushless Servomotor**

Pot. / RPM / U / I : **25 kW / 3000 RPM / 325 V / 47.2 A**

No. de Serie : **63765** Fecha de recepción: [REDACTED]

No. de parte : **SOP-455-427** Fecha de entregado: [REDACTED]

Tipo : **Servomotor Brushles No. De Salida:**

Cliente : **ALPLA**



Pruebas Iniciales
(motor como recibido del cliente)

Electricas	A	B	C
R [Ω]	0.172	0.175	0.174
R DIELEC [MΩ]	>99	>99	>99
U prueba [V]	500		
Freno	N / A		
Reductor	N / A		

Observaciones iniciales

Mecanicas / Electricas

Flecha presenta rayones

balero lado car: 6211Z
balero lado libr: 6307DU

TRABAJOS A REALIZAR

- X Revisión Visual y Físico del Motor
- X Medición de Dimensionamiento
- X Medición MCA / Evaluación de Devanados
- X Rodado de equipo en vacío (drive back)
- X Prueba de Torque / Análisis Imanes Permanentes
- X Revisión de conectores de control y fuerza
- X Diagnostico de Resolver
- X Revisión de conmutación
- X Desmontaje de dispositivo feedback
- X Desensamble del equipo
- X Inspección visual interna
- X Lavado y deshidratado de devanado
- X Lavado de pzas. mecncs. en gral.
- X Cambio y montaje de rodamientos
- X Ensamblado del equipo
- X Conector de control nuevo
- X Montaje y ajuste de feedback
- X Pruebas finales
- X Pintado del equipo

Pruebas Iniciales
(sin carga)

U / ver. V / hor. W / ax.	I [A] H	I [A] AH	Tensión [V]	RPM	Vibración	Freno on/off	Freno torque	Term. [Q/C]	Sellos Enfriam
0.60	0.60	0.60	VDF	1800		N / A	N / A	Q/20°C	N / A

EVALUACIÓN DE DEVANADOS

Servo Marca/Mod : **Moog Brushless Servomotor**

Pot. / RPM / U / I : **25 kW / 3000 RPM / 325 V / 47.2 A**

No. de Serie : **63765**

Prueba Inicial: MCA

ALPLA

Trend Analysis

Phases: 3 HP 33 Kw ES

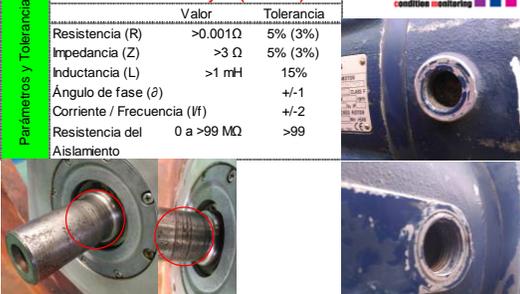
	T1-T2	T1-T3	T2-T3
Resistance	0.172	0.175	0.174
Impedance	10.0	9.0	9.0
Inductance	2.0	1.0	1.0
Phase Angle	67	67	66
I/F	48	48	47
Insulation	> 99 MegOhm		

Suciedad en devanados.

NORMAS / GARANTÍA

MCA Motor Circuit Analysis (IEEE1415)

Parámetros y Tolerancias	Valor	Tolerancia
Resistencia (R)	>0.001Ω	5% (3%)
Impedancia (Z)	>3 Ω	5% (3%)
Inductancia (L)	>1 mH	15%
Ángulo de fase (δ)		+/-1
Corriente / Frecuencia (If)		+/-2
Resistencia del Aislamiento	0 a >99 MΩ	>99



Rayones en la flecha.

EVALUACIÓN DE CONMUTACION

Servo Marca/Mod : **Moog Brushless Servomotor**

Pot. / RPM / U / I : **25 kW / 3000 RPM / 325 V / 47.2 A**

No. de Serie : **2124**

Resolver : **API - HAROWE, INC. HAROSYN.**

Prueba inicial feedback:



Resolver en buenas condiciones.

CONDICIONES ORIGINALES

Fuerza de los imanes permanentes:

Fuerza de imanes permanentes.



@1000min-1

Condicion del sensor de posicion:



Ajuste estático.

Ajuste dinámico.

5.2.1 Lista de algunos procesos mecánicos.

- Balanceo dinámico.
- Balero nuevo.
- Barnizar 2 veces (Resistente a VDF).
- Cambio de encoder.
- Cambio de resolver.
- Cambio y montaje de rodamientos.
- Conector de control nuevo.
- Conector de potencia nuevo.
- Corrección de devanados (capton)/Barnizar.
- Corregir laminado del estator (rozamiento).
- Desembobinar.
- Desensamble del equipo.
- Desmontaje del dispositivo feedback.
- Diagnóstico de dispositivo feedback.
- Diagnóstico mecánico.
- Embobinado.
- Encasquillado de lado carga.
- Encasquillado de lado libre.
- Ensamblado de equipo.
- Fabricación de balata.
- Fabricación de buje.
- Inspección visual interna.
- Lavado de piezas mecánicas en general.
- Lavado de motor.
- Lavado y deshidratado de devanado.
- Mantenimiento a freno.
- Medición de dimensionamiento.
- Medición MCA/Evaluación de devanados.
- Metalizado flecha.
- Montaje y ajuste de feedback.
- Nuevo encoder.
- Nuevo resolver.
- Reposición de ventilador.
- Revisión de conectores.
- Revisión de conmutación.
- Rodado de equipo en vacío.
- Tornillería/Zapatillas/Identificación de cables.
- Verificación de balanceo.

5.3 Instrumentación.

La instrumentación utilizada es adquirida de la empresa estadounidense *Mitchell Electronics*, es la principal herramienta que se utiliza para los diagnósticos para el ingeniero mecatrónico de servomotores industriales, la empresa cuenta con laboratorios totalmente acondicionados para los diagnósticos de servomotores. Los laboratorios están equipados con todo lo necesario para trabajar sin desplazamientos o lapsos de paro a otro laboratorio, no hay necesidad de tomar prestado algún tipo de herramental consumible o aditamento porque siempre se encuentra el laboratorio limpio y con los consumibles a la mano, es por ello que se logra una concentración grande para que el ingeniero mecatrónico no tenga distracciones que provoquen error, lo que lleva a un mejor desarrollo del trabajo en tiempo y forma.

La instrumentación de *Mitchell Electronics* cuentan con varios sets de cables, estos cables están diseñados específicamente al modelo del encoder, algunos utilizan módulos amplificadores por los bits de manejo, los cables tienen un uso determinante para los diagnósticos específicamente de los servos, cada laboratorio tiene su propio juego de cables, los módulos de *Mitchell Electronics* son versátiles y están colocados estratégicamente en la pared de la mesa de trabajo con una facilidad de poder desconectar y conectar rápidamente si es necesario.

5.3.1 Mitchell Electronics, Model TI-5260.



32. TI-5260.

Características.

- U V W Las fases pueden cambiar individualmente +, -, o abierto.
- Fácil de crear combinaciones de fases de bloqueo, ya sea de línea a línea o línea-neutral.
- Ayuda a limitar la exposición del personal a altos voltajes.
- Diodo protegida contra los transitorios⁷ de conmutación.
- Hasta 10 amperios corrientes con bloqueo.



⁷ **Transitorio.** *Descripción*, Variación brusca de tensión de hasta varios miles de volts (también denominado impulso, punta o pico). *Duración*, Microsegundos. *Causas*, Operaciones de maniobra: conmutaciones, capacitores, paralelos, etc. Arranque y parada de equipos potentes o maquinaria de oficinas elevadores, equipos de soldadura, descargas estáticas, rayos y tormentas. *Errores*, Errores de

Descripción general.

