

LINEAS, TRANSFORMADORES Y BOMBAS



Autor:

Pedro Gea

rao Estudios y proyectos S.L.

Índice de contenidos:

1. Líneas eléctricas
 - 1.1. Conductores desnudos y aislados.
 - 1.2. Estructura de los cables. Principales conductores.
 - 1.3. Aislantes.
 - 1.4. Cálculos de la sección de una línea.
2. Condensadores
 - 2.1. Cálculo de la potencia reactiva a compensar
3. Transformadores
4. Bombas
 - 4.1. Ejemplo
5. Problemas asociados al arranque
 - 5.1. Arranque directo de motores asíncronos
 - 5.2. Arranque con autotransformador
 - 5.2.1. Arranque con autotransformadores de relación variable.
 - 5.2.2. Arranque con autotransformadores de relación fija.
 - 5.2.3. Cálculo del autotransformador de arranque.
 - 5.3. Arranque estrella-triángulo
 - 5.4. Variadores de velocidad
 - 5.4.1. Modo de operación
 - 5.4.2. Componentes
 - 5.4.3. Propiedades del arrancador
 - 5.4.4. Aplicación en bombeo
 - 5.4.5. Ventajas e inconvenientes de los arrancadores progresivos.
 - 5.5 Arrancadores con resistencias
 - 5.5.1. Arrancadores con resistencias estatóricas
 - 5.5.2. Arrancadores con resistencias rotóricas

6. Tarificación eléctrica

- 6.1. Tarifas eléctricas
- 6.2. Facturación básica
- 6.3. Complementos tarifarios
 - 6.3.1. Complemento por discriminación horaria
 - 6.3.2. Complemento por potencia reactiva
- 6.4. Ejemplo práctico de tarificación

7. Bombas: Definición y cálculo

- 7.1. Definición
- 7.2. Clasificación de las bombas
 - 7.2.1. Bombas de desplazamiento positivo
 - 7.2.2. Bomba centrífuga
- 7.3. Aplicación de la ecuación de la energía. Cálculo de bombas.
- 7.4. Potencia requerida para mover la bomba
- 7.5. Pérdidas en tuberías.

1. LÍNEAS ELÉCTRICAS

La energía eléctrica como tal no puede almacenarse en la actualidad en cantidades que resulten significativas, de forma que puedan responder a la demanda existente. Por tanto, para que exista una situación estable en el sistema eléctrico global debe haber un equilibrio constante entre la energía eléctrica producida y la consumida.

El desequilibrio se produce cuando los consumos tienen una bajada importante, o lo que es lo mismo, las demandas suben al máximo. Por eso, las tarifas tratan de penalizar el consumo en los momentos máximos y premiar el consumo cuando hay excedentes de energía por falta de consumo.

Al no poderse almacenar la energía, las líneas que la transportan juegan un papel fundamental. La forma en que están distribuidas es la siguiente: parten de los generadores, en los que existen unos transformadores que elevan la tensión hasta 220 KV ó 400 KV hasta que llegan a núcleos urbanos en los que existen de nuevo estaciones transformadoras en las que se reduce la tensión a MT (11 KV / 25 KV). De aquí se adentra en el núcleo urbano hasta que se transforman a BT.

Uno de los criterios a la hora de establecer las líneas eléctricas, es que cualquier punto de consumo tenga caminos alternativos por los cuales pueda ser alimentado.

1.1. Conductores desnudos y aislados.

La utilización de conductores aéreos desnudos es una de las formas clásicas de transportar la energía eléctrica. Los conductores van sujetos a aisladores. El riesgo que entraña esta disposición obliga a mantener ciertas distancias de seguridad entre los conductores y el suelo, edificios, etc... Aunque esta disposición se ha usado mucho a todos los niveles (AT, MT, BT) en la actualidad se está relegando su uso a AT, dejándose para BT los cables aislados. El desarrollo

continuo de nuevos materiales con buenas propiedades aislantes y mecánicas ha tenido como consecuencia la aparición de una gran variedad de cables aislados que abren un gran abanico de usos.

1.2. Estructura de los cables. Principales conductores.

Los cables aislados están formados básicamente por unos conductos o haz de conductores rodeados por el aislante, que se suele complementar con otros elementos para mejorar aspectos mecánicos, resistencia a agentes atmosféricos, ataque de elementos químicos.

Los principales conductores son dos: cobre y aluminio. El cobre es el principal elemento utilizado. Tienen gran ductilidad, lo que hace ideal para la fabricación de hilos finos, con los que se fabrican los cables. Su resistencia mecánica y a la corrosión le permiten tener una vida útil larga, aún en ambientes severos.

Para líneas aéreas con conductores desnudos, sometidos a esfuerzos importantes se emplea el cobre duro, con una carga de rotura entre 37 y 45 Kg/mm². Para conductores aislados se emplea un cobre recocido que tiene peor carga de rotura (± 20 Kg/mm²) pero mayor elasticidad.

El aluminio también se utiliza mucho. Su principal ventaja frente al cobre es la economía, ya que a pesar de que su resistividad es 1,64 la del cobre, su densidad es el 30% de la de éste. Esto implica que a igualdad de resistencia eléctrica el peso del aluminio es la mitad del de cobre.

Las propiedades mecánicas del aluminio son inferiores a las del cobre (carga rotura 15 Kg/mm²). Para mejorarlas se han adoptado diversas soluciones: fabricación de conductores con alma de acero, uso de aleaciones de aluminio

1.3. Aislantes

- -Termoplástico. Pierden resistencia mecánica al calentarse, reblandeciéndose. Se usa el PVC y el PE.
- Materiales termoestables. Polietileno reticulado, goma natural, goma butílica, goma etileno-propileno (EPR).
- Otros. Aceites, siliconas, acetato de vinilo, politetrafluoretileno (PTFE, teflón)

1.4. Cálculos de la sección de una línea.

La sección viene dada por el calentamiento y por la caída de tensión. Hay una serie de datos de partida para calcular la sección de los conductores.

$$u = \frac{u(\%) \cdot V}{100}$$

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot P}{u \cdot V}$$

- Potencia del receptor (P)
- Intensidad absorbida por el receptor (I)
- Factor de potencia del receptor (cosφ)
- Tensión del receptor (V)
- Longitud de la línea (L)
- Caída máxima de tensión permitida (u)
- Resistividad del conductor empleado (ρ)
- Aislamiento de los conductores
- Tª ambiente

Ejemplo.-

Se quiere instalar una línea de alimentación de un motor monofásico de 2,2 KW de potencia a 220V de tensión, con un factor de potencia de 0.9, que está situado a 120 m del origen de la línea. El conductor es de cobre ($\rho=0,0178 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$). Calcular la sección del conductor para que la caída de tensión máxima sea del 5%.

$$u = \frac{u(\%) \cdot V}{100} = \frac{5 \cdot 220}{100} = 11 \text{ V}$$

$$S = \frac{2 \cdot \rho \cdot L \cdot P}{u \cdot V} = \frac{2 \cdot 0.0178 \cdot 120 \cdot 2200}{11 \cdot 220} = 3.88 \text{ mm}^2.$$

Para el calculo teniendo en cuenta el calentamiento de los conductores se utilizan tablas que quedan recogidas en las normas y reglamentos vigentes para instalaciones eléctricas.

2. CONDENSADORES.

Un condensador es un elemento cuya función básica es almacenar energía. Básicamente se trata de dos placas de conductos situadas a una cierta distancia, y que por las leyes del campo eléctrico se sabe que la tensión que existe entre las placas del condensador es proporcional a la carga almacenada. Para explicar su efecto en corriente alterna, decir que un condensador representa una impedancia capacitiva y que matemáticamente hablando, tiene signo contrario de las llamadas impedancias inductivas. Impedancia inductivas son todos aquellos elementos que tienen bobinas arrolladas. Un caso particular son los motores eléctricos de bombas de agua.

Al tener distinto signo se contrarrestan.

Toda impedancia produce un consumo de energía, así se puede hablar de tres tipos de potencias consumidas:

- *Potencia activa* $P = R \cdot I^2 = V \cdot I \cdot \cos \varphi$ medido en Wattios
- *Potencia reactiva* $Q = X \cdot I^2 = V \cdot I \cdot \sin \varphi$ medido en VAr
- *Potencia aparente* $S = Z \cdot I^2 = V \cdot I$ medido en VA.

Donde:

- P es la potencia consumida, ésta puede ser de tres tipos:
 - Activa (P)
 - Reactiva (R)
 - Aparente (S)
- R es la resistencia que al igual que la potencia será de tres tipos:
 - Activa (R)
 - Reactiva (X)
 - Aparente (Z)
- I es la intensidad de corriente (Amperios)
- V es la tensión en la línea (Voltios)
- φ ángulo de desfase y que hay que procurar que sea mínimo para evitar los complementos e intentar tener descuentos.

