

Determinación de la capacidad requerida para la prestación del servicio de mantenimiento en plantas de generación de energía hidroeléctrica

*Diana Lucía Guzmán Gómez**, *Guillermo López Ramírez*** y *Rodolfo Rodríguez Baracaldo****

(Recibido el 25 de abril de 2003. Aceptado el 11 de julio de 2003)

Resumen

En este artículo se presenta la metodología utilizada para determinar la capacidad requerida de personal para la prestación del servicio de mantenimiento electromecánico en tres plantas de generación hidroeléctrica. Se empleó el método de pronósticos para determinar el número de horas requeridas para efectuar las actividades de mantenimiento en el año 2003 y el estudio de variables para calcular el tiempo disponible de los operarios. Los resultados permitieron determinar el número óptimo de personal y plantear alternativas para efectuar el mantenimiento, las cuales fueron evaluadas por medio de los métodos multicriterio discretos.

----- *Palabras clave:* mantenimiento de plantas de generación hidroeléctrica, pronósticos, series de tiempo, ARIMA método de expertos, métodos multicriterio discretos.

Determination of the required capacity for offering the maintenance service in hydroelectric generation plants

Abstract

The methodology used to determine the required capacity of workers for offering the electro-mechanical maintenance service in three hydroelectric generation plants is presented. The method of prediction was used in order to

* Ingeniera Industrial. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. dialuc@caliescali.com.

** Ingeniero Industrial. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. guilopez@latinmail.com.

*** Ingeniero Mecánico. Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales. rrodrigu@nevado.manizales.unal.edu.co.

determine the number of hours suitable to perform the maintenance activities in the year 2003, and the study of variables for calculating the workers available time. The results enable to determine the optimum number of workers and generated alternatives in order to undertake the maintenance activities, which were evaluated through discret multicriterion methods.

----- *Key words:* maintenance in hydroelectric generation, prediction, time series, ARIMA, experts method.

Introducción

Toda instalación sufre deterioro por uso, operación inadecuada, defectos en el montaje, especificaciones técnicas mal concebidas y por su no utilización. La función de mantenimiento busca la conservación en condiciones óptimas de la maquinaria y equipos, mediante la colocación en el momento y en la cantidad adecuada de los recursos humanos y técnicos, de tal manera que exista mayor seguridad, confiabilidad y estabilidad en el sistema productivo.

En las plantas generadoras de energía hidroeléctrica la planeación, programación y control de las actividades de mantenimiento está sujeta al efecto de variables como capacidad disponible de personal de electricistas y mecánicos, antigüedad de la maquinaria, traslado de personal, políticas de la empresa, sistemas de información, equipos y herramientas, fabricación y reparación de piezas, clima, entre otros.

Para determinar las horas requeridas de mantenimiento para el año 2003 en tres plantas de generación hidroeléctrica (A, B y C que en conjunto tienen una capacidad aproximada de generación de 180.000 kW), se empleó la metodología de pronósticos, que permitió establecer la cantidad de personal necesario para desarrollar las actividades; además, por medio del análisis de variables que afectan el mantenimiento, las horas pronosticadas para éste y el número de personal, se plantearon alternativas para la prestación del servicio de mantenimiento en las plantas de generación.

Metodología empleada para determinar la capacidad

Análisis de la situación actual

Inicialmente es necesario realizar el diagnóstico de la situación actual de la empresa, identificando la misión, visión, políticas laborales, el proceso de producción de energía, la función del mantenimiento electromecánico, el manual de funciones del personal, los costos involucrados

en la realización de las actividades, los problemas y necesidades de la empresa, el proceso de fabricación y reparación de piezas.

Selección del método

Para planear y programar el mantenimiento se pueden emplear técnicas [4] que permiten determinar el tiempo estándar de cada actividad, como: parar y observar, muestreo del trabajo, gráficos de control [15], tiempos predeterminados (MTM) y estimación [13]. Otras permiten estimar la capacidad requerida (mano de obra, materiales, maquinaria, etc.) para realizar el mantenimiento; entre éstas se encuentran los pronósticos, el Tableau heurístico, la programación lineal [12], las filas de espera [3] y la simulación [14]. Algunas filosofías de mantenimiento como el *Reliability Centered Maintenance* (RCM) [2] y *Total Productive Maintenance* (TPM), buscan mejorar la prestación del servicio de mantenimiento desde el punto de vista técnico, organizacional, financiero y social.

Para el caso particular de estudio el método más apropiado son los pronósticos, ya que el mantenimiento de las plantas generadoras involucra actividades poco frecuentes con duración y requerimientos de mano de obra variable, lo que hace de este un sistema inestable.

