

# BES Quiz #1: Efectos de la variación de frecuencia de operación en sistemas BES

## BES Quiz #1

Se tiene un sistema BES (ESP) con un motor de 100 hp el cual se encuentra actualmente cargado al 90% y operando a 50 Hz.

Si se aumentara la frecuencia de operación de 50 a 60 Hz, ¿Cuál será la potencia entregada por el motor?

- A. 100 HP
- B. 120 HP
- C. 156 HP

## Solución

Antes de comenzar es necesario aclarar que para la resolución de este problema se va a realizar una “simplificación” que tiene que ver con no considerar al sistema BES como parte del pozo, pues al cambiar la frecuencia de operación se generará un nuevo punto de equilibrio entre el reservorio (curva IPR), la cañería (curva VLP) y la nueva curva de la bomba (dadas por las leyes de afinidad). Como el objeto de este ejercicio es tratar la interacción entre la bomba y el motor, se optó por tomar esta simplificación.

La aclaración del primer párrafo es importante ya que deja en claro el objetivo de este ejercicio: Estudiar la interacción entre el motor y la bomba de un sistema BES. Y para entender esta interacción, es importante primero dejar en claro algunos conceptos fundamentales respecto a los motores eléctricos.

### **La potencia de un Motor:**

---

Supongamos que tenemos un motor que tiene pegado una etiqueta que dice “100 HP”. ¿Qué significa esto? Que el motor diga “100 HP” nada tiene que ver con que el motor nos entregue dicha potencia, pues el mismo nos puede entregar más o menos. De hecho, **la potencia que va a entregar un motor es siempre la potencia “requerida”** (o sea la que nosotros le pidamos en la punta del eje).

Es así que si movemos una maquinaria que requiere 50 HP, el motor entregará 50 HP, si la maquinaria le pide al motor 100 HP, el motor brindará los 100 HP, y si ahora le pido al motor 150 HP...¡sí, el motor entregará 150 HP! Esto se cumple independiente de si mi motor es un motor de 80, de 100 o de 130 HP.

Entonces, una vez más... ¿Qué significa que el motor es de 100 HP? Lo que significa esta “etiqueta” es que, si nosotros le solicitamos al motor hasta 100 HP, este podrá entregar la potencia requerida en forma confiable (sin que se produzca una falla). Entonces, si a mi motor de 100 HP le pido 50, el mismo entregará 50 HP, y si le pido 100 HP, este entregará 100 HP. Ahora, si a mi motor de 100 HP le solicito 130 HP, este (como dijimos antes) entregará la potencia solicitada, o sea 130 HP. Como esta potencia solicitada es mayor a la potencia “de la etiqueta del motor”, esto significa que si bien el motor entregará estos 130 hp solicitados, no lo hará en forma confiable. Lo que sucederá es que, para poder entregar esta potencia, el motor comenzará a tomar más corriente de la red. Y al consumir más corriente se comenzará a calentar el bobinado hasta que el mismo falle por alta temperatura (si es que no ocurre antes alguna otra falla mecánica como por ejemplo una rotura de eje). Es aquí cuando las protecciones del motor debieran, justamente, protegerme el motor para evitar que este daño ocurra. Y la protección más usual para este escenario es la de sobre-corriente. De hecho, un concepto que es importante tener en cuenta es que junto con la potencia del motor, en la etiqueta también encontraremos la corriente nominal. Esta corriente es la que el motor pedirá a la red cuando el mismo esté cargado al 100%, o sea cuando al motor se le pida la máxima potencia que este puede entregar en forma segura. Si le solicitamos más potencia, entonces la

corriente que el motor tomará de la red para poder entregar esa potencia solicitada superará el valor de corriente nominal (¡y los problemas comenzarán!).

Habiendo analizado ya el comportamiento del motor en función de la demanda de potencia, ahora si podemos analizar que sucede con nuestro equipo electro-sumergible.

Al modificar la frecuencia de operación en un sistema BES, este cambio tendrá un efecto tanto en el motor como en la bomba. Para poder entenderlos, vamos a explicar primero qué sucede en el motor, luego qué sucede en la bomba y finalmente qué sucede en mi sistema bomba-motor.