La potencia reactiva generalmente se requiere para crear el campo magnético de motores y transformadores. Si toda la energía o potencia reactiva que necesitan los consumidores se generase en las centrales eléctricas y transportada por las líneas y transformadores hasta el consumo, se producirían una serie de problemas en generadores, líneas y transformadores, aumentando de forma general las pérdidas y disminuyendo su eficacia.

Para solucionar el problema lo indicado es generar la potencia reactiva en el punto donde se realice el consumo. Por ello, al ser la mayoría de las aplicaciones y consumos industriales de carácter inductivo, lo ideal es colocar sistemas de condensadores para compensar la potencia reactiva.

Para compensar la energía reactiva se pueden utilizar condensadores estáticos y máquinas rotativas síncronas.

Las máquinas síncronas, funcionando como generador o motor, pueden dar o recibir energía reactiva al mismo tiempo que proporcionan potencia activa. Se utilizan poco debido a los problemas de mantenimiento que presentan.

El sistema mayormente usado es el de baterías de condensadores.

2.1. Calculo de la potencia reactiva a compensar.

Para el cálculo de la potencia reactiva que es necesario compensar, se tendrá que determinar en primer lugar la potencia reactiva consumida por la instalación (Q), y en segundo lugar el factor de potencia que se quiera lograr ($\cos\phi$).

Para saber la potencia reactiva consumida en una instalación en funcionamiento hay distintos métodos:

1. Instalación de registradores de potencia reactiva en distintos puntos de la instalación.
2. A partir del contador de energía reactiva, midiendo la tensión (V) y la intensidad (I).
3. A partir del recibo de energía consumida

3. TRANSFORMADORES

Se puede observar el efecto contrario, de tal forma que si se mueve un conductor en un campo magnético, se produce un desplazamiento de las cargas en el mismo, diciéndose entonces que se ha inducido una fuerza electromotriz f. e. m.

De igual forma cuando una corriente variable circula por un circuito o bobina se crea un campo magnético variable que induce una f.e.m. autoinducida.

Un transformador se define como una máquina estática que tiene como misión transmitir, mediante un campo electromagnético alterno, la energía eléctrica de un sistema, con determinada tensión. Se compone de dos arrollamientos aislados eléctricamente entre si y devanados sobre un mismo núcleo de hierro que se llaman primario y secundario (al primario se le suministra potencia y el secundario la cede).

Una corriente alterna que circula por uno de los arrollamientos crea en el núcleo un campo magnético alterno. La mayor parte de este flujo atraviesa el otro arrollamiento e induce en el una fuerza electromotriz alterna. Se transmite así de un arrollamiento a otro por medio del flujo magnético del núcleo.

En un transformador real, las líneas del flujo magnético no están confinadas enteramente en el hierro, sino que algunas de ellas se cierran a través del aire. La parte del flujo que atraviesa los dos arrollamientos se denomina flujo común o útil, mientras que el resto se denomina flujo de dispersión.

La potencia obtenida de un transformador es inferior a la potencia suministradora al mismo, a causa de las pérdidas en forma de calor, que se producen en el arrollamiento primario y secundario (pérdidas en el cobre) y las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault en el núcleo (pérdidas en el hierro). Estas pérdidas se reducen al mínimo utilizando un hierro con ciclo de histéresis estrecho, y construyendo el núcleo con láminas muy finas para minimizar las corrientes de Foucault.

Suponiendo que no hay pérdidas, la relación entre las tensiones e intensidades transformadas y el n° de arrollamientos es:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

donde:

- V es la tensión de entrada y de salida
- N es el numero de arrollamientos en el transformador.
- I es la intensidad de entrada y de salida.

Cuando se consideran transformadores trifásicos, hay que considerar cada fase como un transformador monofásico. Hay 3 formas de conectar los devanados de un transformador trifásico: en estrella, en triángulo y en zig-zag.

4. BOMBAS

Las bombas, como maquinas que son, se pueden definir como un conjunto de aparatos combinados para recibir cierta forma de energía, transformarla y restituirla en otra más adecuada. Desde este punto de vista las bombas tienen efectivamente un motor eléctrico que recibe energía eléctrica y que la transforma en una energía de presión que finalmente transmite al agua.

La mayoría de los motores de bombas son de inducción o asíncronos. Este tipo de motores está formado por un estator y un rotor. En el llamado estátor se coloca la bobina inductora, que está alimentada por una corriente monofásica o trifásica. Como su nombre indica es la parte que no se mueve del motor. Por otro lado se encuentra el rotor, la parte móvil, y que se mueve debido a las corrientes y fuerzas inducidas como consecuencia de la interacción con el flujo del estator, según se ha comentado en el apartado de transformadores.

El circuito magnético del estator esta formado por chapas apiladas con ranuras longitudinales, donde se alojan tres devanados uniformemente distribuidos a lo largo del mismo. Los devanados pueden ser imbricados simples, imbricados de doble capa o concéntricos, según potencia y fabricante.

El circuito inducido puede ser de rotor devanado o de rotor en cortocircuito (jaula de ardilla). En esta último caso (el más frecuente), está constituido por una

serie de banas conductoras paralelas cortocircuitadas mediante anillos circulares y que se alojan sobre ranuras longitudinales del cilindro.

Un detalle importante a considerar en los motores asíncronos trifásicos es la disposición de los terminales del devanado del estator en la caja de banes, tal y como se ve en la figura.

La conexión en estrella se emplea cuando la maquina ha de conectarse a la tensión más elevada indicada en su placa de características, mientras que la de triángulo es para la más baja.

Desde el punto de vista del instalador y usuario interesa hacer un balance energético, funcionando el motor a plena carga, mediante el calculo de la potencia de entrada al motor (Se), la potencia de salida y el rendimiento.

La potencia de entrada, como ya se ha comentado, tiene dos componentes:

- La necesaria para crear el flujo y producir la conversión electromagnética, llamada potencia reactiva (Qe)
- La que produce potencia mecánica en el eje o potencia útil o y nominal (potencia de salida) Pn

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$S = \frac{P}{\cos \varphi}$$

donde:

S es la potencia aparente.

P es la potencia activa consumida

Q es la potencia reactiva.

La potencia de salida será la útil de entrada por el rendimiento de motor.

$$P_n = P \cdot \eta$$

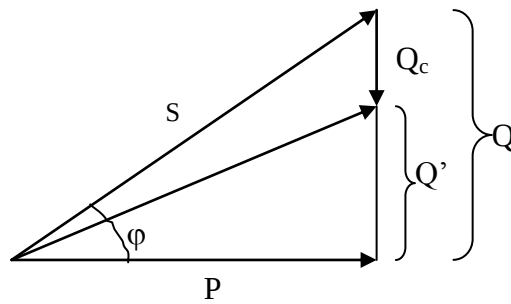
donde:

P_n es la potencia nominal suministrada en le eje.

η es el rendimiento del motor.

Por tanto se ve claramente que para disminuir el consumo de energía total conviene hacer Q lo más pequeño posible y aumentar η lo máximo posible.

Para mejorar Q lo indicado es colocar una batería de condensadores. Cuyo valor se puede hallar por:



$$Q_c = Q - Q' = P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$C = \frac{Q_c}{\omega \cdot V_L^2}$$

donde:

Q_c es la potencia reactiva a compensar

Q' es la potencia reactiva resultante después de la Compensación.

C Condensadores (Faradios)

f es la frecuencia de la corriente (Hz)

4.1. Ejemplo.

Calcular la batería de condensadores a instalar para mejorar el factor de potencia a las $\varphi = 0.92$ de un motor de una bomba trifásico con las siguientes características.

$$P = 11 \text{ KW} \quad V = 220 / 380 \text{ V} \quad \cos \varphi = 0.85$$

Red a 380 V - 50 Hz

$$C = \frac{Q_c}{\omega \cdot V_L^2} = \frac{P \cdot (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi')}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_L^2} = \frac{11000 \cdot (\operatorname{tg} 32 - \operatorname{tg} 23)}{2 \cdot 3.14 \cdot 50 \cdot 380^2} = 47.02 \mu F$$

Si se conectan los condensadores en triángulo, cada condensador ha de ser 16 μF - 300V mientras que si se conectan en estrella, cada condensador es 48 μF - 220V.

5. PROBLEMAS ASOCIADOS AL ARRANQUE.

El valor eficaz de la corriente que absorbe un motor asíncrono, inicialmente parado, en el instante en que se conecta a la red eléctrica se expresa como:

$$I_{ca} = \frac{V_e}{\sqrt{R_c^2 + X_c^2}}$$

en donde:

V_e = Valor eficaz de la tensión simple de la red eléctrica.

R_c = Resistencia combinada del estátor y rotor.

X_c = Reactancia combinada de dispersión.

Esta corriente, llamada corriente de arranque, alcanza valores muy elevados (del orden de 5 va 7 veces su valor nominal, e incluso en las primeras milésimas de segundo después de la conexión llega a ser de hasta 12 a 15 veces este valor),

debido a que en esos primeros instantes prácticamente toda la oposición al paso de corriente es ofrecida por la resistencia combinada (R_c), que es muy pequeña.