Método de pronósticos

Dada la atmósfera de incertidumbre y las imprecisiones inherentes a los procesos, las organizaciones deben tomar decisiones basadas en pronósticos, puesto que las conjeturas sustentadas en modelos académicos son más confiables que aquellas basadas únicamente en el instinto de quienes administran las organizaciones; lo anterior no quiere decir que el pronóstico intuitivo sea malo sino que debe complementarse con bases teóricas. Las ventajas de este método para el caso particular son las siguientes:

1. Se cuenta con los datos históricos suficientes para crear y analizar las series de tiempo.

2. Es un método objetivo, basado en datos reales y no en el criterio de personal relacionado con el mantenimiento.
3. Si se actualizan los datos constantemente este método sirve para tomar decisiones en otros períodos de tiempo y en diferentes aspectos como cantidad de material, equipos, etc.
4. De acuerdo con el comportamiento de la serie de tiempo y sus componentes, se puede concluir acerca de la situación actual de las máquinas, el personal, y su posible actuación en el futuro.
5. Los resultados obtenidos a través del pronóstico, representan el comportamiento histórico de la información.

Pasos para aplicar la metodología de pronósticos

Construcción de la serie de tiempo. Una serie de tiempo es una sucesión de observaciones de un fenómeno que es variable con respecto al tiempo y se observa en intervalos de tiempo regulares, es decir que las observaciones se hacen en períodos igualmente espaciados; las variaciones descritas por la serie son el resultado del comportamiento sistemático o aleatorio de la variable [11]. Una serie de tiempo puede analizarse utilizando el modelo de descomposición en el cual se considera que la serie está compuesta de cuatro patrones básicos [6]:

- Tendencia T: es el componente de largo plazo que representa el crecimiento o disminución en la serie sobre un período amplio.
- Cíclico C: es la fluctuación en forma de onda alrededor de la tendencia; tiende a repetirse cada dos o más años.
- Estacional S: es un patrón de cambio que se repite a él mismo cada cierto período de la serie.
- Aleatorio I: mide la variabilidad de la serie después de retirar los otros componentes.

$$Y = F(t), \text{ donde } F = (T, S, C, I) \quad (1)$$

Para la obtención de la información requerida en los pronósticos, se estudió un período de tiempo de 126 meses (enero de 1992 a junio de 2002), que permitió la construcción de una serie de tiempo correspondiente a las horas hombre de trabajo empleadas en actividades de mantenimiento. En la tabla 1 se presenta como ejemplo la serie de tiempo para la planta A.

Tabla 1 Serie de tiempo planta A

<i>Fecha</i>	<i>Horas</i>	<i>Fecha</i>	<i>Horas</i>
Ene., 93	16,00	Nov., 97	487,50
Feb., 93	134,10	Dic., 97	303,00
Mar., 93	405,95	Ene., 98	264,00
Abr., 93	346,50	Feb., 98	246,00
May., 93	1.449,00	Mar., 98	149,00
Jun., 93	145,00	Abr., 98	445,50
Jul., 93	85,00	May., 98	407,00
Ago., 93	59,50	Jun., 98	818,00
Sep., 93	242,00	Jul., 98	352,00
Oct., 93	8,00	Ago., 98	716,00
Nov., 93	25,00	Sep., 98	819,50
Dic., 93	952,50	Oct., 98	532,00
Ene., 94	80,00	Nov., 98	668,00
Feb., 94	326,50	Dic., 98	341,50
Mar., 94	345,00	Ene., 99	2.033,50
Abr., 94	101,00	Feb., 99	402,00
May., 94	245,25	Mar., 99	874,50
Jun., 94	422,00	Abr., 99	835,50
Jul., 94	71,00	May., 99	325,00
Ago., 94	362,50	Jun., 99	996,00
Sep., 94	508,50	Jul., 99	889,00
Oct., 94	169,50	Ago., 99	1.361,50
Nov., 94	394,00	Sep., 99	134,00
Dic., 94	406,00	Oct., 99	455,00
Ene., 95	281,00	Nov., 99	719,50
Feb., 95	330,50	Dic., 99	321,00
Mar., 95	134,00	Ene., 00	1.124,00

Tabla 1 (continuación)

<i>Fecha</i>	<i>Horas</i>	<i>Fecha</i>	<i>Horas</i>
Mar., 95	134,00	Ene., 00	1.124,00
Abr., 95	586,00	Feb., 00	407,50
May., 95	274,00	Mar., 00	784,50
Jun., 95	205,00	Abr., 00	569,50
Jul., 95	150,00	May., 00	930,50
Ago., 95	130,00	Jun., 00	895,00
Sep., 95	965,55	Jul., 00	298,50
Oct., 95	1.699,00	Ago., 00	481,00
Nov., 95	271,75	Sep., 00	653,50
Dic., 95	747,00	Oct., 00	1.652,50
Ene., 96	676,50	Nov., 00	827,50
Feb., 96	471,00	Dic., 00	893,00
Mar., 96	681,00	Ene., 01	639,50
Abr., 96	224,00	Feb., 01	1.768,00
May., 96	56,00	Mar., 01	296,00
Jun., 96	335,00	Abr., 01	603,00
Jul., 96	735,00	May., 01	3.431,50
Ago., 96	515,00	Jun., 01	1.537,00
Sep., 96	639,50	Jul., 01	363,00
Oct., 96	532,50	Ago., 01	1.433,50
Nov., 96	130,00	Sep., 01	1.398,00
Dic., 96	54,00	Oct., 01	1.423,80
Ene., 97	315,00	Nov., 01	1.098,50
Feb., 97	404,00	Dic., 01	1.692,00
Mar., 97	589,00	Ene., 02	113,00
Abr., 97	155,00	Feb., 02	568,50
May., 97	601,50	Mar., 02	791,00
Jun., 97	979,00	Abr., 02	3.082,50
Jul., 97	707,00	May., 02	766,50
Ago., 97	1.701,50	Jun., 02	929,50
Sep., 97	931,00	Jul., 02	101,00
Oct., 97	739,50	Ago., 02	578,00

