

**NOTA TÉCNICA**

**Sistemas de Enfriamiento en  
Generadores Eléctricos  
de Plantas Termoeléctricas**

**Ing. Alberto R. Fuentes Quijada**



**CURSOS TÉCNICOS  
PARA LA INDUSTRIA**

Los generadores de potencia eléctrica, también llamados alternadores, transforman la energía mecánica transmitida por un ente motriz a través de un acoplamiento rígido entre ejes en energía eléctrica. Este generador es el habitual en plantas de generación de energía. Los generadores refrigerados con gas durante su operación producen una gran cantidad de calor originado principalmente por dos causas:

- Efecto Joule debido a las altas corrientes que circulan por los arrollados de este.
- Las pérdidas por rozamiento con el gas que se esté usando como medio refrigerante que se producen cuando el rotor, que gira a altas velocidades, debe vencer la resistencia de la atmósfera que existe en el interior del alternador. Para absorber este calor y mantener el generador refrigerado se utilizan fluidos tales como el aire, hidrógeno (H<sub>2</sub>) y agua, entre otros. Con respecto al segundo fluido se deben tomar todas las medidas de seguridad en cuanto a su operación y manejo. En estos equipos se hace necesario proporcionar un método efectivo para eliminar todo el calor que se produce, de tal forma que no se someta a los distintos componentes del generador a esfuerzos térmicos excesivos, a la vez que se intentan minimizar las pérdidas por el

rozamiento entre el rotor y el gas usado para para la refrigeración.

Una mala refrigeración de un generador limita la potencia tanto activa como reactiva, además si la temperatura del generador no es controlada bajo los parámetros operativos, podría producirse la actuación de la protección por alta temperatura, a través de instrumentos que miden este parámetro causando la salida de la máquina del sistema eléctrico.

### **Desarrollo**

Los generadores eléctricos, tienen dentro de sus características fundamentales, que la velocidad denominada velocidad de sincronismo, es constante. Los generadores constan de un devanado inductor y un devanado inducido, ambos independientes. El sistema inductor (el que crea el campo magnético) va en el rotor, parte móvil, y el inducido (donde se genera realmente la energía eléctrica) en el estátor o parte fija. Otra característica de esta máquina es

que el sistema inductor se alimenta con corriente continua proporcionada a través de rectificadores estáticos o dinámicos, pudiendo regularse en estos la intensidad y tensión del campo inductor. En las figuras mostradas a continuación pueden ver algunos de los componentes de un generador.



**Generadores síncronos.** Este generador es el comúnmente usado en plantas de generación de energía eléctrica. La máquina más utilizada en generación eléctrica es la máquina trifásica, que agrupa tres bobinas en el inducido en ángulos de 120°. Se producirán así tres ondas de tensión, una en

cada bobina, obteniéndose así la llamada onda trifásica.

En cuanto a velocidades de giro, estas dependen del número de polos en el inductor y de la frecuencia de la corriente de generación. En grandes máquinas lo más frecuente es la utilización de dos polos en el inductor. Al ser la frecuencia de 50 o 60 Hz la velocidad del generador será de 3000 o 3600 rpm, dado que:

$$\text{rpm} = \text{frecuencia} * 120 / \text{número de polos}.$$

### **Generadores de inducción.**

Este tipo de generador es similar al anterior, con la diferencia de que en el sistema inductor los conductores se encuentran unidos en corto asimilándose así a la máquina eléctrica con configuración de “jaula de ardilla”. Otra diferencia fundamental es que la carga del generador es variable con la velocidad de este, siendo su regulación por velocidad. Este tipo de generadores no pueden contemplarse en un sistema aislado ya que estos no son auto excitantes y por tanto deben utilizarse, en paralelo con otros generadores. Se utilizan fundamentalmente acoplados a turbinas secundarias recuperadoras de energía en centrales eléctricas, pero casi nunca como generadores principales. **Sistemas de refrigeración en generadores.** Los sistemas de refrigeración son usados en los generadores para extraer el calor que se produce por la generación de energía eléctrica.

