ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Departamento de Ingeniería Mecánica

Presentación del Informe Técnico

"SELECCION DE EQUIPOS DE BOMBEO PARA EDIFICIOS DE ALTURA"

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO MECANICO

Presentado por:

WILSON WILCHES

Guayaquil - Ecuador

1989

A G R A D E C I M I E N T O

Al ING.IGNACIO WIESNER
Director de Informe Técnico, por su ayuda y colaboración para la realización de este trabajo.

D E D I C A T O R I A

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MI ESPOSA

DECLARACION EXPRESA

Declaro que:

" Este Informe Técnico corresponde a la resolución de un problema práctico relacionado con el perfil profesional de la Ingeniería Mecánica "

(Reglamento de Graduación mediante la elaboración de informes técnicos)

Wilson René Wilches Alvear

.....

ING.NELSON CEVALLOS
Decano

.....

ING.IGNACIO WIESNER
Director de Informe Técnico

.....

ING.EDUARDO ORCES
Miembro Del Tribunal

RESUMEN

Mi objetivo en este informe es el de presentar el problema de la selección de equipo de bombeo en una aplicación concreta como son los edificios de altura y hago una comparación del funcionamiento, consumo de energía y costos de los sistemas que se utilizan.

En el primer capítulo defino los parámetros hidráulicos necesarios de conocer y la forma de calcularlos de acuerdo al sistema que se piensa instalar, esto es sistemas de elevación con hidroneumático para los pisos superiores, un solo hidroneumático ubicado en la parte baja del edificio o sistemas denominados de presión constante con tres bombas funcionando en paralelo proporcinando entre las tres el caudal pico necesario y funcionando una sola en las horas de menor consumo.

En el segundo capítulo describo el funcionamiento de los diferentes sistemas y pongo especial énfasis en el cálculo de los tanques hidroneumáticos y la diferencia entre dos tipos de estos: los tanques sin precarga de aire inicial y aquellos con precarga de aire. Se visualiza el trabajo de los tanques con presiones atmosféricas diferentes como son el caso de Guayaquil y Quito, por lo cual el volumen útil de los tanques varía aunque su volumen total es el mismo.

Luego; hago una estimación del consumo de energía y eficiencia para cada sistema.

En el tercer capítulo selecciono el equipo que fue instalado en el edificio SKIROS de la ciudad de Quito y comparo en cotos y consumo de energía con los otros sistemas que pudieron haber sido seleccionados.

Al final presento las conclusiones que resultan del informe en las que se indica las ventajas y condicionantes para la selección de cualquier sistema, considerando tres aspectos básicos que son: diseño del edificio, consumo de energía y costos del sistema.

I N D I C E G E N E R A L

I N D I C E D E A B R E V I A T U R A S

Ee= Consumo de Energía por Funcionamiento
Er= Consumo de Energía durante los arranques
Et= Consumo de Energía Total
Eu= Energía útil
Hm= Altura dinámica total
K = Consumo de agua promedio diario
k = Coeficiente de rugosidad absoluto
N = Número de arranques diario de los equipos
n = Eficiencia
P = Presión absoluta
Pa= Presión atmosférica
Pg= Presión monométrica
Pg= Presión de precarga
Pot=Potencia nominal consumida
Q = Caudal
Re= Número de Reynolds
Vh= Volumen de agua
Vu= Volumen útil
Vt= Volumen del tanque
Z = Altura estática

I N D I C E D E F I G U R A S

ANTECEDENTES

Debido a la gran cantidad de construcciones de edificios de altura, aunque disminuida en relación a años anteriores, ya sea para apartamentos, oficinas u otra aplicación especialmente en la ciudad de Quito que es donde ha estado mi mayor experiencia, ha sido cada vez más necesario proveer al constructor, de equipos de bombeo de agua de buena calidad y de operación sencilla y eficiente pero que satisfagan las necesidades existentes mediante una adecuada selección del equipo.

Cuando inicialmente visité algunos edificios en Quito debido a que los encargados del mantenimiento del edificio se quejaban del excesivo recalentamiento de los motores; concretamente puedo citar dos edificios como el edificio ATRIUM y COLEGIO AMERICANO DE QUITO, pude observar que se estaban utilizando sistemas hidroneumáticos para la provisión de agua pero se escogían y dimensionaban los tanques sin ningún criterio técnico lo cual me llevó a investigar cuales eran los parámetros, primeramente para el hecho de haber seleccionado sistemas hidroneumáticos y luego para haber dimensionado tanques con tales o cuales medidas.

Algo que sucedía en estos sistemas era el arranque frecuente de los equipos, para lo cual había que buscar una solución aumentando el rango de trabajo de los sistemas, esto se lo podía hacer de dos maneras, una era aumentando el número y tamaño de los tanques y la otra aumentar el volumen útil de los tanques precargándolos con aire a presión inicial.

La razón del porqué esta última alternativa sería una solución y como seleccionar esa presión inicial se explica en este informe, detallando sobre el funcionamiento de estos equipos y visualizando como se puede economizar energía con una adecuada selección de los tanques.

El informe va mas allá determinando cuáles son los sistemas además de los hidroneumáticos que se pueden utilizar para la provisión de agua en edificios y cual es el más conveniente en función de los condicionantes que se presentan en este informe.

CAPITULO I

DEFINICION DE PARAMETROS HIDRAULICOS

1.1 ALTURA DINAMICA TOTAL

Uno de los datos necesarios de conocer el momento de seleccionar un equipo para el uso de alimentación de agua a un edificio es el cálculo de la altura dinámica total, la cual es la suma de algunas cargas.

Cuando se trata de edificios en donde el agua se bombea hacia tanques elevados de almacenamiento para posterior distribución por gravedad los cálculos son sencillos, ya que únicamente se requiere conocer la altura estática total, más los cálculos de pérdidas en la única tubería de subida y sus accesorios, y como el caudal de suministro de la bomba es prácticamente constante, se puede determinar rápidamente la bomba necesaria a través de las curvas de funcionamiento u operación que proporciona el fabricante de la misma.

No sucede lo mismo cuando es del caso el sistemas hidroneumáticos, ya que como el sistema alimenta directamente a las puntos de consumo, es necesario tener siempre una presión mínima en el punto más desfavorable en relación a la ubicación del equipo de bombeo.

En definitiva, se puede decir que para el cálculo de la altura dinámica total los factores ha considerar son: la altura total de descarga, la altura de succión, pérdidas por fricción tanto en la tubería de succión como en la de descarga y pérdidas en accesorios.

Expresándolo en fórmula, la altura dinámica total está dada por

$$Hm = \frac{P_2 - P_1}{r} + Z_2 - Z_1 + H_{ra} + H_{ri} + \frac{Vd^2}{2g} \qquad (1)$$

en donde

$\frac{P_2 - P_1}{r}$ es la diferencia de presiones entre el pozo de aspiración y depósito, pero como generalmente están abiertos a la atmósfera, éste término se hace cero.

$Z_2 - Z_1$ es la altura estática total (succión + descarga)

H_{re} son las pérdidas en la aspiración

H_{r1} son las pérdidas de descarga.

$\frac{Vd^2}{2g}$ es una pérdida secundaria en el desagüe del depósito que por lo general siempre se la considera dentro de las pérdidas en la descarga como parte de H_{r1}

ALTURA DE DESCARGA

Como se dijo anteriormente, cuando se trata de sistemas que alimentan un tanque elevado para posterior distribución por gravedad, la altura de descarga es simplemente el desnivel existente desde el punto de ubicación de la bomba hasta el punto de descarga de agua.

Cuando se trata de sistemas hidroneumáticos, se puede igual considerar el punto más alejado de servicio en cuanto a desnivel, sin embargo en los sistemas hidroneumáticos se suele agregar a este término la presión necesaria de servicio en el punto más lejano en términos de altura. Asi por ejemplo si en el punto más alejado se requiere una presión mínima de servicio de 15 Psi (15 Lb/Pul^2), esto se lo divide para el peso específico del agua (0.0361 Lb/Pul^3) se obtendrá la presión en pulgadas de columna de agua o si se multiplica directamente la presión en Psi por el factor de 2.31 se obtendrá

la presión en pies de columna de agua, y la altura total de descarga sería la altura estática más la presión de servicio.

ALTURA DE SUCCION

La altura estática de succión es únicamente el desnivel existente entre la bomba y el sitio donde se encuentra la válvula de pie, esto es igual en cualquiera de los casos. Sin embargo un punto muy importante aquí es la altura neta de succión positiva (NPSH de las siglas en Inglés), que está definida como la cabeza total de succión en pies absolutos determinando en la boca de succión, menos la presión de vapor del líquido en pies absolutos.

Esto es simplemente un análisis de las condiciones de energía en el lado de succión de una bomba para determinar si el líquido se evaporará en el punto más bajo de presión en la bomba.

El NPSH disponible es una función del sistema en el cual la bomba opera. Es el exceso de presión del líquido en pies absolutos, sobre su presión de vapor cuando este arriva a la succión de la bomba.

El NPSH requerido es una función de diseño de la bomba y varía con la velocidad y capacidad dentro de una misma bomba. Esta característica es proporcionada por el fabricante dentro de las curvas de operación.

Siempre el NPSH disponible debe ser mayor al requerido en un punto determinado de operación para evitar la cavitación de la bomba.

Este factor es muy importante de considerar en las partes altas como Quito en donde la presión atmosférica es menor.

PERDIDAS EN TUBERIAS

Cuando se trata de un sistema de alimentación hacia un tanque elevado de distribución, el cálculo de pérdidas por fricción en tuberías se lo realiza de acuerdo al caudal suministrado por la bomba, material de la tubería de conducción del agua, diámetro del tubo y largo del mismo.

Existen pérdidas tanto en las tuberías de succión como en las de descarga.

En la mecánica de fluidos existen fórmulas para el cálculo de este tipo de pérdidas que generalmente son denominadas pérdidas primarias como es la ecuación de DARCY-WEISBACH, que utiliza a la vez el diagrama de MOODY para encontrar el coeficiente de pérdidas de carga, el cual a la vez depende del número de Reynolds y rugosidad relativa.

Sin embargo en la práctica existen tablas que dan valores muy aproximados a lo real, estas tablas están dadas en función del caudal de suministro, diámetro de la tubería y material de la misma, esta se expresa en términos de porcentaje de pérdidas, así por ejemplo para un caudal de 100 gpm (22.6 m^3/hora), tubería de 2½" galvanizado se tendrá un porcentaje de por ejemplo 15% de pérdidas, significa esto que por cada 100 mts. de largo de tubería se están perdiendo 15 mts. en altura.

Puesto que estas pérdidas varían de acuerdo al caudal, es necesario construir sobre la curva de operación de la bomba, la curva del sistema incluyendo la tubería.

El cálculo de pérdidas para un sistema hidroneumático se lo debe hacer considerando el punto más desfavorable, es decir el punto más alejado con la tubería más delgada.

Los gráficos de operación del sistema son gráficos como el de la figura 1.

En este gráfico el punto de operación es el de intersección de la curva de tubería con la curva de funcionamiento de la bomba. Algo importante aquí es que en este caso la curva de la tubería debe incluir también las pérdidas en los accesorios que se describen en seguida:

PERDIDAS EN ACCESORIOS

Las pérdidas por fricción en accesorios como codos, tes, válvulas, etc, son denominadas pérdidas secundarias, para las cuales existen fórmulas de cálculo, pero para sistemas relativamente pequeños como son los utilizados en edificios, lo que se hace es evaluar las pérdidas en accesorios como longitud equivalente en metros o pies de tubería.

De esta manera, para cada accesorio existe una longitud equivalente de tubería, a la cual lógicamente habrá que calcular su pérdida en función del caudal y longitud de tubería. Existen tablas muy detalladas para calcular este punto.

Una vez que se han calculado todas las pérdidas se puede calcular la altura o presión de descarga.

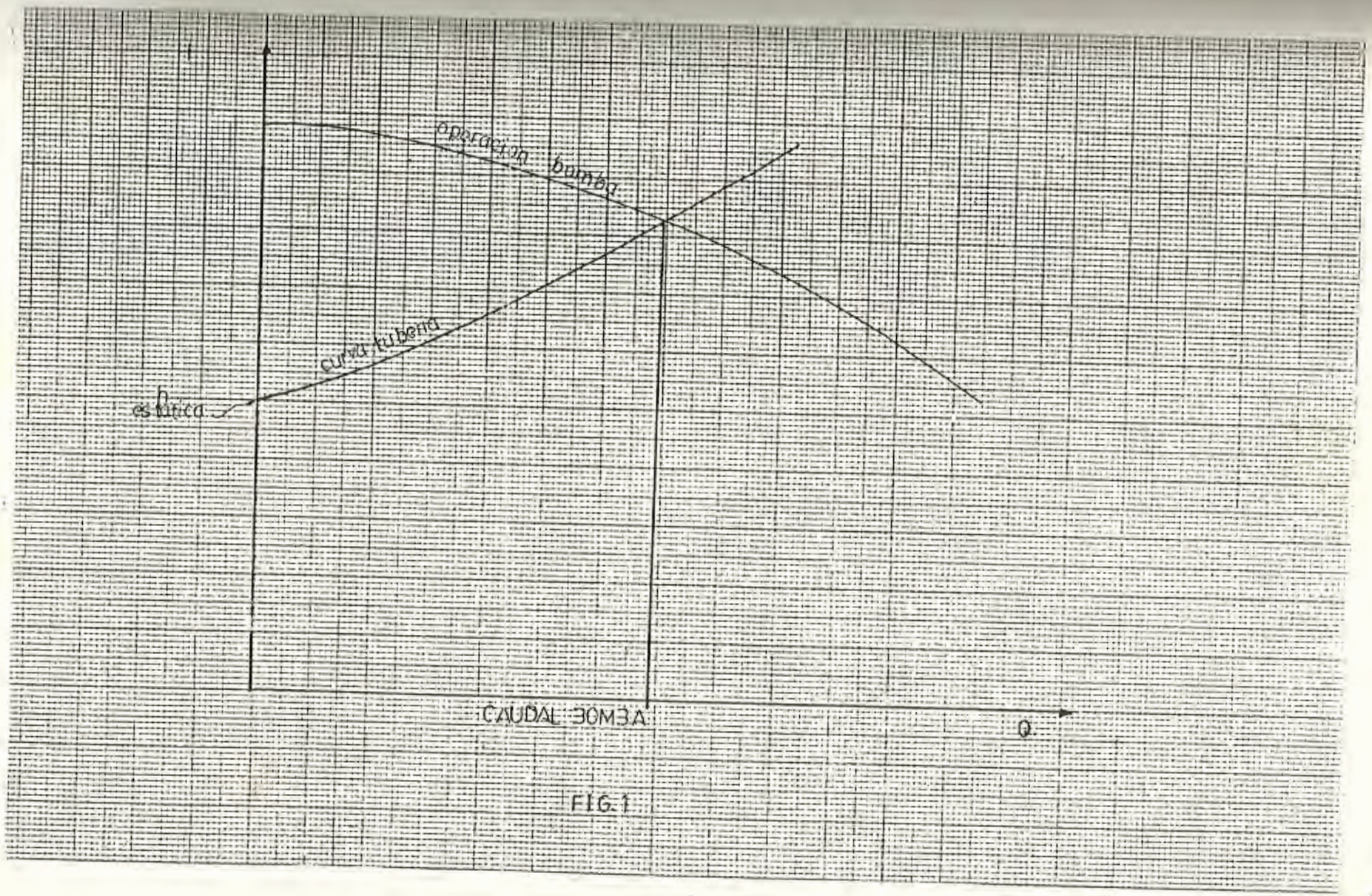


FIG. 1

Se puede construir un gráfico de pérdidas totales versus caudal como el de la figura 2 en donde se muestra una curva típica de pérdidas:

Si a este gráfico se superpone la altura de succión y descarga se obtendrá el gráfico del sistema (Fig 3).

