***“Confiabilidad y uso eficiente de la energía: Análisis predictivo de fallas en la industria y la minería y el uso confiable de equipos de electrónica de potencia.***

***Apuntes del curso EL 6007, 27 de abril de 2012.***

***Ing. Alfredo Muñoz Ramos.***

Los motores eficientes y la electrónica de potencia son equipos cada vez más empleados, pero su uso requiere de especial atención para asegurar la confiabilidad de su operación, lo que queda demostrado por el hecho que, en este último tiempo, se han debido desarrollar diferentes normativas que deben ser tomadas en cuenta en forma rigurosa. En el caso de los motores eficientes, debe tomarse en cuenta que el mejoramiento de la eficiencia no se traduce necesariamente ni en un aumento del torque de partida, ni en una disminución de la corriente de partida ni tampoco en un mejoramiento del factor de potencia. En el caso de los convertidores de frecuencia, la capacidad de los cables de conexión, las distancias entre el tablero de conexión, el tablero, el transformador y el motor resultan esenciales. En esta conferencia, se describen diferentes ejemplos de instalaciones confiables y soluciones a casos en que, por diversas razones, los usuarios sufrieron fallas por no considerar las recomendaciones de norma. Se analiza en particular el caso de las características de los cables de conexión, de las líneas aéreas de distribución y de los condensadores de compensación de factor de potencia.

Una vez instalados los equipos, se debe asignar recursos al mantenimiento de los equipos los que en general son cuantiosos, debido, fundamentalmente, a que la sustitución de un equipo realizada a destiempo trae como consecuencia un incremento de la energía eléctrica consumida en la planta y una disminución drástica de la productividad de la instalación. En esta conferencia, se analizan diversas formas de enfrentar este problema. En primer lugar se muestra la definición de estándares de calidad para definir, en forma cuantitativa, el uso eficiente de los recursos asignados al mantenimiento. Se da una visión de los modos de fallas de los equipos ordenados según modo de falla y según tiempo total del equipo fuera de servicio. Se muestran fórmulas aproximadas aplicadas al cálculo de los gastos de mantenimiento en función de los tiempos que el equipo está fuera de servicio, distinguiendo entre los intervalos planificados y los no planificados. Se muestran, en casos reales, diagramas de dispersión logarítmicos, en función del tiempo medio gastado en la reparación y el número de veces que la falla se repite. Se plantean, enseguida, algunos casos de mejoramientos de los indicadores en base al empleo de instrumentación y pruebas especialmente dirigidas al mantenimiento predictivo de máquinas eléctricas.

1. **INTRODUCCIÓN.**

En esta publicación se muestra una metodología que permite evaluar innovaciones tecnológicas que tienden a un uso racional de la energía, tomando en consideración no sólo el ahorro de energía que se logra sino también los mejoramientos en la confiabilidad del sistema que se implanta, de tal modo de considerar matemática y económicamente la reducción del número de fallas que ocurrirá al operar en forma racional un nuevo sistema.

En efecto, los motores eficientes y la electrónica de potencia son equipos cada vez más empleados, pero su uso requiere de especial atención para asegurar la confiabilidad de su operación, lo que queda demostrado por el hecho que, en este último tiempo, se han debido desarrollar diferentes normativas que deben ser tomadas en cuenta en forma rigurosa. En el caso de los motores eficientes, debe tomarse en cuenta que el mejoramiento de la eficiencia no se traduce necesariamente ni en un aumento del torque de partida, ni en una disminución de la corriente de partida ni tampoco en un mejoramiento del factor de potencia. En el caso de los convertidores de frecuencia, la capacidad de los cables de conexión, las distancias entre el tablero de conexión, el tablero, el transformador y el motor resultan esenciales. En esta artículo, se describen diferentes ejemplos de instalaciones confiables y soluciones a casos en que, por diversas razones, los usuarios sufrieron fallas por no considerar las recomendaciones de norma. Se analiza en particular el caso de las características de los cables de conexión, de las líneas aéreas de distribución y de los condensadores de compensación de factor de potencia.