Consecuencia directa de esta corriente el par de arranque (M_a), es decir, el par que se ejerce en el eje del motor en el instante de la conexión a la red eléctrica; magnitud que varía proporcionalmente al cuadrado de la tensión simple aplicada (V_e).

$$M_a = K \cdot V_e^2$$

donde la constante de proporcionalidad K depende tanto de las características internas del motor (el número de polos, entre otras) como de las características de la red eléctrica (frecuencia). El valor del par de arranque en los motores asíncronos trifásicos existentes en el comercio y la industria oscila entre 1.5 y 3 veces el valor del par nominal.

Este elevado valor de M_a puede acarrear consecuencias muy perjudiciales para el motor, llegando a quedar fuera de servicio, en ocasiones, al salirse el rotor de su eje.

Igualmente, las elevadas corrientes de arranque dan lugar a efectos térmicos, por efecto Joule, que limitan la vida útil de la máquina, deteriorando sus bobinas y aislamientos. Además, originan caídas de tensión en la red eléctrica que pueden afectar al correcto funcionamiento de otras máquinas y aparatos e incluso a otras instalaciones vecinas, siendo este efecto tanto más acentuado cuanto mayor es la potencia del motor.

Todas las circunstancias que se acaban de exponer aconsejan la limitación de la corriente y el par de arranque, magnitudes que, como se observa en las ecuaciones, pueden ser modificadas de dos maneras:

- a) Actuando sobre el valor eficaz de la tensión aplicada al motor (V_e).
- b) Actuando sobre la resistencia combinada del motor (R_c)

Esta segunda posibilidad puede ser llevada a efecto, a su vez, modificando: el valor de la resistencia del estátor (R_c) o el valor de la resistencia del rotor (R_r).

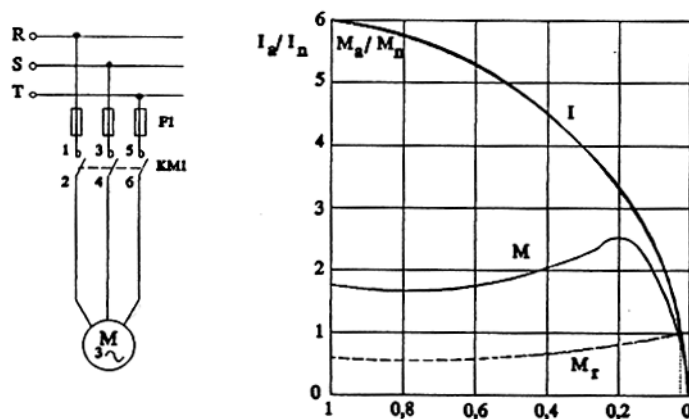
Atendiendo a la variable sobre la que se actúe, se distinguen los siguientes procedimientos y dispositivos de arranque de motores asíncronos:

- 1) Arranque directo.
- 2) Arranque por la variación de la tensión del estátor:
 - 2.a) Arranque por autotransformador.
 - 2.b) Arranque estrella-triángulo.
 - 2.c) Arrancadores progresivos.
- 3) Arranque por variación de la resistencia combinada.
 - 3.a) Con resistencias estatóricas.
 - 3.b) Con resistencias rotóricas.

5.1. Arranque directo de motores asíncronos.

Se denomina arranque directo a aquél que se realiza conectando el motor, inicialmente parada, directamente a la red que lo alimenta, sin el empleo de dispositivos de limitación de corriente.

Conforme transcurre el tiempo, se va estableciendo el flujo magnético y la máquina adquiere velocidad, incrementando progresivamente la fuerza electromotriz y reduciéndose consecuentemente los valores de la corriente y del par, que describen las curvas mostradas en la figura :



Se observa en la figura los elevados valores, superiores siempre a los nominales, que presentan el par y la corriente absorbida por el motor durante el proceso de arranque. Ya se ha indicado en el epígrafe anterior los efectos perjudiciales que este hecho puede acarrear; por tanto, este procedimiento de arranque sólo puede ser aplicado a motores de pequeña potencia. El Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT) especifica en su instrucción MI BT 034 que:

“Los motores de potencia superior a 0.75 kilovatios estarán provistos de reostátos de arranque o dispositivos equivalentes que no permitan que la relación de corriente entre el periodo de arranque (I_a) y el de marcha en régimen nominal (I_n), indicado en su placa de características, sea superior a la señalada en la tabla”.

POTENCIA NOMINAL	I_a/I_n
De 0.75 a 1.5	4.5
De 1.5 a 5	3
De 5 a 15	2
Más de 15	1.5

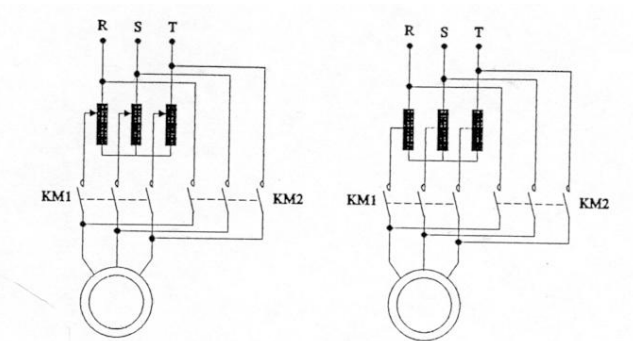
5.2. Arranque con autotransformador.

La conexión de un autotransformador en bornes del motor asíncrono permite reducir la tensión aplicada al mismo. Dado que la corriente y el par de arranque disminuyen proporcionalmente con el cuadrado de la tensión, con este dispositivo es posible realizar arranques suaves o no peligrosos.

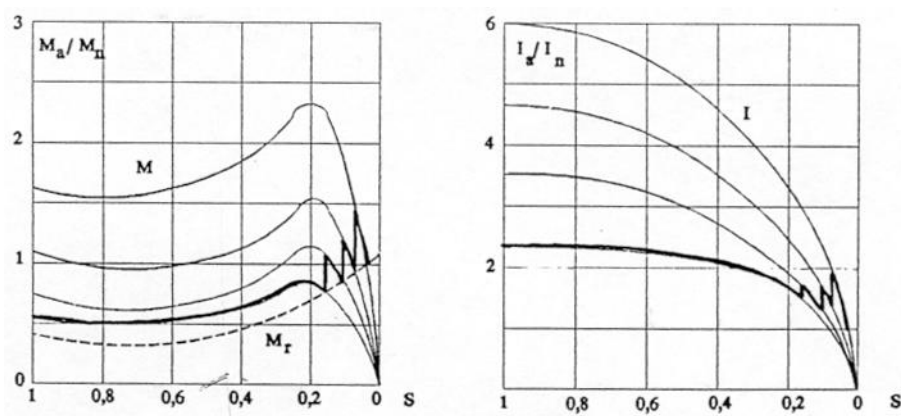
En la práctica industrial se utilizan dos tipos de autotransformadores: de relación de transformación variable y de relación de transformación fija.

5.2.1. Arranque con autotransformadores de relación variable.

Los autotransformadores de relación variable permiten variar la tensión aplicada al motor desde cero hasta un valor ligeramente continua, con lo cual existe la posibilidad de ajustar la tensión al valor más adecuado en cada instante, evitándose con ello la aparición de picos peligrosos de par y de corriente durante el proceso de arranque. Este hecho se observa en las figuras, en las que además se aprecia la considerable reducción que experimenta el valor de dichas magnitudes respecto del que tendrían en el arranque directo.



Una vez finalizado el proceso de arranque, puede mantenerse conectado el autotransformador, en el caso de que se desee regular con él la velocidad del motor, o bien, puede ser eliminado, alimentando al motor directamente de la red eléctrica, con lo que se mejora la eficiencia de la instalación.



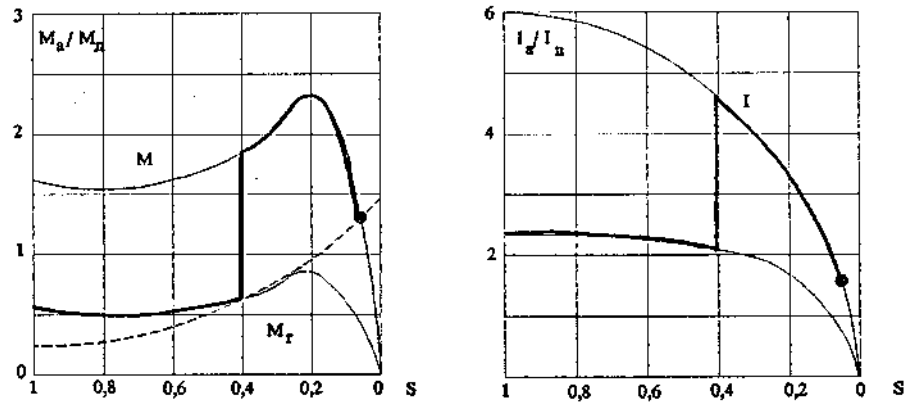
5.2.2. Arranque con autotransformadores de relación fija.