Este gráfico es el que luego se superpone al gráfico de operación de la bomba obteniéndose algo similar a lo mostrado en la figura 1.

Para el caso de sistemas hidroneumáticos el punto de intersección será el de presión mínima es decir el de arranque del equipo, pero siempre existe un diferencial de 20 Psi (1.4 kg./cm^2) para el apagado que será una presión adicional almacenada en el tanque.

El funcionamiento completo del equipo se describirá en el capítulo 2.

1.2 CAUDAL NECESARIO

Se Anota como caudal necesario este punto porque es el caudal que necesita proveer el equipo a determinada presión o altura dinámica total el cual cambia de acuerdo al sistema utilizado.

1.2.1 SISTEMAS HIDRONEUMATICOS

Para el caso de sistemas hidroneumáticos el cálculo del caudal necesario es muy crítico y dificil de calcular ya que puesto que el equipo suministra directamente a la red de servicio y el consumo no es constante y más bién depende de muchas variables como si el edificio es de apartamentos u oficinas, tipo de gente que lo habita, etc. entonces existen datos tabulados por algunas fuentes

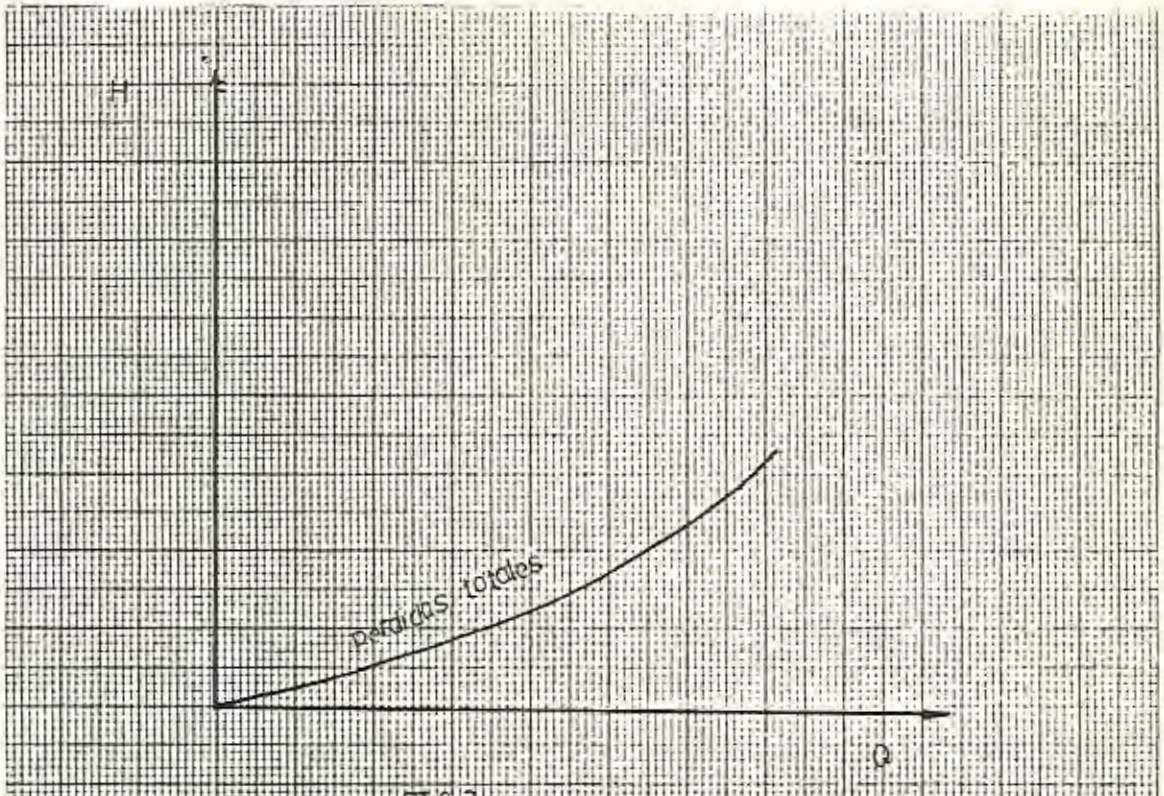


FIG.2

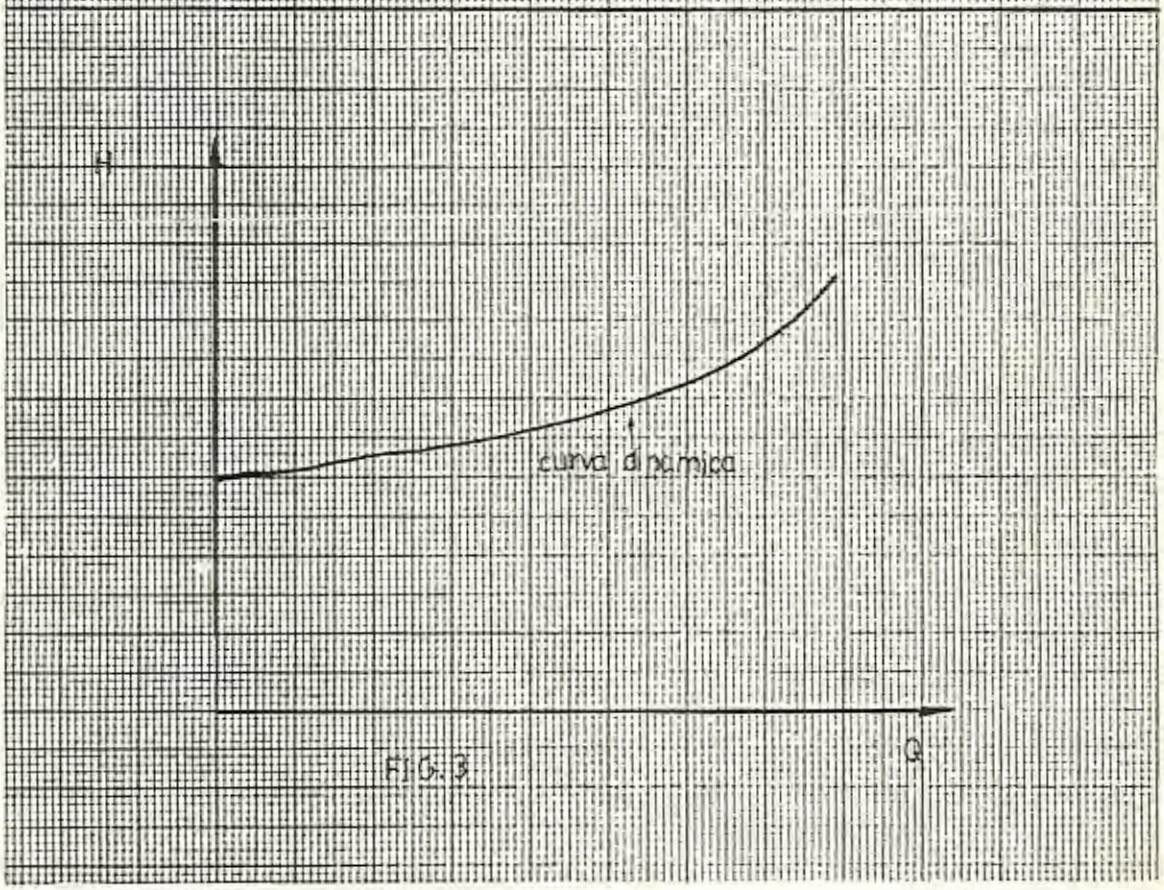


FIG.3

estadísticas para el consumo de agua. Estos datos están dados para las horas pico de consumo y cambian entre las diferentes fuentes.

TABLA I

TIPO DE EDIFICIO	CONSUMO EN Lt/min POR ACCESORIO
HOTEL	3.02
EDIF. APARTAMENTOS	1.13
HOSPITAL	1.51
EDIF. OFICINAS	2.64
MERCANTILES	2.26

Fuente: TYLER G. HICKS, BME, Bombas, su selección y aplicación, Cía.

Se indica además que para menos de 50 accesorios se reduzca la capacidad de la bomba en un 50%, para más de 150 accesorios se aumenta la capacidad de la bomba del 15 al 25%. Que se aumente la capacidad en un 25% si la mayor parte de los ocupantes son mujeres.

Existen otras referencias que indican el consumo de agua de acuerdo al número de apartamentos que tiene el edificio y si son o no de lujo y dan gráficos como el de la figura 4.

1.2.2 SISTEMAS DE ELEVACION

El cálculo de caudal para sistemas de elevación es mucho más sencillo puesto que la bomba tendrá que enviar solamente el caudal necesario para llenar el tanque en un determinado tiempo, las dimensiones de este tanque estarán lógicamente de acuerdo al consumo en el edificio; que según datos estadísticos en ciudades grandes de

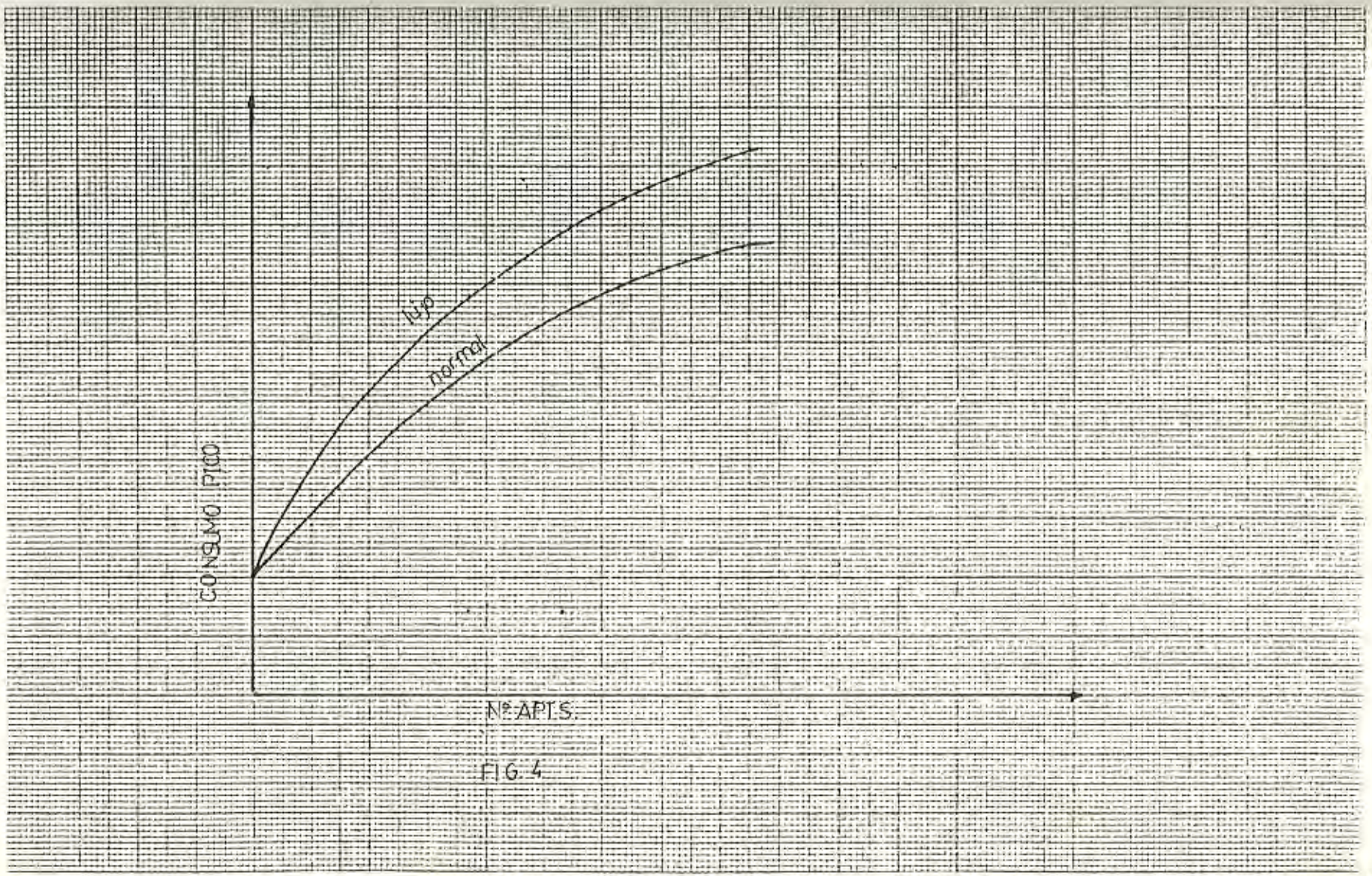


FIG. 4

más de 100.000 habitantes está entre 140 y 250 litros por habitante por día

En todo caso, aquí no existe mucho problema puesto que la bomba alimentará nuevamente el tanque en caso de existir un mayor consumo cuando reciba la orden por un control de nivel.

El tanque bajo debe tener la suficiente reserva incluso la de regulación para el caso de incendios.

El caudal horario será aquel del consumo total diario, aunque esto podrá variar un poco.

De todas maneras no hay que olvidar que los sistemas de elevación van siempre auxiliados por sistemas hidroneumáticos para los pisos superiores, pisos en los cuales habrá que determinar el consumo pico como lo indicado en el punto anterior.

Como ejemplo se podría indicar que un edificio en el que habitan 100 personas, se tiene que el consumo diario será como promedio de 19.500 litros, la bomba deberá proporcionar un caudal de 19.500 Lt/hr.

1.2.3 SISTEMAS PRESION CONSTANTE

Estos sistemas cuyos funcionamientos se describirán en el siguiente capitulo son la alternativa para el uso de hidroneumáticos con tanques muy grandes.

Para el cálculo del caudal en este caso, es el mismo sistema de cálculo que para el cálculo de sistemas hidroneumáticos, solo que

simplemente para el cálculo del caudal que las bombas deben suministrar ya que pueden ser dos o tres bombas, la bomba guia debe proporcionar solamente el 20% del caudal pico de consumo, el 80% restante se divide entre las bombas restantes.

CAPITULO II

ALTERNATIVAS DE SOLUCION

Luego de haber definido los parámetros hidráulicos necesarios para la selección del equipo de bombeo como son el caudal y la altura dinámica total, se indican a continuación las alternativas de solución en la selección del equipo, describiendo el funcionamiento de cada uno de los sistemas.