1. **CONSIDERACIONES TÉCNICAS A CONSIDERAR AL MOMENTO DE ELEGIR UN MOTOR EFICIENTE.**

Se presentan a continuación algunas consideraciones que deben ser tomadas en cuenta cuando se opera motores eficientes. En primer lugar se habla de los métodos de control de motores. Después se aborda la problemática del arranque de los motores de alta eficiencia y se explica el comportamiento de la corriente y del torque durante la partida. A continuación se explica el efecto que tienen las condiciones de operación sobre el rendimiento del motor.

La elección del control del motor debe considerar una serie de factores entre ellos los siguientes:

1. Caída de voltaje durante la partida del motor.
2. Corriente de cortocircuito en la barra donde se conectará el motor.
3. Torque resistente a velocidad nula.
4. Torque resistente durante la aceleración del motor.
5. Torque resistente a velocidad final.
6. Torque motriz del motor.
7. Costo de inversión y costo de operación del sistema.
8. Mantenibilidad del sistema.
9. Requerimientos de control remoto.
10. Requerimientos de velocidad y de control.
11. Restricciones de tamaño físico de la instalación.
12. Facilidad de uso.

De estos requerimientos, uno de los principales es que el sistema tenga una partida segura, por lo que, desde el punto de vista del torque, el sistema debe diseñarse de tal modo que el torque motriz sea superior al torque resistente de la correa de transporte estando esta cargada con material. La dificultad del cálculo estriba en el hecho de que, al partir, el motor toma una corriente varias veces la nominal, lo que puede acarrear una disminución del voltaje del sistema. La Figura 1 siguiente muestra el torque de un motor para dos valores diferentes del voltaje y el torque resistente de una correa de transporte.

Se observa que, en el caso práctico analizado, la correa parte, pero queda girando a una velocidad notablemente inferior a la nominal lo cual no sólo es ineficiente sino que, muy probablemente, hace operar las protecciones y la correa finalmente se detiene.

Figura 1. Característica de torque versus velocidad.

*Observaciones.*

1. *Torque Motriz a voltaje 0.6 o/1. Es el voltaje pronosticado con transformador en tap 1.*
2. *Existen dos puntos de operación permanentes: A 30% de velocidad (y alta corriente) y a prácticamente 100 % de velocidad (y baja corriente). La partida es lenta o fracasa.*

Por el contrario, si la correa de transporte está poco cargada, entonces el motor tendrá torque suficiente como para acelerar hasta una velocidad de régimen próxima a la sincrónica y la partida será exitosa. Esta situación se muestra en la Figura 2 siguiente.

Figura 2. Característica de torque versus velocidad.

*Observaciones.*

1. *Torque Motriz a voltaje 0.649 o/1. Es el voltaje pronosticado con transformador en tap 4.*
2. *Existe un solo punto de operación permanente. La partida es rápida.*

La Figura 3 siguiente muestra el registro, en función del tiempo, de una partida exitosa de la correa en estudio. Se observa que el transitorio de partida dura aproximadamente 25 segundos. El voltaje, medido a la salida del partidor suave (es decir, no en bornes del motor sino que antes del cable de 82,5 metros) sube desde 0 a 300 Volts en aproximadamente 10 segundos. Al cabo de 25 segundos la corriente baja (al alcanzar el motor una velocidad cercana a la nominal) y el voltaje sube a 380 Volts. La caída de voltaje es provocada por la corriente de partida del motor (entre 1400 A y 1600 A medidos). En el caso en estudio, ningún ajuste del partidor suave permite una partida con una corriente de partida menor que la registrada.

Los Recuadros que se muestran a continuación, contienen una Memoria de Cálculo de los voltajes y corrientes en el sistema en estudio. El transformador de alimentación del motor es de 750 kVA trifásicos, y su razón de transformación es de 13000:400 Volts entre fases.

La reactancia en tanto por uno es 0,01+j\*0,0575.

Figura 3. Registro de la partida de una correa de transporte.