Autocorrelación simple y parcial. Los métodos de autocorrelación se emplean para evaluar los componentes de una serie. La autocorrelación

simple (ACF: Autocorrelation Function) corresponde a la relación entre las covarianzas de una variable en un desfase k y la varianza, como se expresa a continuación [6,5]:

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (Y_t - \bar{Y})(Y_{t-k} - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2} \quad (2)$$

Donde:

r_k = coeficiente de autocorrelación para un desfase de k períodos.

\bar{Y} = media de los datos de la serie.

Y_t = observación (dato) en el período de tiempo t .

Y_{t-k} = observación (dato) en k períodos anteriores o en el período $t-k$.

n = número de datos de la serie.

La autocorrelación parcial (PACF: Partial Autocorrelation Function) se genera de igual manera que la autocorrelación simple, con la diferencia que esta mide la correlación entre observaciones que se encuentran separadas k períodos, manteniendo constantes las correlaciones intermedias [7].

Los análisis de autocorrelación simple y parcial se representan en gráficos conocidos como *correlogramas*, en los cuales se visualiza el valor de la autocorrelación para cada uno de los desfases k y los límites de confianza. Mediante el empleo del *software* Statgraphics [8] para la serie de datos anterior se obtienen los resultados de la figura 1.

Selección del modelo de pronóstico. En la gráfica de autocorrelación simple (ACF), no se detecta la presencia de ciclos o estaciones, sin embargo no se puede garantizar que el proceso sea estacionario ya que existen algunos datos que afectan el comportamiento aleatorio de la serie (ruido blanco) [5].

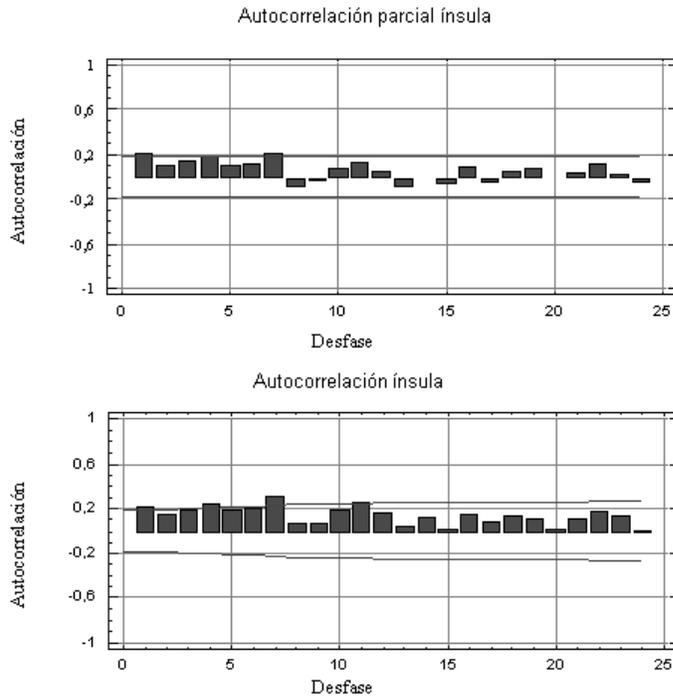


Figura 1 Correlogramas

La serie de tiempo analizada anteriormente no garantiza la estabilidad, es decir, la media y la varianza no son constantes a través del tiempo. El empleo de los modelos ARIMA (modelo de pronóstico formulado por Box-Jenkins que refleja el comportamiento histórico de la serie, empleado cuando los datos siguen un patrón estacional, tendencioso o cíclico) permite realizar las transformaciones necesarias de los datos para estabilizar la varianza, el valor de diferenciación "d", permite estabilizar la media, de manera tal que los pronósticos representen adecuadamente la serie de tiempo [5, 7].

La autocorrelación simple muestra un decrecimiento leve a lo largo de los desfases y la autocorrelación parcial picos significativos en los primeros desfases, por lo cual se aplica un proceso autorregresivo AR (p). Se detectan picos al inicio de los desfases del ACF y un decrecimiento hacia cero de los valores en el PACF, por lo que no se puede desechar la opción de agre-

gar al modelo un componente de promedio móvil MA (q).