2.1 SISTEMAS HIDRONEUMATICOS

Entre los sistemas utilizados para la alimentación de agua en edificios están los sistemas llamados HIDRONEUMATICOS, estos equipos tienen los siguientes componentes:

(1) Una bomba de alimentación de agua, la cual debe ser capaz de suministrar suficiente presión para el trabajo correcto del sistema. En edificios pequeños (hasta 6 plantas) se utilizan bombas tipo Jet; que son solamente bombas centrífugas con dispositivo de venturi por el que recircula el agua de descarga para aumentar la presión; en edificios grandes se utilizan bombas centrífugas directamente acopladas al motor, bombas de varias etapas o bombas tipo turbina regenerativas con acople flexible hacia el motor; en este tipo de bomba el agua recircula varias veces por la carcaza para aumentar la presión de descarga.

(2) Un tanque hidroneumático, que es un tanque de plancha metálica de forma cilíndrica, en el cual se forma una cámara de aire que se encuentra a presión debido al empuje del agua en el recipiente cerrado. Esta presión es la que luego impulsa al agua hacia la red de distribución.

El tanque hidroneumático puede estar precargado con aire o sin precarga inicial, la diferencia en el funcionamiento lo vemos más adelante.

(3) Un compresor de aire si el sistema es precargado.

(4) Accesorios de control.

SISTEMAS HIDRONEUMATICOS SIN PRECARGA DE AIRE

En los sistemas hidroneumáticos sin precarga de aire, la bomba succiona del depósito y alimenta un tanque de plancha metálica, al ingresar agua al tanque, el agua comienza a comprimir el aire que se encontraba a presión atmosférica, hasta que este alcance determinada presión preseleccionada y la bomba desconecte por medio de un dispositivo de control de presión situado en un punto en la descarga del sistema lo más cercano posible al tanque o en el tanque mismo.

Si se denomina Vt al volumen del tanque y Pa a la presión atmosférica, se tendrá que antes de bombear agua hacia el tanque, el volumen de aire en el tanque es igual a Vt, sin embargo al bombear agua, este volumen de aire se reducirá y la presión aumentará de Pa a P_2 donde $P_2 > Pa$. Si se considera que el trabajo de compresión del aire como isotérmico, lo cual sería lo ideal. Se puede escribir que

$$Pa \times Vt = P_2 \times V_2$$

Entonces el volumen de aire a una presión P_2 será:

$$V_2 = \frac{Pa \times Vt}{P_2}$$

Donde P_2 es la presión absoluta, es decir la presión manométrica mas la presión atmosférica:

$$P_2 = P_{2g} + Pa \qquad (3)$$

El volumen del agua en el tanque V_H es por lo tanto igual al volumen del tanque menos el volumen de aire:

$$V_H = Vt - V_2 \qquad (4)$$

Reemplazando se tiene que

$$V_H = Vt - \frac{Pa - Vt}{P_2}$$

Puesto que $P_2 = Pa + P_{2g}$ se obtiene que el volumen de agua es:

$$V_H = Vt \times \frac{P_{2g}}{P_{2g} + Pa} \qquad (5)$$

De esta forma se podrá conocer cual será la cantidad de agua que existirá en el tanque a determinada presión manométrica.

Sin embargo es siempre necesario conocer la cantidad de agua bombeada entre dos intervalos de presión ya que éste es el volumen útil real del tanque; asi por ejemplo, con ésta bomba que trabaja en un intervalo de presiones de 20-40 Psi (1.4-2.8 Kg./cm^2), se tendrá que el volumen útil o volumen de regulación del tanque será la cantidad de agua que tenía el tanque a la presión de 40 Psig menos la cantidad de agua en el tanque a la presión de 20 Psig, que será el punto donde la bomba conecte nuevamente para alimentar el tanque.

Si se denomina Vu a la cantidad de agua entre estos intervalos se tiene que:

$$Vu = V_{H1} - V_{H2} \qquad (6)$$

Donde V_{H1} es el volumen de agua a la presión de desconexión y V_{H2} el volumen de agua a la presión de conexión; Vu es el volumen útil del tanque.

Para ilustración, si se tiene por ejemplo un tanque de 200 galones (0.756 m^3) y la bomba trabaja en el rango de presiones de 30-50 Psig (2.1-3.5 Kg./cm^2), y con la presión atmosférica de 14.7 Psi, el volumen de agua que saldrá del tanque hasta que la bomba conecte nuevamente será

$$Vu = V_{H1} - V_{H2}$$

$$Vu = 200 \times \frac{50}{50 + 14.7} - 200 \times \frac{30}{30 + 14.7}$$

$$Vu = 20.33 \text{ galones}$$

Es decir que de los 200 galones que tiene el tanque, se están utilizando apenas 20.33 galones (0.0768 m^3), el 10% aproximadamente del volumen del tanque.

Si se tuviera una presión atmosférica de 10.3 Psi (0.73 Kg./cm^2) que es el caso de las regiones altas como Quito el volumen útil obtenido para el caso anterior sería de:

$$Vu = 16.95 \text{ galones } (0.064\ m^3)$$

Entonces el volumen útil del tanque es menor aunque se esté trabajando en el mismo rango de presión manométrica.

El volumen útil de un tanque es un punto muy necesario de conocer especialmente en sistemas grandes, ya que de acuerdo a esto se puede seleccionar la bomba.

Los fabricantes de motores hacen recomendaciones para aquellos a partir de 10 HP de que el número de arranques por hora no deben pasar de 20 y el ciclo de trabajo no menos de un minuto.

Si se toma esto en consideración, una bomba que proporcione de acuerdo a su curva de operación un caudal de 20 gpm (4.52 m^3/hora), y cada vez que la bomba arranque, su motor debe trabajar como mínimo 1 minuto, entonces el volumen que la bomba proporciona en este tiempo será de 20 galones. Por lo tanto deberá haber espacio para almacenar esta cantidad de agua. Estos 20 galones será el volumen útil que deberá tener el tanque.

De acuerdo a esto, se puede dimensionar el tanque mediante una deducción de las fórmulas anteriores, obteniendo que el volumen del tanque será

$$Vt = \frac{Vu}{Pa} \times \frac{(P_{2a} + Pa)\,(P_{1a} + Pa)}{P_{2a} - P_{1a}} \qquad (7)$$

Donde

Vu = Volumen útil requerido

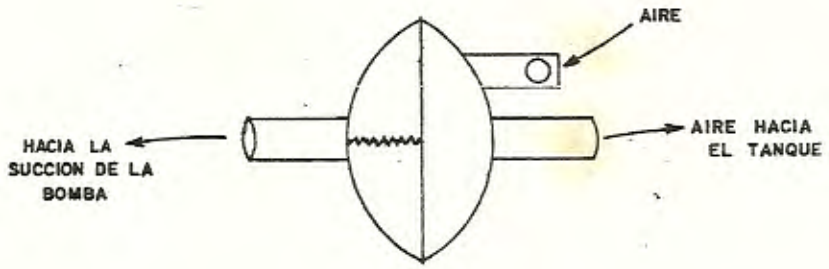
Pa = Presión atmosférica

P_{2a} = Presión manométrica de apagado

P_{1a} = Presión manométrica de encendido

Es necesario anotar que los tanques sin precarga de aire necesitan siempre de un dispositivo de reposición de aire ya que el oxígeno tiende siempre a diluirse en el agua cuando se encuentra sometido a presión, disminuyendo con el tiempo el volumen de aire que se tiene en el tanque. El dispositivo de reposición de aire es automático y su funcionamiento es el siguiente:

El dispositivo es una especie de dos platos cóncavos cerrados (figura 5)



CONTROL DE VOLUMEN DE AIRE

FIGURA 5

En el interior de estos platos existe una membrana con un resorte, cuando la bomba succiona se produce un vacío que hala la membrana, produciéndose la introducción de aire del ambiente por un orificio al otro lado de la membrana, este aire ya no puede salir al ambiente porque existe un dispositivo de válvula check que lo impide. Cuando la bomba para, el resorte hace regresar la membrana que empuja al aire hacia el interior del tanque.

Es interesante construir las curvas de volumen útil de los tanques relacionando el volumen del tanque que se encuentra con agua con la presión manométrica en el tanque.

Con estas curvas se puede calcular de una manera rápida el volumen útil entre dos rangos de presión. Además, a partir de estas curvas se puede ver claramente que cuando la presión atmosférica es diferente, el volumen útil del tanque cambia. La figura 6 muestra la curva para el caso de tanques a presión atmosférica al nivel del mar (14.7 Psi) y la figura 7 muestra el caso de presión atmosférica a una altura de 2.800 metros sobre el nivel del mar.

De estos gráficos se puede deducir lo siguiente:

(1) Existe una asíntota en el volumen total del tanque, es decir que solamente con presión infinita (imposible de alcanzar), se podrá llenar completamente con agua el tanque.

(2) Cuando se trabaja con rangos cada vez más altos de presión, el volumen útil se hace cada vez menor, así se tiene que por ejemplo con P.atm de 14.7 Psi, con rangos de presión de 20-40 Psi se tiene un porcentaje de volumen útil del 16% del volumen del tanque; sin

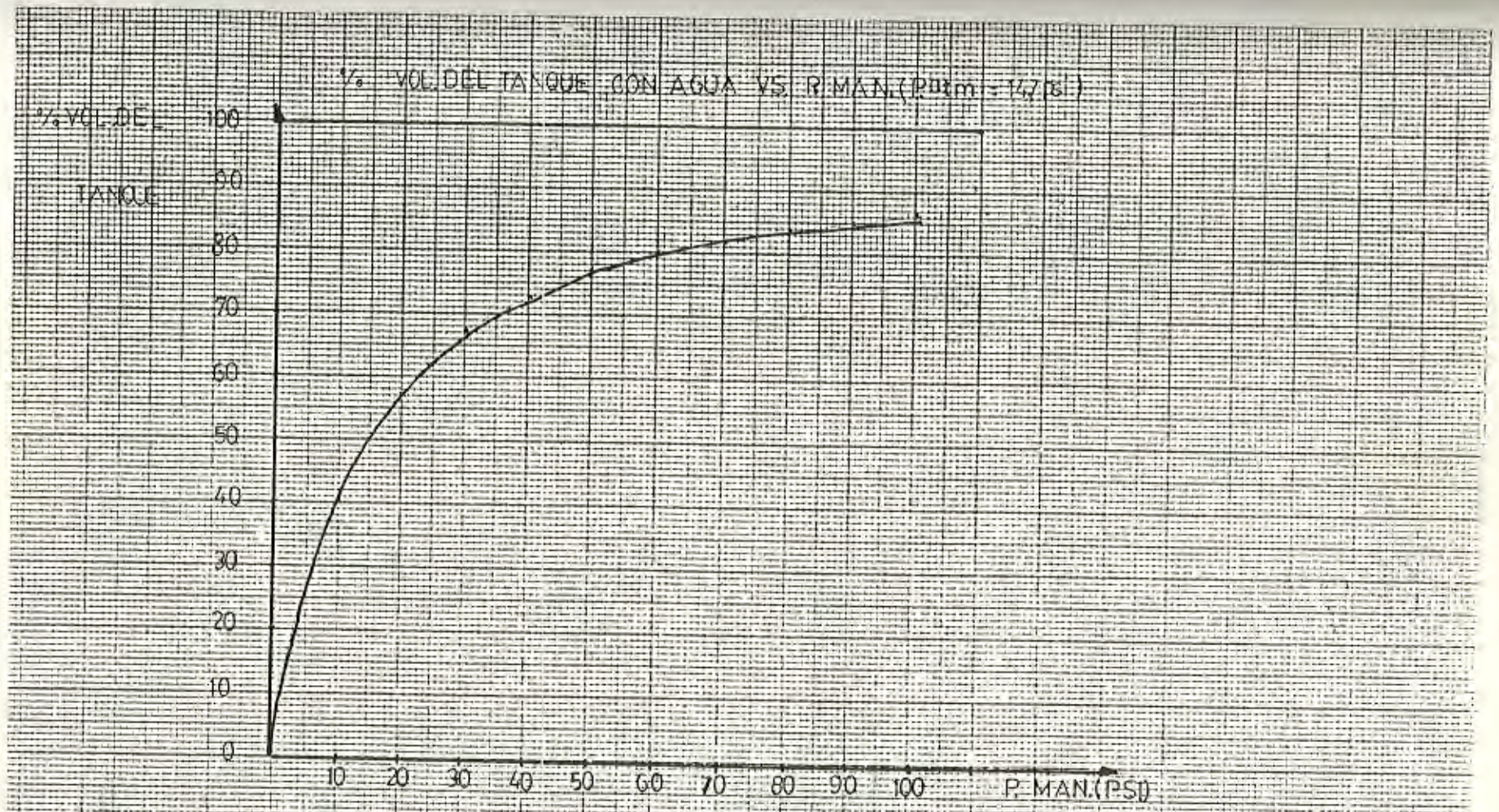

% VOL. DEL TANQUE CON AGUA VS. P. MAN. (Patm = 14.7 PSI)
% VOL. DEL TANQUE
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
P. MAN. (PSI)

FIG. 6

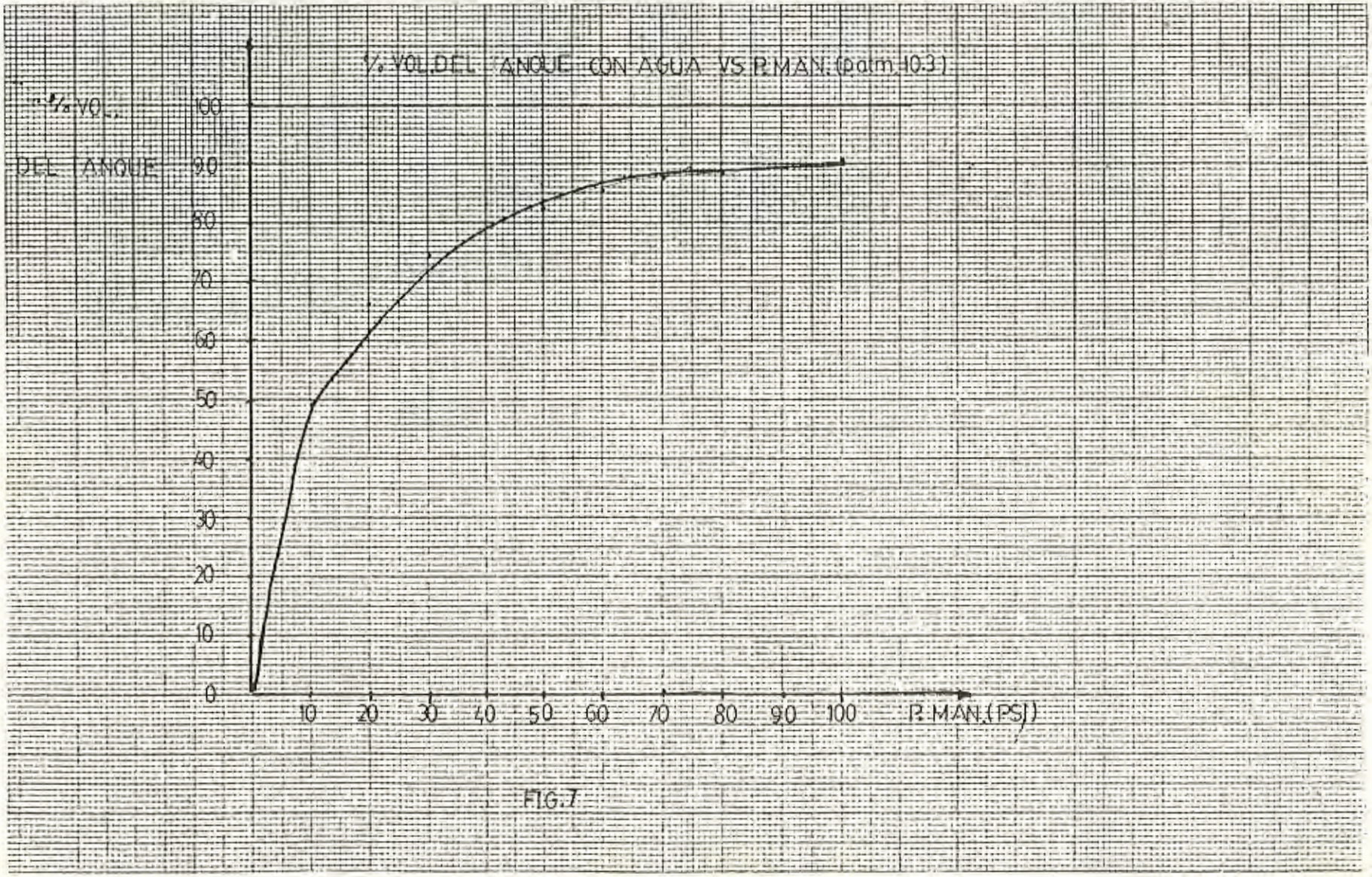

% VOL. DEL ANOQUE CON AGUA VS P. MAN. (patm 10.3)
% VOL. DEL ANOQUE
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
P. MAN. (PSI)

FIG. 7

embargo con un rango de 30-50 Psi (igual diferencial de presiones) se tiene un porcentaje del 10% aproximadamente.