### 

*Figura 4. Dibujo esquemático de las características del circuito de alimentación del motor*

### RECUADRO 1

**MEDICIONES Y CARACTERÍSTICAS DE PLACA:**

**TRANSFORMADOR EN TAP 1 (13860:400).**

1. Voltaje en barra medido al partir: 13000 Volts entre fases (6,2% inferior al nominal).
2. Corriente por el secundario del transformador (medida): 3355 Amp, ángulo-74,45o.
3. Potencia nominal del transformador 750000 [VA]= 750 kVA.
4. Impedancia del transformador (Ohms, fase neutro, secundario):

ZT=(0,01+j\*0,0575)\*400\*400/750000 [Ohms fn]

ZT=0,0021+j\*0,0123 = 0,0125 ángulo (80,13o) [Ohms fn]

1. Impedancia del cable (Ohms); cada uno:

ZCAB=0,0083+j\*0,0221 (Ohms)

1. Corriente por cada cable (Amperes), son dos cables en paralelo:

ICAB=3355/2 (ángulo –74,45°)= 1677 A (ángulo –74,45°)

1. Corriente por el motor (Amp)

IM=2\*ICAB=3.355 A (ángulo –74,45)

IM=60% de IPNOM (5590 A)..

1. Corriente de partida nominal IPNOM (dato del fabricante) del motor (Amp): 5590 A.

### RECUADRO 2

**MEDICIONES Y MEMORIA DE CÁLCULO:**

**TRANSFORMADOR EN TAP 1 (13860:400).**

1. Voltaje en barra medido: 13000 Volts entre fases (6,2% inferior al nominal).
2. Corriente por el secundario del transformador (medida): 3355 Amp, ángulo-74,45o.
3. Potencia nominal de placa del transformador 750000 [VA]= 750 kVA.
4. Impedancia de placa del transformador (Ohms, fase neutro, secundario):

ZT=(0,01+j\*0,0575)\*400\*400/750000 [Ohms fn]

ZT=0,0021+j\*0,0123 = 0,0125 ángulo (80,13o) [Ohms fn]

1. Cálculo de la caída de voltaje en el transformador (Volts fase neutro):

dVT=ZT\*3355 [ángulo(80,13-74,45)=41,9 (ángulo 5,68o).

1. Cálculo del voltaje en el secundario del transformador (Volts, fase neutro):

VST=13.000\*400/13.860/√3(ángulo 0)-dVT=216,6-41,9 (ángulo 5,68o)

VST=216,6-(41,69+j\*4.15)=174,91-j\*4.15=174,96 (ángulo -1,36°)

1. Voltaje a la salida del partidor (Volts, fase neutro):

VP=0,98\*VST=171,5 (ángulo 0°)

1. Corriente por cada cable (Amperes), son dos cables en paralelo:

ICAB=3355/2 (ángulo –74,45°)= 1677 A (ángulo –74,45°)

1. Caída en el cable (Volts):

dVCAB=ZCAB\*1677 (ángulo –74,45°)

El valor de la impedancia del cable ZCAB es el dato señalado en el Recuadro 1:

dVCAB =(0,0083+j\*0,221)\* 1677 (ángulo –74,45°)

dVCAB=0,2212 (ángulo 87,85°)\* 1677 (ángulo –74,45°)=371 (ángulo 13,4°)

1. **Voltaje en el motor (Volts, fase neutro):**

**VM=VP-dVCAB=132,1 (ángulo 1,5)**

**VM=60% de VNOM.**

1. Corriente por el motor (Amp)

IM=ICAB=3.355 A (ángulo –74,45)

1. Corriente de partida nominal del motor (Amp):

IPNOM=5.590 A .