Para realizar la comparación de modelos se emplean criterios como minimización de errores (desviación absoluta de la media (DAM), error medio cuadrado (EMC), porcentaje de error medio absoluto (PEMA), error medio (EM), porcentaje medio de error (PME)), minimización de la desviación estándar y *test* (RUNM: *test* de corridas arriba y debajo de la mediana, RUNS: *test* de corridas arriba y abajo, AUTO: *test* de autocorrelaciones de Box Pierce, VAR: *test* de diferencia de varianzas, MEAN: *test* de diferencia de medias).

Luego de analizar un conjunto de modelos autorregresivos e integrados de promedios móviles (ARIMA) para la serie de tiempo de la planta generadora A, se plantearon cinco modelos (tabla 2), los cuales cumplen con las condiciones de factibilidad requeridas con respecto a la mi-

Tabla 2 Comparación de modelos planta A

Modelo	Constante	Ajuste	EMC	DAM	PEMA	EM	PME
0, 1, 1	*	Raíz cuadrada	267.949	333,761	115,915	97,9135	-78,4869
0, 1, 2	*	Raíz cuadrada	68.964	332,539	116,477	89,0648	-79,9107
3, 1, 0	*	Raíz cuadrada	318.973	360,946	123,204	54,902	-83,7187
2, 1, 1		Raíz cuadrada	289.077	340,179	115,499	139,09	-71,7895
4, 1, 0	*	Raíz cuadrada	313.027	354,445	137,058	60,4662	-99,272

Modelo	RUNS	RUNM	AUTO	MEAN	VAR	DES. EST.
0, 1, 1	OK	OK	OK	OK	OK	8,94
0, 1, 2	OK	OK	OK	OK	OK	8,98
3, 1, 0	OK	OK	OK	OK	OK	10,12
2, 1, 1	OK	OK	OK	OK	OK	9,32
4, 1, 0	OK	OK	OK	OK	OK	9,99

nimización de errores de pronóstico, cumplimiento de *test* y menor desviación estándar.

Después de comparar los modelos con las herramientas vistas anteriormente, el modelo seleccionado fue el ARIMA (2, 1, 1) sin constante y con transformación de raíz cuadrada, ya que al realizar la comparación de los errores se encontró que la diferencia entre estos no era significativa y, debido a las características de la serie, presenta menor porcentaje de error medio absoluto y menor porcentaje medio de error. El crite-

rio para elegir el modelo se basó en los resultados de las proyecciones, buscando que estos no sobredimensionaran la serie.

Pronóstico. Los datos pronosticados para el año 2003, con base en el modelo ARIMA (2, 1, 1), para la planta A se presentan en la tabla 3.

Se emplearán aproximadamente un total de 10.269,8 horas hombre para realizar actividades de mantenimiento en la planta de generación A durante el año 2003.

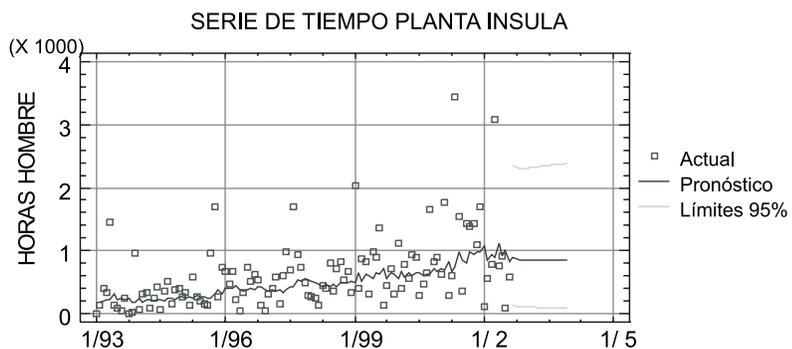


Figura 2 Serie de tiempo para la planta A

Tabla 3 Resultados pronósticos para la planta A

<i>Período</i>	<i>Pronóstico (horas)</i>	<i>Límite inferior</i>	<i>Límite superior</i>
9/2	903,464	134,354	2.354,600
10/2	874,338	119,620	2.323,370
11/2	854,096	111,854	2.291,890
12/2	854,750	110,692	2.299,320
1/3	855,860	109,476	2.308,520
2/3	855,873	107,952	2.315,600
3/3	855,814	106,433	2.322,460
4/3	855,811	104,948	2.329,420
5/3	855,814	103,480	2.336,380
6/3	855,814	102,026	2.343,310
7/3	855,814	100,589	2.350,230
8/3	855,814	99,166	2.357,140
9/3	855,814	97,759	2.364,030
10/3	855,814	96,367	2.370,900
11/3	855,814	94,991	2.377,760
12/3	855,814	93,629	2.384,600

Con respecto a los pronósticos de la planta A se puede concluir que:

- Las horas de mantenimiento aumentaron levemente hasta el año 1998; las del año 1999 en comparación con el año anterior se incrementaron aproximadamente un 62%, ocurriendo un incremento igual para el año 2001. El aumento en las horas de mantenimiento se debe a la antigüedad de los equipos que obliga a realizar mayor cantidad de reparaciones y a incrementar las actividades de mantenimiento predictivo, además al cambio de políticas que buscan que la maquinaria siempre esté en óptimas condiciones, por lo que se requiere de un mantenimiento total en períodos de tiempo más cortos.
- El pronóstico para el año 2003 es muy estable, ya que los picos se presentan en diferentes épocas del año y no existen ciclos ni estaciones.

