

Determinación de prácticas de mantenimiento tomando como base la funcionalidad operativa

Rubén Eduardo Klimasauskas.

RESUMEN

El objeto de este trabajo es establecer una metodología para el cálculo de la confiabilidad operacional en equipos críticos utilizados para proveer energía eléctrica en una operación de manera que se disponga de una base de cálculo sólida que permita una adecuada asignación de los siempre escasos recursos de toda organización. La metodología basada en un análisis fundado, pero no limitado a los conceptos de mantenimiento centrado en la confiabilidad, en inglés conocido por Reliability Centered Maintenance (RCM). Para ilustrar esta metodología se presenta un caso de estudio.

El caso en estudio corresponde a una pequeña central eléctrica constituida por grupos electrógenos (GE) de potencia base y de reserva, con especificaciones claras y concretas acerca de la energía que deben entregar, Para el cumplimiento de los objetivos se determinan los estados de cada uno de los GE. En la metodología se calculan los índices de confiabilidad efectivos de cada activo y de combinaciones posibles y, en base a éstos valores se determinan los trabajos de mantenimiento que se requieren para asegurar la funcionalidad operacional necesaria de manera que se consiga una adecuada operación.

Con esta propuesta, se dejó en claro que, según el trabajo que los activos van a desarrollar en la organización, serán las labores de mantenimiento a que serán sometidos; mantenimiento que se realiza sujeto a no violar restricciones operacionales y asegurar la función objetivo principal de estos activos. De esta manera, se define la correcta asignación de recursos disminuyendo costos de mantenimiento, sin necesidad de comprometer la calidad del desempeño de los activos.

INTRODUCCIÓN

Es menester disponer de una metodología que permita conocer la confiabilidad operacional, expresada a través de su índice específico. De esta manera se dispondrá de una base racional de información que posibilitará la exitosa toma de decisiones. Lo expuesto se ilustrará tomando un caso real de trabajo.¹

METODOLOGÍA

Se dispone de una planta generadora de energía eléctrica (EE) compuesta dos grupos electrógenos (GE) en paralelo, de 2,2 KW c/u para una carga máxima de 3,80 MW. Las características de cada grupo electrógeno son:

- Marca: MAN²

¹Ken Blanchard & Sheldon Bowles, 1993 William Morrow and Company, New York, USA, "Raving fans. A Revolutionary Approach to Customer Service"

²Man es marca registrada de Man B&W Diesel Group, Alemania.

- Modelo ; 2AVS25/30
- Capacidad 2260 KW.
- Tension de salida: 2,3 KV.
- Frecuencia: 60 HZ.

Estos grupos son necesarios para asegurar la normal operación de una planta de concentración de mineral. A estos equipos se le suma una batería de dos GE con las siguientes características:

- Marca: CUMMINS³
- KTTA 2300 GS
- 918 KW.
- Tensión de salida: 2,30 KV.
- Frecuencia 60 HZ.

Este último grupo se denomina “muleto” o de reserva, pues deben entrar en funcionamiento cuando uno de los primeros generadores sale de servicio por averías o mantenimiento. Los Cummins no son de régimen permanente, pues fueron adquiridos con el solo propósito de reemplazar cualquiera de los Man, durante períodos de tiempo no mayores a 21 días. Por ello, es menester que cada GE reciba el mantenimiento que necesite, sin entrar en exceso y / o falta.⁴

- Los GE Man, son de uso continuo y constituyen la energía base de la planta. Debe cuidarse que mantengan las performances de fábrica y puedan proporcionar la carga máxima de demanda energética.
- Por otra parte, los Cummins al ser grupos de reserva, es necesario que cuando sean requeridos, entren en funcionamiento para reemplazar a alguno de los Man. Por ello, es menester que cuando deban entrar en escena, lo hagan sin problemas.
- De esta manera, se tiene que en el teatro de la operación de la fábrica, 2 funciones muy diferentes:
- Los GE Man son de potencia continua y solo deben ser reemplazados de a uno por períodos de tiempos limitados, que no excedan los veintiún días.
- Los Cummins deberán reemplazar por el período máximo antes detallado a los Man. Por ello, cuando se pongan en funcionamiento, no pueden fallar.