Estas premisas reducen el abanico de opciones a los dos gases que se han usado tradicionalmente; aire o H<sub>2</sub>. De los dos el H<sub>2</sub> presenta mejores propiedades refrigerantes que el aire.

En la actualidad la mayoría de las centrales se abastecen de H<sub>2</sub> (necesario para reponer las pérdidas y para las recargas en períodos de mantenimiento) mediante el suministro externo de gas. Sin embargo, es posible evitarse este suministro externo mediante la instalación de generadores de H<sub>2</sub> “in situ”. Estos generadores evitan el trasiego de H<sub>2</sub> con los riesgos que esto conlleva y además abaratan el precio de este, suponiendo una inversión atractiva con períodos de amortización que según los casos pueden llegar a ser menores de tres años. Aunque se puede generar H<sub>2</sub> mediante el reformado de gas natural, la opción preferida en las centrales es la electrólisis.

Dos tecnologías compiten en la actualidad en este campo: la alcalina y la de membrana de intercambio protónico, siendo esta última la que presenta mayores ventajas en cuanto a la pureza del gas generado, facilidad de mantenimiento y sencillez en la instalación.

Las necesidades de H<sub>2</sub> de un generador eléctrico se deben a los siguientes factores:

- La reposición de las pérdidas de H<sub>2</sub> a través de las juntas del alternador o cualquier otro sitio. Típicamente estas pérdidas son del orden de 18 Nm<sup>3</sup> (tres bombonas diarias) de H<sub>2</sub>

/día para los grupos de generadores de 400 MW o más.

- Conservación de la pureza del H<sub>2</sub> en los valores establecidos de operación (> 99 %) Para garantizar la estanqueidad del generador y evitar que el H<sub>2</sub> pueda fugarse, se hace necesario instalar equipos auxiliares que permitan asegurar el correcto sellado del generador en los extremos de su rotor.

### **Refrigeración con aire**

La tecnología ha permitido que generadores con una potencia de hasta de 150 MW, sean enfriados por aire con agua refrigerada y son llamados TEWC (totally enclosed water to air cooled), este tipo es un sistema de enfriamiento cerrado. El aire circula por dentro del generador y por un intercambiador de calor, donde cede su calor al circuito de agua de refrigeración de la planta. Para pequeños generadores, la refrigeración puede hacerse con aire los cuales son llamados abiertos OV (open ventilated). El tipo OV es el más antiguo, el aire pasa solo una vez por los devanados y se devuelve caliente a la atmósfera. El mayor inconveniente de este sistema es la alta cantidad de impurezas que se depositan en los bobinados, por lo que se debe tener un buen sistema de depuración de aire mediante filtros. Otro problema que presenta este tipo de refrigeración es el ruido que se genera por el movimiento que se le imprime al aire dentro del generador.

### **Refrigeración por hidrógeno.**

La utilización de H<sub>2</sub> como medio refrigerante permite la construcción de generadores más grandes y con más potencia nominal. El H<sub>2</sub> presenta mejores propiedades refrigerantes que el aire debido a:

- Tiene una conductividad térmica siete veces mayor que el aire, lo cual facilita la transferencia de calor.
- Presenta una menor fricción ya que su densidad es del 7% de la densidad del aire, esto produce en una operación más eficiente del generador ya que se reducen las pérdidas. La eficiencia de un alternador por este concepto puede llegar a aumentar en un 0,2%.
- El diseño necesario para el uso del H<sub>2</sub> como refrigerante proporciona a su vez protección intrínseca contra la humedad y la polución (aceite o polvo) que pudieran entrar en el interior del alternador produciendo fallos en el mismo, sin embargo, su uso no está exento de desventajas que deben ser tomadas en cuenta. Los alternadores refrigerados por H<sub>2</sub> necesitan mantener un determinado nivel de presión de este gas, típicamente entre 30 y 80 psig (2,11 kg/cm<sup>2</sup> y 5,6 kg/cm<sup>2</sup>).