- Una de las ventajas del método ARIMA es que no se sesga por los valores extremos; como se puede ver el aumento en las horas de mantenimiento de los últimos tres años no afecta radicalmente la proyección, como lo harían otro tipo de métodos.

Variables que afectan el mantenimiento

Después de calcular el número de horas-hombre requeridas para efectuar las actividades de mantenimiento electromecánico en la planta de generación, el siguiente paso en la determinación de la capacidad requerida para la prestación del servicio, es identificar los factores que afectan la cantidad de tiempo disponible del personal, para lo cual se empleó el diagrama causa-efecto [9] de la figura 3.

Políticas de la empresa. Corresponden a aquellas actividades que legalmente se encuentran

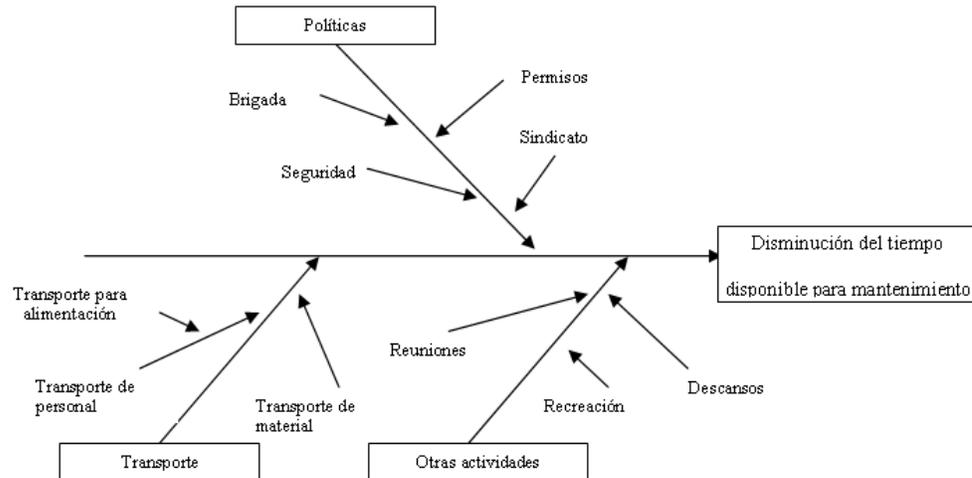


Figura 3 Diagrama causa-efecto

justificadas y por tal motivo no se pueden suprimir. Para el caso del personal de mantenimiento electromecánico dichas políticas incluyen su participación en el sindicato, las brigadas de seguridad, los permisos por calamidad doméstica o enfermedad, normas de seguridad, etc.

Transporte. Incluye el traslado de personal y materiales hacia cada una de las plantas de generación y el desplazamiento entre ellas.

Para determinar los tiempos necesarios para el traslado del personal entre las plantas, se diseñó una encuesta para determinar los tiempos estimados de traslado de un lugar a otro según las condiciones de la carretera (seca o húmeda), obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 4.

Otras actividades. Son actividades que no hacen parte del mantenimiento, pero que se reali-

zan para el bienestar del personal y buen desempeño de las actividades como reuniones, recreación, descansos.

Para el caso de estudio la variable generación no afecta, ya que cada planta cuenta con varios grupos que generan en diferentes momentos del día, por esto en caso de que alguno falle los demás sirven de apoyo, cubriendo la demanda de energía.

Horas disponibles de trabajo

Las horas disponibles de trabajo de los operarios, dependen de la planta en la cual se encuentren desarrollando las actividades de mantenimiento debido a los factores analizados como alimentación, transporte, reuniones, descansos, etc. Teniendo en cuenta un año de cincuenta y dos semanas, vacaciones de tres semanas (quince

Tabla 4 Tiempo promedio de transporte entre plantas

<i>Lugares de traslado</i>	<i>Tiempo (min) según condiciones de terreno</i>		<i>Promedio (min)</i>
	<i>Seco</i>	<i>Húmedo</i>	
Planta A-Planta B	31,6	40,0	35,8
Planta B-Planta C	10,0	14,6	12,33

días hábiles) y dos semanas de festivos (dieciséis días) se obtienen los resultados que se presentan en la tabla 5.