Teniendo en cuenta estas características, estos dos grupos funcionales deben ser sometidos a prácticas de mantenimiento distintas.

Debe tenerse en cuenta que no debe llegarse a que cada uno de estos activos genere menos energía que aquella para la que fueron seleccionados, sino que, por el contrario, deben analizarse parámetros que puedan denotar desgastes o anomalías de manera que realmente puedan ser detectados y solucionados alcanzando realmente las causas y no sus efectos. Por ello, debe hacerse un

³Cummins es marca registrada de Cummins Engine Company, Usa

⁴**Mourbay John:** 1991 Butterworth Heinemann Ltd. Oxford, England, “Reliability Centered Maintenance”.

detalle del Work Breakdown Structure (WBS)⁵de manera que se analicen los diferentes componentes de cada GE, posibles modos de fallas y, sobre todo las probabilidades de fallos que puedan poner en riesgo la función del activo.

- **.GE Man:** Cada grupo genera en las mejores condiciones 2,26 MW y en serie de 4,52 MW. para una carga máxima de 3,80 MW, un 19 % de margen de seguridad. Esto significa que se tiene una tolerancia de 0,72 MW entre ambos grupos. Es decir, la función de los Man es generar ambos, como máximo 3,80 MW. Por ello, todos aquellos defectos de estas máquinas que signifiquen una capacidad de generación mayor o igual a 3,80 MW, no está poniendo en juego la función de estos activos.
- **GE Cummins:** Cada unidad genera 0,918 MW, los dos en serie, 1,84 MW y el conjunto debe ser usado para suplantar a uno de los Man. En este caso, la carga total disponible a suministrar, será de 4,10 MW. La tolerancia, ante estas condiciones es del 14,00 %. Por ello, es menester que el tándem de estos generadores esté trabajando como mínimo al 95% de su capacidad. Con el objeto de fijar límites de tolerancias, el conjunto, debe producir como mínimo un 10% de la capacidad máxima de carga. Si se denomina x_1 al porcentaje de generación con respecto de la máxima capacidad de los Cummins y x_2 a la correspondiente a cada Man que quedó operativo se tendrá:

$$1,84 x_1 + 2,26 x_2 \geq 3,95,$$

Reemplazando $x_1 = 0,95$ se tiene que:

$$x_2 \geq 93,36\%,$$

Se toma

$$x_2 \geq 94,00\%,$$

Esto significa que cuando debe reemplazarse un GE Man por los dos Cummins, la capacidad de generación del Man que quedará operativo, no podrá estar generando por debajo del 94% de su capacidad máxima. En cifras, la generación de este grupo será G_R (Generación real)

$$2,21 \text{ MW} \leq G_R \leq 2,26 \text{ MW}$$

La función de los GE Cummins está claramente definida, y ambos no pueden generar menos que 1,86 MW y cada Man que quedará operativo no podrá hacerlo por debajo de los 2,21 MW para que esta inecuación se cumpla. Dicho de otra manera su función en la organización. En este camino las fallas que no comprometan estas funciones no serán importantes y por lo tanto no se gastarán recursos en impedir las, pero todas aquellas que si lo hagan, deben ser evitadas.