La alta conductividad térmica del H<sub>2</sub> favorece la transferencia de calor y su baja densidad reduce significativamente la potencia consumida por el ventilador del generador el cual es el encargado de hacer circular el refrigerante en todo su interior, sin embargo, uno de los mayores

problemas de este tipo de refrigerante es el peligro de explosión dentro del generador por una posible entrada de aire; hay que recordar que con un contenido del 20% a 85% de oxígeno la mezcla es altamente explosiva. Por ello, estos generadores suelen ser equipados con instrumentos que permiten la detección temprana de pequeñas cantidades de oxígeno que hacen de estos generadores unos equipos seguros; de hecho, la mayor parte de los grandes generadores se refrigeran con este gas. Los generadores refrigerados con H<sub>2</sub> son los habituales en las plantas de generación térmica. Los generadores refrigerados por H<sub>2</sub>, deben ser a prueba de explosiones, esto incrementa el costo, ya que la ingeniería es más compleja y el diseño de la planta requiere tomar todas las precauciones del caso.

**Refrigeración por agua e hidrógeno.** Pueden lograrse diseños de generadores aún más compactos mediante el uso de enfriamiento con agua en el devanado estático. El aumento de refrigeración permite una elevación de la corriente del generador, lo que conduce a un mejor rendimiento de este. El agua de enfriamiento circula por dentro de las bobinas huecas del estator. Esta agua es desionizada y se suministra en circuito cerrado con instrumentación en línea y en todo momento se supervisa su conductividad. El calor removido por esta agua es transferido a un intercambiador

de calor cerrado (los fluidos no se mezclan) que utiliza agua del sistema de enfriamiento de la planta.

**Pureza de hidrógeno en el generador.** El H<sub>2</sub> contenido en el generador entra en contacto con todas las partes internas del mismo, así como también con lo que se llama aceite de sello, del cual comentaremos más adelante. Esta condición hace que su pureza disminuya variando significativamente la densidad de este gas y aumentando con ello el trabajo de los ventiladores del rotor del generador. La pureza de H<sub>2</sub> es una de las variables operativas a ser monitoreadas constantemente tanto por instrumentos instalados en línea como por muestras aleatorias tomadas a las bombonas de H<sub>2</sub> compradas a suplidores de este gas. La idea es conocer en todo momento el porcentaje de pureza y tomar las acciones correctivas de ser necesario. En la figura 1 se muestra que con una variación de un 4% (100% a 96%) de la pureza se pueden producir pérdidas que pueden llegar a ser de 600 a 1200 US\$/día, para generadores con potencias comprendidas entre 400 y 800 MW.