### **Efecto de la variación de frecuencia en el motor.**

---

Al variar la frecuencia de alimentación de un motor de inducción, el efecto que logramos (el efecto buscado) es que el mismo gire más rápido o más lento en función de este cambio. El cambio de velocidad será proporcional al cambio de frecuencia. Esto significa que, si aumentamos un 20% la frecuencia (de 50 a 60 Hz. por ejemplo) el motor pasará a girar aproximadamente un 20% más rápido<sup>1</sup>.

***Nota 1:** Lo que varía en forma lineal es lo que se conoce como velocidad de sincronismo. La velocidad real será algo más lenta que la de sincronismo, de acuerdo a la demanda de potencia. La diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad real es lo que se conoce como “resbalamiento”.*

Pero la variación de velocidad no es el único efecto que nos encontraremos al modificar la frecuencia de operación. La “potencia” del motor (aquel valor que el fabricante estableció como seguro operar) también se va a ver afectada por el cambio de frecuencia.

Ahora, si todos sabemos que  $Pot = I * V * cte.$ , ¿cómo es posible que al cambiar la frecuencia de operación cambie la potencia que puede entregar el motor (en forma confiable)?

La respuesta está en que, cuando variamos la frecuencia, también variamos en forma proporcional el voltaje de alimentación. Es por eso que en los variadores de frecuencia - *Variable Speed Drive* o VSD en inglés- se configura una “rampa de voltaje” para que, al modificar la frecuencia de operación, modifique al mismo tiempo el voltaje de salida.

La razón por la que se debe modificar la tensión al variar la frecuencia es porque existe una relación entre la velocidad de giro y la cantidad de flujo magnético que puede manejar un motor. Y si nosotros por ejemplo disminuimos la frecuencia de operación, como el motor girará más despacio, el mismo se saturará magnéticamente al menos que disminuyamos en la misma proporción la tensión de alimentación.

Al alimentar el motor con menos tensión, entonces la potencia que ahora este puede entregarnos en forma segura disminuirá también proporcionalmente al cambio de frecuencia, pues con menos demanda de potencia llegaremos al valor de la corriente nominal.

Veamos esto último en un ejemplo: Imaginemos que tenemos un motor asincrónico cuyos datos son los siguientes:

- Potencia: 2 HP (@ 50 Hz)
- Tensión: 220 V
- Corriente: 6,5 A

Ahora si yo le coloco un variador de frecuencia y disminuyo un 10% la misma (de 50 a 45 Hz), entonces para no saturar magnéticamente al motor **debemos disminuir en la misma proporción la tensión de alimentación, pasando de 220V a 198V**

Sabemos que la corriente máxima que puede manejar este motor es de 6,5 A, **independiente a la frecuencia que esté operando** (recordemos que la generación de calor en el bobinado dependerá de la corriente que está circulando, por eso es que no debemos nunca dejar que la demanda de corriente del motor supere al valor de corriente nominal si queremos evitar que el mismo se dañe).

Si ahora estamos alimentando a nuestro motor con 198 V y 45 Hz, ¿qué potencia solicitada en la punta del eje hará que el motor llegue a tomar el valor de corriente máxima (los 6.5 Amp.)?

Utilizando nuestra vieja ecuación  $Pot = I * V * cte$ , podemos hacer una relación entre la condición de operación a 50 y a 45 Hz.

$$\frac{Pot_{Max@50}}{Pot_{Max@45}} = \frac{I * V_{50} * cte_{50}}{I * V_{45} * cte_{45}}$$

La constante que aparece en estas ecuaciones tiene que ver con el factor de potencia ( $\cos\phi$ ), la eficiencia del motor, el cambio de unidades de Watt a HP y el " $\sqrt{2}$ " ó " $\sqrt{3}$ " dependiendo de si estamos utilizando corriente monofásica o trifásica. Asumiendo que esta constante no cambiará al variar la frecuencia (lo que es bastante real en un cierto rango de aplicabilidad) podemos cancelarla a ambos lados de la ecuación. Respecto a la intensidad (corriente), en ambos casos la intensidad máxima que puedo manejar es la misma, y tiene que ver con cuanta corriente puede manejar el bobinado sin "quemarse" (corriente de placa). Por ende, también la podemos simplificar.

Entonces:

$$\frac{Pot_{Max@50}}{Pot_{Max@45}} = \frac{I * V_{50} * cte_{50}}{I * V_{45} * cte_{45}}$$

$$Pot_{Max@45} = Pot_{Max@50} \frac{V_{45}}{V_{50}} = 2 \text{ HP} * \frac{198 \text{ V}}{220 \text{ V}} = 1.8 \text{ HP}$$

Esto significa que la potencia máxima que podemos solicitarle a este motor en forma segura cuando lo estemos operando a 45 Hz (10% menos que lo indicado en la placa) y por ende alimentándolo con 198V para evitar su saturación magnética (10% menos que lo indicado en la placa) es de 1.8 HP (10% menos que lo indicado en la placa).