La consecuencia de un fallo de una de las máquinas de potencia base tendrá como resultado el corte total de suministro de energía eléctrica en toda la planta con grandes perjuicios en lo que a producción, seguridad y economía y finanzas se refiere. Si las máquinas que deben reemplazar a los generadores Man no son confiables, o no son capaces de generar para satisfacer la carga, quizá convenga agregar un tercer generador de reserva. Este es un ejemplo de cómo puede manejarse una consecuencia de excesiva incertidumbre. Una vez definida la función de cada activo, debe evaluar-

⁵The Project Management Body of Knowledge's Guide (PMBOK). 2004, practical Third edition, Project Management Institute, Newtown Square, PA .

se el estado de cada uno, para ello, se procederá a hacer el WBS de cada uno, es decir descomponer al activo en sus componentes que evidenciarán los posibles modos de fallo.

Cada GE se considerará compuesto por el motor Diesel y el alternador o generador propiamente dicho, A su vez, éstos se vinculan entre sí por medio de un acople mecánico o embrague. Para que el GE funcione correctamente, es menester que motor, alternador y embrague se encuentren operativos y en condiciones.

Si uno de estos elementos, el motor, acople o el alternador falla, hará que el sistema no cumpla la función para la que fue designado. Si $P(M)$ es la probabilidad de falla del motor, $P(Ac)$ la del acople y $P(A)$ la del alternador, se tendrá que la probabilidad de falla del sistema valdrá:

$$P(GE) = \text{Mínimo}(P(M); P(Ac); P(A))$$

La probabilidad de falla de cada uno de los elementos constituyentes del GE dependerá de la de sus componentes resultantes. Un activo equipo a mantener, es un conjunto de componentes de diferentes complejidades, por lo que el primer paso a dar será descomponerlo en sub componentes y éstos a su vez en sub componentes, y así sucesivamente hasta llegar a un ítem lo suficientemente simple como para que pueda ser enfocado y analizado correctamente. Este tipo de actividad se conoce como Work Breakdown Structure (WBS).

El primer paso es definir la criticidad de cada activo, de acuerdo con la función que el mismo debe asegurar⁶. Para ello, debe idearse un método de cálculo de ésta. En la Tabla 1 se detalla un método de trabajo. En este caso, los equipos de potencia base son los Man. Los Cummins son para sustituir a ante eventuales salidas de servicio. Nótese lo siguiente:

- En ningún caso pueden estar los Man fuera de servicio (F/S) en forma simultánea.
- Si fuera necesaria la puesta en servicio de los Cummins, para asegurar la continuidad de la función para lo que los Man fueron instalados, es condición necesaria y suficiente que ambos GE funcionen de acuerdo con lo especificado cuando se definieron las funciones de los activos.
- El funcionamiento de la planta generadora genera una interdependencia entre cada Man y los dos Cummins.

Determinación de la criticidad de los generadores

Para la determinación de las criticidades se usa una convención basada en nueve ítems, con igual peso relativo en el momento de la evaluación. Si se tiene en cuenta que los parámetros analizados son nueve y la máxima puntuación (contribución a la criticidad) es cinco puntos, se tiene que el valor máximo de criticidad se obtiene cuando el índice llega a cuarenta y cinco unidades. De acuerdo con la convención adoptada se tiene:

- **Puntaje 30; 45** Muy crítico.
- **Puntaje 29; 15** No muy crítico o medianamente crítico.
- **Puntaje 14; 9** No crítico.

⁶ Améndola Luis: 2002, Valencia, España "Modelos mixtos de confiabilidad".

En la tabla 1, se ilustra la determinación de las criticidades para los generadores Man y Cummins. Estos últimos poseen una criticidad mayor de 40 puntos, pues en el ítem correspondiente a la existencia de un equipo de repuesto, se debe tener en cuenta que una vez utilizados lo Cummins, por la salida de servicio de un Man, no existe otro equipo que pueda suplantarlos. La criticidad de los Man se ubica en 37 puntos, razón por la que se concluye que todos estos equipos son altamente críticos.

El otro punto que debe analizarse es el correspondiente al estado en que se encuentran cada una de estas máquinas. De esta manera se determinará a ciencia cierta el tipo de mantenimiento al que debe ser sometido el activo, teniendo en cuenta su estado y su criticidad.