Para realizar las actividades de mantenimiento en las plantas mayores se requiere de electricistas y mecánicos. Con el fin de determinar el número teórico de cada uno de ellos, se calculó el porcentaje de mantenimiento eléctrico y mecánico de los últimos meses, obteniéndose los resultados de la tabla 5. Teniendo en cuenta los resultados de los pronósticos para el año 2003, las horas disponibles y los porcentajes de mantenimiento eléctrico y mecánico, se obtienen los resultados que se exponen en la tabla 6.

Se puede concluir que para las plantas de generación se requiere un equipo de mantenimiento electromecánico integrado por nueve electricistas y trece mecánicos.

Evaluación de las alternativas

Después de calcular el número de operarios para realizar las actividades de mantenimiento, se emplean algunas herramientas de los métodos multicriterio discretos para plantear y evaluar alternativas. El método general tiene los siguientes pasos [10]:

1. *Definir el problema.* En este paso se recopilan todos los datos e información necesaria acerca de la empresa y se analiza la situación actual.
2. *Definir el objetivo del estudio.* Analizar diferentes alternativas para la realización del mantenimiento electromecánico de acuerdo con la situación actual, el estudio de las variables que afectan el mantenimiento, las proyecciones de horas requeridas de personal y encuestas.
3. *Definir los expertos.* Dado que no existen en el medio otras generadoras que cumplan con las mismas características de edad, tiempo de uso y que operen con similares condiciones climáticas y laborales, es necesario seleccionar como expertos a siete integrantes del personal de mantenimiento electromecánico de las plantas, cuya opinión fue tomada en cuenta para la evaluación de alternativas; los criterios de decisión y las alternativas se plantearon con base en los resultados obtenidos en el estudio de pronósticos y variables.
4. *Definir los criterios de decisión.* Para determinar los criterios en un método mul-

Tabla 5 Horas disponibles de trabajo

<i>Planta</i>	<i>Horas semana</i>	<i>Horas al año</i>	<i>% eléctrico</i>	<i>% mecánico</i>
A	31,01	1.426,46	31,71	68,29
B	35,25	1.621,50	32,98	67,02
C	31,40	1.444,40	45,17	54,83

Tabla 6 Número de operarios requerido para mantenimiento eléctrico y mecánico

<i>Planta</i>	<i>Número teórico de operarios</i>	<i>Operarios</i>	
		<i>Eléctrico</i>	<i>Mecánico</i>
A	7,19	2,27	4,91
B	7,27	2,39	4,87
C	4,61	2,08	2,52

ticriterio discreto [1] es necesario recurrir a una técnica de trabajo en grupo, en este caso se empleó el método *Brainstorming*. Se definieron los siguientes criterios para la evaluación: logística, calidad, costo de transporte, disponibilidad, costo de personal, número de personal, tiempo de traslado, carga de trabajo, recursos de la empresa, especialización, flexibilidad, alimentación, número de vehículos, asimilación del personal, aceptación de la empresa.

5. *Seleccionar los criterios.* Una vez determinados los criterios, se seleccionan los más significativos. El número de criterios lo define un grupo de expertos, se recomienda [1] trabajar con 7 ± 2 . Para el caso de estudio, los criterios se seleccionaron mediante la observación y el análisis de datos, obteniéndose los siguientes: logística, transporte, disponibilidad, cantidad de personal y especialización.
 - *Logística.* Este criterio busca evaluar la complejidad y cantidad de personal especializado (ingenieros y jefes de grupo) requerido para realizar la planeación, programación y control de las actividades de mantenimiento. Actualmente se cuenta con un ingeniero mecánico, sin embargo en las entrevistas realizadas al personal se ha detectado la necesidad de contar con un ingeniero electricista que brinde apoyo a las actividades logísticas del mantenimiento eléctrico.
 - *Transporte.* Estima el número de vehículos requeridos para el traslado del personal (operarios e ingenieros) hacia el sitio de trabajo establecido. Estos vehículos son subcontratados.
 - *Disponibilidad.* Mide la respuesta (tiempo de llegada) de los operarios hasta el lugar donde se deben realizar las actividades de mantenimiento correctivo, además mide su presencia en determinado lugar para realizar actividades de mantenimiento preventivo y predictivo.
6. *Determinación de la escala y unidades de medida para los criterios.* Se observa en la tabla 7 la escala o unidad de medida correspondiente a cada criterio.
7. *Formulación y selección de las alternativas.* Mediante trabajo en grupo y teniendo en cuenta el análisis de la situación actual, se formulan las alternativas que se adecuan a las necesidades de mantenimiento de las plantas de generación. Para este caso las alternativas se determinaron de acuerdo con la situación observada, obteniéndose las siguientes:
 - *Mantenimiento bajo el método actual.* Plantea continuar efectuando el mantenimiento electromecánico de la misma forma que se hace en la actualidad, es decir, un grupo de electricistas y mecánicos rotando entre las plantas.
 - *División por planta.* Se trata de aumentar el personal de mantenimiento y dividirlo entre las plantas, de acuerdo con las necesidades de cada una de ellas.
 - *División por equipos.* Consiste en la asignación de un grupo de personas que se encargue de la realización del mantenimiento de los servicios auxiliares, edificios e instalaciones, bocatomas, puente grúa, tuberías y subestación. Otro grupo que se encargue de realizar mantenimiento a las generadoras y equipos de apoyo (refrigeración, drenaje, regulación de velocidad y válvulas).