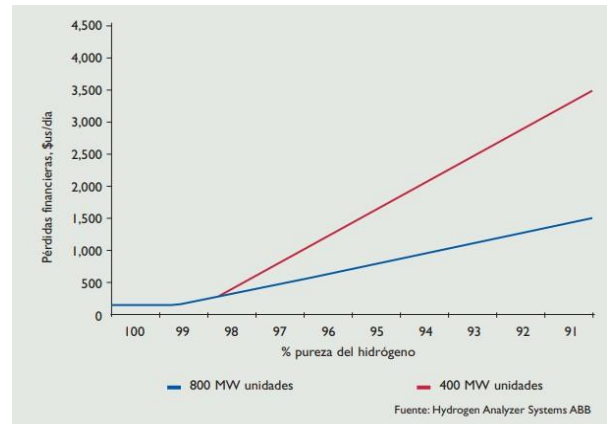


Figura No.1

Con la finalidad de mantener la pureza del H<sub>2</sub>, este gas se hace pasar por un secador, que consiste en una cámara llena con material absorbente llamado alúmina activada. Esta cámara se conecta cruzando los ventiladores del generador, entonces el gas circula a través del secador pudiendo la unidad estar en servicio. El material absorbente puede extraer hasta un litro de agua del H<sub>2</sub>, esto va a depender de la cantidad de H<sub>2</sub> contenida en el generador. Para regenerar el material absorbente, se pone fuera de servicio el secador para esto se cierran las válvulas de entrada y salida de H<sub>2</sub> al secador y se purga el H<sub>2</sub> al tanque de vacío del sistema de aceite de sello. El agua absorbida por la alúmina en el secador una vez que finalice el proceso de secado (3 a 4 h) se drena al medio ambiente como vapor, para ello se hace pasar un flujo de aire caliente proveniente de un elemento calefactor. Un protector termostático del secador controlará la temperatura del secado. El estado del medio secante pudiera determinarse por comparación

de color a través de una mirilla que trae el secador en la parte baja. El color pudiera ser azul claro cuando está seco y gris-rosado cuando está saturado por la humedad. Se debe regenerar el material absorbente cuando este cambie de color azul a gris.

La operación de regeneración del material absorbente es realizada por el personal de operaciones de la planta utilizando para ello el instructivo de este sistema. La otra manera de aumentar la pureza del H<sub>2</sub> dentro del generador es la inyección de H<sub>2</sub> nuevo a través del sistema de bombonas que tiene cada generador.

El generador debe ser a prueba de explosiones, esto incrementa el costo de estos equipos, ya que la ingeniería es más compleja y el diseño de la planta requiere precauciones contra el riesgo de incendio o explosión por H<sub>2</sub>. Aun cuando las estadísticas no muestran muchos casos de incendios o explosiones en generadores que son refrigerados con este gas, hay reportes que indican que han ocurrido explosiones e incendios en este tipo de generadores. En las figuras 2 y 3, se muestran dos generadores que han tenido accidentes con H<sub>2</sub>. En la figura 2, se puede observar cómo quedó un generador después de una explosión en su interior por H<sub>2</sub>, no se ha confirmado la causa del accidente, sin embargo, se maneja la hipótesis que cuando se hacía el barrido de H<sub>2</sub> se introdujo por error aire al generador con todavía presencia de H<sub>2</sub> en su interior. En este accidente se puede ver que el

generador cumplió con el diseño al soportar la explosión.



Figura No. 2

En la figura 3 se muestra un generador que sufrió una explosión en su exterior al producirse una falla en el sistema de aceite de sellos que posibilitó la salida del H<sub>2</sub> al medio ambiente, específicamente a la cabina donde se encuentra los colectores de los anillos de excitación.



Figura No. 3

Es necesario instalar equipos auxiliares que permitan asegurar el correcto sellado de la máquina en los extremos del eje y proporcionar una distribución efectiva del H<sub>2</sub>, una correcta presión de este y una monitorización de su pureza. La elección del H<sub>2</sub> viene determinada por la influencia de estas ventajas e inconvenientes en la operación del alternador.

Para generadores grandes, por encima de 150 MW, el aumento de eficiencia es un factor decisivo que compensa generalmente la complejidad inherente a la refrigeración con este gas, mientras que para alternadores entre 80 y 150 MW la decisión ya no es tan clara y existe margen para uno u otro sistema en función de las características de la central.

Si la elección para la refrigeración del alternador ha sido H<sub>2</sub>, es necesario asegurarse el suministro de este, no sólo para el llenado inicial, sino también para el llenado ante la necesidad de un mantenimiento del generador y la operación diaria de la planta, en tal sentido se debe contar con contratos de empresas proveedoras de H<sub>2</sub> que garanticen un suministro confiable, tanto en cantidad, calidad y presión en las bombonas.