(3) Con menor presión atmosférica la curva sube más rápidamente hacia la asintota, disminuyendo el volumen útil del tanque, así se tiene que con presión atmosférica de 10.3 Psi y una presión manométrica de 20 Psi se tiene el 67% del tanque con agua y con 40 Psi el 79% del tanque con agua; y 79 - 67 = 12% de volumen útil, mientras que con Pa = 14.7 Psi se tenía aproximadamente el 16% de volumen útil.

Luego de conocer el funcionamiento y el cálculo de los tanques hidroneumáticos sin precarga se podrá seleccionar o dimensionar el equipo de acuerdo a los parámetros calculados como son presión y caudal necesario.

Puesto que el caudal para el caso de los hidroneumáticos se calculó en base de consumo pico, el tamaño del tanque se dimensionará tomando en consideración que la bomba debe trabajar durante 1 minuto y esta cantidad de agua deberá ser el volumen útil del tanque tomando en cuenta el rango de presiones con las que se trabaja.

La presión mínima será la calculada para el punto más desfavorable y la presión de apagado será con una diferencia de 20 Psi del mínimo.

Analizando esto se puede visualizar que el volumen requerido para los tanques serán muy grandes o de otra manera los equipos funcionarán ineficientemente con arranques demasiado frecuentes.

SISTEMAS HIDRONEUMATICOS CON PRECARGA DE AIRE

Con el propósito de utilizar un mayor volumen del tanque hidroneumático se precargan con aire a los mismos de tal forma de poder trabajar en la parte inicial de la curva de compresión de aire que es la más utilizable o donde con un diferencial de presión dado se aprovechan la mayor cantidad de agua del tanque.

Los sistemas que usan tanques precargados son sistemas mucho más eficientes y económicos en el aspecto de consumo de energía, sin embargo son más costosos en el caso de los tanques que usan membranas interiores o más complicado y caro el control automático para tanques sin membrana interior.

El sistema precargado funciona de la siguiente manera:

Si se introduce aire al tanque a una presión cualquiera de precarga Pp mediante un compresor de aire, entonces se tendrá una condición inicial de un volumen del tanque Vt con una presión Pp. Si luego de precargado el tanque se bombea agua hacia el mismo, la presión del aire en el tanque aumentará a P_2 y el volumen de aire se reducirá a V_2, y si se considera una isoterma se tendrá la relación:

$$Pp \times Vt = P_2 \times V_2 \qquad y$$

$$V_2 = \frac{Pp \times Vt}{P_2} \qquad (8)$$

El volumen de agua en el tanque es $V_H = Vt - V_2$ o

$$V_H = Vt \times \frac{P_2 - Pp}{P_2} \qquad (9)$$

Pero:

$P2 = P2_a + Pa$

$Pp = Ppg + Pa$

Por lo tanto

$$V_H = Vc \times \frac{P2_a - Ppg}{P2_a + Pa} \qquad (10)$$

Donde

Vt = Volumen total del tanque

$P2_a$ = Presión manométrica de apagado

Ppg = Presión manométrica de precarga

Pa = Presión atmosférica

El volumen útil entre dos intervalos de presión de prendido y apagado de la bomba estará dado por:

$$Vu = Vt \times \frac{P2_a - Ppg}{P2_a + Pa} - Vt \times \frac{P1_a - Ppg}{P1_a + Pa} \qquad (11)$$

El volumen útil del tanque será mayor cuanto más cercano a cero se haga el segundo término de la ecuación anterior. Para esto se necesita que $P1_a$ (la presión de encendido del sistema) sea igual o ligeramente mayor a Ppg (la presión de precarga), de esta forma se tendría que el volumen útil sería máximo cuando la presión de arranque sea igual a la presión de precarga y;

$$Vu = Vt \times \frac{P2_a - Ppg}{P2_a + Pa} \qquad (12)$$

y ya que $P_{pg} = P_{1_a}$

encuentra con agua con la presión manométrica del mismo para diferentes presiones de precarga, 2 tipos de presión atmosférica: nivel del mar (Guayaquil) y a 2.800 metros sobre el nivel del mar (Quito).

El volumen útil se puede sacar fácilmente a partir de estos gráficos cuando se toman dos valores de presión que sería el rango de trabajo del sistema.

De estas curvas se puede deducir lo siguiente:

(1) Existe una asíntota en el volumen total del tanque

(2) Cuando se trabaja con rangos de presión más altos, aunque la presión de precarga sea la presión de encendido del sistema, siempre el volumen útil es menor que en rangos más bajos, así, en un sistema que trabaja entre 40-60 Psi, se tiene según la curva, un volumen

y puesto que siempre $P2_g > P1_g$:

Entonces el volumen de Vu2 (para el tanque precargado) es mayor que Vu_1 (del tanque sin precarga), y esta diferencia está dada (si se restan las dos ecuaciones) por:

$$Dv = Vt \times \frac{P1_g}{P1_g + Pa} - Vt \times \frac{P1_g}{P2_g + Pa} \qquad (13)$$

Dv = Diferencia de volumen útil entre un tanque precargado y uno sin precarga trabajando en un mismo rango de presiones manométricas.

Se pueden construir las curvas de volumen útil de igual que los tanques sin precarga relacionando el porcentaje del tanque que se encuentra con agua con la presión manométrica del mismo para diferentes presiones de precarga, 2 tipos de presión atmosférica: nivel del mar (Guayaquil) y a 2.800 metros sobre el nivel del mar (Quito).

El volumen útil se puede sacar fácilmente a partir de estos gráficos cuando se toman dos valores de presión que sería el rango de trabajo del sistema.

De estas curvas se puede deducir lo siguiente:

(1) Existe una asíntota en el volumen total del tanque

(2) Cuando se trabaja con rangos de presión más altos, aunque la presión de precarga sea la presión de encendido del sistema, siempre el volumen útil es menor que en rangos más bajos, así, en un sistema que trabaja entre 40-60 Psi, se tiene según la curva, un volumen

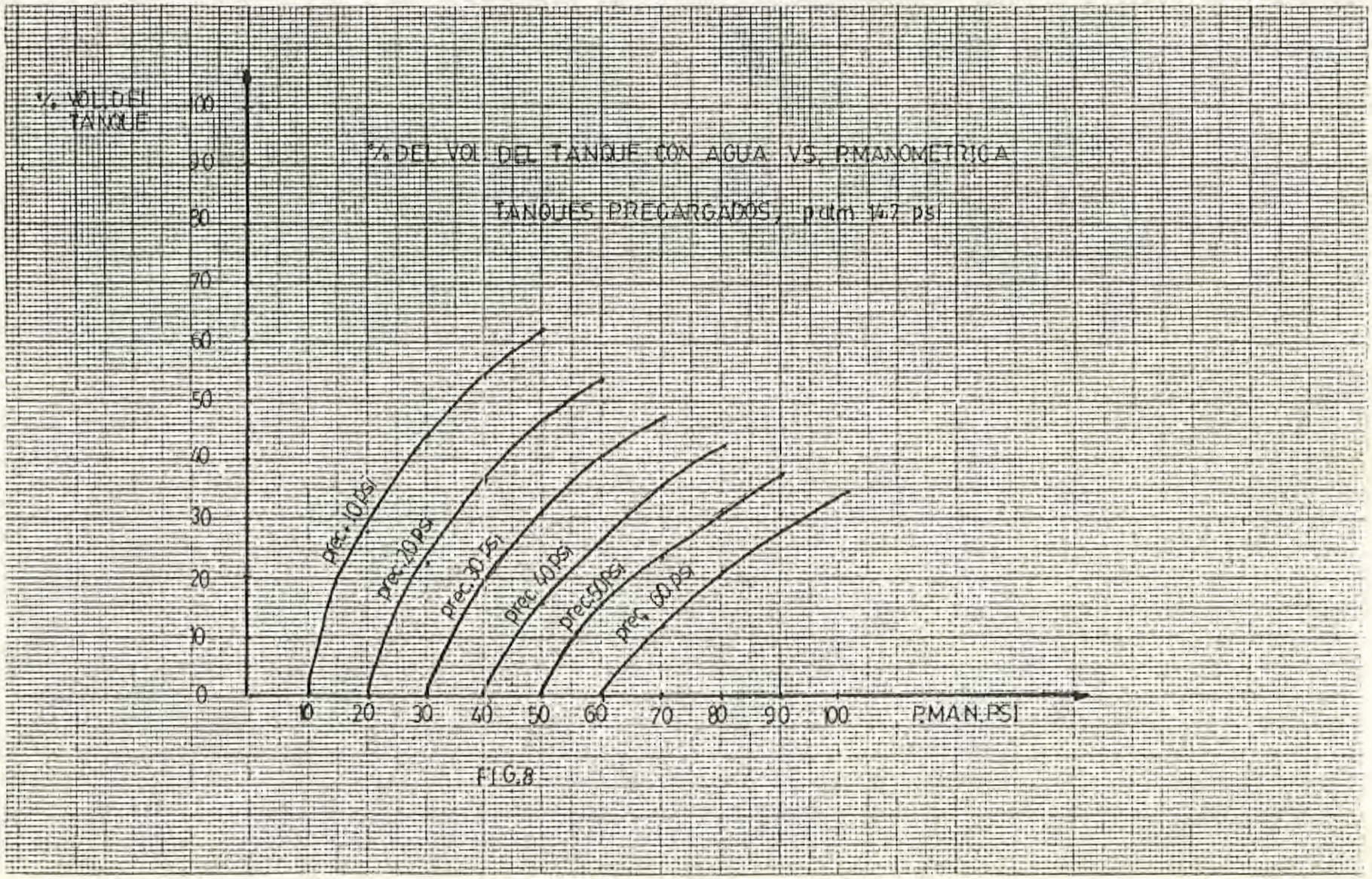

% VOL DEL TANQUE
% DEL VOL DEL TANQUE CON AGUA VS. P.MANOMETRICA
TANQUES PRECARGADOS, patm 14.7 psi
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
P.MAN.PSI
prec. 10 psi
prec. 20 psi
prec. 30 psi
prec. 40 psi
prec. 50 psi
prec. 60 psi

FIG.8

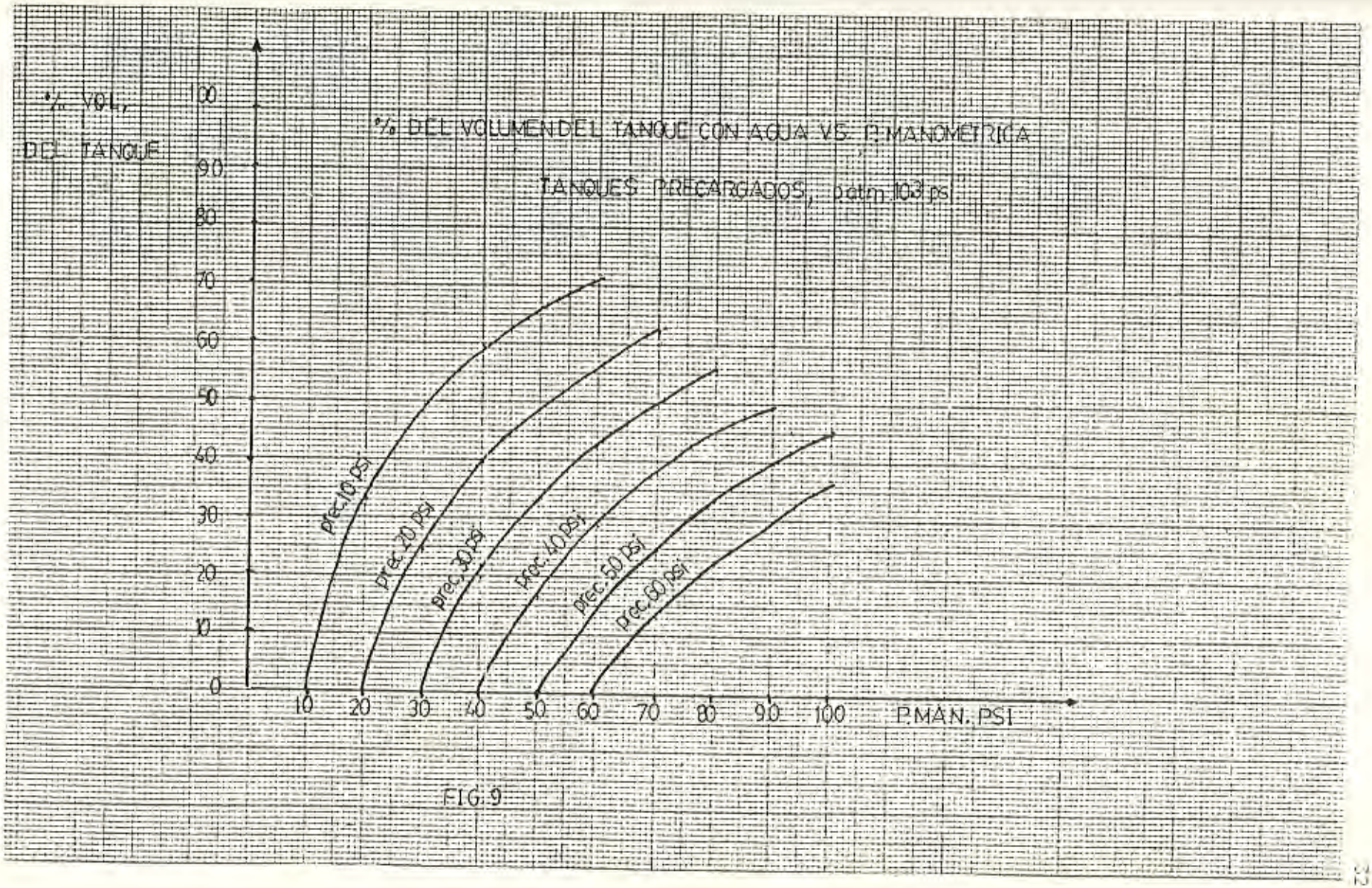

% VOL. DEL TANQUE
% DEL VOLUMEN DEL TANQUE CON AGUA VS. P. MANOMETRICA
TANQUES PRECARGADOS, patm 103 psi
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
P.MAN. PSI
prec.10 psi
prec.20 psi
prec.30 psi
prec.40 psi
prec.50 psi
prec.60 psi

FIG. 9

útil del 28% del volumen total del tanque cuando se tiene una precarga de 40 Psi; en cambio un sistema que trabaja entre 60-80 con una precarga de 60 Psi, el volumen útil es según la curva de un 21% aproximadamente, aunque en ambos casos el diferencial de trabajo, era de 20 Psi.

