

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL BALANCEO DE GENERADORES DE ALTO  
VOLTAJE EN ISAGEN S.A. ESP**

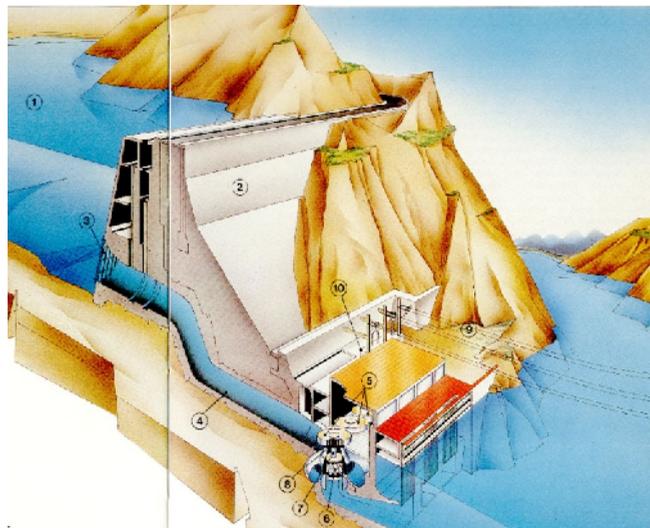
SANTIAGO ARANGO GUERRA  
sarango5@eafit.edu.co  
Departamento de ingeniería mecánica

SANTIAGO MOLINA DELGADO  
smolina3@eafit.edu.co  
Departamento de ingeniería mecánica

ÁREA DE ÉNFASIS  
GESTION DE PROYECTOS

ASESOR PRINCIPAL  
JUAN SANTIAGO VILLEGAS

SECTOR BENEFICIADO  
ISAGEN S.A. ESP



## **RESUMEN**

La empresa ISAGEN S.A. ESP cuenta con 5 centrales de generación de energía, de las cuales 4 son hidráulicas y una es térmica. Para mantener los centros productivos en buen funcionamiento y obtener una confiabilidad alta, se tiene un equipo de mantenimiento el cual basa su trabajo, en el mantenimiento predictivo y correctivo. Dentro del mantenimiento predictivo realiza diferentes análisis como: termografía, líquidos penetrantes, vibraciones etc. Con el análisis de vibraciones se puede realizar balanceos a los generadores de las centrales, por lo cual se diseña una metodología para realizar dicho balanceo, el cual es aplicable a otros equipos.

## **ABSTRACT**

ISAGEN SA ESP has 5 power generating stations, of which 4 are hydro and thermal is. To maintain production facilities in good working order and obtain a high reliability, it has a maintenance team which bases its work, predictive and corrective maintenance. In predictive maintenance performed different tests such as thermography, liquid penetrant, vibration etc. With vibration analysis can be done balancing to power generators, so designing a methodology for conducting such a roll, which is applicable to other machines.

## **PALABRAS CLAVES**

Centrales hidroeléctricas  
Generador  
Turbina  
Cojinetes  
Mantenimiento predictivo  
Balanceo  
Vibraciones  
Espectro

## **KEY WORDS**

Hydroelectric  
Generator  
Turbine  
Bearings  
Predictive maintenance  
Balance  
Vibrations  
Spectrum

## **INTRODUCCION**

Uno de los sectores empresariales más importantes en Colombia es el sector energético, el cual le aporta desarrollo industrial y crecimiento económico al país. Entre las empresas que tienen como objetivo la generación de energía esta ISAGEN S.A ESP, una empresa del estado ubicada en la ciudad de Medellín y con sedes en diferentes ciudades de Colombia.

ISAGEN S.A ESP tiene 5 centros productivos, 4 hidroeléctricas: San Carlos, Calderas, Jaguas y Miel I, y 1 Termoeléctrica: Termocentro; con una capacidad instalada de generación de 1240 MW, 26 MW, 170 MW, 396 MW y 300 MW respectivamente. Las 3 primeras ubicadas en la zona de Guatapé, Antioquia, Miel I en Norcasia, Caldas y Termocentro en Cimitarra, Santander.(ISAGEN, 2003)

La sede principal está ubicada en el sector del poblado en la ciudad de Medellín, donde se encuentran todos los equipos de administración, Producción y Comunicación, además de la Gerencial General y el Centro de Desarrollo Integral (CDI). Desde allí se realiza el manejo y control de los 5 centros productivos.

En la Gerencia de Producción está el equipo de Mantenimiento e Ingeniería, los cuales se encargan de que las centrales estén operando de manera adecuada, para así poder generar energía eficientemente. Para lograr esto se hacen estudios de Mantenimiento Predictivo como: Termografías, Análisis de vibraciones, Chequeo de espesores, Líquidos penetrantes y partículas magnéticas, Análisis metalográficos, Análisis de aceites, Chequeo de corrientes y aislamiento etc.