**Sistema aceite de sellos.**

Para garantizar el encapsulamiento del H<sub>2</sub> dentro del generador a presiones que pueden llegar hasta 80 lb/in<sup>2</sup> (5,7 kg/cm<sup>2</sup>) se requiere de un sellado en sus extremos. Uno de los métodos más usados para sellar es un sistema de sellos radiales con aceite. Su principio de funcionamiento se basa en inyectar aceite a través de un sello radial que por un lado está en contacto con el H<sub>2</sub> y por el otro lado con el ambiente, se acostumbra a decir lado aire y lado H<sub>2</sub>. Este aceite produce un cierre hidráulico manteniendo una presión diferencial a través de una válvula de 5 a 8 lb/in<sup>2</sup>

(0,352 a 0,56 kg/cm<sup>2</sup>) por encima de la presión del H<sub>2</sub> dentro del generador. Ver figura 4.

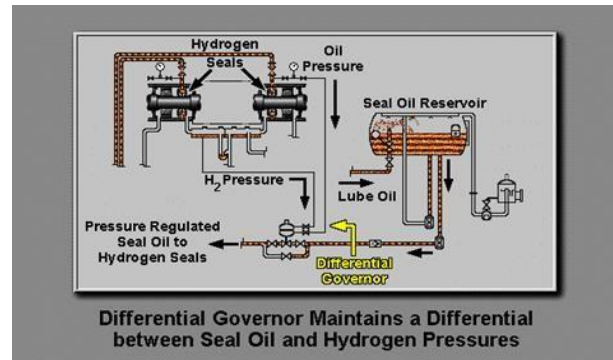


Figura No. 4

En las figuras 5 y 6 se detalla la configuración del sello.

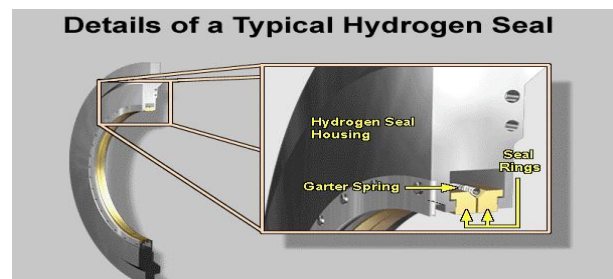


Figura No. 5

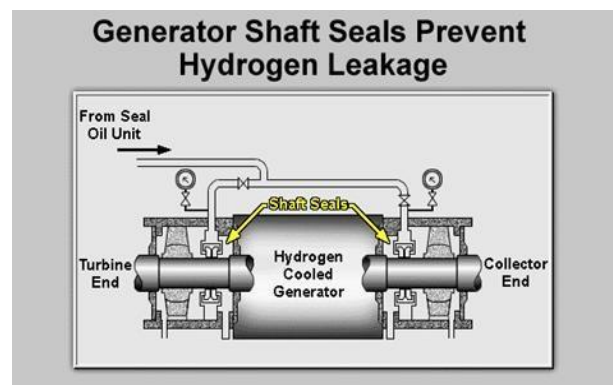


Figura No. 6



El sistema de aceite de sellos cuenta además con dos bombas para el suministro de aceite para el sellado; una de corriente alterna y otra de corriente continua con la finalidad de garantizar un sellado aun cuando se haya perdido la alimentación de corriente alterna. También cuenta con tuberías, instrumentación, válvulas y tanques separadores entre otros, ver figura 7.

En algunas unidades también se puede alimentar el sello de H2 con aceite de lubricación de la turbina, en la figura 8, se puede apreciar un sistema como este.