**La corriente real medida en terreno (3355 A= 60% de 5590 A) es insuficiente para tener una partida segura del motor. No obstante lo anterior el motor es capaz de mover la correa con baja carga.**

1. **CARACTERÍSTICAS DE ARRANQUE DE MOTORES DE ALTA EFICIENCIA.** 
   1. **Consideraciones generales.**

En general, se entiende que las características de arranque de un motor son la corriente y el torque en la partida, es decir con velocidad igual a cero. Al respecto, es importante indicar que deben distinguirse las características denominadas “**de rotor bloqueado**” con los **valores instantáneos** en la partida. El torque y la corriente de rotor bloqueado, son características de régimen permanente, que se miden manteniendo el rotor detenido; en cambio los valores instantáneos de partida son las magnitudes que alcanzan estas variables en el instante mismo del arranque, que aún con rotor bloqueado difieren de los valores de régimen permanente, según la relación entre los parámetros circuitales (R,L) del motor en esas condiciones.

Las normas establecen límites para la corriente y para el torque de rotor bloqueado, no así para sus valores instantáneos (al inicio del arranque).

* + 1. ***Corriente en el arranque.***

Cuando el motor está en rotor bloqueado, en régimen permanente, el valor efectivo de la corriente de rotor bloqueado, por enrollado, se puede evaluar simplemente como:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

R = r1 + r2

X = x1 + x2

siendo r1 y r2 las resistencias por enrollado del estator y del rotor (referida al estator), y x1 y x2  las reactancias de fuga por enrollado del estator y del rotor (referida al estator).

En el período transitorio o de “inrush”, la corriente puede alcanzar valores instantáneos bastante mayores. En efecto, la ecuación diferencial del circuito es:

v = Ri + L(di/dt) [Volts]

cuya solución depende de las condiciones iniciales. El peor caso es cuando la conexión se hace en el instante en que v(t) pasa por cero. En ese caso, la solución de la ecuación anterior es:

cuya forma de onda es la que muestra la Figura siguiente.

Transitorio de la corriente de arranque (R=0,0125 [o/1]; X=0,19 [o/1])

El valor máximo de i(t) o corriente máxima de inrush, se alcanza en el primer semiciclo (ωt=π), siendo su valor:

Imax=√2 IRB (1+e-πR/X)

Si se denomina γ a la relación entre Imáx  y el valor máximo de i(t) en régimen permanente (manteniendo rotor bloqueado), √2 IRB , se tiene que:

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

En vez del valor R/X algunos fabricantes entregan el valor del factor de potencia del motor (en la partida) con lo que la expresión resulta:



|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

En que:

*cos(φp)=* factor de potencia del motor en la partida*.*

Se aprecia que ** >1**, es decir **Imax > √2 IRB**.

Así por ejemplo si X ≈ 5R (cos *φp =* 0,196*)*, se tiene que  = 1,53. Es decir el valor máximo de la corriente de inrush es 53% mayor que el valor máximo de la corriente de rotor bloqueado en régimen permanente.

Para efectos de las protecciones del motor, interesa este valor instantáneo Imax , más que el valor efectivo IRB estipulado en las normas. En este “peor caso” (conexión en el instante en que v pasa por cero), la magnitud de Imax dependerá entonces de la razón R/X.

En la Figura siguiente se muestra un conjunto de valores de catálogo del factor de potencia en la partida de motores de diversas potencias. Se observa que el factor de potencia decrece al incrementarse la potencia del motor, de tal modo que el valor máximo de la corriente –es decir el valor de crece en motores de mayor tamaño, siendo entonces la situación descrita más riesgosa en motores de mayor tamaño que en motores pequeños.

Factor de potencia en la partida de motores de diversos fabricantes.

Si se revisan antecedentes de motores eficientes comerciales, se encuentra una gran dispersión de valores de torque de partida para motores eficientes de igual potencia nominal, como se muestra en la Figura siguiente.

Torque de arranque de motores de diversos fabricantes en función del rendimiento del motor: a) Motores de 1 HP; b) Motores de 10 HP; c) Motores de 100 HP.