Los autotransformadores de relación fija proporcionan en su salida o secundario una tensión fija, inferior a la existente en su entrada o primario. El arranque de motores asíncronos con estos dispositivos se realiza en dos pasos.

- 1) Se alimenta al motor a través del autotransformador, aplicándole al estátor una tensión inferior a la nominal. De esta manera, el par y la corriente en el instante de arranque quedan reducidas considerablemente, ya que estas magnitudes disminuyen con el cuadrado de la tensión aplicada.
- 2) Una vez el motor ha adquirido una cierta velocidad, cercana ala que debe de funcionar, se elimina el autotransformador y se conecta el motor directamente a la red eléctrica. De esta manera, el motor alcanza el régimen de funcionamiento normal y finaliza el proceso de arranque.

5.2.3. Cálculo del autotransformador de arranque.

La elección del autotransformador de arranque de un motor asíncrono debe realizarse de forma que se evite la aparición de picos de par y de corriente elevados durante el arranque. En la figura se observa como un autotransformador de relación fija, con una tensión de salida insuficiente, puede reducir excesivamente las características del motor, dando lugar a arranques inadecuados, con valores muy elevados del par y de la corriente al eliminar el arrancador,



Designando por r a la relación entre las magnitudes de arranque (par y corriente) con autotransformador (M_{at} , I_{at}) y sin autotransformador (M_a , I_a):

$$r = \frac{M_{at}}{M_a} = \frac{I_{at}}{I_a}$$

la tensión de salida del autotransformador debe ser:

$$V = \sqrt{r} \cdot V_n$$

siendo V_n la tensión compuesta nominal del motor (igual a la de la red eléctrica). La potencia del autotransformador de arranque se obtiene como:

$$S_t = r \cdot S_a$$

siendo:

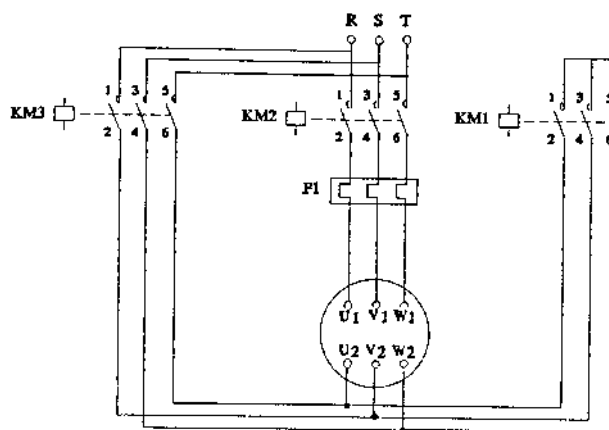
$$S_a = \sqrt{3} \cdot V_n \cdot I_a$$

la potencia que absorbe el motor en el arranque directo.

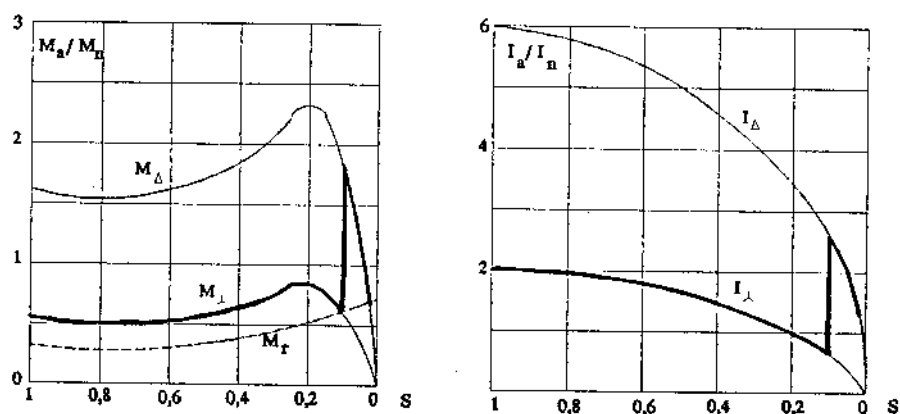
5.3. Arranque estrella-triángulo.

Este es el procedimiento de arranque más conocido y utilizado, aunque sólo puede ser utilizado en motores de dos tensiones, en los que existe la posibilidad de conectar las bobinas de estátor tanto en estrella cómo en triángulo.

En condiciones de funcionamiento normal, la conexión en triángulo se utiliza cuando la tensión de la red eléctrica coincide con la más pequeña del motor, mientras que la conexión en estrella se emplea en redes eléctricas de tensión igual a la más grande del motor ($\sqrt{3}$ veces mayor que la otra en los motores de dos tensiones existentes en el mercado). Así, por ejemplo, un motor de 220/380 V funcionará en triángulo conectado a una red eléctrica de 220 V de tensión de línea y en estrella cuando la tensión de línea de la red eléctrica sea de 380 V.



Para realizar el arranque estrella-triángulo, sin embargo, el motor se conecta en estrella a la red eléctrica de tensión igual a la menor de sus dos tensiones. De esta manera, la tensión aplicada al motor es $\sqrt{3}$ veces más pequeña que la nominal en estrella, con lo cual tanto el par como la corriente de arranque quedan reducidos a $1/3$ del valor con arranque directo como se observa en la siguiente figura:



Transcurrido un cierto tiempo desde el arranque, o bien, al detectarse que su aceleración ha disminuido significativamente, el motor pasa a la conexión en triángulo, en la que alcanza la velocidad de régimen, ya que es alimentado a su tensión nominal.

En el paso de la conexión de estrella a triángulo se producen picos de par y de corriente, tanto más intensos cuanto más alejado se encuentre el motor de su velocidad de régimen en el instante del cambio. Este efecto debe ser tenido en cuenta al diseñar el arrancador, ya que disminuye la vida útil de su aparato y perjudica al motor.

De lo expuesto se deduce que el arranque estrella triángulo:

- Sólo puede ser utilizado en motores de dos tensiones (que permiten las conexiones estrella y triángulo).
- Los motores han de funcionar normalmente en triángulo, es decir, sólo pueden ser alimentados por redes eléctricas de tensión igual a la más pequeña del motor.

5.4. Variadores de velocidad

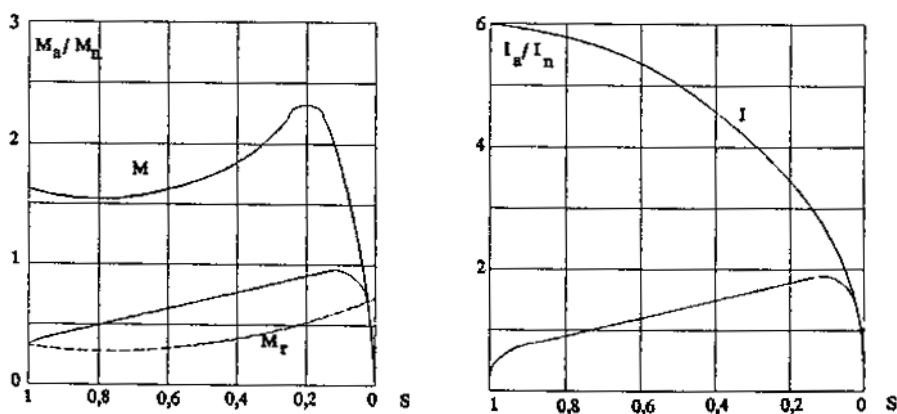
El motor de inducción tiene una característica par-velocidad muy rígida en la zona de funcionamiento estable, lo que significa que funciona a una velocidad prácticamente constante, por lo que su regulación ha resultado complicada y cuando se han necesitado motores para una gran regulación se han cogido de corriente continua.

Hoy en día la tecnología ha permitido que la regulación se pueda hacer en motores de inducción variando la frecuencia de entrada al motor, variando por tanto la velocidad de giro de éste.

5.4.1. Modo de operación.

La tensión aplicada al motor se eleva desde cero hasta el valor nominal de forma suave y regulada. El par producido es proporcional al cuadrado de la tensión aplicada, con lo que el motor estará desarrollando un par gradual y continuo.

Los arrancadores progresivos son convertidores electrónicos, constituidos por pares de tiristores conectados en antiparalelo en cada fase, que permiten reducir el par y la corriente de arranque al aplicar en cada instante la tensión mínima necesaria al motor.



El funcionamiento de cada tiristor está gobernado por un circuito de control, que recibe en cada instante información de las magnitudes eléctricas (tensión e intensidad) y mecánicas (par y velocidad) del motor, incrementando progresivamente el valor de la tensión aplicada de tal forma que se mantengan dentro de ciertos límites los valores del par y de la corriente durante el proceso de arranque.

5.4.2. Componentes.

A modo de comentario decir que un convertidor de frecuencia consta de 4 partes fundamentales.

- Rectificador. A él llega la tensión senoidal trifásica y se convierte a una tensión continua.
- Circuito intermedio, formado por unos condensadores que mantienen un nivel de tensión para el inversor, además de estas perturbaciones eléctricas.
- Inversor. Aquí se “trocea” la tensión proveniente del circuito intermedio y se saca de nuevo con la frecuencia deseada hasta el motor.
- Sistema de control y regulación. Actúa directamente sobre los tres anteriores de forma independiente.