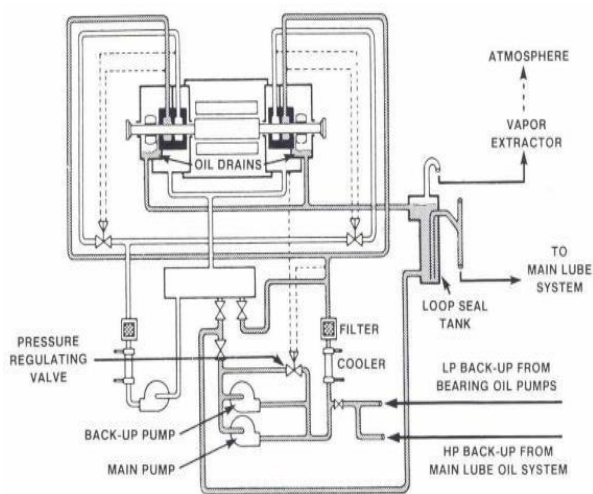


Figura No. 7

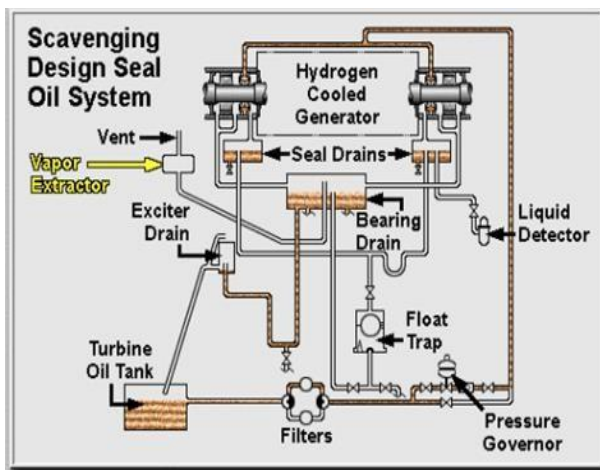


Figura No. 8

## Barrido de hidrógeno

Se conoce en el argot de operadores de plantas, al barrido de H2 del generador como una operación para desalojar todo el H2 contenido en el mismo para realizar algún tipo de inspección en su interior (programada o de emergencia). Los fabricantes de generadores eléctricos resaltan dentro de sus recomendaciones en el mantenimiento a estos equipos, una inspección mayor cada 48.000 a 50.000 horas de funcionamiento. Dentro de estas inspecciones se detallan las pruebas de ensayos no destructivos tales como inspección visual a todos los componentes internos y pruebas de ultrasonido a los anillos del generador (retaining ring), limpieza, revisión de cuñas de las bobinas estáticas e inspección y medición del ajuste del sello de H2, entre otros. Para poder hacer el mantenimiento mayor a un generador que tenga un sistema de refrigeración con H2 o agua e H2 se necesita hacer una parada de la unidad, esperar que la temperatura del rotor de la turbina sea menor a 150 °C (3 o más días) para poder poner fuera de servicio el sistema de rotación lenta (giro lento o turning gear) y el sistema de aceite de lubricación. El sistema de aceite de sello continuará en servicio hasta que sea completado el barrido. El personal de mantenimiento u operaciones efectuará el barrido del H2 del generador el cual se hará utilizando un gas inerte como el CO2. Para realizar este barrido se deberá contar con personal entrenado, con equipos de

medición de pureza, concentración de H<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>, reguladores de presión y bombonas de CO<sub>2</sub>. En las figuras 9 y 10 se puede observar un ejemplo de la disposición de las bombonas de CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub> y parte del proceso del barrido.