De manera análoga, podemos aplicar este mismo razonamiento cuando aumentamos la frecuencia de operación de un motor.

5.40" / 137.16 MM O.D.					6 5/8" / 168.28 MM O.D. or Larger Casing					
H.P.		VOLTS		AMPS	PART NUMBER		LENGTH		WEIGHT	
60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz		Upper Tandem	Center Tandem	Ft.	M	Lbs.	Kgs.
120	100	855	712	88	111840	111991	18.7	5.70	1232	558.84
		1030	858	73	111841	111992				
		1295	1080	59	111842	111993				
		2165	1803	33	111843					

*Del catálogo de WoodGroup. Notar como el motor de 100 HP @50 Hz se comporta como un motor de 120 HP si lo utilizo a 60 Hz. Claro está que la tensión con la que tengo que alimentar a este motor la deberé variar en forma proporcional a la variación de frecuencia. Notar también que, sin importar a que frecuencia opere el motor, la corriente nominal (corriente máxima que puede tolerar el motor) es siempre la misma.*

En resumidas cuentas, podemos decir que la potencia máxima que podemos solicitarle a un motor (Motor Horsepower o MHP) varía en forma proporcional a la variación de frecuencia.

$$MHP_2 = MHP_1 * \frac{Hz_2}{Hz_1}$$

**Efecto del cambio de frecuencia en la bomba.**

Como bien mencionamos antes, al cambiar la frecuencia de operación en un sistema BES, vamos a lograr en un primer momento que el motor gire más rápido o más lento. Este cambio de velocidad será proporcional al cambio de frecuencia como ya mencionamos.

Entonces, el efecto inmediato que vamos a observar en la bomba es que los impulsores de la misma girarán a una velocidad diferente.

Lo que ocurre con una bomba centrífuga cuando variamos su velocidad de giro lo podemos describir a través de lo que se conoce como las "Leyes de Afinidad":

Para explicar lo que ocurre, podemos tomemos un punto cualquiera de la curva TDH de la bomba (o varios...):

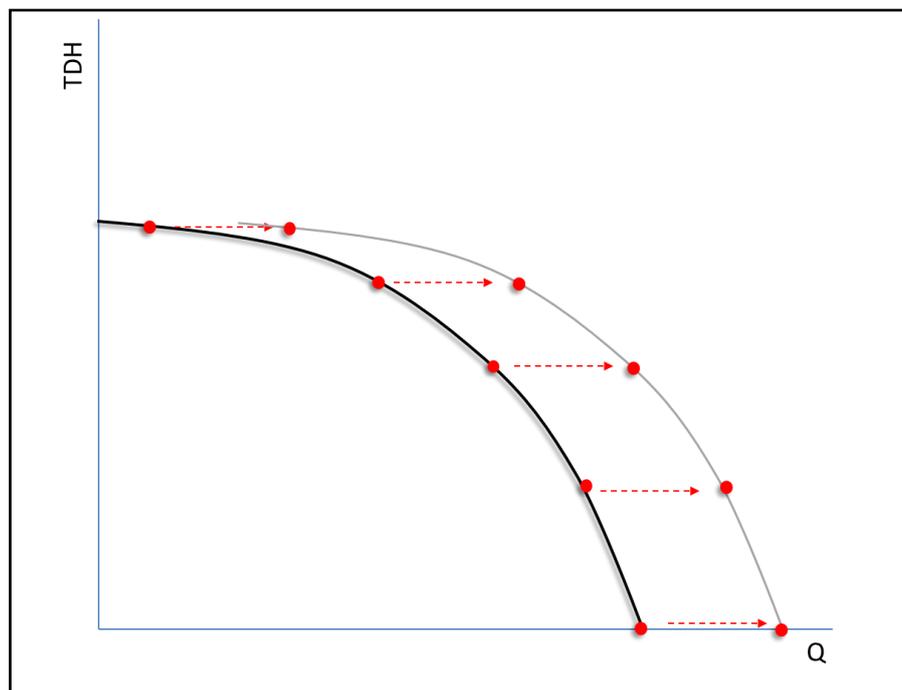
**Primer Ley de Afinidad:**

Lo que nos dice la primera ley de afinidad es que el caudal se desplazará en forma lineal con el cambio de velocidad.