(3) A menor presión atmosférica existe un mayor volumen útil entre 2 valores de presión, esto es más acentuado en presiones bajas de trabajo.

Es conveniente mencionar que existen algunas diferencias entre los diversos tanques precargados que se utilizan como son las siguientes:

SISTEMAS PRECARGADOS SIN DISPOSITIVO DE SEPARACION AIRE/AGUA

En estos sistemas el aire está en permanente contacto con el agua y debido a la dilución del oxígeno en el agua, se necesita estar precargando nuevamente el tanque con un compresor.

Al iniciar la precarga de aire es necesario siempre que exista una cierta cantidad de agua en el tanque. Esta cantidad de agua debe estar sobre el orificio de descarga de agua del tanque, para evitar que en el momento de funcionar el sistema se escape aire por la tubería de descarga.

Por estos factores se reduce el volumen útil teórico en un factor empírico que generalmente se lo toma de 1.35.

Los sistemas precargados sin dispositivo de separación aire/agua necesitan adicionalmente de algún sistema de control para evitar la fuga de aire de precarga cuando por ejemplo hay una falla en la energía eléctrica, consumiéndose en este caso toda el agua del tanque y, como la bomba no prende cuando debería por la falta de energía, entonces todo el aire de precarga escapa por la tubería.

Para remediar esto se suele utilizar válvulas solenoides que cierran el suministro de agua ante la falta de energía eléctrica o al bajar la presión hasta ciertos limites impidiendo de esta manera el escape de aire.

SISTEMAS PRECARGADOS CON DISPOSITIVOS DE SEPARACION AIRE/AGUA

Con el objeto de optimizar el uso de tanques precargados se construyen otros sistemas como son los tanques con una membrana separadora aire/agua que por lo general son importados y de mayor costo y existen solamente hasta cierto volumen. Estos tienen una válvula en la parte superior para la introducción del aire de precarga, lo cual no debe perderse nunca a no ser el escape por una válvula defectuosa o por la ruptura de la membrana.

Aquí en nuestro país se están fabricando tanques a los cuales se les introduce un balón de neopreno al que luego se precarga con aire. De esta manera se separa el aire del agua, y los volúmenes de los tanques que se pueden encontrar son mayores que aquellos con membrana.

Para terminar se puede decir que los sistemas hidroneumáticos se pueden utilizar para presurizar edificios en los siguientes casos:

- Imposibilidad de construir tanques elevados por el diseño del edificio

- Presurización de pisos superiores cuando se utilizan tanques elevados de distribución.

- Edificios que aunque no son de mucha altura sin embargo ocupan una gran área y el consumo por lo tanto es grande como es el caso de colegios, hospitales, escuelas, etc.

CONSUMO DE ENERGIA Y EFICIENCIA

Se considerará para la estimación del consumo de energía el hecho de que como promedio un motor con arranque directo consume 7 veces la potencia nominal y se asumirá el tiempo de duración del arranque como de 1 segundo.

Si se denomina N al número de arranques diario y K el consumo de agua promedio diario en galones, se tendrá que:

$$N = \frac{K}{Vu} \qquad (14)$$

Donde Vu es el volumen útil del tanque en galones sea precargado o no.

Si se denomina Er al consumo de energía en Kw-hr durante los arranques y Pot a la potencia nominal consumida por la bomba en Kw, se tendrá que:

$$Er = \frac{7 \times N \times Pot}{3600} \qquad (15)$$

Reemplazando (14) en (15) se tiene que

$$Er = \frac{7 \times K \times Pot}{3600 \times Vu} \qquad (16)$$

La energía conseguida mensualmente por concepto de arranques será

$$Erm = \frac{30 \times 7 \times K \times Pot}{3600\ Vu} \qquad o$$

$$Erm = \frac{K \times Pot}{17.14\ Vu} \qquad (17)$$

La energía consumida en Kw-Hr diario por funcionamiento de la bomba será:

$$Ec = N \times Pot \times T$$

Donde:

N = Número de arranques diario

Pot =Potencia nominal de consumo durante el funcionamiento

T = Tiempo mínimo de trabajo de la bomba cada vez que funciona (en horas)

El tiempo mínimo de trabajo está dado a su vez por:

$$T = \frac{Vu}{60 \times Q}$$

Donde:

Q = Caudal en GPM

El consumo de energía por funcionamiento diario en Kw-Hr tomando en consideración que N = K/Vu será

$$Ec = \frac{K}{Vu} \times Pot \frac{Vu}{60 \times Q} \quad o$$

$$Ec = \frac{K \times Pot}{60 \times Q} \quad (18)$$

El consumo mensual en Kw-hr será

$$Ec = \frac{K \times Pot}{2 \times Q} \quad (19)$$

El consumo total de energia mensual será

$$E_{Tm} = Erm + Ecm \quad o$$

$$E_{Tm} = \frac{K \times Pot}{17.14 \times Vu} + \frac{K \times Pot}{2 \times Q}$$

$$E_{Tm} = K \times Pot \left(\frac{1}{17.14 \times Vu} + \frac{1}{2 \times Q}\right) \quad (20)$$

La eficiencia del sistema se considerará como la relación entre la energía útil y la energía consumida por el equipo.

La energía útil o aprovechada estará en función del consumo total mensual y la altura o presión de servicio; en un edificio la presión de consumo se tomará para objeto de cálculo como 30 lb/pul².

Entonces:

$$P_{media} = 30 \ lb/pul^2$$

La energía útil será:

$$E_u = 7.23 \times 10^{-6} \ K_m \times P_{medio}$$

Donde

K_m = consumo de agua mensual en galones

P_{medio} = presión media en el edificio en lb/pul^2

La eficiencia del sistema será:

$$n = \frac{E_u}{E_{Tm}} \qquad (21)$$

Puesto que la energía útil será igual ya sean sistemas precargados o no, un sistema precargado es mas eficiente que uno sin precarga cuando el volumen del tanque es el mismo. Para conservar la misma eficiencia con sistemas sin precarga se tendrá que aumentar el volumen total de los tanques.

2.2 SISTEMAS DE ELEVACION

Los sistemas de elevación hacia tanques para distribución posterior por gravedad son sistemas sencillos y ampliamente utilizados. Sin embargo es un sistema no muy conveniente para el caso de edificios muy grandes en área pero no de mucha altura ya que en estos casos la presión de servicio es insuficiente.

Los sistemas de distribución por gravedad en el caso de edificios de altura están siempre auxiliados por sistemas hidroneumáticos para

los pisos superiores.

El funcionamiento de los equipos es de la siguiente manera:

La bomba succiona del depósito y descarga directamente hacia el tanque superior en el cual existe un control de nivel que puede ser mecánico como el caso de pesas que activan un contacto eléctrico o electrónico como el caso de sondas o electrodos que transmiten la señal por conductividad dieléctrica hacia un relé de control, activando o desactivando el sistema.

El tipo de bombas utilizadas son las centrífugas de impulsor cerrado de una o más etapas. Puesto que aquí no se requiere una mayor presión de descarga sino mas bién el caudal suficiente para llenar en un tiempo corto el tanque de distribución. Las bombas son más pequeñas y de menor potencia que las requeridas para el caso de sistemas hidroneumáticos, el consumo de energía es menor también por el menor número de arranques de la bomba aunque habría que sumar aquí el consumo de energía en el hidroneumático para las plantas superiores.

Para la selección del equipo se requiere calcular lo siguiente

- Altura dinámica total de acuerdo a lo indicado en el Capítulo I.

- Caudal necesario.

Los depósitos elevados equilibran el transporte y el consumo, el depósito suministra la diferencia. Si la cantidad transportada es

superior al consumo, el depósito retiene el exceso. Por lo tanto, los depósitos de agua son depósitos diarios. El equilibrio entre afluencia (transporte) y consumo se realiza dentro del mismo dia. El caudal transportado puede ser menor si existe un depósito que si este falta (como el caso de hidroneumáticos). Si existe depósito elevado, la instalación de captación debe calcularse para:

$$\frac{Q_{max} + \text{Reserva de incendios}}{\text{Duración diaria de bombeo}}$$

Donde Qmax es 1.5 veces el consumo medio que para el caso de nuestras poblaciones se puede tomar un promedio de 150 lts/habitante/día.

La reserva de incendios será de acuerdo al caudal suministrado por la bomba de incendios para duración de bombeo de no menos de 1 hora.

La bomba de suministro no deberá estar sobredimensionada, ya que esto ocasiona que la bomba trabaje en el extremo de la curva o fuera de ella ocasionando el recalentamiento del motor. Por ésta razón se deberá poner especial cuidado en el cálculo de la altura dinámica total, gráficamente esto lo se puede visualizar de la siguiente forma:

Se supone que se calculó una curva dinámica que supuestamente debería trabajar con la curva de la bomba de la forma de la figura 10.

Sin embargo realmente la curva dinámica es más plana obteniéndose como lo indica la figura 11. Proporcionando la bomba un mayor caudal

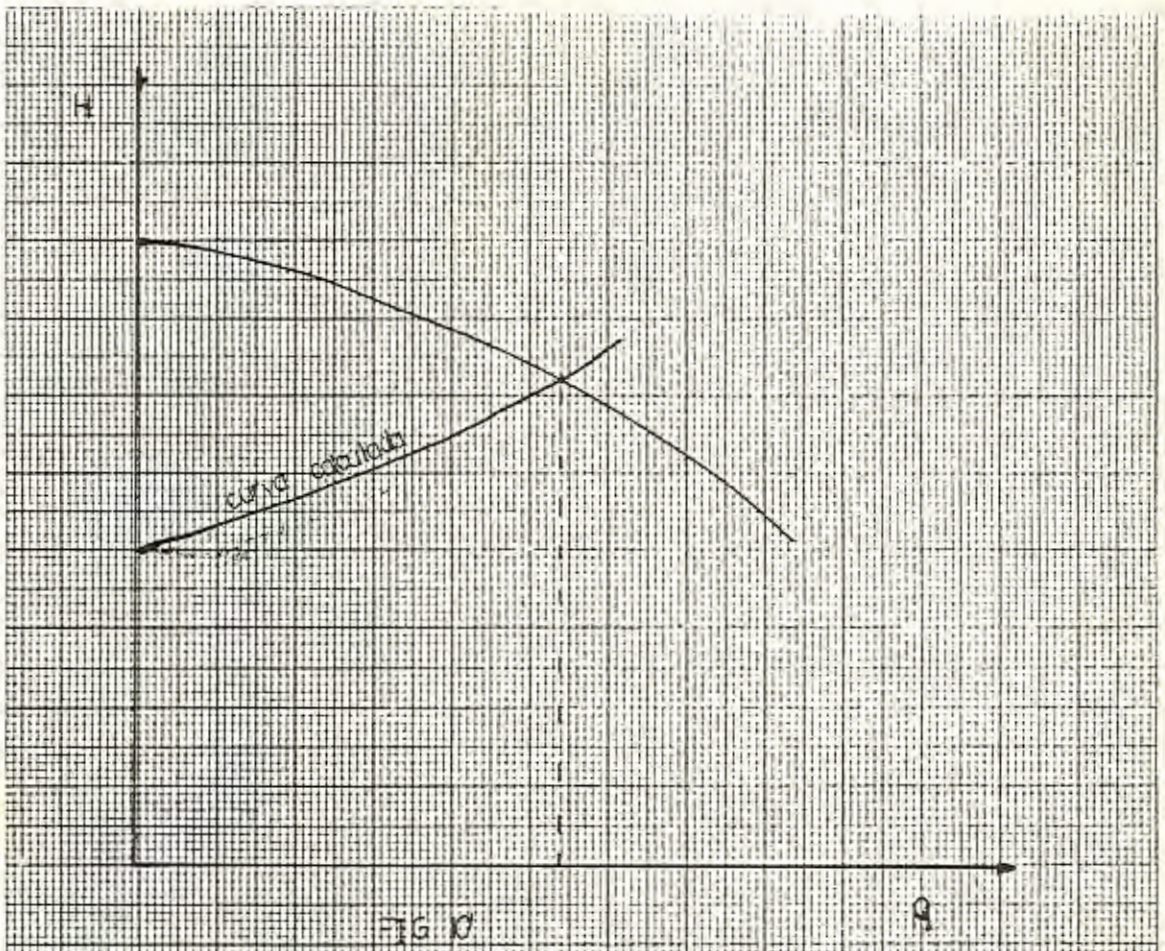


FIG 10

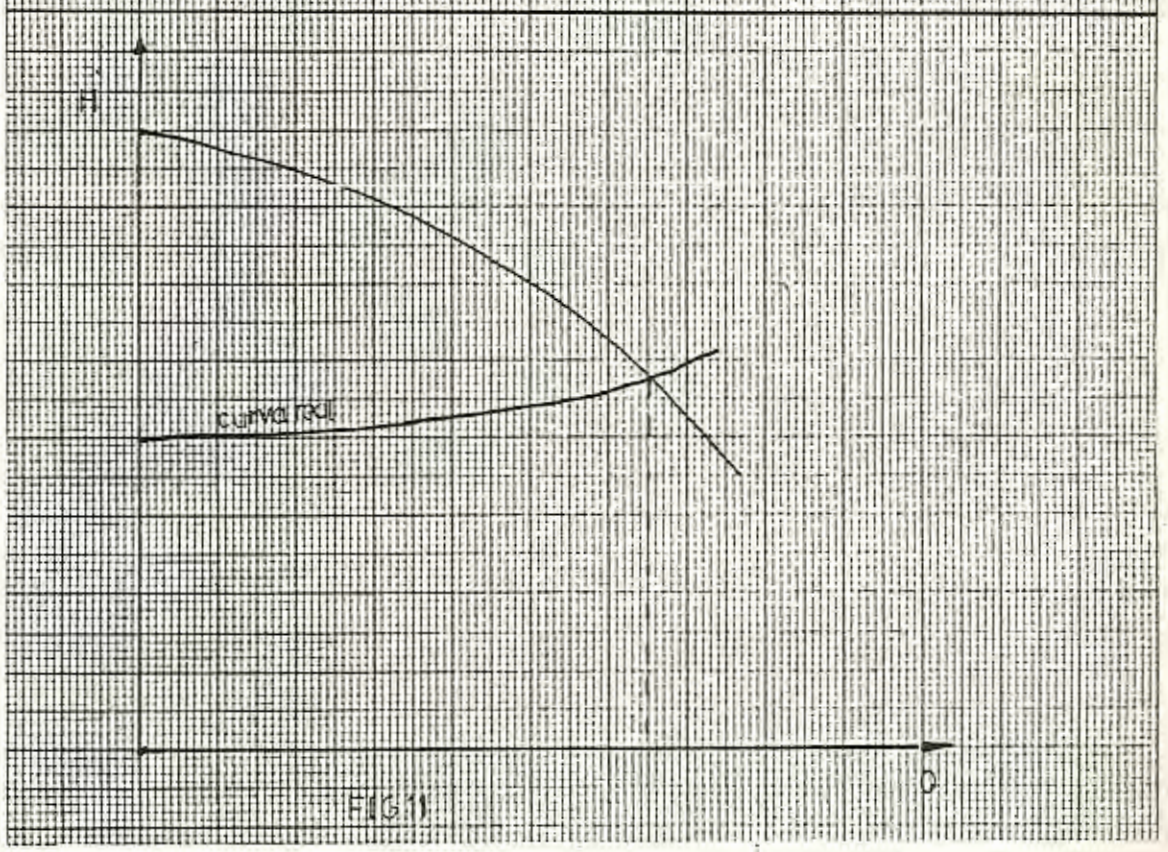


FIG 11

del deseado realmente y consumiendo mayor potencia.