Tabla 1. Determinación de las criticidades

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE			ÍTEM	DESCRIPCIÓN	PUNTAJE		
		ESTD	MAN	CUMMINS			ESTD	MAN	CUMMINS
Grado de utilización				Seguridad del personal					
1	81% a 100%	5	5,00		5	Obliga a usar máscaras anti gases y aislamiento total	5	5,00	5,00
	61% a 80%	4		4,00		Obliga a usar máscaras anti gases y aislamiento común	4		
	41% a 60%	3				Obliga a usar máscaras de polvo o vapores y aislamiento total	3		
	21% a 40%	2				Obliga a usar máscara de polvo y aislamiento común	2		
	0% a 20%	1				Sin máscara y 67 aislamiento común	1		
Equipo de repuesto				Lugar de trabajo (temperaturas y ventilación)					
2	No existe	5		5,00	6	Temperaturas extremas y sin ventilación	5		
	Existe pero es difícil de instalar	4				Temperaturas extremas ventilado y viceversa	4	4,00	4,00
	Disponible en otras plantas	3				Temperaturas medias sin ventilación	3		
	Disponible en stock	2				Temperaturas moderadas sin ventilación	2		
	Existe otro listo para usar	1	1,00			temperaturas moderadas con ventilación	1		
Afección a otros procesos				Lugar de trabajo (altura)					
3	Toda la planta	5	5,00	5,00	7	Mayor a 6 m	5		
	Fuertemente a otros procesos	4				Entre 4 y 6 m	4		
	Afecta a su entorno	3				Entre 3 y 4 m	3		
	Afecta solo a su instalación no afecta, hay otro en paralelo	2				Entre 1 y 3 m	2	2,00	2,00
		1			Menor de 1 m	1			
Tiempo de reparaciones				Riesgo eléctrico					
4	Superior a 1 jornada de 8 horas.	5	5,00	5,00	8	Media tensión (1 a 33 KV)	5	5,00	5,00
	Entre 1/2 jornada y 1 jornada	4				Baja tensión (0,22 a 1 KV)	4		
	Entre 2 y 4 horas	3				Entre 0,050 y 0,22 KV	3		
	entre 1 y 2 horas	2				Menor a 0,050 K V	2		
	Menor de 1 hora	1				Sin Tensión	1		
				Edad del equipo					
					9	Mayor o igual a 10 años	5	5,00	5,00
						Mayor o igual a 5 y menor a 10 años	4		
						Mayor o igual a 3 y menor a 5 años	3		
						Mayor o igual a 1 y menor a 3 años	2		
						Menor a 1 año	1		
Total puntaje								37,00	40,00

Una medida de establecer el estado de cada activo es usando una convención que permita asignar un puntaje a cada componente del WBS y de esta manera, determinarlo de la manera más exactamente.

Se denomina índice de confiabilidad al valor numérico expresado en porcentaje que indica el estado y condición del activo, sector o planta, respecto de la posibilidad de llevar a cabo las Unidades de medida de servicio (UMS) de funcionamiento de producción, su capacidad y posibilidad para el funcionamiento continuo seguro y eficiente.

Para poder determinarse este índice, debe usarse un método de calificación basado en ciertos factores básicos tales como⁷:

- **Estado:** Deben conocerse la condición operativa de cada activo. Puede recurrirse al historial que evidencie trabajos de envergadura que tengan directa incidencia en la disponibilidad del bien.
- **Edad de la unidad del activo:** Existen dos tipos de edades: la edad desde nueva y la edad desde la última recorrida u overhaul. Cuando existen ambas, se usa la segunda denominada DUR (Desde Última Recorrida general) o TSO (Time Since Overhaul). asumiendo como overhaul al conjunto de tareas efectuados sobre el activo que lo coloquen en “cero horas”.
- **Condiciones del medio ambiente:** Es muy importante el lugar donde un activo se encuentra trabajando. Estas circunstancias determinan en gran manera las rigurosidad de las inspecciones, las componentes preventivas de éstas, calidad de materiales a usar, etc.
- **Naturaleza del trabajo:** El trabajo puede ser de servicio pesado, liviano o medio. Debe quedar claramente especificado y comprendido.
- **Condiciones de seguridad:** Debe tenerse muy en cuenta el grado de seguridad tiene directa incidencia en el índice de confiabilidad
- **Accesibilidad:** Muchas veces, la complicación ante una determinada reparación o práctica de mantenimiento, la constituye la dificultad o facilidad de acceder al sistema que falló, más que la falla en sí misma.

Luego de definir estos lineamientos, se dará un puntaje máximo a cada uno de los factores detallados. El peso específico de cada ítem no es simétrico, donde el principal aporte lo hace el estado del activo, seguido por la naturaleza del trabajo o tipo de trabajo (TT) que se muestra en las tablas correspondientes. Al igual que en el caso de la determinación de la criticidad, el método usado corresponde a una convención cuantitativa

Tabla 2. Peso específico de los ítems usados para calcular los índices de confiabilidad

Ítem	Descripción	Puntaje	%
1	Estado	42	28%
2	Edad	20	13%
3	Medio ambiente	25	17%
4	Naturaleza del trabajo	32	21%
5	Seguridad	17	11%
6	Accesibilidad	17	11%

⁷ **Klimasauskas Rubén:** 27-03-08 Mantenimiento de máquinas pesadas y equipos móviles. www.mantenimientomundial.com.

En la tabla 3, se ilustra el cálculo del índice de confiabilidad los GE Man, en base a una convención antes descrita en la tabla 2. Mientras que en la tabla 4 se ilustra el cálculo análogo para los Cummins.⁸

Tabla 3. Índice de confiabilidad Man.

Detalle	GE Man 2AVS25/30 N°1							GE Man 2AVS25/30 N°2						
	Estado	Edad	MA	TT	Seg.	Acces.	Total	Estado	Edad	MA	TT	Seg.	Acces.	Total
Motor	7	4	3	5	3	3		5	3	1	4	1	3	
Sistema eléctrico	4	2	2	3	2	2		2	3	0	2	0	2	
Transmisión	7	4	4	5	3	3		5	2	2	4	1	3	
Sistema neumático	7	4	4	5	2	3		5	3	2	4	0	3	
Chasis	8	4	4	5	3	3		6	3	2	4	1	3	
Refrigeración	3	2	3	3	2	2		1	4	1	3	0	2	
Total	36	20	20	26	15	16	133	24	18	8	21	3	16	90
Máximo total posible	42	20	25	32	17	17	152	42	20	25,20	31,50	16,80	16,80	152,30
índice de confiabilidad	85,71%	100%	79,37%	82,54%	89,29%	95,24%	87,33%	57,14%	90%	31,75%	66,67%	17,86%	95,24%	59,09%

Tabla 4. Índices de confiabilidad Cummins.

Detalle	Cummins 1							Cummins 2						
	Estado	Edad	MA	TT	Seg.	Acces.	Total	Estado	Edad	MA	TT	Seg.	Acces.	Total
Motor	5	1	2	4	2	3		5	1	2	4	2	3	
Sistema eléctrico	2	3	1	4	1	2		2	3	1	4	1	2	
Transmisión	1	1	3	3	2	3		1	1	3	3	2	2	
Sistema neumático	5	2	3	2	0	3		5	2	3	2	0	3	
Chasis	7	3	3	2	2	3		7	3	3	2	2	3	
Refrigeración	2	4	2	4	2	2		2	4	2	4	2	3	
Total	22	14	14	19	9	16	94	22	14	14	19	9	16	95
Máximo total posible	42	20	25,20	31,50	16,80	16,80	152,30	42	20	25,20	31,50	16,80	16,80	152,30
índice de confiabilidad	52,38%	70%	55,56%	60,32%	53,57%	95,24%	61,72%	52,38%	70%	55,56%	60,32%	53,57%	85,24%	62,38%

Si se denomina i_c a cada índice de confiabilidad, de los cálculos anteriores se obtuvo:

- $i_{c(Man1)} = 87,33\%$.
- $i_{c(Man2)} = 59,09\%$.
- $i_{c(Cummins 1)} = 61,72\%$.
- $i_{c(Cummins 2)} = 62,38\%$.