El interruptor de rotor proporciona un método fácil y preciso de la aplicación de una tensión de bloqueo para un motor sin escobillas de imán permanente (servo). El bloqueo del rotor es la forma sencilla de probar la dirección del rotor. El bloqueo del rotor también se utiliza tanto en el control y ajuste de la alineación de retroalimentación con servomotores. Los interruptores de las fases están cableados y etiquetados para permitir la aplicación de un voltaje positivo, voltaje negativo, o no hay tensión para cada fase. Esto hace que sea muy sencillo de aplicar prácticamente cualquier polaridad de la tensión de bloqueo de línea a línea o neutral.

No sólo los interruptores etiquetados hacen la conexión mucho más simple y más rápido para el ingeniero, también es mucho más precisa. Las conexiones incorrectas son una causa común de la alineación incorrecta de retroalimentación durante la reparación de motor servo.

Conexión.

Se conecta el cable rojo a la terminal positiva (+) y el cable blanco al terminal negativa (-) de la fuente de alimentación para el bloqueo. Después se conectan las fases del motor a la U, V, W y las conexiones del bloqueo de terminales de cambio rápido con un cable especial. Como se trata de la misma disposición de pines del bloque de terminales que utiliza el TI-3000, con esta composición de las posiciones de fases, se ahorra tiempo y reduce el riesgo de una conexión incorrecta, ya sea durante la alineación o la prueba de funcionamiento del motor.

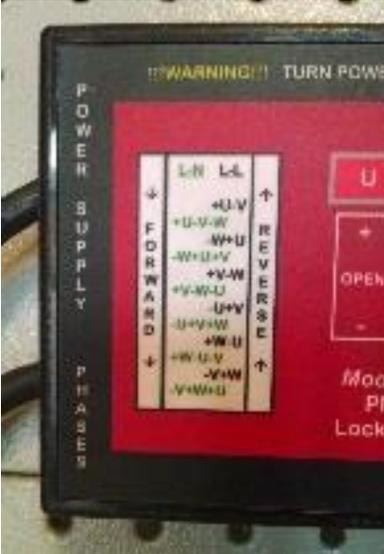


33. Fuente.

Si se necesita encontrar un bloqueo que produce un ángulo de cero, es una simple cuestión de caminar a través de todos los bloqueos posibles de una manera sistemática, siguiendo el patrón de la leyenda de superposición.

procesamiento o pérdida de datos. Daños severos en circuitos electrónicos: PC, TV, DVD, lógica de sistemas de refrigeración, sistemas de seguridad, etc. Solución, Supresor (descargador) de sobretensiones.

Incluso la tarea de hacer una hoja de datos para un trabajo de reparación del motor se hace más simple y más precisa al observar las posiciones de los interruptores para registrar la información de bloqueo. Las buenas técnicas de reparación requieren procedimientos consistentes, y con el dispositivo ayudará a los ingenieros con bloqueos consistentes en todo momento.



34. Lista de bloqueos.

5.3.2 Mitchell Electronics, Model TI-5000EX.



35. TI-5000 EX.

Descripción general.

Es una solución completa para probar y depurar dispositivos de retroalimentación que se encuentran típicamente en servomotores modernos. Entre lo que puede dar el dispositivo tenemos:

1. Fácil de realizar pruebas en dispositivos de impulsos basados tales como encoders, resolvers o incrementales.
2. Fácil lectura de datos, velocidades, y los estados de entrada de las líneas de impulso de muchos dispositivos (incluyendo encoders).
3. Realizar fácilmente las pruebas de los dispositivos de realimentación del resolver.
4. Ejecute el ajuste con una excelente precisión.

El "TI-5000" nos ayuda como medio de comunicación entre el motor y la interfaz gráfica (PC), tiene distintos tipos de operación. Mediante el botón *Select Feedback*, se selecciona el tipo de encoder correcto de las distintas selecciones del codificador. La prueba de visualización de datos determina si el codificador está proporcionando toda la salida de datos, determina si la cuenta está cambiando correctamente según lo indicado por la selección de retroalimentación, si cualquier bit esta en error provoca estado de alarma. Para los codificadores de serie, se hace la prueba de recuento para determinar con mayor precisión si se está produciendo la cantidad correcta de conteos por revolución. De la misma forma podemos obtener el ángulo de resolver y por medio de las combinaciones con el dispositivo anterior determinar lo que llamamos "Lockup" es el ajuste que tiene el motor respecto a lo más cercano a ceros en grados.

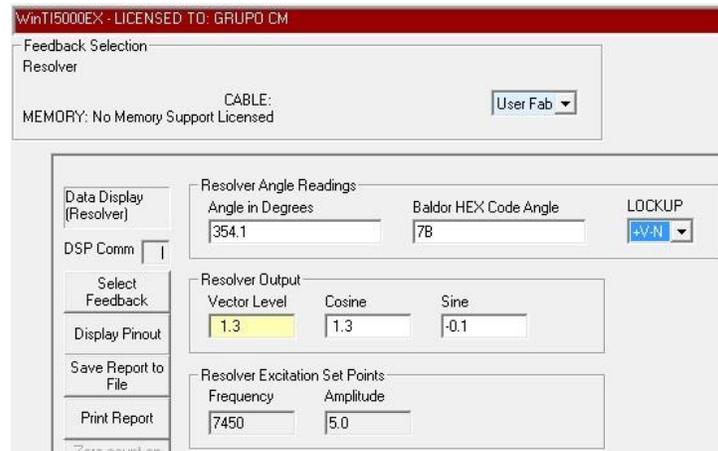
5.3.3 Problema de señal en resolver.

Se presenta una imagen a continuación que hace referencia a la interfaz gráfica que tenemos en la PC para determinar las lecturas, lo importante de este cuadro previamente es la selección del feedback (resolver), después determinamos mediante la lectura parámetros que con la experiencia se pueden confirmar como el desnivel entre el núcleo y el cuerpo del resolver como se aprecia en la imagen, lo que se podría deducir con anticipación es que el motor estuvo expuesto a esfuerzos horizontales, provocando un desplazamiento lineal sobre el eje del rotor que hizo que el núcleo del resolver se desplazara dado que esta acoplado al rotor del servomotor.



36. Desnivel de resolver

Por este detalle tenemos que en el nivel del vector está en color de alarma, este error se corrige dependiendo claramente de lo que pueda reflejar el motor, puede que la tapa de lado carga este floja y al ajustar la tornillería correctamente este empuje el rotor para atrás y el vector se ponga en verde (buena señal), otro caso podría ser que no tenga las arandelas de nivel, estas son arandelas milimétricas en cuanto su espesor que precisamente ajustan con el número de arandela el núcleo al nivel del cuerpo.



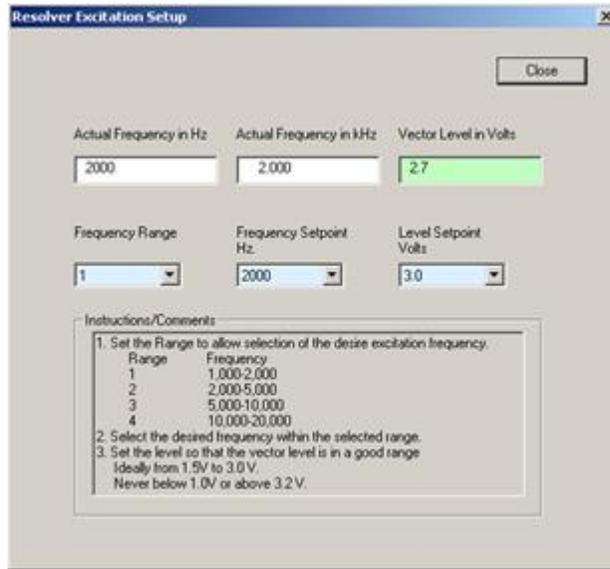
37. Ejemplo de desnivel en resolver.