$$Q_2 = Q_1 * \left( \frac{RPM_2}{RPM_1} \right)$$

O lo que es lo mismo:

$$Q_2 = Q_1 * \left( \frac{Hz_2}{Hz_1} \right)$$



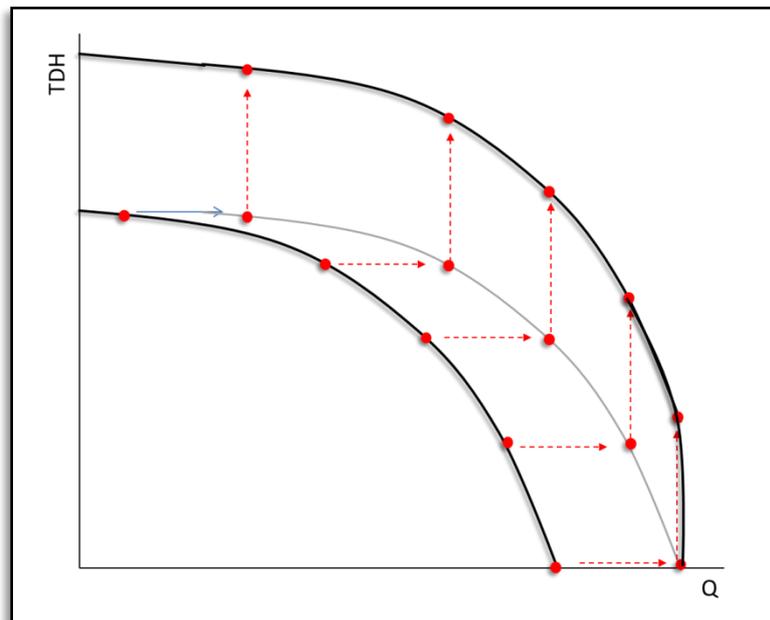
**Segunda Ley de Afinidad:**

La segunda ley de afinidad, postula que el levantamiento cambiará en forma cúbica el cambio de frecuencia.

$$H_2 = H_1 * \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right)^2$$

O lo que es lo mismo:

$$H_2 = H_1 * \left(\frac{Hz_2}{Hz_1}\right)^2$$



En definitiva, si aumentamos la velocidad de giro, toda la curva de la bomba se desplazará hacia derecha y hacia arriba. O sea, la bomba básicamente se comportará como si fuera una “bomba más grande”. De manera análoga, si disminuyéramos la velocidad de rotación entonces la bomba se comportará como una bomba más pequeña.

**Tercera Ley de Afinidad**

Esto hasta aquí es “demasiado bueno”: Tiene que haber una trampa. Y la trampa esta justamente en la tercera ley de afinidad, la cual establece que la potencia requerida (en inglés conocida como “*Break Horsepower*” o por su acrónimo BHP) aumentará **en forma cúbica** respecto al aumento de velocidad.

$$BHP_2 = BHP_1 * \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right)^3$$