CONSUMO DE ENERGIA Y EFICIENCIA

El consumo de energía de los sistemas de elevación será aquel del consumo del equipo de elevación mas el consumo del hidroneumático para los pisos superiores.

Puesto que los equipos de elevación se calculan para el bombeo de una sola vez al día, el consumo de energía del equipo de elevación por arranques será:

$$Er = \frac{7 \times Pot}{3600}$$

Y el consumo mensual por arranques será:

$$Erm = \frac{30 \times 7 \times Pot}{3600} \qquad o$$

$$Erm = \frac{Pot}{17.14}$$

El consumo por funcionamiento del equipo será igual como el calculado para hidroneumáticos, es decir

$$Ecm = 30 \times P \times T$$

Donde T es el tiempo diario de bombeo en horas, que es la relación del consumo diario sobre el caudal de la bomba, es decir

$$T = \frac{K}{60 \times Q}$$

Estando Q en galones por minuto

Entonces

$$Ecm = \frac{30 \times K \times Pot}{60 \times Q} \qquad o$$

$$Ecm = \frac{K \times Pot}{2 \times Q}$$

Igual a lo obtenido para el caso de hidroneumáticos

El consumo de energía mensual del equipo de elevación será en Kw-hora.

$$Erm = \frac{Pot}{17.14} + \frac{K \times Pot}{2 \times Q}$$

Cabe anotar que como la presión requerida es menor, la potencia del equipo será también menor.

El consumo de energía total considerando el sistema hidroneumático de los pisos superiores será:

$$E_{TT} = E_{Tme} + E_{TmH}$$

El consumo de energía del hidroneumático se calculará como lo indicado en el punto anterior, tomando en consideración que es un equipo con caudales menores y presiones menores.

La eficiencia del sistema será de la misma manera la energía útil en relación a la energía consumida.

La energía útil será de igual manera:

$$Eu = 7.23 \times 10^{-6} \times Km \times Pmedia$$

Donde

Km = Consumo de agua mensual en galones

Pmedia = Presión media en el edificio (lb/pul^2)

La eficiencia de todo el sistema sería:

$$n = \frac{Eu}{E_{TT}}$$

2.3 SISTEMAS PRESION CONSTANTE

Se denominan así a los equipos de bombeo para edificios en donde se trata de mantener la presión constante variando el caudal de suministro con dos o tres bombas trabajando en paralelo.

El sistema funciona de la siguiente manera:

Puesto que el consumo de agua en un edificio no es constante durante todo el día, el sistema de presión constante surge como una alternativa para los hidroneumáticos con tanques muy grandes y en donde no se puede construir tanques de elevación, operando con una bomba pequeña de bajo caudal y alta presión el sistema presión constante abastece los pequeños consumos de agua, generalmente el 20% del caudal pico calculado. Con cero consumo la bomba alimenta hacia un pequeño tanque de presión calculado de acuerdo al caudal que suministra esta bomba.

Cuando el consumo aumenta, la presión tiende a bajar, cuando baja hasta cierto límite conecta una bomba más grande que ayuda a la primera con el 40% del caudal pico proveyendo entre las dos el 60% del caudal pico calculado.

Cuando el caudal de consumo es el pico calculado entran a funcionar las tres bombas en paralelo.

Al seleccionar las bombas para que operen de esta manera, hay que tomar en cuenta con mucho cuidado las curvas de operación de las mismas, y construir la curva dinámica sobre las curvas de operación, ya que al operar las bombas en paralelo el caudal suministrado no es necesariamente la suma de caudales de cada una de las bombas sino que se necesita construir la curva dinámica sobre la curva de 2 y 3 bombas funcionando en paralelo para poder determinar su caudal con un gráfico como el de la figura 12.

La presión se trata de mantener constante de la siguiente forma:

Si la bomba guia trabaja con un diferencial de 20 Psi, por ejemplo en un edificio podria prender en 70 Psi y apagar en 90 Psi. Si la presión cae debido al consumo 5 libras menos de los 70 Psi, o sea 65 Psi, entra inmediatamente a trabajar accionada por un dispositivo de control de presión la segunda bomba ayudando a la primera, si el consumo no aumenta, y mas bién disminuye la segunda bomba ayudará a la primera hasta que se alcancen los 80 Psi, luego continuará sola la primera hasta los 90 Psi; pero si el consumo aumenta hasta el caudal pico calculado, entonces entrará a trabajar una tercera bomba cuando la presión baje hasta los 60 Psi, que debe ser la presión

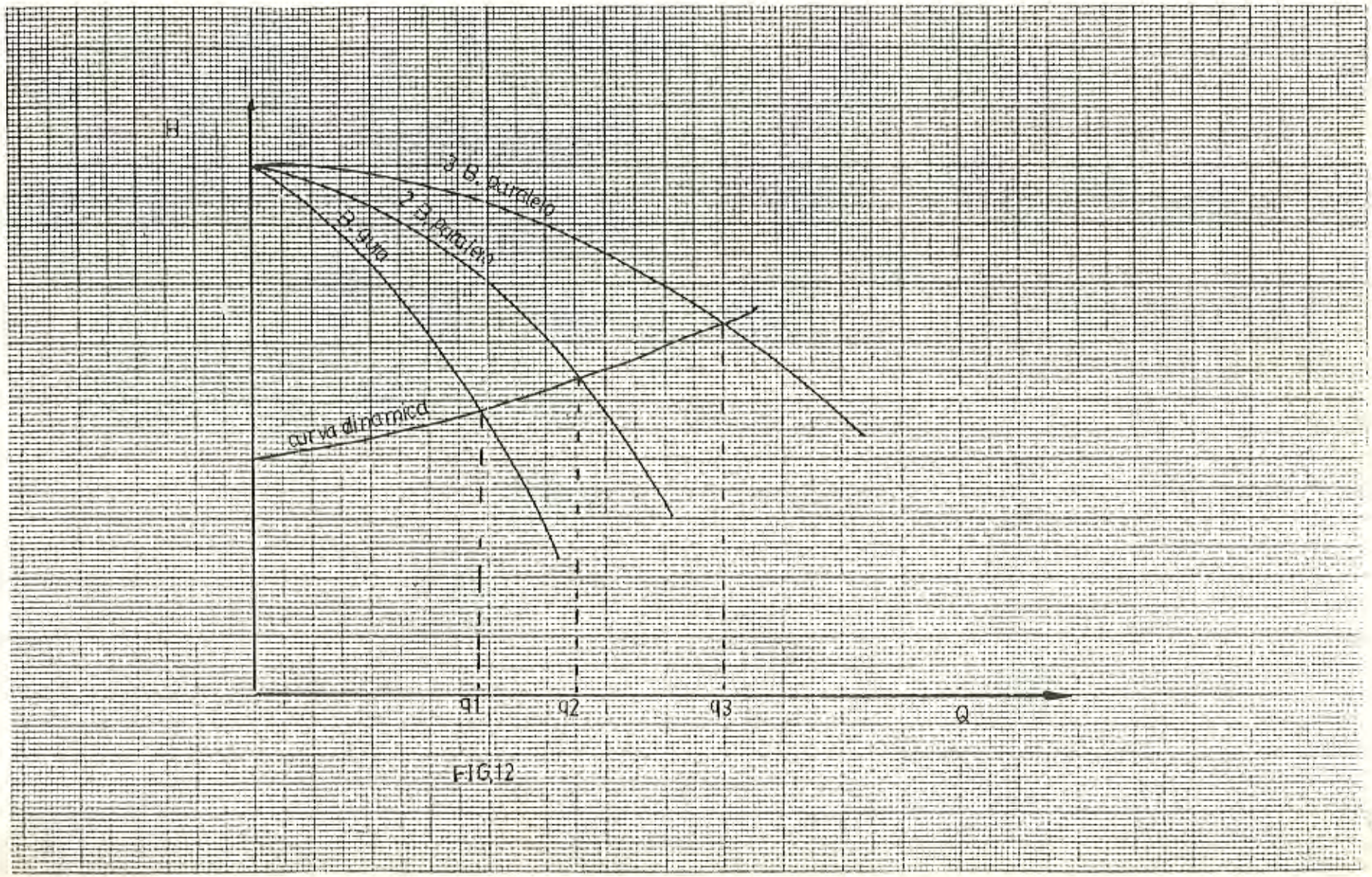


FIG 12

mínima para que el agua llegue al punto más desfavorable. Esta tercera bomba ayudará a las dos anteriores hasta alcanzar los 80 Psi, luego siguen las dos bombas hasta los 85 Psi y luego solo la bomba guia hasta los 90 Psi en que desconectará cuando el consumo sea cero.

Estos sistemas son muy útiles para el caso de edificios de oficinas en donde hay períodos del día en que practicamente no hay consumo, también para el caso de apartamentos en donde solamente a ciertas horas del día existe el consumo pico, trabajando en el resto del tiempo solamente la bomba guía.

El tipo de bombas utilizadas para estas aplicaciones son aquellas del tipo centrífuga multietapa o tipo turbina regenerativa que son bombas de media-alta presión y relativamente bajo caudal.

Personalmente prefiero las del tipo de turbina regenerativa ya que es una bomba menos voluminosa y logra el mismo efecto que una bomba centrífuga multietapa recirculando el fluído en su carcaza.

CONSUMO DE ENERGIA Y EFICIENCIA

Para el cálculo del consumo de energía se considerará lo siguiente:

- Existen 2 horas picos durante el cual se consume el 40% del total del consumo diario, trabajando durante este tiempo las tres bombas.

- El 60% restante del consumo lo proveerá la bomba guía.

- Se considera que durante las horas pico las tres bombas, están

trabajando continuamente.

- Se denomina Pot_1, Pot_2, Pot_3. la potencia de consumo en Kw de la bomba 1, bomba 2, y bomba 3 respectivamente.

- Si se denomina N al número de arranques diario y K al consumo de agua promedio diario, se tendrá que el consumo de energía de la bomba guía cuando proporcione el 60% del consumo diario será durante los arranques el siguiente:

$$Er_1 = \frac{7 \times k \times Pot_1}{3600\ Vu} \times 0.6$$

Mensualmente se tendrá un consumo de energía por concepto de arranques de:

$$Erm_1 = \frac{30 \times 7 \times K \times Pot_1}{3600\ Vu} \times 0.6 \qquad o$$

$$Erm_1 = \frac{K \times Pot_1}{28.57 \times Vu}$$

El consumo de energía por funcionamiento para esta bomba será para el mes:

$$Ecm_1 = \frac{0.6 \times K \times Pot_1}{2 \times Q}$$

El consumo total para el 60% del consumo del dia en esta bomba será:

$$E_{Tm1} = 0.6\ K \times Pot_1 \left(\frac{1}{17.14\ Vu} + \frac{1}{2 \times Q}\right)$$

El 40% del consumo diario se lo hará durante el tiempo que trabajen las tres bombas, por lo tanto el consumo de energía será:

$$Ecm = (Pot_1 + Pot_2 + Pot_3) \times \frac{0.4\ K}{Q_T} \times \frac{30}{60}$$

$$Ecm = (Pot_1 + Pot_2 + Pot_3) \times \frac{K}{5\ Q_T}$$

El consumo total del sistema será

$$E_{TT} = 0.6K \times Pot_1 \left(\frac{1}{17.14\ Vu} + \frac{1}{2 \times Q}\right) + (Pot_1 + Pot_2 + Pot_3) \times \frac{K}{5\ Q_T}$$

La energía útil será igual que en los casos anteriores:

$$Eu = 7.23 \times 10^{-6}\ Km \times Pmedia$$

Km = Consumo mensual de agua en galones

Pmedia = Presión media en el edificio en lb/pul^2

La eficacia del sistema será

$$n = \frac{Eu}{E_{TT}}$$

CAPITULO III

SOLUCION PROPUESTA

3.1 CASO ESPECIFICO

Para ilustrar lo dicho en este informe técnico, a continuación se hace la selección del equipo que se utilizó concretamente en el EDIFICIO SKIROS de la ciudad de QUITO.

Este es un edificio que tiene las siguientes características:

- Edificio de 15 plantas para departamentos con dos torres, además dos subsuelos, en el subsuelo 2 se colocará el equipo de bombeo.

- El diseño del edificio indica la construcción de dos tanques de distribución comunicados entre si sirviendo uno a cada torre con un volumen cada uno de 15 m^3.

- Existirá un equipo hidroneumático para la presurización de los dos pisos superiores que comprenden tres departamentos.

- En el subsuelo 2 se instalará el equipo de bombeo con una sola bomba que alimente hacia los dos tanques con un volumen total de 30 m^3.

- La tubería de elevación es del tipo de hierro galvanizado de un diámetro de dos pulgadas.

- La altura estática hasta los tanques desde el punto de ubicación de la bomba es de 43 m.

- La tubería hacia las dos plantas superiores es del tipo hierro galvanizado del diámetro de una pulgada.

- La altura desde la ubicación del equipo hidroneumático hasta el punto más desfavorable es de 6 m de altura y aproximadamente 30 m de largo.

- El número de departamentos es de 45

- El número de unidades en cada departamento es de 25

- El número aproximado de personas habitando el edificio es de 180

Primeramente se calculará el caudal aproximado que deberá proveer la bomba tomando en consideración el número de habitantes en el edificio.

Si se considera un consumo promedio de 150 lts/hab/día, el consumo diario será de 27.000 lts o 7142 galones. Si se calcula bombeo diario para que se lo realice en 75 minutos se obtiene un caudal de 95.2 GPM, el cual puede ser un poco más o un poco menos tomando en consideración que el bombeo no necesariamente se lo puede realizar en 75 minutos sino 1 hora, hora y media o un tiempo prudencial que mas bién esté de acuerdo al criterio del ingeniero. Sin embargo el caudal que proporcione la bomba si será uno y será aquel que se obtenga al calcular la curva dinámica y superponer a las curvas de operación de las bombas.