En el caso particular de las bombas, los variadores de frecuencia actúan sobre estos de forma que cambian sus propias curvas características, “generando” curvas de funcionamiento parabólicas casi paralelas a las de funcionamiento a velocidad nominal. Actualmente existen en el mercado muchos modelos. La elección más adecuada depende de las prestaciones que se necesiten. Para ello hay que tener en cuenta la potencia que tiene que soportar el variador de frecuencia, ya que este, a pesar del elevado coste, puede ser capaz de llevar varios motores, siempre y cuando la suma de sus potencias no supere a la del variador. Aun que en la realidad, como se comenta en el punto siguiente, lo mas usual y económico es

conectar una única bomba al variador (reduciendo así las necesidades en el variador) mientras las demás funcionan en un régimen de todo/nada.

5.4.3. *Propiedades del arrancador.*

La figura muestra la evolución del par y de la corriente de arranque de un motor con arrancador progresivo. Frente a los arrancadores descritos en los aparatos precedentes, se distinguen las siguientes ventajas:

- 1) La corriente de arranque está limitada a un valor máximo de 1,5 a 2 veces la corriente nominal del motor.
- 2) No aparecen picos intempestivos de par y de corriente en el proceso de arranque.

Estas dos características son especialmente importantes para alargar la vida útil del motor, al disminuir los esfuerzos sobre sus bobinas, y de los contadores del circuito de potencia.

5.4.4. *Aplicación en bombeo.*

Con el control de una bomba con un variador o un arrancador obtendremos las siguientes mejoras:

- Arranque suave
- Tiempo de arranque regulable
- Limitación de corrientes en todo momento.
- Rampa de parada ajustable.
- Supresión del golpe de ariete.
- Protección térmica.
- Protección contra el fallo de fase.
- Detección de marcha en vacío.

Un solo arrancador nos permite la posibilidad del arranque consecutivo de varios motores.

Este sistema nos permite el control de grupos de presión, de tal forma que podemos regular la presión de salida de un grupo de bombas, utilizando varias bombas en control todo o nada y una bomba regulada con un ajuste fino.

5.4.5.Las ventajas e inconvenientes de los arrancadores progresivos son las siguientes:

- Ventajas:

- 1) Permiten regular la velocidad del motor evitando la aparición de aceleraciones y deceleraciones bruscas. Esta cualidad es muy útil en aplicaciones con cintas transportadoras de pequeña inercia, como ocurre en las plantas embotelladoras.
- 2) Pueden ser utilizados como frenos, consiguiendo frenados muy suaves. Esta aplicación es utilizada en electrobombas hidráulicas para evitar los efectos de golpe de ariete, fenómeno causante de roturas en las tuberías y desgaste en las válvulas.
- 3) Consiguen un importante ahorro de energía, sobre todo para cargas pequeñas. Este hecho, de gran interés para reducir el coste del recibo de energía eléctrica, es el resultado de aplicar la mínima tensión necesaria al motor en todo momento, ya que disponemos de flexibilidad, rapidez y precisión de las regulaciones.
- 4) Eliminación de desequilibrios en la red.

- Inconvenientes:

- 1) Obtenemos una desclasificación del motor.
- 2) Con la instalación del variador de velocidad se crean armónicos al mismo tiempo que aparecen perturbaciones electromagnéticas.

5.5. Arrancadores con resistencias.

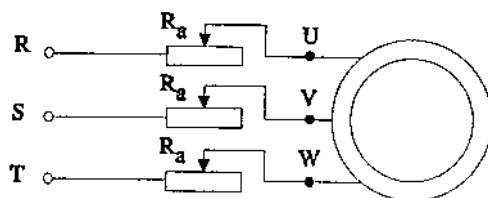
Uno de los procedimientos más antiguos utilizados en la limitación de la corriente de arranque de motores asíncronos está basado en el incremento de la resistencia de sus bobinas con la conexión adicional de resistencias exteriores, que se eliminan una vez finalizado el arranque del motor.

Dependiendo de que las resistencias de arranque se dispongan en el estátor o en el rotor se distinguen dos tipos de arrancadores:

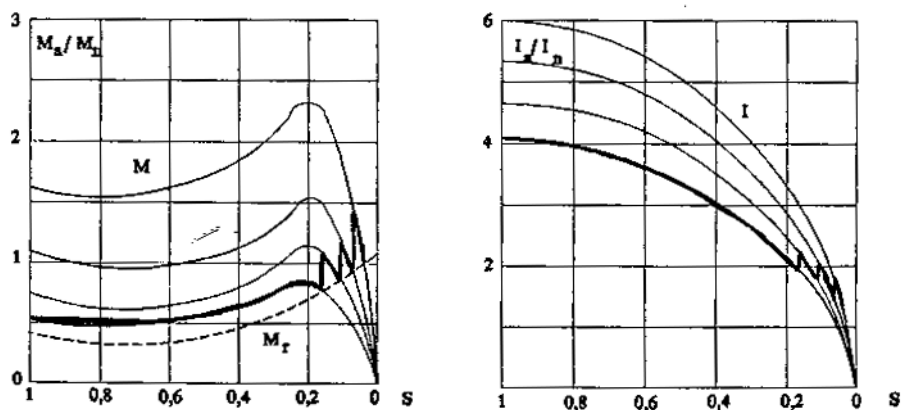
- a) Con resistencias estatóricas
- b) Con resistencias rotóricas.

5.5.1. Arrancadores con resistencias estatóricas.

Están constituidos por resistencias variables, conectadas en bornes del motor, en serie con las bobinas del estátor:



En estos arrancadores, la corriente de arranque disminuye de forma inversa al valor de la resistencia conectada al estátor, mientras que el par de arranque se reduce proporcionalmente al cuadrado de la caída de tensión en la misma; en consecuencia, la disminución de estas magnitudes no es tan grande como en los arrancadores precedentes, como se observaba en la figura siguiente.



La resistencia de arranque debe ser ajustada a su valor máximo en el momento de conexión del motor a la red eléctrica, con objeto de reducir la corriente y par de arranque al mínimo posible. Conforme el motor va adquiriendo velocidad, se va reduciendo progresivamente la resistencia, hasta que queda completamente anulada al finalizar el proceso de arranque.

Si la resistencia de arranque tiene varios tramos, en la conmutación de unos a otros aparecen picos de par y de corriente tanto más importantes cuanto menor es su número.

Los arrancadores con resistencias estáticas no son utilizados en la actualidad, salvo que se trate de aplicaciones muy particulares, de pequeña potencia, en las que se desee sencillez y economía en el arranque. Aparte de los inconvenientes indicados anteriormente:

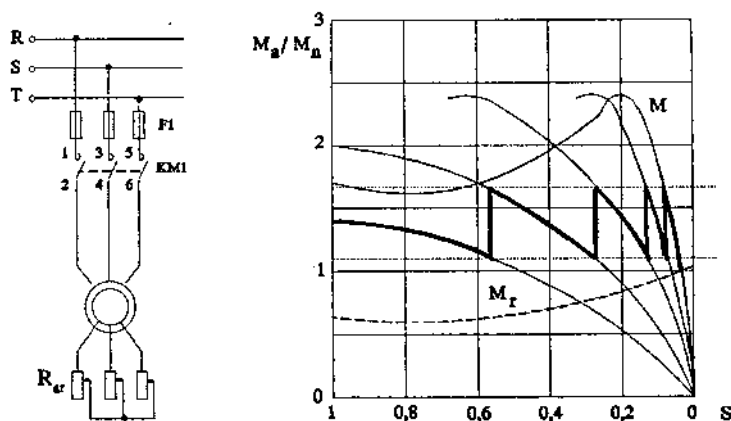
- Disminución del par y de la corriente de arranque menor que con otros arrancadores
- Aparición de picos de par y de corriente durante el arranque.

Se presentan los siguientes problemas:

- Disipación de potencia en las resistencias de arranque, lo cual limita la potencia de los motores a los que se puede aplicar.
- Disminución adicional de la eficiencia del sistema, como consecuencia de lo anterior.

5.5.2. Arrancadores con resistencias rotóricas.

Están constituidos por resistencias variables conectadas en serie con las bobinas del rotor, que reducen la corriente y el par de arranque al disminuir el valor de la corriente del rotor.



La figura muestra como se inclina la característica mecánica de un motor asíncrono al aumentar la resistencia del rotor, observándose que el par de arranque (y, por tanto, la corriente de arranque) puede ser reducida a valores no peligrosos, próximos al par nominal e incluso inferiores, si así se desea.