No solamente puede ser un error en el vector de nivel un desnivel, dado que siempre existen otros inconvenientes como posiblemente el núcleo haya sido expuesto a contaminantes, rebaba del mismo motor, aceites, polvo de balata, etc. o básicamente un daño físico en el devanado que es imposible arreglar, y requiere la adquisición de uno nuevo.



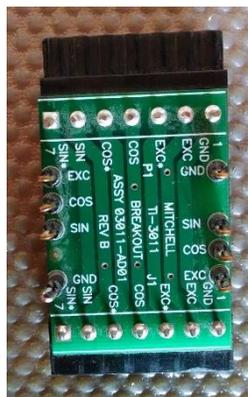
38. Devanado en núcleo dañado

Los problemas más comunes que causan resultados incorrectos para lograr una buena resolución es la mala conexión al probador y excitación, estos problemas son porque la amplitud es demasiado alta o la frecuencia de excitación demasiado baja.



39. Excitación de resolver.

En mal ajuste deja en claro por qué simplemente invirtiendo los cables de seno con coseno es la forma menos complicada de cambiar la dirección del resolver. Es decir debemos reglamentariamente considerar por defecto las conexiones que debe tener los cables del resolver en conexión con la tarjeta del "5000" (esto es importante porque si hacemos el ajuste con un cable intercambiado provocaremos un error tal que el motor no *correrá* en la maquina porque el ajuste se hizo con una señal diferente) existe un manual de conexiones y dudar de la conexión ya es error, se debe tener en cuenta siempre al manual, en dicha tarjeta se conectan las señales de entrada del osciloscopio para captar las señales de onda que son gráficamente representación de la señal de resolver, del ajuste, prueba estática, dinámica y de imanes.



40. Tarjeta de ajustes.

5.4 Asignación de OT.

Al motor se le asigna un número de OT (orden de trabajo) esto es para tener un control absoluto del proceso que lleva el motor en la empresa, cotizaciones de las refacciones, formatos digitales, salida del motor e información adicional como localización del motor, condición y fecha de entrega. La clave está descrita como 13-439 en la imagen siguiente, esto quiere decir que al motor se le realizara algún servicio el año 2013, y el segundo número refleja el número de motor que se está trabajando en dicho año.



41. Motor Moog – OT.

5.5 Inspección visual y auditiva.

El proceso de diagnóstico inicial tiene como primer paso una inspección visual, se toman fotografías de como llega el servomotor, esto nos ayuda en mucho dado que las fotografías son usadas como respaldo para su posterior armado. Para utilizar las fotografías pertinentes como representativas de los daños localizados en los motores.

Las condiciones iniciales del servomotor pueden reflejar daños localizados por la inspección visual y auditiva, esto sin hacer intervención directa. Algunos ejemplos pueden ser una flecha dañada, rotor con arrastre (motor sin freno de fábrica), ruido en los baleros, golpes, problemas en el interior del motor por existencia de suciedad acumulada o devanados..

En el ejemplo de la fotografía siguiente, el lado carga presenta daños, posiblemente el acople que tenga con alguna otra parte mecánica provoco es daño de arrastre, esto puede ser considerado para confirmar posibles daños dentro del motor. Puede que los coples utilizados sobre la flecha se hayan movido, la parte mecánica que une a la parte móvil del mecanismo no esté concéntrico esto causa de daño sobre los baleros, se considera un arrastre por no estar en una posición céntrica a lo largo del motor.

Otro posible daño visible son los servomotores que son refrigerados, hay motores que tienen paso de agua por la carcasa de aluminio, tienen un diseño en el casco del motor que hace fluir un refrigerante con la finalidad de disminuir la temperatura del motor, ya sea porque se encuentra en

un ambiente de temperaturas extremas, o simplemente el motor nunca para. Esto es un proceso que podría mejorarse con el uso del fluido correcto, sin embargo optan por agua altamente salina sin ningún tipo de tratamiento y este genera depósitos de sal, y a la larga llega a tapan el paso del fluido.



42. Chaqueta de enfriamiento y daño en lado carga (flecha).

Otro posible inconveniente es la señal de entrada que se puede obtener con el resolver, en su caso no podemos ver reflejado el voltaje óptimo de señal por el mal alineamiento del resolver con el núcleo del mismo, vemos un mal alineamiento en la segunda imagen, básicamente lo que ocurre es que el campo magnético que existe en el núcleo no es el deseado y energía se pierde por el mal alineamiento, es por ello que para eso debemos hacer ajustes, colocar rondadas milimétricas o ver algún inconveniente con la posición del rotor.



43. Encoder sin alguna intervención encotrador en un servomotor.

Se presentaron algunos ejemplos y se mencionaron otros que el ingeniero mecatrónico debe y tiene la obligación de estar anotando todas las observaciones y notas sobre esta presencia de daños o los posibles daños que puedan ser considerador para mejorar el mantenimiento del servomotor al ser ensamblado nuevamente, para tener como éxito un buen ajuste y servicio.

Es crucial tener en cuenta que este dispositivo de control tiene y debe tener especial cuidado, es la parte que montada y ajustada debe de hacer su trabajo sin ninguna complicación. El trabajo de análisis se desarrolla desde el retiro del feedback hasta que este se vuelve a montar y ajustar. Aclarar que si algo no se cotiza y después si debió haber sido cambiado o reparado la empresa debe cubrir eso por parte de culpa de no tomar el tiempo correcto ni las responsabilidades adecuadas para un buen diagnóstico.

5.6 Freno.

Cuando se analiza un servomotor con freno, este “abre” a un voltaje determinado o cierra a su vez de igual forma a un cierto voltaje, es preciso obtener y comparar el voltaje con el que este freno del servomotor abre o cierra, la comparación se visualiza con la fuente del laboratorio con la otra salida de voltaje que tiene la fuente (la otra terminal es para alimentar el TI-5260) contra la etiqueta o placa del dispositivo freno al hacer desacople por el técnico mecánico.

El diagnóstico del freno es de la misma importancia que las demás partes que componen el motor, el motor tiene como protección el freno como paro emergente o freno sin excitación en potencia, esta se manda por el conector de control para que el freno cierre, esta señal esta ya previamente programada por el control de PLC⁸ y transmitida por el drive al motor.

Al rectificar o fabricar balata, es necesario ajustar con la medición de un torquímetro⁹ y corroborar el torque de acuerdo a las especificaciones del motor (placa).



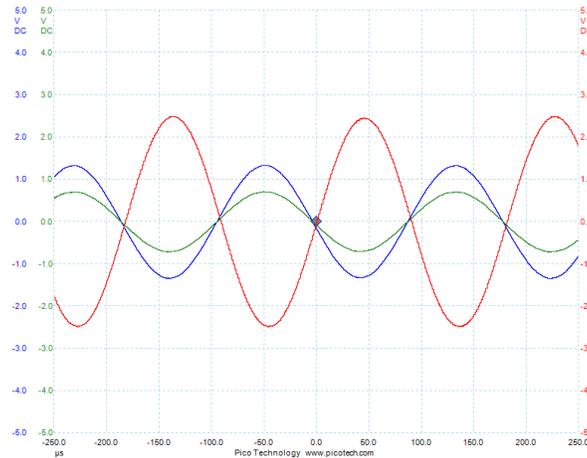
44. Freno.