Para el cálculo de la curva dinámica se tomarán caudales desde 60 GPM hasta 120 GPM con intervalos de 20 GPM, tomando en cuenta los siguientes datos:

Largo de tubería = 43 m

Accesorios:

12 codos de 2" x 90°

1 válvula de pie de 2"

1 válvula de check de 2"

1 válvula de compuerta 2"

Utilizando el método de longitud equivalente se obtiene que estos accesorios hacen el equivalente en pérdidas que un tubo de 2" de diámetro y 26.5 m de largo. El largo total de la tubería por lo tanto se asumiran como de 69.5 m.

Se calculará las pérdidas con la ecuación de DARCY - WEISBACH usando el diagrama de MOODY.

Para hierro galvanizado el coeficiente de rugosidad absoluto k es de 0.18.

Según esto se obtienen los resultados tabulados en la tabla II, y con los cuales se construyen la curva dinámica que se muestra en la figura 13.

Según esta curva se buscó una bomba que diera un caudal aproximado al calculado y se escogió el equipo que se especifica en el punto 3.2.

El equipo hidroneumático se los escoge en base a los siguientes parámetros

TABLA II

Q g.p.m.	Re	k/d	λ	Hrp m.
60	94,059	0,0036	0,029	7,16
80	123762	0,0036	0,029	12,85
100	155940	0,0036	0,028	20,40
120	187128	0,0036	0,027	23,75

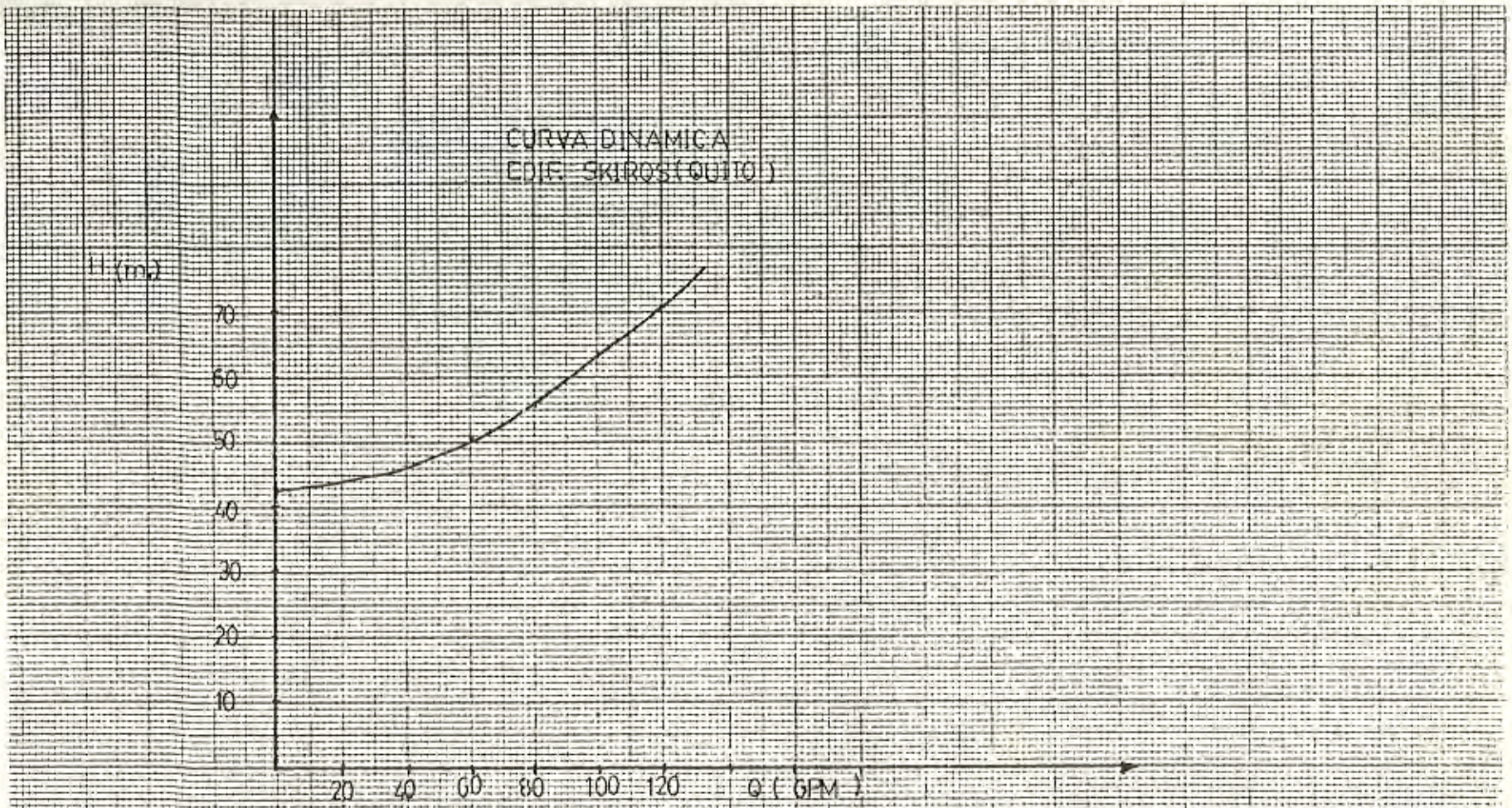

CURVA DINAMICA
EDIF. SKIROS (QUITO)
H (m)
70
60
50
40
30
20
10
20
40
60
80
100
120
Q (GPM)

FIG. 13

CAUDAL REQUERIDO

El caudal requerido se lo calcula en base al método del número de unidades de servicio de la siguiente forma.

3 departamentos x 25 unidades = 75 unidades

75 unidades x 1.13 lts/min/unidad = 84.75 lt/min

84.75 lt/min = 22.42 GPM

Este será el caudal promedio para el equipo en la hora pico.

PRESION REQUERIDA

Para el cálculo de la presión se procede al cálculo de pérdidas en la tubería. Se tomará en consideración que se tiene una presión positiva debido a la ayuda por la caída de gravedad de 6 m columna de agua.

En la tabla III se aprecian las pérdidas para caudales de 10, 20 y 30 GPM.

El cálculo se lo realizó por el mismo método anterior tomando en consideración los siguientes accesorios:

10 codos de 1" x 90°

1 válvula de compuerta de 1"

2 válvulas chekc de 1"

1 té de 1"

Obteniendo una longitud equivalente de 21.2 m.

La longitud total es por lo tanto de 21.2 m + 30 m = 51.2 m

Puesto que se tiene una presión favorable de la gravedad de 6 m c.a, a las pérdidas totales se tendrá que restarle este valor para obtener la presión necesaria para que llegue agua hasta el punto más desfavorable, obteniéndose la tabla IV.

Se tendrá que buscar una bomba que con un caudal aproximado de 20 gpm proporcione una presión de 30.4 Psi o equivalente a 21.4 m.c.a.

Para la selección del tanque de presión se toma en consideración que la bomba trabajará entre 30 y 50 Psi con un caudal promedio de 20 gpm. Cuando el consumo es cero, la bomba almacena agua en el tanque, y su funcionamiento será de por lo menos 15 seg, ya que por el caudal que proporciona se ve que será un motor pequeño.

Durante estos 15 seg la bomba dará un volumen de agua aproximado de 5 galones, el cual será el volumen útil que deberá tener el tanque.

El volumen total del tanque si no tiene precarga será

$$Vt = \frac{Vu}{Pa} \times \frac{(P_{2g} + Pa)\ (P_{1g} + Pa)}{P_{2g} - P_{1g}}$$

donde

Pa = 10.3 Psi (A 2.800 metros sobre el nivel del mar)

Vu = 5 galones

P_{2g} = 50 Psi

P_{1g} = 30 Psi

Entonces

Vt = 58.9 galones

TABLA III

Q g.p.m.	Re.	k/d	λ	Hrp m.
10	31683	0,0071	0,048	8,21
20	61881	0,0071	0,042	27,42
30	95792	0,0071	0,038	59,46

TABLA IV

Q gpm.	Hrp (m.)	P. positiva (m.)	P. requerida m.c.a.	P. requerida p.s.i.
10	8,21	6	2,27	3,22
20	27,42	6	21,42	30,41
30	59,46	6	53,46	75,90

Si el tanque fuera precargado el volumen del tanque será

$$Vt = Vu \times \frac{(P_{2g} + Pa)}{P_{2g} - P_{1g}}$$

Vt = 15 galones

3.2 EQUIPO UTILIZADO

El equipo utilizado fue para el equipo de elevación el siguiente:

- 1 Bomba marca GOULDS de procedencia americana, cuya curva de operación se muestra en la figura 14 junto con la curva dinámica calculada.

Modelo 3656, 1½ x 2 - 8, directamente acoplada a un motor de 10 HP, 3.500 RPM. La potencia consumida en el punto de corte es de aproximadamente 7.5 HP.

Eficiencia del 66%, NPSH requerido de 6 pies.

Caudal proporcionado en el punto de corte de 92 GPM lo cual está dentro del rango calculado.

El impulsor que posee la bomba es de 7 pulgadas de diámetro del tipo cerrado.

El equipo hidroneumático seleccionado fue el siguiente:

- Una bomba centrífuga marca GOULDS de procedencia norteamericana, modelo 3642, 1 x 1¼ - 5. En la figura 15 se muestra la curva dinámica superpuesta con la curva del fabricante.

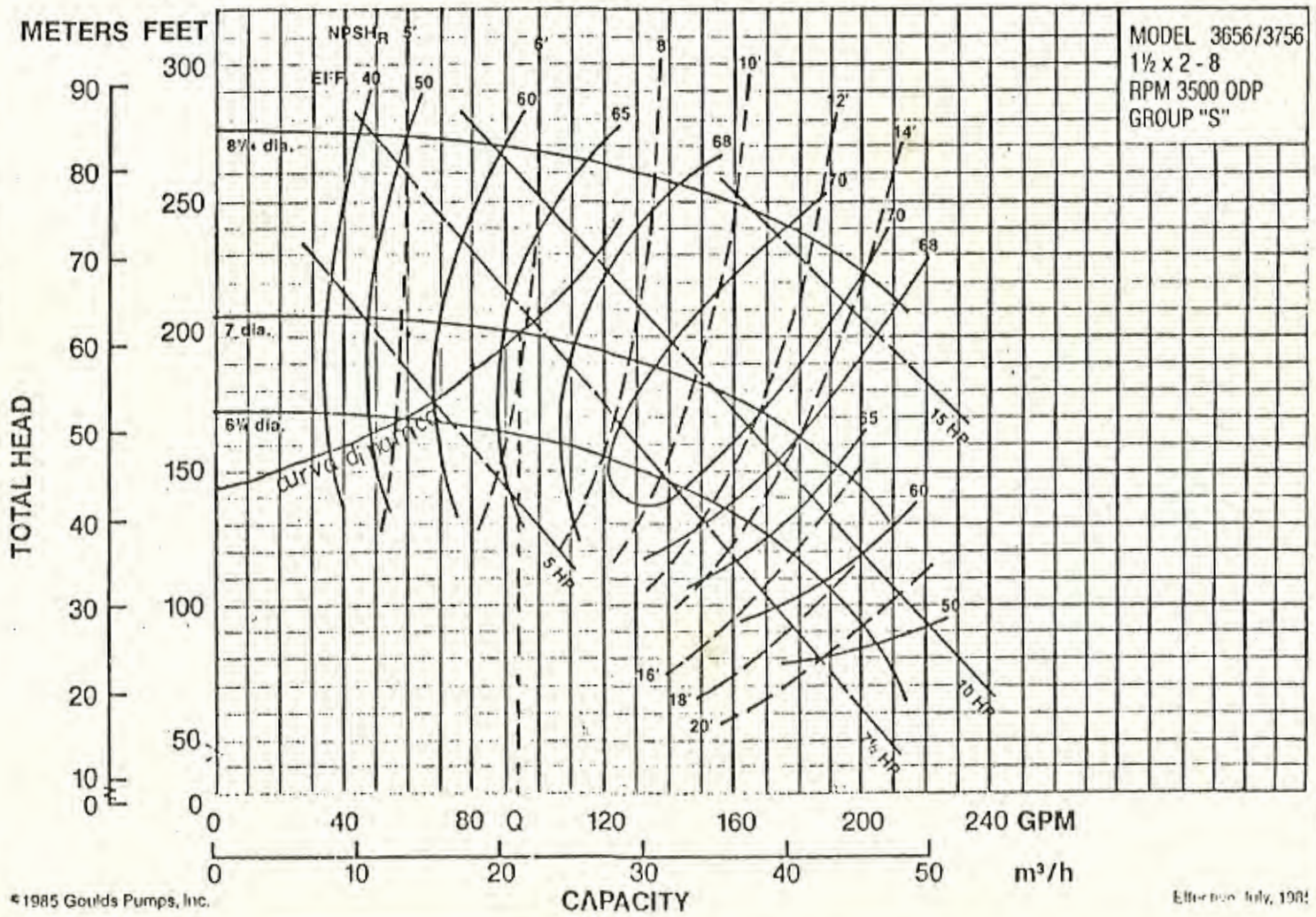

GOULDS PUMPS, INC
SENECA FALLS, NEW YORK 13148
MODEL 3656/3756
1½ x 2 - 8
RPM 3500 ODP
GROUP "S"
METERS FEET
TOTAL HEAD
NPSHR 5'
EFF 40
50
60
65
68
70
8¾ dia.
7 dia.
6¼ dia.
curva di turnco
5 HP
7½ HP
10 HP
15 HP
0 40 80 Q 120 160 200 240 GPM
0 10 20 30 40 50 m³/h
CAPACITY
© 1985 Goulds Pumps, Inc.
Effective July, 1985

FIG14

La curva de la bomba seleccionada es la que aparece con el número 2 en la figura, es decir una bomba con motor de 1 HP, 3.500 RPM.

- Un tanque hidroneumático de fabricación nacional de 60 galones.

ACCESORIOS

Equipo de elevación:

- 1 arrancador del tipo de arranque directo con protección térmica contra sobrecarga.

- 1 relé electrónico de nivel con tres sondas en el tanque bajo y tres sondas en el tanque alto para trabajo automático.

Equipo hidroneumático:

- 1 control de presión
- 1 manómetro
- 1 control de volumen de aire

Este fue básicamente el equipo utilizado que aunque para la instalación se utilizaron otros accesorios de plomería, estos no influyeron en el resultado final y ahora los equipos se encuentran trabajando normalmente.