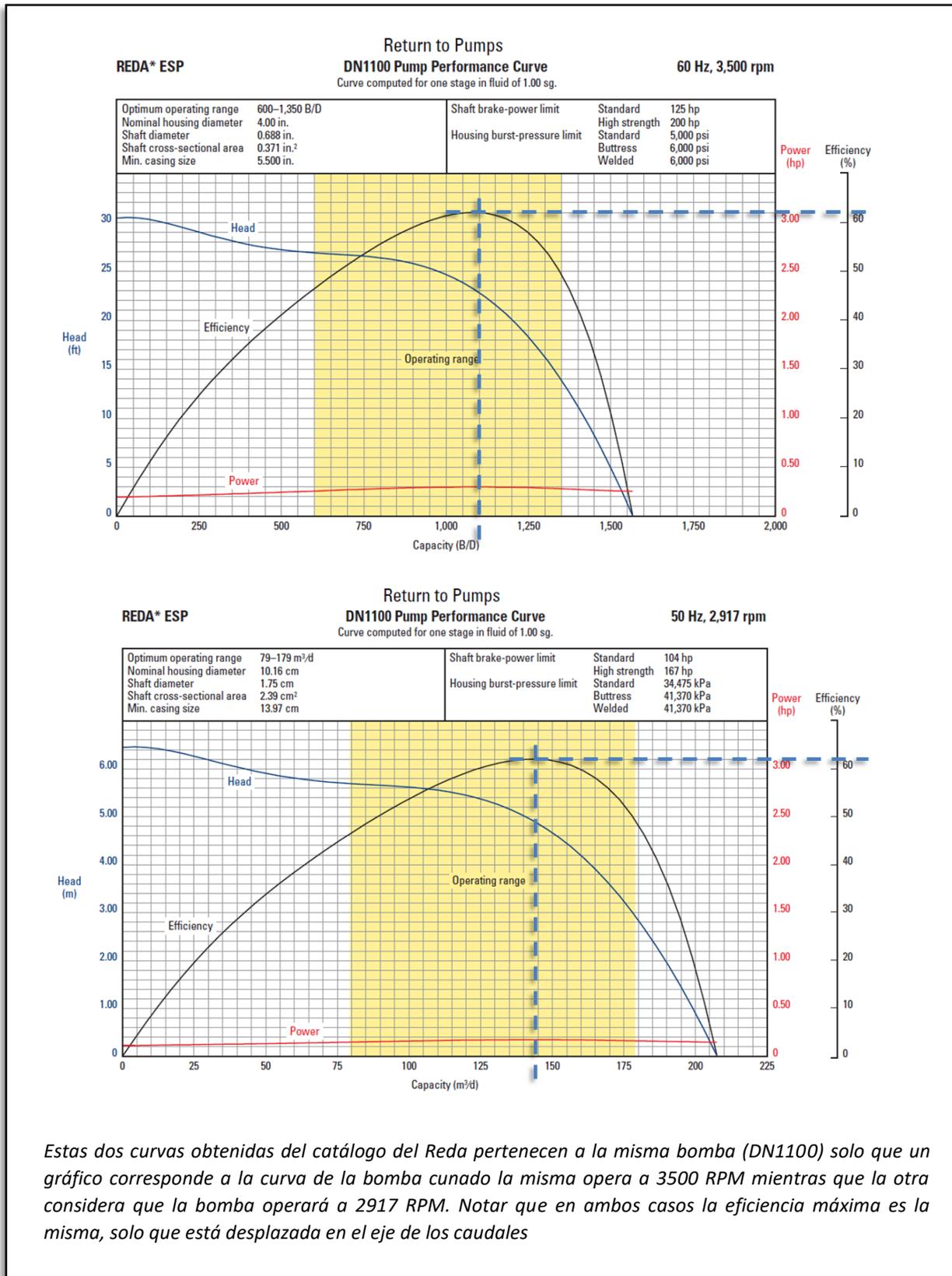
O lo que es lo mismo:

$$BHP = BHP_1 * \left(\frac{Hz_2}{Hz_1}\right)^3$$

Esta tercera ley en realidad es fácil de comprender al mirar las otras dos leyes, pues si consideramos que podemos expresar la potencia hidráulica de la bomba de la siguiente manera...

$$HP_{hid} = Q * TDH * \delta * cte.$$

...entonces es lógico de suponer que si incrementamos el caudal en forma lineal y la altura en forma cuadrática, la potencia hidráulica debiera de incrementar en forma cúbica. Algo interesante a remarcar es que los valores de eficiencia no cambian, tan solo se desplazan a lo largo del eje de los caudales. O sea, si tenemos una bomba operando a unas 2957 RPM (velocidad de un motor de inducción bipolar @ 50 Hz. considerando un 3% de resbalamiento) cuyo punto de mayor eficiencia (conocido como BEP por su acrónimo en inglés: *Best Efficiency Point*) es de 62% @145 m<sup>3</sup>/d, al operar la bomba a 60 Hz la eficiencia en el BEP será exactamente la misma (62%) solo que ahora este punto ya no se encontrará a los 145 m<sup>3</sup>/d, sino que se desplazará hacia la derecha en forma lineal con el aumento de frecuencia, o sea que ahora encontraremos al BEP @174 m<sup>3</sup>/d <sup>(2)</sup>



Estas dos curvas obtenidas del catálogo del Reda pertenecen a la misma bomba (DN1100) solo que un gráfico corresponde a la curva de la bomba cuando la misma opera a 3500 RPM mientras que la otra considera que la bomba operará a 2917 RPM. Notar que en ambos casos la eficiencia máxima es la misma, solo que está desplazada en el eje de los caudales

**Nota 2:** El "1100" del nombre de esta bomba nos indica el caudal donde encontraremos el BEP, cuando la bomba esté girando a unas 3500 RPM, velocidad de rotación de un motor de inducción bipolar trifásico @ 60 Hz considerando un 3% de resbalamiento.