⁸ Los Controladores Lógicos Programables (PLC) continúan evolucionando a medida que las nuevas tecnologías se añaden a sus capacidades. El PLC se inició como un reemplazo para los bancos de relevos. Se puede pensar en un PLC como un pequeño computador industrial que ha sido altamente especializado para prestar la máxima confianza y máximo rendimiento en un ambiente industrial. En su esencia, un PLC mira sensores digitales y analógicos y switches (entradas), lee su programa de control, hace cálculos matemáticos y como resultado controla diferentes tipos de hardware (salidas) tales como válvulas, luces, relés, servomotores, etc. en un marco de tiempo de milisegundos.

⁹ La llave dinamométrica, llave de torsión o torquímetro es una herramienta manual que se utiliza para ajustar el par de apriete de elementos roscados.

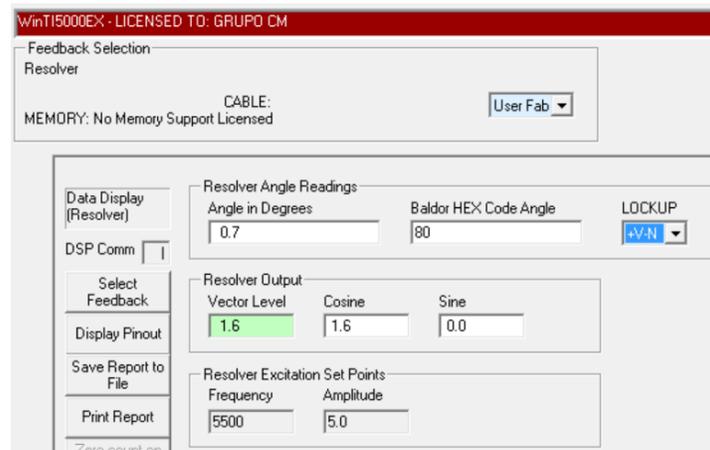
5.7 Ajuste estático.

El ajuste estático es una prueba en la que por medio de la conexión al osciloscopio podemos ver la gráfica de la señal del resolver, esto es importante dado que podemos ver si existe algún dado en el mismo y que provoque que no emita la señal esperada, cuando la señal previamente a descartado alguna mala conexión. De esto modo en la siguiente grafica podemos ver las señales de seno y coseno, verde y azul respectivamente, y la señal de excitación del resolver. Esto en resumen es el posicionamiento del rotor, importante dado que las maquinas toman esto como punto inicial para hacer las tareas programas.



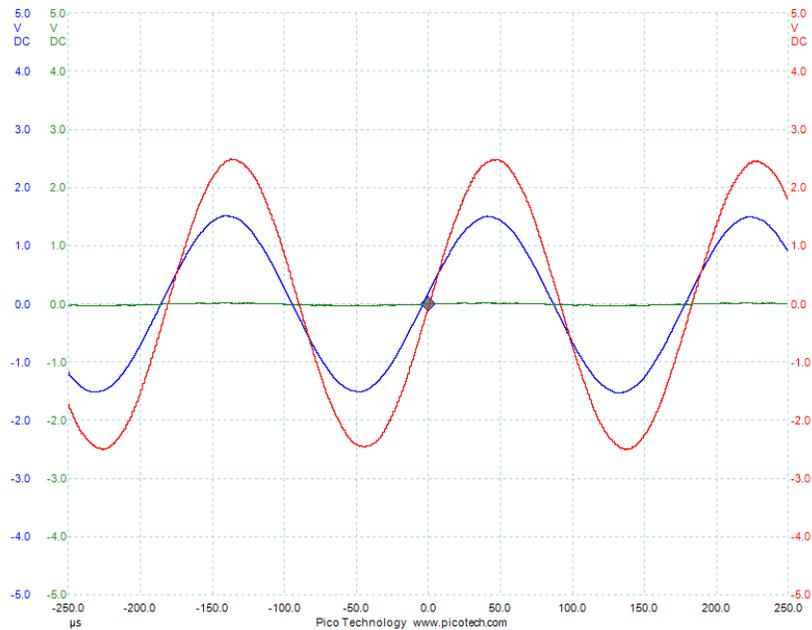
45. Señal de resolver.

Las señales se comparan con los dígitos que vemos en la interfaz del TI-5000, el ajuste consiste en hacer juego con las combinaciones con el TI-2560 para las fases, hasta encontrar la combinación de bloqueo en que el ángulo marque cero o lo más cercano a cero, como vemos en la siguiente imagen el bloqueo o lo que conocemos como *Lockup* para este motor está en V+N- (U-W-). Y con este mismo ajuste tiene que salir el motor después de los arreglos mecánicos posteriormente diagnosticados.

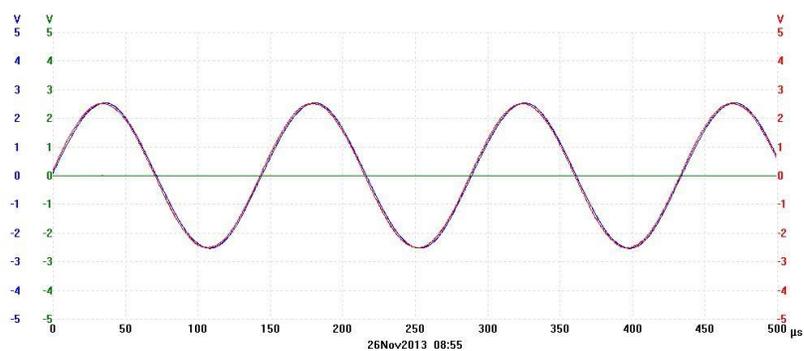


46. Lockup.

Al realizar el ajuste estático se obtiene el *Lockup*, al estar energizado el rotor provoca el bloqueo y la señal siguiente es la que apreciamos. Se aprecia que hay un ligero desfase entre las líneas de excitación del resolver y el coseno, estas fases deben estar correctamente alineadas para tener en las pruebas una mejor exactitud al momento de establecer bloqueos. Los ponemos en fase con la configuración de excitación del resolver en la parte de las frecuencias y voltaje de excitación para cada motor puede variar dicha frecuencia si se desconoce es posible establecerla anteponiendo la visualización del osciloscopio.



47. Señal de bloqueo desfasada.

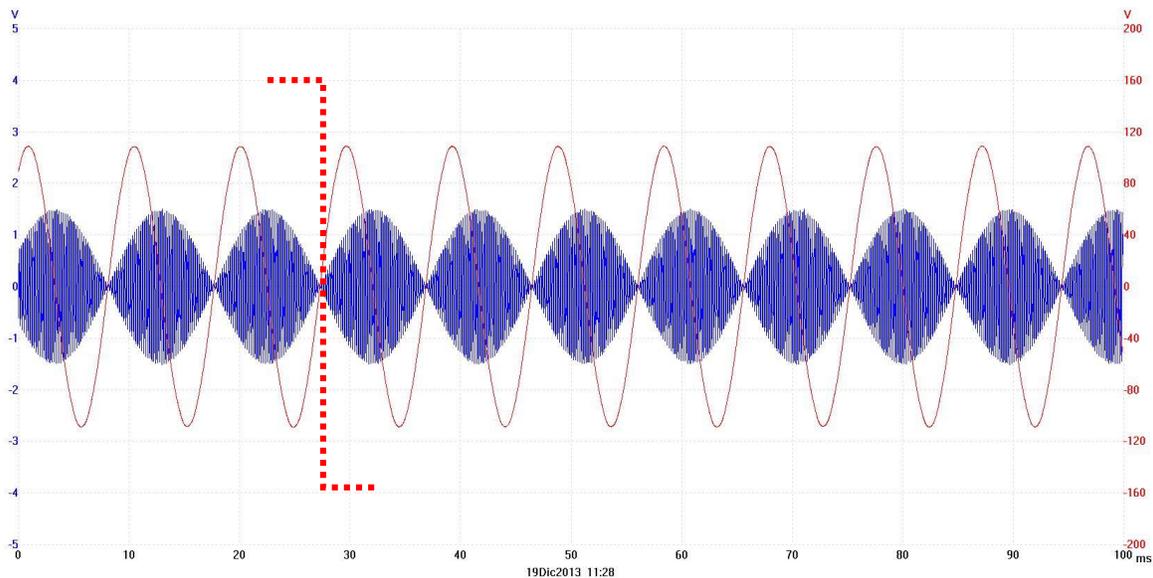


48. Señal correcta de ajuste.

5.8 Ajuste dinámico.

El ajuste dinámico consiste en la prueba de una de las fases con respecto a la señal del coseno, la explicación del porqué de la prueba, es para observar el comportamiento de dicha señal al estar en movimiento el rotor, este ajuste es la unión de la flecha lado carga con un motor que tiene un tacómetro para medir las revoluciones por minuto a la cual está sometida la prueba, este se acopla para hacer una prueba cinética pero sin carga, para determinar el estado de la fase.