CONSUMO DE ENERGIA

El consumo de energía para el caso de sistemas de elevación se tenía que estaba dado por:

Performance Curves

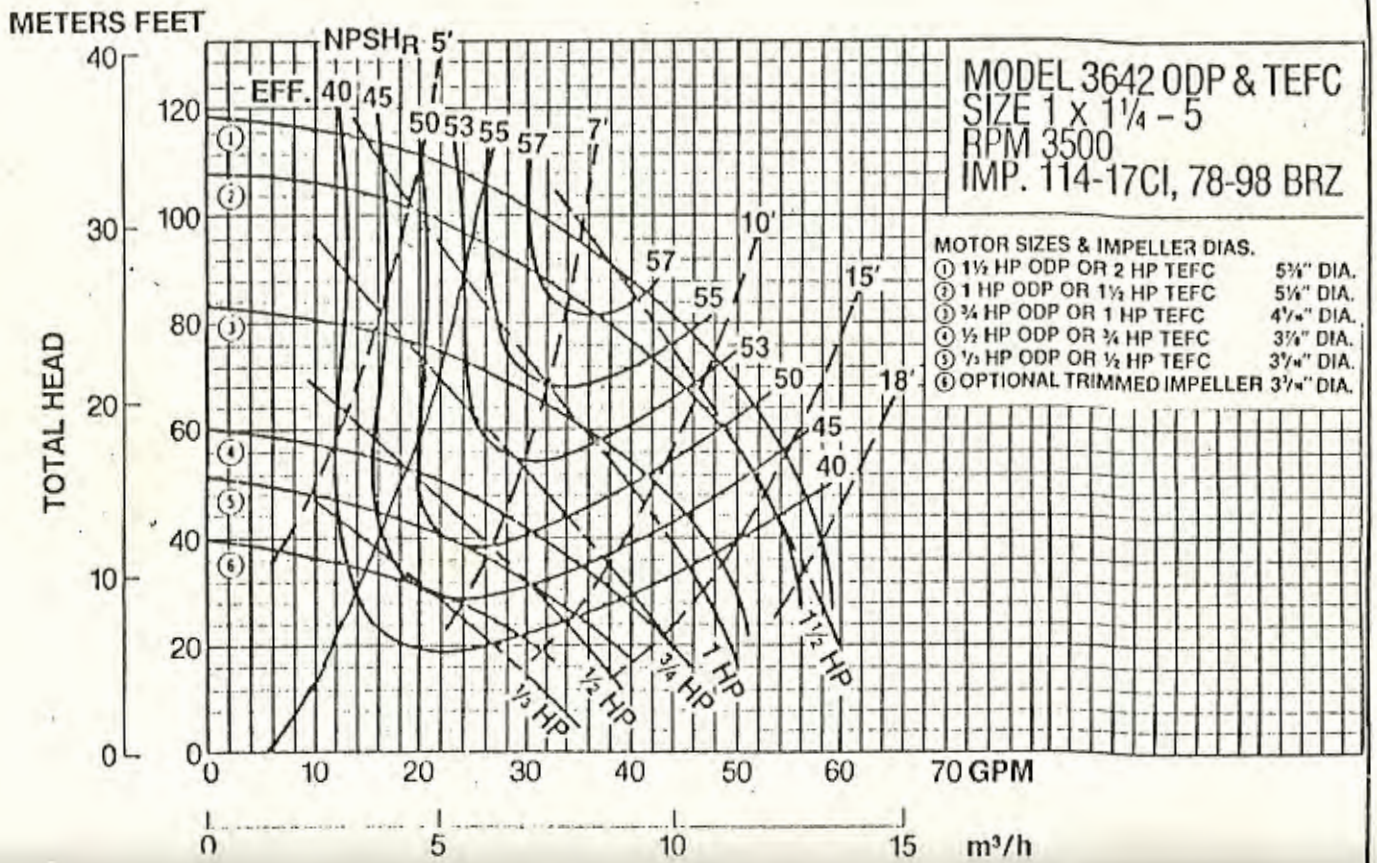


FIG. 15

$$E_{Tm1} = \frac{Pot}{17.14} + \frac{K \times Pot}{2 \times Q}$$

En este caso:

Pot = 7.5 HP = 5.6 Kw

K = 7142 Galones

Q = 92 GPM

Por lo tanto reemplazando se obtiene que

$$E_{Tm1} = 217.69 \text{ Kw-hr}$$

El consumo del hidroneumático de los pisos superiores está dado por

$$E_{Tm2} = K \times Pot \left(\frac{1}{17.14\ Vu} + \frac{1}{2 \times Q} \right)$$

En este caso

K = 476 Galones (12 personas por 150 lt/hab/dia)

Q = 20 GPM

Vu = 5 GAL

Pot = 1 HP = 0.746 Kw

Reemplazando se obtiene

$$E_{Tm2} = 13.02 \text{ Kw-Hr}$$

La energía total consumida será

$$E_{TT} = 217.69 + 13.02 = 230.71 \text{ Kw-hr}$$

EFICIENCIA

Para el cálculo de eficiencia se calcula primeramente la energia útil

$$Eu = 7.23 \times 10^{-6} \times Km \times Pmedia\ de\ consumo$$

$$Km = 7142\ Gal \times 30 = 214.260\ Gal$$

$$Pmedia = 30\ Lb/pul^2$$

entonces:

$$Eu = 46.47\ Kw\text{-}hr$$

La eficiencia del sistema será

$$n = \frac{46.47}{230.71} = 0.20$$

$$n = 20\%$$

Ahora se realizará la comparación si se hubieran seleccionado otros sistemas

SISTEMA HIDRONEUMATICO

Caudal necesario:

45 Dptos x 25 Unidades/Dep = 1125 Unidades

1125 Unidades x 1.13 lt/min = 1271 lt/min = 336 GPM

Q = 336 GPM (Caudal de consumo pico)

PRESION NECESARIA

Para resumir el cálculo de la presión necesaria y puesto que es para

objeto de comparación se asumirá las pérdidas en tuberías como del 30% del largo total, ya que el dimensionamiento de tubería para este caso se debió haber hecho para no permitir una pérdida mayor a este porcentaje.

así:

Altura estática : 43 m

Pérdidas totales : 12.9 m

Presión en el punto

más desfavorable : 7 m.c.a.

Presión mínima : 62.9 m.c.a. o 89.3 Lb/pul²

Para un diferencial de 20 Lb/pul$_2$ el sistema deberá trabajar entre 90 y 110 Lb/pul².

Se calcula la potencia media consumida por un equipo mediante la fórmula

$$Pot = \frac{Fhs \times 0.746}{7620\ e} \times 100$$

Pot = Potencia demandada en Kw

F = Gasto en lt/seg

s = Densidad del líquido

h = Columna total en m. de líquido

e = Eficiencia de la bomba (se tomará como de 0.7)

Para este caso se tomará la potencia promedio demandada entre 63 m.c.a y 77.5 m.c.a (90 y 110 Lb/pul²)

Con 63 m.c.a se tiene

$$Pot = \frac{(21.16\ lt/seg)\ (63\ m) \times 0.746}{7620 \times 0.7} \times 100 = 18.64\ Kw$$

con 77.5 m.c.a se tiene

$$Pot = 22.93\ Kw$$

La potencia promedio de consumo será de 20.78 Kw

El volumen útil del tanque deberá ser de por lo menos 336 galones por lo tanto el tanque necesariamente será precargado, ya que de otra manera resulta un tanque muy grande.

El volumen del tanque será

$$Vt = Vu \times \frac{(P_{2g} + Pa)}{P_{2g} - P_{1g}}$$

$$Vt = 336 \times \left(\frac{110 + 10.3}{110 - 90} \right)$$

$$Vt = 2021\ Galones$$

<u>CONSUMO DE ENERGIA</u>

El consumo mensual de energía del hidroneumático será de:

$$E_{Tm} = K \times Pot \left(\frac{1}{17.14\ Vu} + \frac{1}{2 \times Q} \right)$$

donde

K = 7142 Galones

Pot = 20.78 Kw

Vu = 336 Gal

Q = 336 GPM

Entonces

$$E_{Tm} = 246.61$$

EFICIENCIA

La eficiencia será

$$n = \frac{Eu}{E_{Tm}}$$

$$n = \frac{46.47 \text{ Kw-hr}}{246.61 \text{ Kw-hr}} = 0.188$$

$$n = 18.8\%$$

SISTEMA PRESION CONSTANTE

- 1 Bomba guia con el 20% del consumo pico o sea 67.2 GPM
- 2 Bombas que entre las dos deben dar un caudal de 269 GPM

Potencia bomba guia considerando una presión promedio de 70.25 m.c.a

$$Pot_1 = \frac{4.23 \text{ lt/seg} \times 70.25 \text{ m.c.a} \times 0.746}{7620 \times 0.7} \times 100$$

$$Pot_1 = 4.15 \text{ Kw}$$

Las otras dos bombas serán de la siguiente potencia

$$Pot_2 = \frac{8.46 \text{ lt/seg} \times 70.25 \text{ m.c.a} \times 0.746}{7620 \times 0.7} \times 100$$

$$Pot_2 = Pot_3 = 8.31 \text{ Kw}$$

El volumen útil del tanque se escogerá en base al caudal de la bomba guia es decir para el trabajo mínimo de 1 minuto se tiene

$$Vu = 67.2 \text{ Galones}$$

Volumen de un tanque precargado será

$$Vt = Vu \left(\frac{P_{2a} + Pa}{P_{2a} - P_{1a}} \right)$$

$$Vt = 67.2 \left(\frac{110 + 10.3}{110 - 90} \right)$$

$$Vt = 404 \text{ Galones}$$

<u>CONSUMO DE ENERGIA</u>

El consumo total del sistema será:

$$E_{TT} = 0.6 \times Pot_1 \left(\frac{1}{17.14\ Vu} + \frac{1}{2 \times Q} \right) + (Pot_1 + Pot_2 + Pot_3) \frac{K}{50_T}$$

$K = 7142$ Galones

$Pot_1 = 4.15$ Kw

$Pot_2 = 8.31$ Kw

$Pot_3 = 8.31$ Kw

$Vu = 67.2$ Galones

$Q = 67.2$ GPM

Q_T = 336 GPM

E_{TT} = 236.05 Kw-hr

EFICIENCIA

La eficiencia será

$$n = \frac{Eu}{E_{TT}}$$

$$n = \frac{46.47 \text{ Kw-hr}}{236.05 \text{ Kw-hr}} = 0.197$$

n = 19.7%

ANALISIS DE COSTOS

Se analizará el costo global de los equipos para cada sistema

a) Sistema de elevación

Equipo con los siguientes componentes:

- 1 Bomba centrífuga de las características especificadas
- 1 Válvula de pie de 2"
- 1 Tablero de arranque y control
- 1 Control de nivel para protección
- 1 Bomba para hidroneumático
- 1 Tanque hidroneumático
- 1 Control de volumen de aire
- 1 Control de presión
- 1 Manómetro

- 1 Arrancador magnético
- 1 Control de nivel eléctrico para protección hidroneumático

Precio total del equipo incluído impuestos . . . . . S/. 1'509.845

Costos de funcionamiento (anual)

Consumo de energía	S/.	166.111
Mantenimiento.	S/.	150.000
Imprevistos.	S/.	100.000
Total costos de operación.	S/.	416.111

b) Sistema hidroneumático

Equipo con los siguientes componentes:

- 1 Bomba de 30 HP aprox.
- 1 Válvula de pie
- 1 Control de presión 90 - 110 Psi
- 1 Manómetro 0 - 200 Psi
- 2 Tanques hidroneumáticos de 1000 galones c/u
- 1 Compresor de 0 - 100 Psi
- 1 Tablero de arranque y control
- 1 Control de nivel eléctrico

Precio total del equipo incluido impuestos . . . . . S/. 3'396.000

Costos de funcionamiento (anual)

Consumo de energia	S/.	177.560
Mantenimiento.	S/.	240.000
Imprevistos.	S/.	150.000
Total costos de operación.	S/.	567.560

c) Sistema de presión constante

- 1 Bomba guia multietapa 5 HP
- 2 Bombas de aprox. 10 HP
- 1 Tanque hidroneumático de 400 Gal.
- 3 Válvulas de pie
- 1 Compresor de aire
- 3 Controles de presión
- 3 Manómetros
- 1 Control de nivel eléctrico
- 1 Tablero de arranque y control

Precio total del equipo incluido impuestos . . . . . S/. 4'062.000

Costos de funcionamiento (anual)

Consumo de energía	S/.	169.960
Mantenimiento.	S/.	240.000
Imprevistos.	S/.	150.000
Total costos de operación.	S/.	559.960

Como se puede ver los sistemas de elevación son los equipos menos costosos tanto en operación como en costos iniciales, así se ve que en el caso del edificio SKIROS el equipo hidroneumático hubiese resultado un 55% más costoso y un equipo de presión constante un 63% más costoso.

En cuanto a los costos de operación se puede apreciar que no existe mucha diferencia entre uno y otro, siempre y cuando los tanques hidroneumáticos estén bien seleccionados.

Por lo tanto se puede decir que la selección de un sistema u otro está condicionado al diseño del edificio.

Si el diseño del edificio lo permite es conveniente utilizar equipos de elevación y si no lo permite habría que escoger entre los sistemas hidroneumáticos y sistemas de presión constante; si existe el suficiente espacio para colocar tanques adecuadamente dimensionados se pueden utilizar sistemas hidroneumáticos ya que si estos están bien seleccionados, no existe mucha diferencia en cuanto a costos de operación con los sistemas de presión constante.

Si no existe el suficiente espacio se debe utilizar sistemas de presión constante ya que el utilizar sistemas hidroneumáticos con tanques muy pequeños conduciría a un costo mucho mayor de energía, así por ejemplo si se hubiese seleccionado sin ningún criterio un tanque de 500 galones para el edificio, con hidroneumático y sin precarga, el consumo de nergía sería de 1235 Kw-hr mensual y de un costo aproximado anual de S/. 889.336 sucres por consumo de nergía lo cual si es bastante representativo y nada adecuado.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a lo expuesto en este informe se llega a las siguientes conclusiones

CONCLUSIONES

(1) La selección de un sistema de bombeo para edificios de altura está en función de:

a) Diseño del edificio

b) Costos del equipo

c) Costos de operación (consumo de energía)

(2) Los sistemas de elevación con hidroneumático para pisos superiores son los de menor costo y consumo de energía.

(3) Los sistemas hidroneumáticos y de presión constante son una alternativa para cuando el diseño del edificio no permite la utilización de sistemas de elevación.

(4) Los sistemas de presión constante son más caros que los sistemas hidroneumáticos pero ocupan mucho menos espacio. El consumo de energía y costos de operación es casi el mismo siempre que el hidroneumático esté bien seleccionado.

RECOMENDACIONES

(1) Se recomienda tanto a Arquitectos como a Ingenieros Civiles el tener en consideración en sus diseños la construcción de tanques elevados de distribución para el suministro de agua para el caso de edificios de altura.

(2) Si se tiene que usar sistemas hidroneumáticos se hacen las siguientes recomendaciones

a) Usar sistemas con tanques precargados con aire.

b) Calcular los tanques de acuerdo al volumen útil necesario y dimensionar el cuarto de bombas para ubicar las mismas.

c) Utilizar dispositivos de control de fuga de aire en caso de utilizar tanques sin accesorio de separación aire/agua para el caso de falla de energía eléctrica.

BIBLIOGRAFIA

1. GOULDS PUMPS INC. GPM, Goulds Pump Manual, Seneca Falls NY, Third edition
2. MATAIX CLAUDIO, Mecánica de los fluidos y máquinas hidráulicas, Harper & Row Publishers Inc., 1970
3. TYLER G. HICKS, BME, Bombas, su selección y aplicación, Cia. Editorial Continental S.A. de C.V., México, 1985
4. WOLFANG-PURSCHEL, La captación y el almacenamiento del agua potable, Urmo S.A. Ediciones, 1982
5. WOLFANG-PURSCHEL, El transporte y la distribución del agua, Urmo S.A., Ediciones, 1982