## Interacción Bomba-Motor frente a una variación de frecuencia.

Hasta aquí hemos estudiado por separado los efectos del motor y de la bomba cuando realizamos un cambio de frecuencia. Ahora nos resta entender como interactuarán estos dos sistemas entre sí, pues los mismos están íntimamente vinculados a través de una serie de ejes.

En nuestro ejemplo planteamos que teníamos un motor de 100 HP cargado al 90%. Esto significa que la bomba le estaba solicitando una potencia igual al 90% de la potencia máxima que el motor podría suministrar: La bomba le está pidiendo al motor 90 HP.

Ahora, al llevar la frecuencia de 50 a 60 hz., estamos incrementando la misma en un 20%. Y como planteamos antes, si aumentamos la frecuencia, la potencia máxima que podemos solicitarle al motor aumentará en forma lineal con el aumento de frecuencia. Esto significa que a esta nueva frecuencia de operación podremos pedirle al motor hasta 120 HP (¡siempre y cuando el variador haya podido aumentar la tensión de alimentación en la misma proporción!).

Pero no tenemos que olvidarnos que **el motor siempre entregará la potencia que se le pide**, y en este caso quien le está pidiendo potencia al motor es la bomba. Y la demanda de potencia de la bomba aumentará en forma cúbica con el aumento de frecuencia según lo establecido en la tercera ley de afinidad.

Es entonces que la demanda de potencia (y por ende lo que el motor entregará) será:

$$BHP_2 = \left(\frac{Hz_2}{Hz_1}\right)^3 * BHP_1 = \left(\frac{60 \text{ Hz}}{50 \text{ Hz}}\right)^3 * 90 \text{ HP} = 156 \text{ HP}$$

Claro está que el motor no será capaz de entregar esta potencia de forma confiable (recordemos que a 60 Hz. el motor puede entregar en forma segura como máximo 120 HP), pues para poder entregar esta potencia que la bomba le demanda, lo que hará el motor es comenzar a consumir más corriente que la que puede manejar (establecida por la corriente de placa). Esto redundará en una excesiva generación de calor en el estator y una probable falla prematura (al menos que actúen la protección por sobretensión del motor, en cuyo caso el mismo se detendrá... ¡siempre y cuando estas protecciones estén bien configuradas y activadas!).

Es muy importante entender que **nosotros no podemos limitar o controlar la potencia que el motor entregará**: Una vez más, el motor entregará la potencia que le pida la bomba. Entonces, la única forma de lograr que el motor entregue menos potencia que la máxima que puede entregar, es haciendo que la bomba le pida menos potencia al motor, y esto lo lograríamos justamente **no aumentando los Hertz** (al menos no tanto). Lo que en todo caso podríamos hacer es encontrar la frecuencia en donde la potencia requerida por la bomba iguale a la potencia máxima que el motor puede entregar. Y para eso podemos igualar las ecuaciones de potencia del motor y de la bomba:

$$MHP_2 = MHP_1 * \left(\frac{Hz_2}{Hz_1}\right)^1$$

$$BHP_2 = BHP_1 * \left(\frac{Hz_2}{Hz_1}\right)^3$$

Como lo que queremos hallar es el punto en donde estas dos potencias se igualan, entonces planteamos que:

$$BHP_2 = MHP_2$$

Obteniendo finalmente la siguiente ecuación:

$$MHP_1 = BHP_1 * \left(\frac{Hz_{max}}{Hz_1}\right)^2$$

Despejando Hz<sub>2</sub> obtenemos:

$$Hz_{max} = \sqrt{\left(\frac{MHP_1}{BHP_1}\right) * Hz_1^2}$$

Reemplazando:

$$Hz_{max} = \sqrt{\left(\frac{100 \text{ HP}}{90 \text{ HP}}\right) * 50 \text{ Hz}^2} = 52,7 \text{ Hz}$$

Podemos observar que a esta frecuencia, la potencia que la bomba le solicitará al motor (105,4 HP) será exactamente igual a la potencia máxima que el motor nos puede entregar (105,4 HP)