Otro caso de reducción del torque de partida puede ocurrir si el motor está conectado al tablero (donde el voltaje es el nominal) mediante un cable largo: la alta corriente de rotor bloqueado del motor eficiente puede reducir considerablemente el torque de partida, debido a la alta caída de voltaje en la línea, impidiendo eventualmente el arranque del mismo. Por ejemplo, si el motor antes descrito está conectado al tablero mediante un cable en el que en condiciones normales se produce una caída de voltaje de 3%, esta caída será alrededor de 18% en el arranque para el motor standard y 20% en el motor eficiente (con K = 1,3 y corrientes de partida atenuadas). Y como el torque es proporcional al cuadrado del voltaje, el menor voltaje en el motor reducirá el torque de rotor bloqueado a un 60 a 70% del valor que se tendría con voltaje nominal.

1. **CORRIENTE DE ENTRADA EN EQUIPOS TRIFÁSICOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA.**

Los rectificadores trifásicos no tienen conexión de neutro; esto imposibilita la circulación de armónicas múltiplos de 3 por cada fase. La Figura siguiente muestra la corriente típica observada en una fase de un rectificador trifásico. Al realizar el análisis armónico de esta corriente se observa que la armónica más importante es la número 5, es decir, de 250 Hz, lo que corresponde a un 18% de la corriente fundamental.



Corriente por una fase de un rectificador trifásico.



Análisis espectral de la corriente de fase de un rectificador trifásico

* 1. **NORMA IEEE 519 Y REGLAMENTO DE LA LEY GENERAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS (CHILE).**

Las Normas definen para establecer sus límites los factores siguientes:



1



2

THV : distorsión total de voltaje

THI : distorsión total de corriente.

La norma IEC define en forma levemente diferente estos factores:



3



4

El Reglamento que se dictará en Chile se regirá por la definición IEEE. La diferencia, como se verá, no es determinante.. La Norma IEEE-519 y el Reglamento que probablemente regirá en Chile establece los límites de distorsión de voltaje y los límites para las corrientes armónicas inyectadas por un usuario, valores que se indican en las tablas siguientes.

**Límites de Distorsión de Voltaje.**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| VOLTAJE NOMINAL | Vh/V1⋅100 [%] | THV [%] |
| VNOM ≤ 69 kV | 3,0 | 5,0 |
| 69 kV < VNOM ≤ 161 kV | 1,5 | 2,5 |
| VNOM > 161 kV | 1,0 | 1,5 |

Para establecer el límite de la distorsión de corriente que es permitido inyectar, se debe conocer:

a) El valor de la corriente de cortocircuito ISC en el empalme del usuario, es decir, en el lugar donde se medirá la inyección de armónicas. Este valor debe ser entregado por la compañía distribuidora de electricidad ya que depende del valor de sus transformadores de distribución.

b) La demanda media IL del usuario, calculada como el valor medio de las demandas máximas leídas durante los 12 meses precedentes a la medición.

Con estos valores de determinan los valores máximos permitidos de distorsión de corriente de cada usuario en particular.

**Límites de Distorsión de Corriente**

**(Válidos para redes de 120 V a 69 kV)**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Distorsión Armónica en % de IL (h impar) | | | | | | |
| ISC/IL | h<11 | 11≤h<17 | 17≤h<27 | 23≤h<35 | 35≤h | THI |
| <20 | 4,0 | 2,0 | 1,5 | 0,6 | 0,3 | 5,0 |
| 20<50 | 7,0 | 3,5 | 2,5 | 1,0 | 0,5 | 8,0 |
| 50<100 | 10,0 | 4,5 | 4,0 | 1,5 | 0,7 | 12,0 |
| 100<1000 | 12,0 | 5,5 | 5,0 | 2,0 | 1,0 | 15,0 |
| >1000 | 15,0 | 7,0 | 6,0 | 2,5 | 1,4 | 20,0 |
| El límite de las armónicas pares es un 25% del valor indicado.  Para sistemas de más de 69 kV los límites son un 50% de los indicados. | | | | | | |

* 1. **EFECTOS DE LAS CORRIENTES ARMÓNICAS.** 
     1. ***Resonancia de condensadores de compensación de factor de potencia.***

La Figura siguiente muestra el circuito equivalente de un sistema típico constituido por un transformador de alimentación, un banco convencional de condensadores y una fuente de armónicas que inyecta 38 Amp de armónica 5.