Los estudios anteriormente mencionados, son realizados en su mayoría por la misma empresa, ya que posee personal capacitado y certificado para la realización de los mismos. Sin embargo, existen estudios los cuales son subcontratados.

Para realizar dichos estudios se hace primero una clasificación de equipos: críticos y periféricos, ya que no es fundamental que se le realicen los análisis a cada uno de los equipos que se encuentren en las centrales. Además hacer un monitorio online a todos los equipos demanda un valor económico alto.(ISAGEN, 2003)

Entre los estudios que se realizan está el análisis de vibraciones, este lo hacen personas del equipo de Mantenimiento e Ingeniería, para extraer datos, analizarlos y así poder realizar mejoras en los equipos de las centrales.

## **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar una metodología clara y sencilla para balancear generadores basados en un diagnóstico de vibración mecánica en ISAGEN S.A. ESP.

## PRESENTACION DE LA EMPRESA

ISAGEN es una empresa de servicios públicos mixta, su objeto principal es la generación y comercialización de energía eléctrica, así como la comercialización de gas natural por redes, carbón, vapor, y otros energéticos de uso industrial.

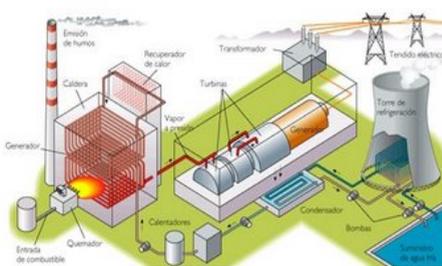
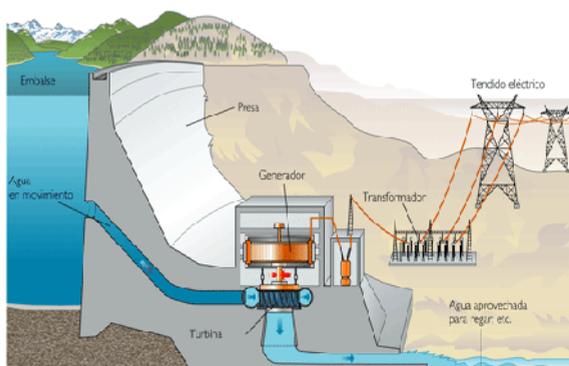
ISAGEN posee y opera sus propias centrales de generación con recursos de origen hídrico y térmico: centrales hidroeléctricas San Carlos, Jaguas, Calderas y Miel 1 y la central termoeléctrica Termocentro.

Central	Ubicación	Capacidad Instalada MW
Central hidroeléctrica San Carlos	San Carlos (Antioquia)	1240
Central hidroeléctrica Jaguas	San Rafael (Antioquia)	170
Central hidroeléctrica Calderas	Granada (Antioquia)	26
Central hidroeléctrica Miel	Norcasia (Caldas)	396
Central térmica Termocentro	Cimitarra (Santander)	300

## FUNDAMENTOS DE LA GENERACION DE ENERGIA

Para generar energía se tienen que tener conceptos básicos de electrotecnia, como lo son: Circuitos, voltaje, corriente, resistencia etc. Pero lo principal es conocer la ley de Faraday la cual es el fundamento de la generación de energía esta dice “Cuando se mueve un conductor eléctrico (hilo metálico), en el seno de un campo magnético (imán o electroimán) aparece una corriente eléctrica por dicho conductor. Lo mismo ocurre si se mueve el imán y se deja fijo el conductor”.

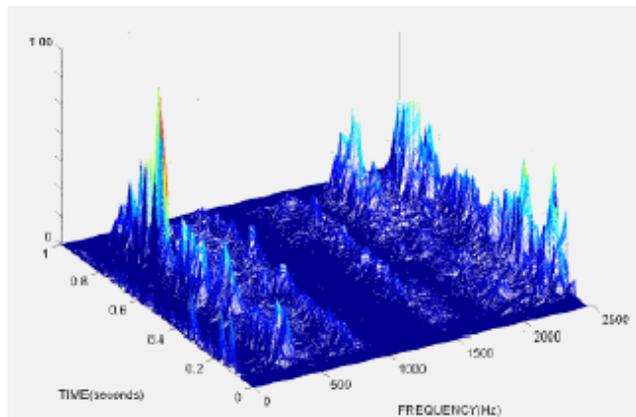
Cuando se trata de un generador eléctrico lo que se hace es poner en movimiento rotativo bobinas que giran en las proximidades de campos magnéticos producidos por imanes o electroimanes (Miguel, 2002)



## **MANTEMIENTO PREDICTIVO (VIBRACIONES MECÁNICAS)**

El análisis de vibraciones, es una de las técnicas más utilizadas, dentro de las empresas, ya que aporta en un alto grado a tener en buena operación de las máquinas y equipos. Este análisis se le practica a todo tipo de máquinas debido a que su operación genera vibraciones dentro de ellas, las cuales no son percibidas por el sentido humano, y se ve la necesidad de tener claro cuáles son las magnitudes de dichas vibraciones, porque pueden ocasionar daños de gran magnitud, y de lo que se trata es de reducirlas al máximo.