Esta señal a su vez también nos muestra la cantidad de polos y números de *Speed*¹⁰, para ello debemos interpretar la gráfica como número de pares de un resolver sería un *speed*. La descripción habla que el manejo de un resolver está dado por juegos de pares de bobinas, para identificar en dado que caso que el resolver no tenga dicha especificación se contempla que cada cresta positiva y negativa es un polo el positivo y negativo respectivamente, por lo que tenemos tres puntos de bloqueo, 0°-360°, 120° y 240° (Se puede apreciar los bloqueos abriendo los *swichs* de fases en el TI-5260, eso quiere decir que al no haber energía manualmente puedo girar el rotor hasta un vector cercano a 120° o 240° de igual forma que con el 360° o 0°, digamos un valor 129°, al accionar la configuración de *Lockup* este debe ir a 120° con la energía suministrada por la fuente). Respetando la regla esto quiere decir que tenemos tres *speed*.

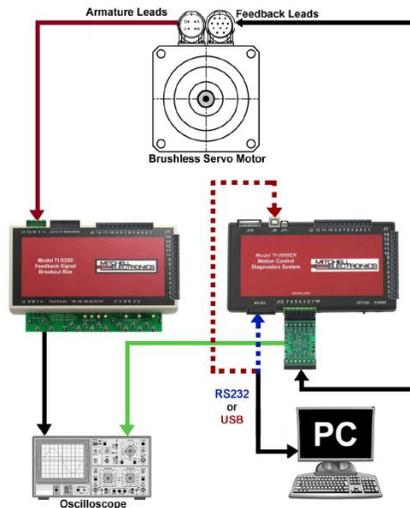


49. Señal de ajuste dinámico.

¹⁰ Los Speed es un número que debemos obtener dado que al configurar el TI-3000 debemos anexar el dato para que el motor pueda correr.

5.8.1 Conexión para pruebas estática y dinámica.

La conexión puede tener distintas variaciones, dado que los motores pueden cambiar sus características. Esta configuración es para un resolver.



50. Interconexión de pruebas.

5.8.2 Prueba de imanes.

El análisis consiste en hacer las interconexiones sobre los módulos para que podamos apreciar gráficamente las tres fases en señales senoidales, y determinar si tienen algún tipo de señal que esté relacionada con las bobinas. Dentro de los resultados obtenidos es la capacidad de voltaje generado por la rotación del servo en vacío obtenido a revoluciones altas.

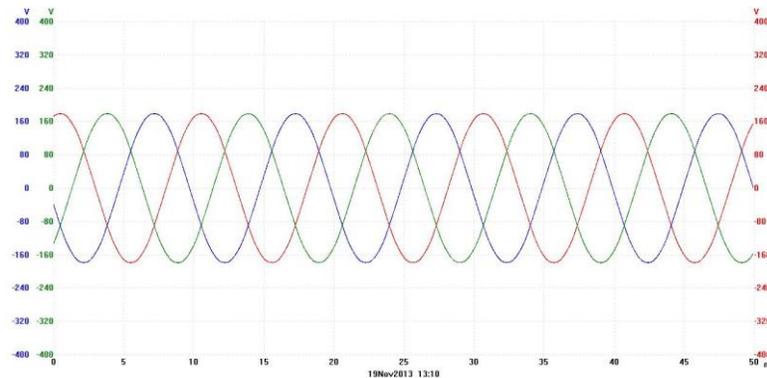
El proceso es bastante sencillo, se acopla el motor de la misma forma para un análisis dinámico, pero los pines de entrada del osciloscopio y de salida de la tarjeta se desconectan y pasan a otro módulo que ejerce la configuración interna necesaria para que se refleje a través de la pantalla la modulación de onda que ejercen las bobinas al hacer girar el rotor con el motor conectado al inversor de frecuencia, a su vez la interpretación podría ser la capacidad que tienen los imanes respecto a las bobinas y sus fases para generar dichas revoluciones.



51. Prueba de imanes.

La señal de la prueba de imanes se puede observar de la siguiente manera:

El servomotor se sometió a las 1000 rpm en vacío. Generando en las tres fases una señal perfecta, las fases no tienen picos y las amplitudes de onda son parejas, llegando a los 160 volt en cada fase.



52. Fuerza de imanes.

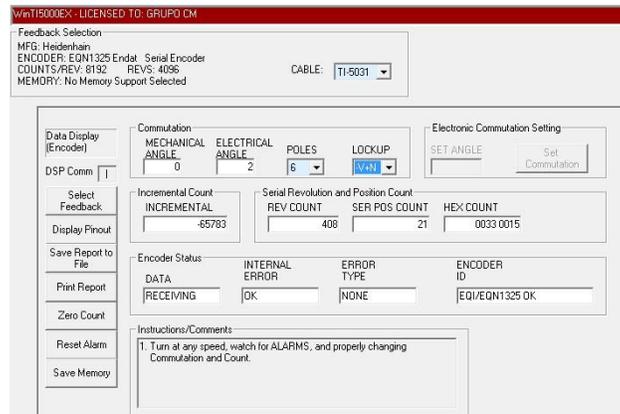
5.9 Prueba de conteo en un Encoder.

El análisis para verificar y determinar que un encoder está en buen estado es muy simple, el ingeniero mecatrónico realiza la prueba de conteo, dependiendo el tipo o marca del servomotor, puede o no tener freno electromagnético. Lo que debemos hacer es asegurar que tipo de servomotor es, en caso de que el servomotor tenga freno, el primer paso es saber cuál de los pines es el par que alimenta al freno en el conector de alimentación. El siguiente paso es alimentar o excitar con voltaje utilizando la fuente del laboratorio generalmente por experiencia el voltaje en el cual abre el freno es aproximadamente 14 Volts, graduando ascendentemente de poco a poco hasta que el freno abra, esto hará que el rotor gire libremente sin forzarlo. Hay que mantener las conexiones muy seguras y sólidas para evitar algún daño sobre el encoder, pues son muy delicados.

Después de liberar el rotor debemos hacer las conexiones de acuerdo al manual. Hacer la relación de marca de encoder, tipo y modelo para usar el cable correcto al conector y al mismo encoder, este paso es muy importante dado que si se usara el cable inadecuado, no importando que el conector sea el mismo, el resultado no atenderá al conteo apropiado y probablemente marque como error interno del mismo encoder, esto haría pensar que el encoder está dañado y un gasto innecesario para el cliente, pues por una falta de concentración ese le cotizaría algo que no necesita.