Circuito equivalente de un sistema con condensadores de compensación de factor de potencia.

En ausencia del condensador, la distorsión en el sistema se puede calcular mediante:



5

El voltaje nominal del sistema analizado es 20 kV entre fases, de manera que:



6

Es decir, se trata de una distorsión de un valor normal aceptado por Normas.

Al conectar el condensador de compensación de factor de potencia[[[1]](#footnote-1)] , el voltaje armónico será:



17

en que:



18

El voltaje o distorsión es:



19

La distorsión del sistema crece, pero lo que es más grave, el sistema presentará una resonancia alrededor de la armónica 13. En efecto:



20

Esto significa que los condensadores aumentan la distorsión en un sistema, y contribuyen a producir el fenómeno de resonancia, es decir, un aumento de la distorsión enormemente elevado, que termina por hacer explotar condensadores o transformadores, si es que las protecciones no operan debido, precisamente, a la presencia de armónicas en el sistema.

* + 1. ***Reducción de armónicas y compensación con condensadores antiresonantes.***

La Figura siguiente muestra la solución del problema de compensar reactivos en sistemas distorsionados. Básicamente consiste en agregar una inductancia en serie con el condensador de compensación de reactivos:

****

Compensación de potencia reactiva antiresonante.



Fotografía del transformador de alimentación, los condensadores (1,5 MVAr en total) y las inductancias que impiden la resonancia.

La Tabla siguiente muestra los valores de las impedancias a cada armónica. La notación empleada es:

ZT : impedancia del transformador

Zf : impedancia del filtro

ZEQ : impedancia equivalente (paralelo de transformador y filtro).

**Valores de las Impedancias**

**Condensadores Antiresonantes**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| h | ZT[Ω] | Zf[Ω] | ZEQ[Ω] |
| 5 | 7,99 | 42,30 | 6,72 |
| 7 | 11,19 | 97,86 | 10,04 |
| 11 | 17,59 | 191,41 | 16,11 |

Empleando los valores de la Tabla es posible calcular la distorsión de tensión:



21

Es decir, la distorsión del sistema disminuye levemente. Sin embargo, lo más relevante es que han desaparecido los riesgos de resonancia (descritos en el párrafo anterior), pues el sistema Lf, Cf se comporta como una inductancia por sobre la armónica 4. El diagrama completo, incluyendo el rectificador que produce armónicas, el filtro de armónicas del rectificador, la carga inductiva de motores eléctricos y la comepnsación agregada se muestran en el diagrama siguiente.



* + 1. ***Compensación con condensadores antiresonantes.***

La instalación siguiente muestra una variación de los consumos reactivos que requieren de la instalación de condensadores cuya operación debe ser controlada en proporción a la potencia reactiva requerida. Las mediciones se muestran en el gráfico siguiente.



Mediciones de Potencia Reactiva (eje y, VAR) y Activa (eje x, W) en una planta específica

El circuito de control de potencia reactiva, antiresonante, se muestra en la figura siguiente.



Control de la compensación de potencia reactiva antiresonante.

1. **CUANTIFICACIÓN ECONÓMICA DE LA CONFIABILIDAD Y PLAN DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO EN UNA PLANTA INDUSTRIAL.**

Uno de los problemas más importantes antes de llevar a cabo un programa de uso eficiente de la energía, consiste en tener indicadores de la confiabilidad con que se usan los equipos y, en lo posible, disponer de un procedimiento de cálculo de esos indicadores. De estos indicadores emergerá el plan de mantenimiento predictivo de los equipos adquiridos y, de esa forma, se asegurará que los equipos eficientes adquiridos tendrán un comportamiento acorde con las expectativas y sólo así se podrán justificar, en el mediano y largo plazo las inversiones realizadas.