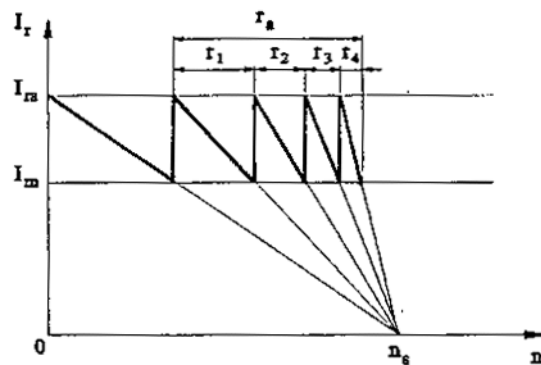
Designado por V , a la tensión compuesta existente en bornes de las bobinas del rotor parado, la resistencia del arrancador necesario para limitar la corriente del rotor en el arranque a un valor I_{ra} , se obtiene como:

$$R_a = \frac{V_r}{\sqrt{3} \cdot I_{ra}}$$

Si la resistencia es variable a tramos, se presentarán picos de par y de corriente durante el arranque, tanto más intensos cuanto menor es el número de resistencias del arrancador.

El número de tramos o de resistencia del arrancador y el valor de las mismas se obtienen por el siguiente procedimiento gráfico:

- 1) Se representan sobre unos ejes coordenados, en abscisas la velocidad del rotor (n) y en ordenadas la corriente del rotor (I_r).
- 2) Se dibujan dos líneas paralelas al eje de abscisas, una correspondiente a la mayor corriente rotórica permitida en el arranque (I_{ra}), y la otra igual o próxima a la corriente nominal del rotor (I_m).
- 3) Se trazan las líneas que representan las características del motor para cada valor de la resistencia del rotor, de tal forma que el cambio de una resistencia a la siguiente se realice a la misma velocidad (figura 12)



- 4) La resistencia de cada tramo k se obtiene como:

$$R_k = R_a \cdot \frac{r_k}{r_a}$$

Los arrancadores con resistencias rotóricas sólo pueden ser utilizados en motores asíncronos de rotor bobinado en los que las bobinas del rotor están accesibles. Este hecho limita considerablemente su campo de aplicación, ya que estos motores no son tan utilizados en la industria como los motores de jaula de ardilla. No obstante, frente a los arrancadores con resistencias estáticas, tienen la ventaja de no presentar tantos problemas de disipación de potencia, por lo que pueden ser utilizados en aplicaciones de gran potencia.

6. TARIFACIÓN ELÉCTRICA.

La energía eléctrica que utilizamos en baja tensión es facturada por la Compañías Suministradoras en periodos mensuales o bimestrales.

La cantidad a abonar en un periodo de facturación está especificada en recibos, en los cuales se distinguen algunos o todos de los siguientes conceptos o términos de facturación:

- Tarifa
- Facturación básica, que está formada por:
 - Término de facturación de potencia
 - Término de facturación de energía.
- Complementos tarifarios en B.T., que pueden ser de dos tipos:
 - Discriminación horaria
 - Suministro de reactiva
- Alquiler de equipos de medida.
- Impuestos (iva 16%).

A principios de cada año natural, el Ministerio de Industria y Energía establece las tarifas básicas a aplicar, así como los precios de sus términos de potencia y energía, los complementos tarifarios a los que haya lugar y el alquiler de los equipos de medida.

En este apéndice se definen estos conceptos, en orden a que el abonado o el técnico proyectista pueda elegir el tipo de tarifa, la potencia a contratar y la forma de realizar la lectura de la energía consumida más adecuados para cada aplicación concreta.

6.1. Tarifas eléctricas.

El suministro de energía eléctrica a las empresas y particulares se realiza acogido a una tarifa, que determina los precios de los términos de potencia y energía, así como los complementos tarifarios que puedan ser aplicados. Las tarifas básicas de baja tensión son las siguientes:

Tarifa 1.0	Para suministros en B. T. De potencia contratada no superior a 770 W.
Tarifa 2.0	Para suministros en B.T. de potencia contratada no superior a 15 Kw.
Tarifa 3.0	General de B.T.
Tarifa 4.0	General de larga utilización
Tarifa B.0	De alumbrado público en B.T.
Tarifa R.0	De riegos agrícola en B.T.

El usuario puede adoptar cualquiera de ellas, con las limitaciones de potencia máxima y de utilización indicadas, y elegir de entre los complementos tarifarios que permita dicha tarifa, el más adecuado a sus intereses. No obstante, no está permitido pasar a otra tarifa hasta que no haya transcurrido un plazo de 12 meses desde el último cambio realizado.

➤ Tarifa 1.0.

Esta tarifa de energía eléctrica puede ser aplicada en suministros de B.T. monofásicos y bifásicos, con potencias contratadas de 445 w y 635 w, a 127 V, y 330 w y 770 w, a 220 V.

No es posible aplicar en esta tarifa ningún complemento tarifario.

➤ Tarifa 2.0.

Es de aplicación a los suministros en B.T. de 127 V y 220 V, cuya potencia contratada no exceda de 15 Kw. A esta tarifa están acogidos mayoritariamente los suministros correspondientes a consumo doméstico, así como los suministros destinados a pequeñas industrias y comercios.

En la tarifa 2.0. puede aplicarse el complemento por discriminación horaria, denominándose en este caso tarifa nocturna.

➤ Tarifa 3.0.

Es de utilización general, es decir, aplicable a cualquier suministro en B.T., sin limitación de potencia.

En esta tarifa hay complementos por discriminación horaria y por suministro de potencia reactiva.

➤ Tarifa 4.0.

También es de utilización general, pero resulta más rentable que la tarifa 3.0. cuando el consumo es elevado y, al igual que ella, dispone de complementos por discriminación horaria y por suministro de reactiva.

➤ Tarifa b.0.

Es aplicable a los suministros de energía eléctrica en B.T. destinados al alumbrado público de calles, plazas, muebles y tinglados de puertos marítimos de

uso público, caminos y carreteras, y semáforos y luces de situación; pero no así al alumbrado ornamental de edificios y fuentes, aunque sean de titularidad pública.

En esta tarifa sólo puede aplicarse complemento por suministro de reactiva.

➤ Tarifa R.0.

Es de aplicación a los suministros de energía eléctrica en B.T. para la elevación y distribución de agua destinada a riegos agrícolas y forestales.

En esta tarifa dispone de complementos por discriminación horaria y por suministro de reactiva.

6.2. Facturación básica

Al formalizar el contrato con el abonado, las Compañías Eléctricas se comprometen a suministrar no sólo la energía eléctrica que éste utilice, sino también un valor máximo de potencia en cada instante. Por ello, la facturación se realiza en base a dos conceptos: la potencia contratada y la energía consumida.

La potencia contratada (PC) es el valor de potencia establecida en la Póliza de Abono, determinada mediante el cálculo de la instalación eléctrica, o bien, obtenida en base a las previsiones del usuario, pero en cualquier caso debiendo ajustarse a los escalones de intensidad normalizados.

La potencia facturada (PF), es decir, aquella que aparece en el recibo, puede obtenerse de varias formas, siendo las más comunes las siguientes:

- a) Sin aparato maximétrico. En este caso, la potencia facturada coincide con la potencia contratada
- b) Con un maxímetro. Pueden presentarse los siguientes casos:

b.1) La potencia registrada por el maxímetro (PR) está comprendida entre el 85% y el 105% de la potencia contratada. La potencia facturada es, entonces, igual a la registrada ($PF = PR$)

b.2) La potencia registrada por el maxímetro es superior al 105% de la potencia contratada. En este caso, la potencia facturada se obtiene como:

$$PF = PR + 2 \cdot (PR - 1.05 \cdot PC)$$

b.3) La potencia registrada por el maxímetro es inferior al 85% de la potencia contratada. La potencia a facturar se obtiene de la fórmula:

$$PF = 0.85 \cdot PC$$

El término de facturación de potencia (TP) es el producto entre la potencia facturada y el precio de dicha potencia (T_p), que depende de la tarifa aplicada.

La energía a facturar se obtiene, generalmente, como la diferencia de las lecturas del contador en el periodo de tarifación, es decir, es igual a la energía consumida en dicho periodo. En caso de que dichas lecturas no hayan podido realizarse, la energía facturada coincide con la estimada por la Compañía Suministradora.

El término de facturación de energía (TE) se obtiene como el producto entre la energía facturada y el precio de dicha energía (T_e), correspondiente a la tarifa aplicada.

Se entiende, entonces, por facturación básica a la cantidad que resulta de sumar el término de facturación de potencia y el término de facturación de energía.

TARIFAS DE BT (1-1-1999)	TÉRMINO DE POTENCIA (T_p) Pta/Kw y mes	TÉRMINO DE ENERGÍA (T_e) Pts/Kwh
1.0 Potencia hasta 770 w	45	10.04
2.0 General, potencia no superior a 15 Kw	251	14.24
3.0 General	224	13.10
4.0 General de larga utilización	357	11.97
B.0 Alumbrado público	0	11.76
R.0 De riegos agrícolas (1-1-98)	53	12.49

En la tabla se indican los precios correspondientes a los términos de potencia y de energía, establecidos por Iberdrola el 1 de Enero de 1998.