La mayor parte de vibraciones en máquinas y estructuras son indeseables porque aumentan los esfuerzos y las tensiones y por las pérdidas de energía que las acompañan. Además, son fuente de desgaste de materiales, de daños por fatiga y de movimientos y ruidos molestos (Sarmiento, 2005)



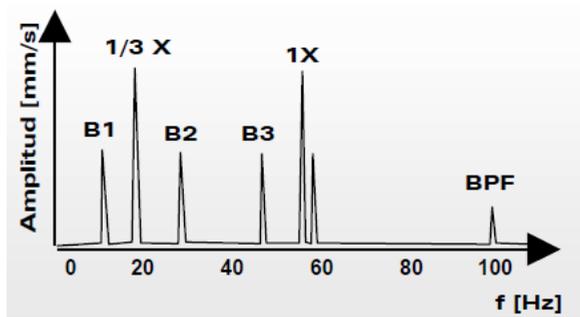
## **METODOLOGIA DE BALANCEO**

### **SENSOR DE DESPLAZAMIENTO**

La medida en desplazamiento (mm ó  $\mu\text{m}$  en SI, mils en S. Inglés) es importante para reconocer patrones que están a muy baja frecuencia. Los picos de vibración que están al comienzo del espectro son mejor resaltados. Esta es una medida especial para hallar anomalías en chumaceras de aceite, muy utilizadas en turbomaquinaria además de los ejes de los generadores.

### **LA TRANSFORMADA DE FOURIER**

Por medio de la transformada de Fourier se puede pasar al dominio de la frecuencia y tener una gráfica amplitud VS frecuencia la cual es llamada espectro donde se puede tener un análisis claro de la máquina.



### RELACIÓN DE ESBELTEZ

Para seguir con el análisis y balanceo de los generadores se debe tener en cuenta la relación de esbeltez del eje del generador ya que con ella se puede saber las revoluciones máximas a las cuales se pueden tomar mediciones para el balanceo.

$$Re = \frac{KL}{Rmin} \quad , \quad Rmin = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Nombre variable	Variable
Relación de Esbeltez	Re
Constante	K
Longitud de eje	L
Radio mínimo de giro	Rmin
Inercia	I
Área transversal	A

### SENSIBILIDAD DE LA MÁQUINA

Los generadores de ISAGEN operan normalmente con una holgura mínima la cual se debe mantener, esta se modifica de acuerdo a pesos que se incrementan o disminuyen para realizar balanceos cuando se exceda la magnitud límite de operación normal y sin fallas.

$$M_{prueba} = 30 * \frac{M_{rotor}}{r_{rotor}}$$

Donde  $M_{rotor}$  es el peso del rotor y  $r_{rotor}$  es el radio del rotor.

## REALIZACIÓN DE MEDICIONES

Todos los generadores están monitoreados en línea las 24 horas del día, de ahí que se toman los siguientes datos de acuerdo a diferentes modos de operación del generador.

Los datos a tener en cuenta son:

- Se pone a girar el generador en vacío, lo que significa que no está excitado ni con carga, para tomar registros de fase y amplitud, y determinan una vibración mecánica. Ej. 30 grados, 180 micrones.
- Se excita el generador para tomar registros, y conseguir vibraciones electromecánicas.
- Se toman registros con la maquina cargada o generando.

De acuerdo a los registros tomados, se hace el siguiente análisis:

Se analiza la variación de la fase en las 3 modos, si la diferencia no es mayor al 5% entre las fases, se considera que es un desbalanceo mecánico, si por el contrario es mayor al 5% se puede decir que es un polo en corto.

En el caso de ser un polo en corto se debe proceder de la siguiente manera para identificar la zona del polo que está fallando.

Con las mediciones que se tomaron anteriormente (en vacío y excitado), se grafican como vectores en un plano para encontrar las componente mecánica (tomada con la maquina en vacío), y la resultante electromecánica (tomada con la maquina excitada), así, se calcula el vector faltante que es un componente eléctrica la cual se proyecta en el centro del plano dando una dirección que muestra una zona aproximadamente de 3 polos en los cuales está el corto.