Tabla 7 Escala o unidad de medida correspondiente a cada criterio

Criterio	Escala o unidad de medida	
Logística	Unidades monetarias (\$/mes)	Salarios: Ingeniero: \$998.002 Jefe de grupo: \$834.762
Transporte	Unidades monetarias (\$/mes)	Costo alquiler: Campero: \$2.160.000 Camioneta: \$2.280.000
Disponibilidad	Escala	Alta = 3 Media = 2 Baja = 1
Personal	Unidades monetarias (\$/mes)	Salario: Mecánico: \$ 671.755 Electricista: \$ 683.030
Especialización	Escala	Alta = 3 Media = 2 Baja = 1

- *Subcontratación.* El equipo de mantenimiento electromecánico se encargaría de realizar el mantenimiento a las generadoras y equipos de apoyo, mientras que el resto de actividades serían subcontratadas.

Posteriormente es necesario realizar un proceso de eliminación de aquellas alternativas que no sean factibles. Para el caso de estudio todas las alternativas son factibles.

8. *Evaluación de las alternativas para cada uno de los criterios.* La tabla 8 presenta

la evaluación Rij de las alternativas i de acuerdo con cada criterio de decisión j.

9. *Homogeneización de los criterios.* Luego de definir si los criterios se van a maximizar o a minimizar, es necesario convertirlos a un solo tipo de optimización (Max. o Min.) con la aplicación del inverso de los valores de la columna a convertir.

$$\text{Max. (Z)} = \text{Min. (1/Z)}.$$

La tabla 9 presenta los criterios homogeneizados para Min.

Tabla 8 Matriz de decisión

	Logística	Transporte	Disponibilidad	Personal	Especialización
Método actual	4.500.290	11.160.000	Media	14.880.085	Media
División por planta	1.996.004	1.160.000	Alta	14.880.085	Alta
División por equipo	3.339.048	11.160.000	Alta	16.906.625	Alta
Subcontratar	3.665.528	8.880.000	Alta	14.440.298	Alta
	Min.	Min.	Max.	Min.	Max.

Tabla 9 Homogeneización de criterios

	<i>Logística</i>	<i>Transporte</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Personal</i>	<i>Especialización</i>
Método actual	4.500.290	11.160.000	0,50	14.880.085	0,50
División por planta	1.996.004	11.160.000	0,33	14.880.085	0,33
División por equipo	3.339.048	11.160.000	0,33	16.906.625	0,33
Subcontratar	3.665.528	8.880.000	0,33	14.440.298	0,33

10. *Normalización de la matriz de decisión.* Para un criterio *j*, las evaluaciones de las *m* alternativas vienen dadas por R_{ij} . El procedimiento de normalización se realiza con la aplicación de la siguiente fórmula para todo R_{ij} :

$$V_i = \frac{R_{ij}}{\sum R_{ij}}, \text{ donde } 0 < V_i < 1 \quad (3)$$

V_i = vector normalizado para cada criterio *i*.

11. *Determinar el peso de cada criterio.* Se pueden emplear métodos de cálculo subjetivo como: el triángulo de Füller, ordenación simple, AHP Saaty, tasación simple y comparaciones sucesivas, además existen métodos objetivos como la entropía y Diakoulaki. Para el caso de estudio se empleó el método objetivo de la entropía.

- *Determinar la entropía de los criterios:*

$$E_j = -K \sum_{i=1}^m R_{ij} \text{Log} R_{ij} \quad (4)$$

E = entropía

m = cantidad de alternativas

$K = 1/\text{Log}(m)$

R_{ij} = calificación de la alternativa *i* respecto al criterio *j*

- *Calcular la diversidad "D" en el criterio *j*:*

$$D_j = 1 - E_j \quad (5)$$

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{j=1}^n D_j} \quad (6)$$

- *Determinar el peso *W* para cada criterio *j*:*

Con los pesos de los criterios se puede identificar cuál de estos tiene más influencia para la toma de decisión en una alternativa; se observa que el transporte y el personal tiene el menor peso; esto se debe a que el costo establecido para cada alternativa en estos aspectos es muy similar.

Tabla 10 Matriz normalizada

	<i>Logística</i>	<i>Transporte</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Personal</i>	<i>Especialización</i>
Método actual	0,33	0,26	0,34	0,24	0,34
División por planta	0,15	0,26	0,22	0,24	0,22
División por equipo	0,25	0,26	0,22	0,28	0,22
Subcontratar	0,27	0,22	0,22	0,24	0,22

Fuente: Barba-Romero, Sergio y Pomerol, Jean Charles. *Decisiones Multicriterio: Fundamentos Teóricos y Utilización Práctica*. 1.997.