Los dos primeros indicadores de éxito que se sugiere considerar son:

* **TFS [Horas]:** Tiempo (horas) en que el equipo está fuera de servicio
* **TFS [% acumulado]:** TFS [Horas]/Tiempo total del equipo fuera de servicio

Normalmente se realiza un gráfico de TFS en función de las causas que originan la detención ordenadas en función del valor de TFS de cada causa. En las figuras siguientes se muestran dos ejemplos de la evaluación en terreno de los indicadores recién mencionados, para dos equipos en particular.





Modo de falla de un equipo en particular (Faena minera: Perforadora de terreno)





Modo de falla de un equipo en particular (Faena minera: Pala de extracción de minera)

Un segundo conjunto relevante e indispensable de cuantificar los constituyen los siguientes indicadores de éxito:

* **MTTR [Horas]:** Tiempo medio (horas) de reparación = TFS [Horas]/n
* **n:** Número de veces que se repite la falla

En que:

**TFS [Horas]:** Tiempo total del equipo fuera de servicio

Normalmente se realiza un gráfico logarítmico de MTTR (mean time to repare) en función de n. Mientras más grande es MTTR peor (fallas agudas). Mientras más grande es n peor (fallas crónicas). En los gráficos siguientes se muestran estos parámetros para los mismos equipos mencionados anteriormente.





**Tiempo medio de horas de reparación en función del número de veces que se repite la falla (Caso de perforadora de terreno)**





**Tiempo medio de horas de reparación en función del número de veces que se repite la falla (Caso de pala de extracción de mineral)**

Como se ha dicho, estos gráficos permiten, no sólo cuantificar las fallas, agregando el concepto de repetibilidad de la falla y duración de esta, sino que focalizar la planificación del mantenimiento predictivo, asignando recursos al estudio y causas de las fallas más dañinas económicamente y, también, asignando recursos al equipamiento e instrumentación requerida para enfrentar estos problemas que aparecen como relevantes.

Esquemáticamente entonces, es posible proponer un nuevo esquema de asignación de los recursos de mantenimiento, el que se grafica en la figura siguiente.



**Forma esquemática de distribución de los gastos de mantenimiento.**

Observación: En el gráfico de la izquierda se muestra una distribución de gastos en que se otorga menos dinero al mantenimiento planificado, lo que contribuye a que el mantenimiento de emergencia es un gasto importante. En este caso, existen costos ocultos, asociados a las emergencias que no siempre se cuantifican adecuadamente. El gráfico de la derecha es la opción propuesta.

Así, el planteamiento propuesto consiste en:

* *Proponer un incremento en los costos asignados a mantenimiento predictivo y su planificación.*
* *Prometer una disminución de los costos asignados a mantenimiento correctivo y de emergencia. Esto en base a curvas de probabilidad.*
* *Prometer una disminución de los costos ocultos (cifra difícil de evaluar en forma total, pero factible de evaluar parcialmente).*
* *Mantener (aproximadamente) el presupuesto de mantenimiento.*

Conviene precisar las llamadas pérdidas o costos ocultos a que se hace mención más arriba. Siendo difíciles de cuantificar, es posible al menos focalizar las causas de ellas, de modo de deducir de esa focalización los instrumentos capaces de cuantificarlas:

* *Pérdidas de producción por mantenimiento programado (pequeñas)*
* *Pérdidas de producción por mantenimiento no programado (emergencias). Se puede medir por el tiempo de reparación.*
* *Pérdidas en el ritmo de producción (por funcionamiento anormal o ineficiente)*
* *Pérdidas de calidad en la producción*
* *Pérdidas transicionales (disminuye la sinergía de la planta)*

Así, debemos desarrollar indicadores que reflejen las pérdidas ocultas, tales como:

* *Tiempo entre fallas inesperadas (En lo posible asociarle un costo, al menos por pérdida de producción).*
* *Tiempos medios de reparación (=tiempo total de reparación/número de fallas). Asociar un costo al menos por el costo de la reparación.*
* *Disponibilidad (Tiempo medio entre fallas/tiempo total) o producción en función del tiempo (Producción media mensual, producción mínima, producción máxima, la banda de valores mensual mientras más pequeña menores son los cosos ocultos). Se puede establecer un costo asociado a trabajar con baja producción.*

Finalmente, a la promesa de éxito, se puede asociar un factor de probabilidad de ocurrencia. Si se fracasa, las fallas seguirían tal cual y habría pérdidas iguales al mayor costo que significó dar más presupuesto a la planificación del mantenimiento y al mantenimiento predictivo.