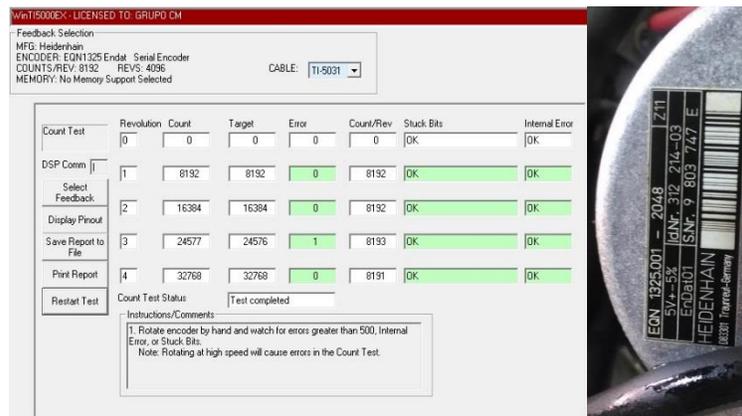
En la imagen siguiente se muestra la interfaz de un encoder para pruebas de señal, bloqueo y conteos. Es importante determinar que no existan saltos en los conteos, aquí intervienen factores como la experiencia del ingeniero, pues va a depender de ello que el análisis de un encoder sea fácil en relación a la experiencia creada con los años de diagnóstico, sin embargo debe ponerse suma atención a los detalles porque de lo contrario el diagnóstico resultará erróneo. Se aprecia el ángulo mecánico, el ángulo eléctrico, número de polos, el lockup (bloqueo del servomotor, relación de posicionamiento en la máquina para efectuar movimientos), y como punto importante el internal

error (error interno) casilla que nos ayuda a determinar qué tipo de error –interno- puede tener o estar generando el encoder.



53. TI-5000EX Encoder Heidenhain.

A continuación se muestra la ventana que el TI 5000EX muestra como interfaz de usuario con el servomotor para hacer la prueba de conteo, antes de ello se debe seleccionar la marca, modelo y serie de encoder en el programa para que todo esté en sincronía (cable, encoder e interfaz). Como se ve en la ventana para el encoder EQN1325 Endat, sin memoria, se usa el cable TI-5031. La prueba ahora es muy sencilla, se determina el conteo haciendo girar el rotor libre de a poco, hasta que el conteo termine automáticamente las ventanas se llenaran con la información obtenida, cuenta y objetivo de la cuenta en ello la comparación arroja un error como tolerancia en el conteo, así mismo la cuenta por revolución y el en caso que exista algún error interno en el conteo se mostrara en pantalla. Así de simple es el conteo y la prueba del conteo para encoder, si el retroalimentador requiere reparación y existe la misma, podrá atenderse. Otra forma, en ocasiones, para ya no tener errores, es muy simple, se trata de sumergir a un baño ultrasónico para limpiarlo de todo agente contaminante y hacer la prueba nuevamente.



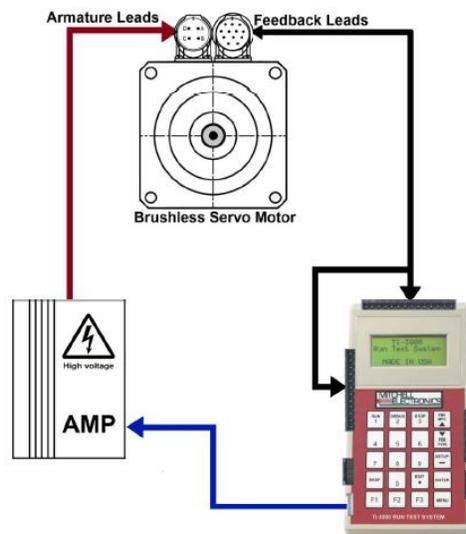
54. Encoder y prueba de conteo.

Mitchell Electronics, Model TI-3000.

Este dispositivo es básico a la hora de probar un motor en condiciones de arranque, cuando se realizan las pruebas para la aprobación es hora de poner a prueba el motor, accionarlo sin carga, pero con alimentación trifásica. Sin embargo es preciso recalcar que para dicha actividad se necesita:

1. Numero de speed.
2. Ángulo de fase en bloqueo.
3. Número de polos del motor.
4. Sentido de giro del motor y de la señal de giro del encoder (*S same o N not same*).

Al introducir los datos en el TI-3000, empieza a indexar la información y podemos por medio del drive, como se le ve en el diagrama este le da la potencia necesaria para con el “pot” modulemos la velocidad del motor, en el display se marcaran las RPM a las que está sometido el motor, esta prueba se hace antes del mantenimiento si todas las demás pruebas anteriores, salen adecuadas y posteriormente a la realización de los mantenimientos o las fallas que corrigieron. Con esto podemos medir la corriente de cada fase con el amperímetro de gancho.



55. Interconexión del TI-3000.

5.10 Máquina dobladora.

Como parte de los trabajos correctivos, las empresas solicitan la asesoría técnica de alguna falla, sugerencia o recomendación sobre lo que deberían hacer con su problema. Pondré el ejemplo de una empresa que se dedica a la manufactura de piezas de cobre las cuales son placas, barras con perfiles geométricos, principalmente utilizados para plantas de transferencia o generación eléctrica. El problema consiste en: que la máquina no realizaba los recorridos de calibración.

La máquina tiene un par de servomotores los cuales hacen los recorridos horizontal y verticalmente respectivamente para la calibración, como el técnico encargado de la marca de la máquina dobladora en México es dueño de las contraseñas de acceso y configuración del HMI, la problemática radicaba en que el acceso a la configuración se descartó por problemas internos de los dueños con los representantes, se acudió a Grupo CM como intermediario directo con la fábrica alemana y el cliente, se checaron todas las líneas de control, se desmonto el motor, se cambiaron cables del motor como control y potencia, se cambió el motor por uno nuevo, hasta se cambió el drive, todo sin éxito.

El técnico de la empresa que tiene la máquina dobladora no daba solución, por lo que se pidieron las contraseñas directamente a la compañía alemana con algunos inconvenientes legales indirectos a Grupo CM, para tener acceso completo a la máquina con la supervisión del técnico representativo de la marca en México. Se realizaron las configuraciones adecuadas desde el HMI¹¹, de esta forma con una buena calibración, ajustes de los servomotores y pruebas se dejó la maquina en total funcionamiento. De esta manera se trabajó en equipo con dos empresas: la dueña de la máquina, el representante de fábrica en México.



56. Máquina dobladora.

¹¹ **HMI** o **interfaz hombre-máquina** es simplemente la manera en que los humanos interactúan con las máquinas. Un **HMI** en términos de **Indusoft Web Studio** plataforma es un panel de control que está diseñado con facilidad, implementado y mantenido / modificar simplemente la creación o modificación en el **entorno de desarrollo**.

5.11 Otros daños en componentes.

Algunos de los daños en los servomotores están relacionados a la contaminación del entorno en el que son utilizados, presentan daños físicos si no existe una detección temprana del problema, por ello se insiste tanto en las tecnologías de diagnóstico preventivo, cuando determinamos fallas de este tipo es crucial hacer diagnósticos completos, por lo que se pide al cliente que mande los cables de control y potencia y no sólo el motor.

A continuación se muestran imágenes que ejemplifican mejor lo se puede encontrar dentro de un motor que sufre sobrecalentamientos excesivos. Se encontró aceite excesivo de motor dentro del mismo, lo que probablemente contamina al encoder. El paso siguiente es desmontar el encoder para un lavado ultrasónico con alcohol isopropílico, para limpiar todo agente contaminante en este caso el aceite, polvo y hollín.



57. Lado libre lleno de aceite.



58. Lavadora ultrasonica.

Un punto siempre a tener en consideración es que no se puede pasar por alto los pequeños detalles, en su complejidad y simplicidad vienen los problemas, es decir, un rotor desbalanceado provoca fricción y caletamiento al girar a altas revoluciones una acción directa al funcionamiento del servomotor, lo que es importante es que debe tener un giro concéntrico en todo momento, aunque el campo magnético ayude a mantener esa posición, detalles como este no se puede pasar por alto. El problema radica en la existencia del contacto del rotor con las paredes del estator.