6.3. Complementos tarifarios.

La facturación básica puede ser complementada con unos recargos y descuentos que se establecen al objeto de relacionar el consumo de energía eléctrica, haciéndolo más uniforme a lo largo del día y más eficiente, al reducir el suministro de potencia reactiva. Los complementos aplicables a algunas de las tarifas de baja tensión son:

- 1) Complemento por discriminación horaria.
- 2) Complemento por potencia reactiva.

La aplicación o no de estos complementos y su valor dependen de la tarifa aplicada.

6.3.1. *Complemento por discriminación horaria.*

La demanda de energía eléctrica a lo largo del día no es siempre la misma. Existen periodos horarios en que el consumo es muy grande (horas punta) y el sistema eléctrico funciona casi al límite de su capacidad. Por el contrario, hay otros periodos en los que la demanda es muy reducida (horas valle) y el sistema eléctrico está infrautilizado. Los consumos realizados fuera de los dos periodos anteriores están representados por las horas llano.

Esta disparidad que se produce en la demanda de energía eléctrica no depende solo de la hora del día, sino también de la estación del año. Así, en verano, las horas punta suelen coincidir con las de más calor (a mediodía), en las que los frigoríficos, ventiladores y aparatos de aire acondicionado funcionan con más

intensidad, mientras que, en invierno, las horas punta suelen ser las primeras de la noche.

Las Compañías Suministradoras de energía eléctrica están muy interesadas en que estas variaciones del consumo no se produzcan; en parte, para evitar la infrautilización del sistema eléctrico, antes mencionada, pero más concretamente para reducir las operaciones de conexión y desconexión de los generadores y transformadores en las centrales y subestaciones eléctricas, que les resultan muy costosas en tiempo y dinero. Por esta razón, se ha establecido los complementos por discriminación horaria, que premian mediante descuentos en la facturación a los abonados, cuyo consumo es más uniforme a lo largo del día, mientras que imponen recargos a aquellos cuyos consumos son menos uniformes.

Los complementos por discriminación horaria a los que podrán acogerse los abonados, dependiendo de la tarifa a la cual se realiza el suministro y siempre que dispongan de aparatos de medida adecuados, son en baja tensión los siguientes:

Tipo 0	Llamado tarifa nocturna, es aplicable a los suministros con tarifa 2.0.
Tipo 1	Aplicable a abonados con tarifas 3.0, 4.0 y R.0, con potencia contratada inferior a 50 Kw, que no tengan instalado contador con discriminación horaria.
Tipo 2	Discriminación horaria para suministros con tarifas 3.0, 4.0 y R.0, que dispongan de contador de doble tarifa.
Tipo 3	Discriminación horaria para suministros con tarifas 3.0,4.0 y R.0, que tengan instalado contador de triple tarifa, sin discriminación de sábados y festivos.
Tipo 4	Discriminación horaria para suministros con tarifas 3.0, 4.0 y R.0, que dispongan de contador de triple tarifa, con discriminación de sábados y festivos.

El valor del complemento por discriminación horaria (CH) se obtiene por la fórmula siguiente:

$$CH = Te_j \cdot \sum \left(\frac{C_k}{100} \cdot E_k \right)$$

si el resultado es positivo significa un recargo y si es negativo representa un descuento o bonificación, siendo cada uno de sus términos:

Te_j Precio del término de energía correspondiente a la tarifa j

C_k Coeficiente de recargo o descuento correspondiente a cada tramo horario de la discriminación horaria aplicada.

E_k Energía eléctrica consumida en cada uno de los tramos horarios.

Los valores de los coeficientes C_k , de recargo o descuento, se indican en la siguiente tabla, para cada tipo de discriminación y periodo horario.

	<i>PERIODO HORARIO</i>	<i>DURACIÓN</i>	<i>COEFICIENTE DE RECARGO O DESCUENTO (C_p) %</i>
TIPO 0			
	Punta y llano	16 horas/día	+3
	Valle	8 horas/día	
		23 a 7 h (invierno)	-55
		0 a 8 h (verano)	
TIPO 1			
	Punta, llano y valle	24 horas/día	+20
TIPO 2			
	Punta	4 horas/día	
		9 a 13 h (invierno)	+40
		10 a 14 h (verano)	
	Llano y valle	20 horas/día	---
TIPO 3			
	Punta	4 horas/día	
		18 a 22 h (invierno)	+70
		10 a 14 h (verano)	
	Llano	12 horas/día	
		8 a 18 y 22 a 24 h (invierno)	---
		8 a 10 y 14 a 24 h (verano)	
	Valle	8 horas/día	
		0 a 8 h (todo el año)	-43
TIPO 4			
	Punta	6 horas/día	
		17 a 23 (invierno)	+100
		10 a 16 (verano)	
	Llano	10 horas/día	
		8 a 17 y 23 a 24 h (invierno)	---
		8 a 10 y 16 a 24 h (verano)	
	Valle	8 horas/día	
		0 a 8 h (todo el año)	-43
		24 horas sábados y domingos	

Las horas punta, llano y valle correspondientes a las discriminaciones horarias de los tipos 3 y 4 dependen de la Comunidad Autónoma en donde se realice el suministro, existiendo las siguientes zonas:

Zona 1	Galicia, Asturias, Cantabria, País Vasco; La Rioja, Navarra y Castilla-León.
Zona 2	Aragón y Cataluña
Zona 3	Madrid, Castilla la Mancha y Extremadura.
Zona 4	Valencia, Murcia y Andalucía.
Zona 5	Baleares.
Zona 6	Canarias.
Zona 7	Ceuta y Melilla.

6.3.2. Complemento por potencia reactiva.

El suministro de potencia reactiva a los abonados da lugar a una infrutilización del sistema eléctrico, debido a la pérdida de capacidad para transmitir energía eléctrica. Para las Compañías Suministradoras supone un sobre coste de sus propias instalaciones, que están muy interesadas en reducir. Por estas razones, se ha establecido un complemento, impropia mente llamado de “energía” reactiva, que penaliza a los usuarios con factor de potencia ($\cos \varphi$) pequeños y recompensa a aquellos abonados que tienen f.d.p. elevados.

Este complemento por suministro de potencia reactiva es aplicable a las tarifas 3.0, 4.0, b.0 y r.0, siempre que tengan instalado un contador de reactiva, pero no es así a los suministros con tarifas 1.0 y 2.0. No obstante, en esta última tarifa, es preceptivo que el $\cos \varphi$ de la instalación no sea inferior a 0.8; en caso contrario, la Compañía Suministradora puede a la instalación de un contador de reactiva por parte del abonado, facturándole complementos por reactiva en los periodos en que el $\cos \varphi$ de la instalación sea inferior a 0.8.

El complemento por reactiva (CR) se obtiene por la fórmula:

$$CR = (TP + TE) \cdot \frac{K_r}{100} = (PC \cdot Tp_j + E \cdot Te_j) \cdot \frac{K_r}{100}$$

TP Término de potencia, igual a la potencia contratada (PC) por el precio de la potencia correspondiente a la tarifa utilizada (Tp_j).

TE Término de energía, igual a la energía consumida (E) por el precio de la energía correspondiente a la tarifa utilizada (Te_j).

K_r Coeficiente porcentual de recargo o descuento, que se obtiene por la expresión:

$$K_r = \frac{17}{\cos^2 \varphi} - 21$$

Cos φ	Coef. Recargo	Coef. Descuento
1.00	-	4.0
0.95	-	2.2
0.90	0.0	0.0
0.85	2.5	-
0.80	5.6	-
0.75	9.2	-
0.70	13.7	-
0.65	19.2	-
0.60	26.2	-
0.55	35.2	-
0.50	47.0	-

cuyos valores se especifican en la tabla para diferentes cos φ . Si es positivo representa un recargo. Si es un valor negativo representa un descuento o bonificación.

El valor de cos φ de una instalación eléctrica puede calcularse en función de las lecturas de los contadores de activa (W_a) y de reactiva (W_r) mediante la expresión:

$$\cos \varphi = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}}$$

Aquellos abonados cuyo cos φ sea inferior a 0.55 en tres o más mediciones estarán obligados a instalar por su cuenta equipos de compensación, pudiéndose llegar a la suspensión del suministro en caso de que dicha mejora no se efectúe.

Tampoco está permitido que la instalación eléctrica de cualquier abonado produzca efectos capacitivos.

6.4. Ejemplo práctico de tarifación.

Supongamos que tenemos contratada una tarifa 2.0., la que podemos tener en cualquiera de nuestras casas, de tal forma que nos encontramos con lo siguiente:

- Potencia contratada: 3,3 kW
- Electricidad consumida: 350 kWh

Con lo que los conceptos de facturación serán los siguientes:

- Potencia contratada:
 $3,3 \text{ kW} \times 2 \text{ meses} \times 247 \text{ Pta/kW mes}$ 1.630 pts
- Electricidad consumida:
 $350 \text{ kWh} \times 14,03 \text{ Pta/kWh}$ 4.911 pts
- Impuesto sobre la electricidad:
 $4,864 \% \text{ sobre } (1.657 + 4.984) \times 1,05113$ 340 pts
- Alquiler del contador:
 $2 \text{ meses} \times 109 \text{ Pta/mes}$ 218 pts
- IVA: 16% sobre todo lo anterior 1.136 pts
- Importe total 8.235 pts**

7. BOMBAS DEFINICIÓN Y CÁLCULO.

7.1. Definición.

Para dotar de flujo a un fluido, desarrollar presión, transmitir potencia, etc. debemos utilizar alguna máquina. Una bomba es un mecanismo que absorbe energía mecánica y la utiliza para dotar de energía a un fluido. Es decir, las bombas introducen o proporcionan energía a los líquidos.