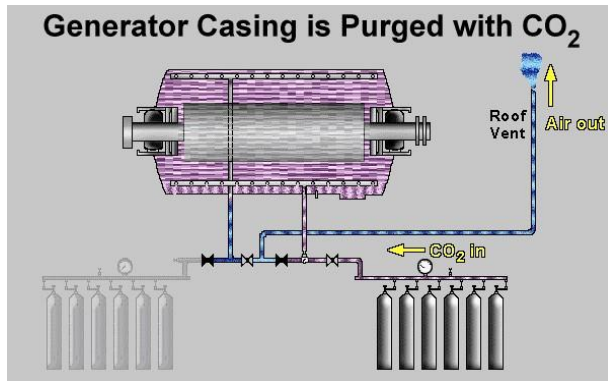


Figura No. 9

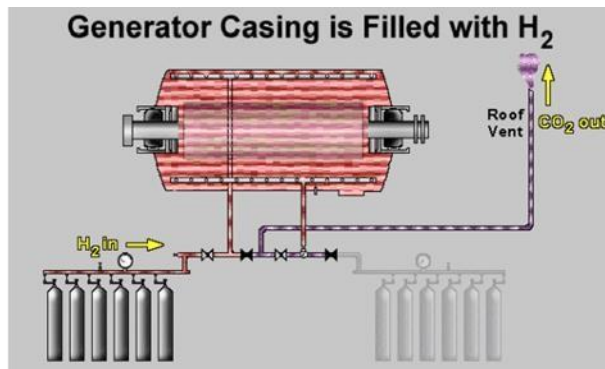


Figura No. 10

El H<sub>2</sub> se consigue en bombona con una presión de 162 Kg/cm<sup>2</sup> (2.300 lb/in<sup>2</sup>). Estas bombonas se encuentran colocadas en un rack, donde también se encuentran las bombonas de CO<sub>2</sub>; todas las bombonas se encuentran operativas, amarradas y además reunidas en un puesto de reducción de presión situada en el mismo local. La presión de reducción de las bombonas de H<sub>2</sub> oscila entre 0.5 y 6 Kg/cm<sup>2</sup>, mantenida por dos válvulas reductoras, una en servicio, mientras que la otra se encuentra dispuesta para entrar en servicio

cuando se requiera. Estas válvulas están previstas para llenar el generador con H<sub>2</sub> y para cubrir las pérdidas de este que se presenta durante el servicio. Esta presión deberá estar siempre arriba de la presión barométrica, para evitar toda entrada de aire al circuito que pudiera mezclarse con el H<sub>2</sub>.

Se recomienda tener en el rack de bombonas, un número de bombonas de CO<sub>2</sub>, que permita hacer un barrido de emergencia. Igualmente se recomienda que todas las bombonas, tanto CO<sub>2</sub> como H<sub>2</sub>, estén sujetas a la estructura del rack.

### Cantidad de bombonas de CO<sub>2</sub> requeridas para barrer el hidrógeno de un generador

Es importante tener suficiente gas inmediatamente disponible para purgar con dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) el H<sub>2</sub> del generador. Una bombona típica de CO<sub>2</sub>, cuando está totalmente cargada, tiene 50 lb (22.7 kg) de CO<sub>2</sub>, cuando se expande y calienta al ambiente dentro del generador, la bombona típica tiene 435 pies cúbicos (12.3 m<sup>3</sup>) de gas. De este gas, una fracción, X, está disponible antes que la bombona sea removida del distribuidor. Si la bombona no es removida, X = 1. La fracción X puede ser inferior a 1 por el CO<sub>2</sub> que se congela en el fondo de la bombona. Debido a que alguna mezcla de gas ocurrirá durante el purgado, se requiere dos veces la cantidad de CO<sub>2</sub> en bombonas para purgar el hidrógeno. El número de bombonas de CO<sub>2</sub> = 2 \* volumen del

generador/(x \* volumen de gas en una bombona).

Ejemplo: Para un generador de 2.800 ft<sup>3</sup> (80 m<sup>3</sup>) y una bombona originalmente a 32°F (0°C) para lo cual X = 0,64, entonces el número de bombona será  $2 * 2.800 / (0,64 * 435) = 20$ , lo cual corresponde a la cantidad de bombona de CO<sub>2</sub> requeridas para estar disponibles en el caso de un purgado de emergencia.

Es recomendable la utilización únicamente de bombonas que descarguen la fase de vapor CO<sub>2</sub>. Las bombonas que tienen un tubo sifón para que descarguen líquido, o bombonas con el puerto de descarga en la parte de abajo para descargar líquido, no deben utilizarse en el generador. El CO<sub>2</sub> líquido, al cambiar de fase es extremadamente frío y puede afectar adversamente las soldaduras en las tuberías. También, forma fácilmente CO<sub>2</sub> sólido luego de que la presión cae en una restricción de flujo y potencialmente bloquea la tubería.