En la tapa del lado libre que protege al encoder se encontró lo cotrapesos (masilla verde) que hacen el balanceo sea concéntrico en el rotor, tal vez una persona que pase por alto estos detalles es que no tiene la experiencia y conocimientos claros del funcionamiento de los motores en general no solo de los servomotores. Parte de la reparación consistee en hacer dicho balanceo nuevamente en el rotor.



59. Máquina dobladora.

El cable de control y potencia rara vez presentan daños, esto en relación del trato directo del operador con su máquina. El siguiente caso donde se observan cables trozados, que dañan directamente el funcionamiento del motor, esto cuenta como parte de un mantenimiento correctivo.



60. Cable de control.

5.12 Ensamble de un servomotor.

Al haberse realizado los análisis y reparaciones debidas el motor debe ensamblarse, el estricto control de tornillería, piezas, tornillos, empaques, cables, todo tiene su fin, es imprescindible que cada una de ellas esté en condiciones de volver a ser ensambladas de lo contrario se cambian por nuevas.



61. Motor sin rotor.

5.13 Destapado de chaquetas de enfriamiento.

Existen problemas específicos como el caso siguiente. En un servomotor *MOOG* los canales de enfriamiento del motor se llenaron de sal cristalizada por un mal proceso de enfriamiento y no al no ser utilizado el purificado en caso de agua, o el anticongelante correcto, lo que provoca con tiempo es que el motor ya no se enfría como debería, aumente su temperatura interna, y en cadena se van presentando problemas.

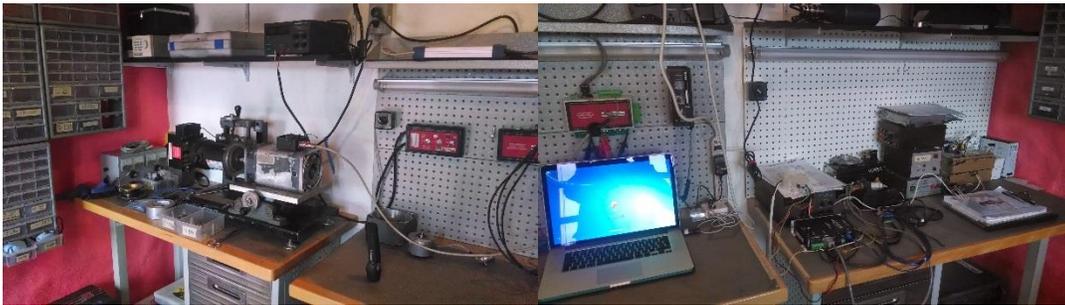
Lo que se muestra es el proceso que se realizó, en resumen se enfrió el estator y calentó la carcasa de aluminio para que con la ayuda de poleas y cadenas se pudiera sacar el estator para posteriormente realizar la limpieza de las chaquetas o canales de enfriamiento sin dañar el estator. Se realizó un corte para poder manipular la carcasa, con una laminación flexible y plana se fue perforando todo el camino donde fluye el fluido, para que no quedar residuos del mismo se lavó varias veces hasta que quedó completamente limpia, se llevó a un taller especializado en soldadura de aluminio para soldar la tapa que fue retirada para su limpieza.



62. Proceso de desacople de estator.

5.14 Aportaciones.

La educación para mí siempre será la base de un buen trabajo profesional, se propone día a día los retos a vencer. Ser activamente estudiante de las nuevas tecnologías y avances da pie al entendimiento claro de lo que involucra nuestras actividades en análisis de servomotores, por esa razón se adopta la cultura de estar informado y actualizado de los nuevos métodos de análisis, un ingeniero mecatrónico debe tener claro procesos, tecnologías involucradas, y sus actualizaciones, como egresado de ingeniería mecatrónica es dar ese panorama más claro a los interesados en este caso los clientes a los cuales se les vende el servicio, adjuntar las diversas tecnologías y darles un porqué de su funcionamiento al aplicarlo. Es por ello que Grupo CM determina que su visión está enfocada en involucrar más ingenieros mecatrónicos a su empresa.



63. Laboratorio donde realice mis trabajos.

Existían diversas actividades de desarrollo dentro de la empresa pero como principal trabajo profesional era solucionar problemas en los servomotores, sin embargo recibí capacitación en distintas actividades, entre ellas se puede destacar el desarrollo de una mesa de trabajo para análisis y balanceo de rotores.

5.14.1 Balanceadora de rotores.

La mesa balanceadora de rotores, es un proyecto que se me asignó totalmente dado que observaron mis resultados laborales, de manera responsable adopte el proyecto, al ser sumamente delicado no se realizó nada sin mi supervisión en la construcción de la misma si ameritaba ayuda. Básicamente esta mesa de trabajo cuenta con una parte metálica y una superficie de madera, en esta última se instalaron dos rieles que atraviesan toda la mesa por la parte superior, la cual está sujeta por tornillería por la parte inferior de la mesa, estos rieles son el soporte de los sensores que captaran la información sobre el balanceo del rotor.

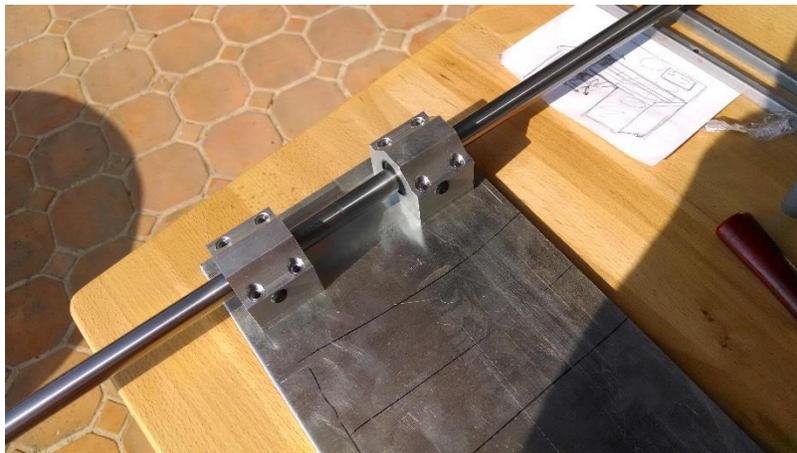
La mesa de trabajo o la balanceadora está diseñada conceptualmente para acoplar los rotores a dos balanceadores que tienen una interfaz con sensores para detectar donde se necesita una masa determinada para balancear el rotor, esto es importante porque si la flecha del rotor no es concéntrica ocasiona que tenga rozamientos con el estator y dañe el motor por sobrecalentamiento y queme los devanados, por dar el más terrible de los casos.

A continuación se muestra el diseño conceptual que realice para su posterior construcción.



64. Diseño conceptual.

En esta imagen se aprecia el inicio del proyecto, es visible un perfil circular de acero inoxidable que se usara como riel, en el están dos rodamientos lineales para que se desplace por toda la longitud del mismo perfil. Esto tiene la finalidad de que en la placa de aluminio se acople el motor y el a su vez tenga ese desplazamiento para jugar con una distancia al tener variedad de rotores en sus dimensiones.



65. Placa con rodamientos lineales.



66. Mesa de trabajo.

En consecuencia de los trabajos realizados en la balaceadora en la imagen siguiente se consiguió colocar milimétricamente los rieles a la mesa de trabajo, era importante dado que cualquier variación que no dejaran equidistantes estos rieles forzarían a los movimientos de los rotores ocasionar vibraciones indirectas, los sensores de vibración posteriormente se acoplaron a unas placas base para que estas estuvieran en función del mismo desplazamiento lineal por todo el riel.