Si se tiene éxito 100% se podría prometer pasar de una curva de probabilidad de ocurrencia de falla a otra con mejores parámetros (que sería la promesa para el primer año). Puede definirse con los parámetros estadísticos (de una distribución de Weibull) o simplemente con el valor medio esperado (que también se deriva de la misma distribución prometida). En este caso, la meta es que la tasa de falla sea menor que el valor medio esperado. Como a la tasa de falla le hemos asociado pérdidas ocultas, la disminución de la tasa de falla queda expresada en dinero.

En una primera aproximación, se llevó a cabo, en una planta real el cálculo de gastos en dólares asociado a cada falla, tomando en consideración sólo aquellos elementos del gasto claramente dimensionados en la faena en particular, los que, en este caso fueron:

* Gastos en Mano de Obra
* Gastos en Materiales
* Gastos en Servicios Externos
* Gastos Generales

Las cifras obtenidas se muestran las tablas siguientes, para algunos equipos en particular y también para el conjunto de equipos.







Con el conjunto de fallas y costos registrados se obtuvo una regresión lineal, de modo de obtener, al menos, una primera aproximación de la relación costo versus falla y poder predecir la situación a futuro si es que los tiempos de falla disminuyen en la faena. Así la expresión de costo adoptada fue:



En que los valores calculados de a, b y c fueron:

|  |  |
| --- | --- |
| **a=** | **884,2** |
| **b=** | **1683,5** |
| **c=** | **22159,3** |

De esta forma, es posible calcular los efectos de un programa de uso eficiente de la energía que tome en consideración adicionalmente, los incrementos de la confiabilidad del sistema.

1. **CONCLUSIONES.**

Se ha mostrado que existe una estrecha relación entre los programas de uso eficiente de la energía y los mejoramientos de la confiabilidad en las instalaciones. El rendimiento de una planta industrial debe ser siempre vigilado atentamente, ya que de él depende el grado de competitividad de la empresa. Sin embargo, el emplear las variables energéticas para evaluar esta eficiencia es sólo de reciente uso, a pesar que, a través de la vinculación entre consumo energético y producción es posible observar diversos comportamientos anómalos de una industria, todos los cuales son, en general, son factibles de solucionar. Todavía con menor frecuencia se considera la confiabilidad de los equipos y el mantenimiento predictivo como una herramienta que debe formar parte de un programa de uso eficiente de la energía. Se ha mostrado que, antes de cambiar un equipo obsoleto ineficiente por otro, se debe realizar un estudio de confiabilidad, ya que toda inversión en equipos eficientes se rentabiliza en el mediano plazo, para lo cual se requiere que, el equipo, no se deteriore irreversiblemente antes de terminar su vida útil. Finalmente, se ha mostrado que es factible lograr importantes ahorros de dinero al unir procedimientos de mantenimiento predictivo con el empleo de equipos eficientes, todo lo cual requiere de un manejo ordenado de los dineros que se gastan en resolver fallas en los sistemas en análisis. En este sentido, se propone una nueva distribución de los recursos destinados al mantenimiento de una planta industrial.

***Acerca del autor.***

***Alfredo Muñoz Ramos,*** *es Ingeniero Civil Electricista y Profesor Titular de la Universidad de Chile. Trabaja en el Programa de Estudios e Investigaciones en Energía de la Universidad de Chile y es asesor permanente de importantes empresas mineras de Chile. Puede ser comunicado indistintamente en* [alfredomunozr@gmail.com](mailto:alfredomunozr@gmail.com) *y* [alfmunoz@uchile.cl](mailto:alfmunoz@uchile.cl)*.*

1. [1] La potencia reactiva, por fase, compensada por el condensador es:

    [↑](#footnote-ref-1)