⁸ **Klimasauskas Rubén:** 03-10-07 Mantenimiento en Minería, Primera y Segunda Parte. www.mantenimientomundial.com.

Si bien el índice de confiabilidad de cada activo por separado es importante, la mayor importancia, según los postulados del RCM es asegurar que el conjunto cumpla la función para las que éstos fueron adquiridos y merecen ser conservados

- Man 1 y Man 2 ;

$$i_{c1} = i_{c(Man1)} \times i_{c(Man2)}$$

$$i_{c1} = 51,61 \%$$

- Man 1 y Cummins 1 y Cummins 2. El índice de confiabilidad de este conjunto valdrá:

$$i_{c2} = i_{c(Man1)} \times i_{c(Cummins1)} \times i_{c(Cummins2)}$$

$$i_{c2} = 33,62 \%$$

- Man 2 y Cummins 1 y Cummins 2. El índice de confiabilidad de este conjunto valdrá:

$$i_{c2} = i_{c(Man2)} \times i_{c(Cummins1)} \times i_{c(Cummins2)}$$

$$i_{c2} = 22,75 \%$$

La única configuración superior al 50% es la correspondiente a los Man trabajando juntos, pero ante una falla de alguno de éstos (en particular el 2 que posee un índice de confiabilidad menor) no llega al 30%. Se deduce que cada índice de confiabilidad debe ser aumentado a un 85% como mínimo de manera que el producto de la primera configuración sea como mínimo del 72% y las segundas con tres componentes superen el 60%.

Para que la función de cada activo y por ende del conjunto se encuentre asegurada, debe:

- 1) Mantener el $i_{c(Man1)}$, a través de prácticas de mantenimiento predictivo y preventivo. El predictivo en los componentes más críticos.
- 2) Someter a una inspección de reparación mayor al Man 2 pero luego de reparar cada Cummins.
- 3) Reparar cada Cummins de manera que se alcance el índice de confiabilidad prefijado y luego someterlo a prácticas de mantenimiento detectivo.

RESULTADOS.

En base a los índices calculados, se programaron las tareas de mantenimiento correspondientes y se obtuvieron excelentes resultados en cuanto a disponibilidad y utilización de los generadores base y disponibilidad en los muletos. Estos resultados cuantifican el mantenimiento que cada activo debió recibir de manera que su función operacional quede completamente asegurada.

CONCLUSIONES

El principal aporte de este método, lo constituye haber podido cuantificar la confiabilidad de cada activo y de los grupos, en caso de tratarse de varias máquinas tal como el caso estudiado. El principal limitante radica en aceptar una convención y que ésta sea respetada en los futuros cálculos o estimaciones. Si cambian parcialmente los criterios, los resultados, carecerán de un patrón o base común, por lo que las medidas que puedan tomarse en base a los cálculos, tendrán un gran componente de incertidumbre, contradiciendo el principio de aplicación de un método cuantitativo como el expresado, que trata de eliminar o disminuir hasta hacer perfectamente manejable posibilidad error. En casos como el analizado, donde el número de máquinas es reducido y, por ende, sus combinaciones funcionales, este método puede aplicarse sin problemas con respaldos informáticos sencillos, por lo que puede usarse en faenas medianas y pequeñas. Caso contrario, se deberá disponer de herramientas más sofisticadas.