67. Proyecto al 50%

A la placa de aluminio se le hizo un barrenado lineal a lo largo para que el motor se pudiera desplazar, de esta forma se obtuvieron movimientos transversales. El motor se dejó montado a la placa de aluminio y cableado con sus fases listas, así como el variador de frecuencia dentro de la mesa de trabajo con el potenciómetro como controlador de velocidad del motor.



68. Variador de frecuencia KB Electronics.

No se llegó a la culminación de la balanceadora porque mis proyectos dentro de la empresa se convirtieron en otros, semanas después de que acepte la oportunidad como responsable de trabajos y mercadeo en el estado de Querétaro, tome la decisión de partir y empezar nuevos retos profesionales así mismo, la recompensa por ser alguien dedicado y de confianza para la empresa, en los sentidos de puntualidad, calidad laboral, generar buen ambiente laboral, comunicación total con mis jefes directos y el dueño, y la facilidad de poder explicar a otros ingenieros las dudas referentes con los servicios que Grupo CM ofrece.

5.14.2 Pantalla y equipo de exposición.

Se ayudó a la instalación y configuración de una pantalla de HD en la parte posterior del laboratorio móvil, el laboratorio móvil es un automóvil está equipado con todos los instrumentos de diagnóstico necesarios para reparaciones emergentes en sitio, hablando de plantas industriales, de otro modo también sirve para dar exposiciones especializadas a grupos relacionados como, ingenieros, técnicos e interesados en los diagnósticos en servomotores.

La pantalla tiene la labor didáctica de maximizar lo que el ingeniero mecatrónico hace en la computadora mostrando cada análisis en los servomotores.



69. Pantalla en lab. móvil

5.14.3 Expos.

Las exposiciones se imparten en donde el cliente las permita, así mismo respetando las leyes de vialidad de dichas zonas industriales, a veces se realizaban en los estacionamientos, salas comunes o auditorios de corporativos. Enfocadas en demostración de servicios, las exposiciones llegan a ser una fuerte arma para abrir mercado en Querétaro, esto porque es más confiable apreciar lo que se hace con su motor en directo que solo tener la fiabilidad de que se hizo algún trabajo.

Se instala una carpa para aproximadamente 15 personas, todo el equipo lo suministra la empresa expositora, el laboratorio móvil provee de energía eléctrica a los equipos por medio de un generador así que no depende de energías externas para funcionar. Las exposiciones se arman dependiendo las necesidades del cliente, tal vez enfocada a prevención, corrección, ajustes, mediciones, etc.



70. Laboratorio móvil.

Conclusiones.

El desarrollo de cada uno de los trabajos y proyectos durante la estancia en Grupo CM fue exitoso, se aplicaron conocimientos de varias áreas de la ingeniería, generalmente desarrollados e impartidos por la Universidad Nacional Autónoma de México en la carrera de ingeniería mecatrónica. Al relacionarse, cada uno de los conceptos forma el perfil para tener la versatilidad que permite desarrollar profesionalmente los trabajos. La tolerancia y disposición fue esenciales para la realización de los proyectos, algunos de ellos con la calidad de urgencia por lo que un trabajo de semanas se realizaba en dos días sin descanso.

Los conocimientos adquiridos como estudiante de mecatrónica fueron aplicados en forma distinta unos más que otros; los conocimientos de mecánica y mecanismos de las asignaturas de mecanismos, cinemática y dinámica, mecánica de sólidos, ciencia de materiales, manufactura, temas selectos de manufactura, conocimientos del uso de programas totalmente para organización de proyectos como Microsoft Excel y Microsoft Project., Aplicación de conceptos de automatización como los temas selectos de mecatrónica que toca los temas de PLC y neumática, todas las asignaturas relacionadas con la parte eléctrica y electrónica como Electricidad y Magnetismo, Análisis de Circuitos, Electrónica Básica, Circuitos Digitales, Máquinas Eléctricas, y las materias que complementan son las relacionadas con la parte de mediciones y entendimiento de temperaturas Termodinámica y maquinas térmicas.

El éxito se refleja en los proyectos y servicios que se terminan a tiempo o antes de la fecha de entrega. La anticipación es fundamental para el cliente, sobre los trabajos a realizar es muy importante para ellos para hacer su tiempo de paro programado en las líneas para hacer pruebas y mantenimientos paralelos a los de los motores ya acoplados a sus máquinas, esto hace factible que la calidad de los servicios incluyan ir a dejar el motor hasta la puerta de la planta del cliente, probarlo con la instrumentación de Mitchell Electronics y que el cliente se quede convencido de que los servicios son de total confianza, Grupo CM y como ingeniero mecatrónico siempre se busca ser líder y referente en el mercado.

Como parte del desarrollo profesional que dentro de la empresa adquirí fue desarrollarme más activamente en las necesidades del cliente, tener absoluta comunicación con los técnicos para saber que se cotizará como parte mecánica y aportar ideas en cuestiones de procedimientos.

Otro principal rasgo es el cargo que se me otorgo para establecer el laboratorio en el estado de Querétaro, este laboratorio tiene la finalidad de implementar los servicios con la misma calidad que su matriz, sin embargo, la estrategia consiste en estar más cercano a los clientes que tienen sus plantas en el dicho estado, esto nos llevó a acondicionar las instalaciones valiéndonos de nuestros conocimientos para así alimentar de energía y elementos base para realizar los servicios, también cómo gestionar los servicios de mediciones en *online* que se describen en capítulos anteriores.

Querétaro tiene como base más de 15 parques industriales los cuales están localizados en todo el estado, en conclusión se llevó a tener importantes clientes y retomar trabajos con algunos que por la limitante de la distancia no se cubrían adecuadamente. El estudio y administración de los recursos proporcionados por la empresa fueron usados para desarrollar trabajos, justificando gastos, desarrollaron en mí persona un carácter administrativo muy efectivo, y lograr ganar la confianza de radicar y estar al frente de las decisiones para beneficio de la empresa en Querétaro.

Se lograron completamente con éxito los objetivos para cada uno de los servicios, llegue a visitar continuamente Celaya e Irapuato plantas como GKN empresa dedicada al proceso de manufactura de piezas automotrices, esta empresa como tal es de las más grandes a la cual se le brindan dichos servicios, se visitó mientras ejercía trabajos a la planta de Scribe San Juan Río Querétaro, se logró hacer proveedor de servicios a Plaka Comex. Y retomar trabajos con Mann Hummel y Lebelier.

Ligado a los objetivos se fue creando un carácter profesional en la organización y programación de labores, el respeto y calidad que como representante de la Universidad Nacional Autónoma de México debe caracterizar para ingenieros de otras universidades, ser partícipe de la confianza brindada de los supervisores en planta como de los que aceptaron mis trabajos.

Referencias.

- <http://lema.rae.es/drae/?val=motor>
- <http://www.eurotechsa.com.ar/ascensores/Servomotores%20brushless%20de%20iman%20permanente.pdf>
- www.mcbtec.com
- <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-tacogenerador-manual-espanol.pdf>
- <http://www.johnsonelectric.com/es/resources-for-engineers/motors/basics-of-motors/synchronous-motor-overview.html>
- <http://www.guemisa.com/articul/pdf/vibraciones.pdf>
- www.flir.com
- http://www.rocatek.com/forum_plc1.php
- http://es.wikipedia.org/wiki/Llave_dinamom%C3%A9trica
- [http://www. Mitchellelectronics.com](http://www.Mitchellelectronics.com)
- TI-5000EX User's Manual
- TI-3000 User's Manual
- WinTI5000EX Demo
- <http://www.indusoft.com/blog/2013/05/31/cual-es-la-diferencia-entre-scada-y-hmi/>
- Conocimientos, práctica y experiencia generada.