Para el cálculo del peso final a poner en el rotor, se debe tener claro un peso de prueba ( $me_p$ ) que se obtuvo en el momento de analizar la sensibilidad de la máquina, y los valores que se tomaron sin peso de prueba ( $V_0$ ) y con peso de prueba ( $V_1$ ), para encontrar una resultante ( $V_x$ ), (solo se toma el valor de la amplitud), con estos valores y la siguiente formula se determina el peso que se debe poner en el rotor del generador. (Casanova, 2005)

$$(me)_0 = (me)_p \frac{|V_0|}{|V_x|}$$

Luego de tener el valor del peso final, se debe saber en qué lugar del rotor se pondrá, para no tener que empezar a realizar un procedimiento de prueba y error, hasta encontrar el lugar preciso, para esto se debe tener en cuenta, las fases que se obtuvieron antes del peso de prueba ( $\theta_0$ ), y después ( $\theta_1$ ), para encontrar los siguientes valores de fase y la fase final donde se ubicara el peso final ( $\alpha_0$ ):

$$\alpha_p + \phi = \theta_x \quad \alpha_0 + \phi = \theta_0$$

$$\alpha_0 = \theta_0 - \theta_x + \alpha_p$$

## CONCLUSIONES

Se consideran las empresas del sector energético como parte fundamental del vivir cotidiano ya que son las encargadas de generar la energía para el desarrollo de las diferentes industrias de todo país.

ISAGEN S.A. ESP es una de las empresas con mayor participación en el sector energético, aportando casi un 20% de la energía que se genera en Colombia, por lo cual es una de las más importantes.

ISAGEN S.A. ESP cuenta con la 4 centrales hidroeléctricas y una térmica, además de tener la central más grande del país en relación a su capacidad de generación alcanzando los 1240 MV.

ISAGEN S.A. ESP para su futuro tiene como proyectos la construcción y operación de las centrales Amoya e Hidrosogamoso, con las cuales espera incrementar la participación en el sector energético.

Existen diversas formas de generar energía (solar, eólica, térmica, hidroeléctrica, nuclear) pero por sus altos costos, cambios de clima, topografía del país ISAGEN S.A. ESP solo trabaja con hidroeléctricas y termoeléctricas.

Dentro de la generación de energía existe una ruta crítica de equipos los cuales deben estar monitoreados todo el tiempo para poder garantizar el buen funcionamiento, mediante los sensores de desplazamiento, velocidad y aceleración, también con un mantenimiento predictivo facilita percibir donde se encontrara el problema en un futuro antes de que este se presente.

Los generadores son parte vital de la generación, por lo que se debe tener mucho cuidado y se deben mantener de la mejor manera, además porque son de muy altos costos.

De acuerdo a la altura de la caída de agua en las centrales hidroeléctricas se selecciona el tipo de turbina, la Pelton es la más utilizada en casos de gran altura, debido a la resistencia en sus cangilones.

Una de las mejores maneras de tener una planta en buen funcionamiento es la aplicación de un buen plan de mantenimiento predictivo, ya que con este se tiene un muy buen control de todas más maquinas.

Entre los diferentes planes de mantenimiento como lo son el correctivo, el preventivo y el predictivo, el tercero es el más efectivo aunque los equipos con los cuales se procede a realizar el mantenimiento sean más costosos. En el futuro se ve que esos costos no son tan importantes como los que ocasionarían un correctivo o un predictivo.

Con un lenguaje sencillo se desea mostrar el procedimiento para llevar a cabo un balanceo paso a paso a generadores de alto voltaje que en un futuro se puede emplear en otras empresas optimizando costos y tiempo.

Existen muchos equipos a los cuales se les puede realizar un balanceo como el expuesto en el capítulo 5, con el cual se mantiene al equipo en perfectas condiciones de funcionamiento.

## **BIBLIOGRAFIA**

ARROYAVE PIEDRAHITA, John. Principios de la generacion hidraulica. Medellin, 2009.

CASANOVA, Euro. Metodos de balanceo de rotores de campo, 2005.

EL PRISMA. Mantenimiento predictivo 2001. [En línea]. [Consultado: 5 de abril 2010]. Disponible en: [http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria\\_mecanica/mantenimientopredictivo/](http://www.elprisma.com/apuntes/ingenieria_mecanica/mantenimientopredictivo/)

HARPER, Gilberto Enriquez.El libro práctico de los generadores, transformadores y motores electricos. Mexico, D.F.: Editorial Limusa, 2004.

ISAGEN. Nuestra empresa2003.[En línea]. [Consultado: 5 de abril 2010]. Disponible en: [www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoIn\\_estructuraPropiedad&idNodo=2](http://www.isagen.com.co/metalnst.jsp?rsc=infoIn_estructuraPropiedad&idNodo=2)

MIGUEL, Pablo Alcalde San. Electrotecnia. Madrid: Editorial Thomson, 2002.

SARMIENTO, Martin. Mantenimiento predictivo generadores sincronicos. 2005.