Tabla 11 Peso de los criterios

	<i>Logística</i>	<i>Transporte</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Personal</i>	<i>Especialización</i>
Entropía	0,9742	0,9982	0,9854	0,9983	0,9854
Diversidad	0,0258	0,0018	0,0146	0,0017	0,0146
Peso	0,4410	0,0308	0,2496	0,0291	0,2496
%	44,0000	3,1000	25,0000	2,9000	25,0000

Fuente: Marrero, Fernando. *Método multicriterio de comparación por parejas modificadas*. 2002.

12. *Determinación de la mejor alternativa.*
Para la elección de la mejor alternativa se emplea el método de producto ponderado, el cual califica cada una de las alternativas según el peso obtenido para cada criterio:

Donde

Pi = producto ponderado para la alternativa i

Wj = peso para cada criterio j

Rij = valor para la alternativa i en el criterio j

$$P_i = \prod_{j=1}^n (R_{ij})^{W_j} \quad (7)$$

Tomando en cuenta que se decidió optimizar mediante la minimización (MIN), la mejor alternativa es aquella que tiene un menor valor Pi (producto ponderado). Esto se puede observar en la tabla 12.

Tabla 12 Producto ponderado

	<i>Pi</i>	<i>Puesto</i>
Método actual	0,3294	4.º
División por planta	0,1872	1.º
División por equipo	0,2356	2.º
Subcontratar	0,2414	3.º

Conclusiones

1. Con la aplicación de la metodología de pronósticos se logró proyectar las horas hombre de mantenimiento para el año 2003. Los

resultados obtenidos reflejan el crecimiento que se ha venido dando en las horas destinadas al mantenimiento, este incremento se debe a la antigüedad de los equipos y a la implementación de nuevas políticas de mantenimiento dirigidas a mantener los equipos e instalaciones en condiciones óptimas de funcionamiento.

- La prestación del servicio de mantenimiento se ve afectada por múltiples variables que disminuyen el tiempo disponible de los operarios. El traslado del personal de mantenimiento entre las plantas, los casinos y demás instalaciones, consume gran parte del tiempo disponible, por tal razón las alternativas que buscan disminuir estos traslados, son una buena opción para reducir costos y aumentar el tiempo dedicado a la realización de actividades de mantenimiento.
- La división del personal para realizar el mantenimiento por plantas, resulta ser la opción más apropiada, ya que reduce los costos de logística y transporte y asegura mayor disponibilidad y especialización de los operarios.

Referencias

- Barba-Romero, Sergio y Pomerol, Jean Charles. *Decisiones multicriterio: fundamentos teóricos y utilización práctica*. Universidad de Alcalá. 1997.
- Cardona Garcés, Lina María. *Aplicación de la metodología de mantenimiento centrado en la confiabilidad al sistema de molienda y separación de la empresa Pulverizar S.A. de la ciudad de Manizales*. Manizales. Universidad Nacional de Colombia. 2002.

3. Chase, R. et al. Dirección y administración de la producción y de las operaciones. 8.^a ed. Bogotá. McGraw-Hill. 2000.
4. Duffuaa, Salih et al. Sistemas de mantenimiento planeación y control. 1.^a ed. México. Limusa Wiley. 2000.
5. Guerrero, Víctor M. Análisis estadístico de series de tiempos económicas. México. Editorial Universidad Autónoma Metropolitana. 1991.
6. Hanke, John E. y Reitsch, Arthur R. Pronósticos en los negocios. 5.^a ed. México. Prentice Hall. 1995.
7. Gujarati, Damodar. Econometría básica. 3.^a ed. McGraw-Hill. 1996.
8. Manual Statgraphics Plus for Windows: Time Series Analysis. Editorial Manugistics. 1995.
9. Ishikawa, Kaoru. Práctica de los círculos de calidad. 2.^a ed. Madrid. Productivity Press. 1990.
10. Marrero D., Fernando. Método multicriterio de comparación por parejas modificado. 2002.
11. Ordóñez Pinzón, Hermelinda. Inferencia, estadística, regresión y muestreo. Manizales. Universidad Nacional de Colombia. 1996.
12. Marrero Delgado, Fernando et al. Herramientas para la toma de decisiones: la programación lineal. Disponible en: www.monografias.com/trabajos6/proli/proli.shtml.
13. Chacón, María y Cordero, Carlos. Estudio de métodos. México. Universidad de Sonora. Disponible en: www.getfound.com.html.
14. Cartif. Simulación de procesos productivos. Asignación eficiente de recursos y optimización de producción. Técnicas de mejora de mantenimiento basado en simulación discreta. Disponible en: www.cartif.es/mantenimiento/simul.html.
15. Barca, R. G. Control estadístico del proceso. www.calidad.com.ar/control7.html. 2001.