### **Cálculo de la cantidad de bombonas de hidrógeno para purgar el CO<sub>2</sub> y llenar el generador**

Una bombona típica de H<sub>2</sub> tiene cerca de 239 pies<sup>3</sup> (6,77 m<sup>3</sup>) de H<sub>2</sub> utilizable cuando se calienta a la temperatura ambiente dentro del generador. Debido a que alguna mezcla de gas ocurrirá durante el purgado, se requerirá dos veces la cantidad de H<sub>2</sub>.

El número de bombonas de purga =  $2 * \text{volumen del generador} / \text{volumen de gas de una bombona}$ . Se requerirán bombonas adicionales de H<sub>2</sub> para presurizar el generador. Una cantidad conservadora es: número de bombona para llenado =  $N * (\text{volumen del generador} / \text{volumen de gas})$  en una bombona, donde N se puede seleccionar de la siguiente tabla.

N	Presión del Generador kg/cm <sup>2</sup>	Presión del Generador kg/cm <sup>2</sup>
1	1	14,2
2	2	28,4
3	3	42,6
4	4	56,8
5	5	71

El número total de bombonas de H<sub>2</sub> que deberían estar disponibles antes de introducir este gas dentro del generador es igual al número de bombona para purgado más el número de bombona para llenado. Ejemplo: para purgar y presurizar un generador de 2.800 pies<sup>3</sup> (80 m<sup>3</sup>) a 60 lb/in<sup>2</sup> (4 kg/cm<sup>2</sup>), debería haber  $2 * (2.800/239) + 4 * (2.800/239) = 70$ , lo cual corresponde al número de bombonas que se deben tener disponibles.

## Bombona de H<sub>2</sub>

Una bombona de H<sub>2</sub> tiene 239 ft<sup>3</sup> a condiciones normales (6,77 m<sup>3</sup>), de estos 6,77 m<sup>3</sup> cerca de 200 ft<sup>3</sup> (5,7 m<sup>3</sup>) son utilizables porque la presión decae durante la descarga. A 70°F (21°C) la presión dentro de la bombona es 2.300 lb/in<sup>2</sup> (162 kg/cm<sup>2</sup>).

Por razones de seguridad, se recomienda minimizar el número de bombonas activas de H<sub>2</sub> en el colector de la unidad y no abrir las válvulas de las bombonas de H<sub>2</sub> antes de ser conectadas a un regulador distribuidor, dado que puede ocurrir “autoignición”.

Una vez verificado que se ha desalojado todo el H<sub>2</sub> del generador a través del CO<sub>2</sub> (*se debe estar seguro que no hay presencia de H<sub>2</sub> en el generador*), se procederá a la inyección de aire seco para expulsar todo el CO<sub>2</sub>. Luego se presurizará el generador a 5 lb/in<sup>2</sup> (0,35 kg/cm<sup>2</sup>), quedando en condiciones para comenzar su mantenimiento.

En cada planta en donde los generadores sean refrigerados por H<sub>2</sub> o H<sub>2</sub> más agua, deberán contar con sus instructivos de operación para el barrido del generador, así como también todas las normas en materia de seguridad que rigen para estos procedimientos.

## Referencias bibliográfica

- ABB, “Hydrogen Analyzer System”, [www.abb.com](http://www.abb.com). Ayoub M. Kazim: “Exergetic efficiency of a PEM electrolyser at various operating temperatures”. Int. J. Exergy, Vol. 1, No. 1, 2004. Electric Energy On-Line, News, [www.electricenergyonline.com](http://www.electricenergyonline.com), 2004. EPRI CT Center [www.eprictcenter.com](http://www.eprictcenter.com). Larminie, J. Dicks A.: “Fuel Cell System Explained”. Wiley New York. Peavy M.A.: “Fuel From Water”. Merit Inc Louisville. Sensidyne, Inc.: “New gas sensors simplify power plant gas detection”, [www.sensydine.com](http://www.sensydine.com)

- Refrigeración de alternadores con hidrógeno producido mediante electrolizadores tipo PE

Ingeniero Agustín Delgado Martín