Actualmente, en la mayoría de los casos, son motores eléctricos los que proporcionan energía mecánica a las bombas.

En la selección de una bomba, para una aplicación dada, es necesario conocer varios factores, tales como la capacidad requerida, propiedades del líquido que será bombeado, condiciones en el interior y exterior de la bomba, fuentes de energía para mover la bomba, etc.

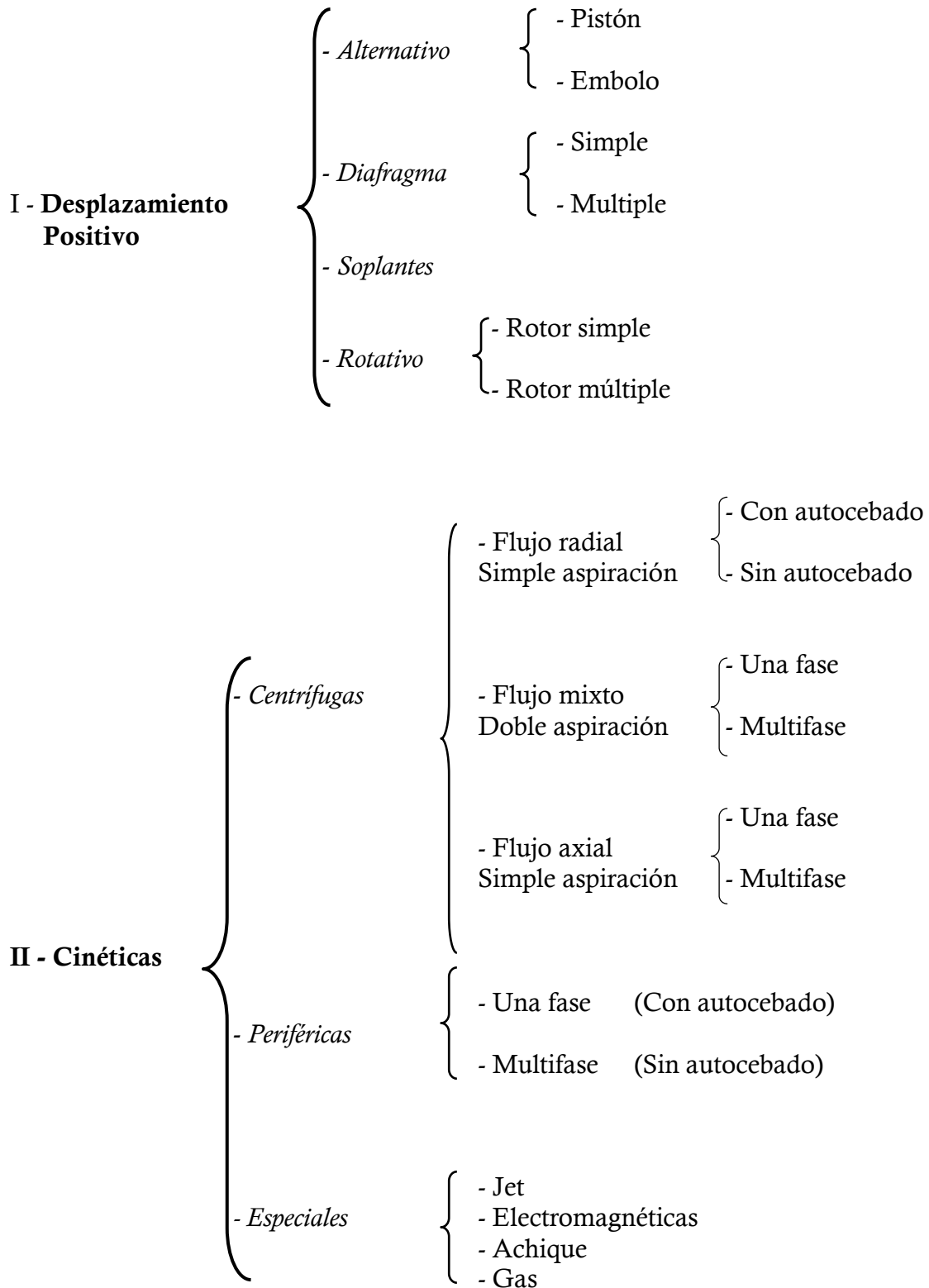
7.2. Clasificación de las bombas.

Aunque hay muchos tipos de bombas es posible clasificarlas en dos grandes categorías según el Hydraulic Institute Standards (Cleveland, Ohio, 1975):

- Bombas de Desplazamiento Positivo
- Bombas Cinéticas

7.2.1. Bombas de desplazamiento positivo.

Son aquellas que han sido diseñadas para proporcionar una determinada cantidad de fluido al sistema por cada revolución de la bomba.



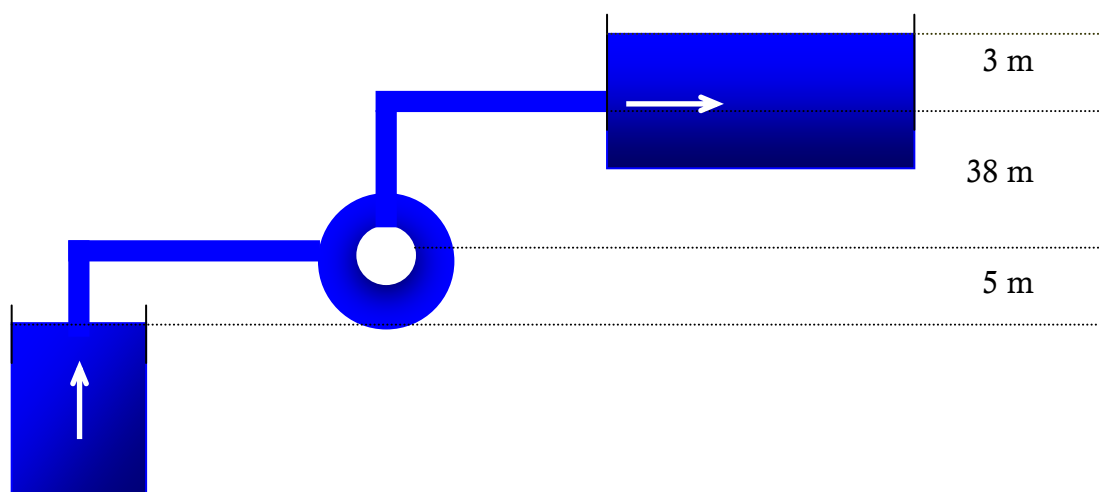
7.2.2. Bombas centrífuga

Las bombas más usadas en abastecimiento, riego y tratamiento del agua son las centrífugas, por lo que sólo nos ocuparemos de este tipo de bombas.

Tal como hemos indicado en el gráfico anterior, las bombas centrífugas pueden ser de flujo radial, mixto o axial.

En las bombas de flujo radial la presión comunicada al agua se desarrolla principalmente por la acción de la fuerza centrífuga. En una bomba de flujo mixto la altura es producida parcialmente por la fuerza centrífuga y otra parte por los álabes del impulsor. Una bomba de flujo axial, también llamada de hélice, desarrolla la mayor parte de su altura por la acción de elevación de los álabes del impulsor sobre el líquido.

7.3. Aplicación de la ecuación de la energía. Cálculo de bombas



La bomba indicada en la figura eleva agua desde el tanque inferior al superior. Si el flujo es de 200 l/s determinar la potencia suministrada al fluido por la bomba, si las pérdidas en el sistema son de 2,75 m.

Aplicando la ecuación de la energía para flujo permanente y fluidos incompresibles:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + H_{bomba} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{pérdidas 1-2}$$

Tomando como puntos 1 y 2 las láminas libres de los depósitos inferior y superior, respectivamente, y como plano de referencia la lámina de agua del inferior, tenemos:

$$\begin{aligned} z_1 &= 0 \\ p_1 &= p_2 = \text{presión atm.} \\ v_1 &= v_2 \\ z_2 &= 46 \text{ metros} \\ h_{f(1-2)} &= 2,75 \end{aligned}$$

$$0 + 0 + 0 + H_p = 46 + 0 + 0 + 0 + 2,75 = 48,75 \text{ m}$$

La Energía total será:

$$E = W_T \cdot H_p$$

donde:

W_T es el peso por ud. de tiempo = peso específico * Caudal = densidad * g * Q

Luego:

$$E = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_p = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.2 \cdot 48.75 = 95648 \text{ Wars} = \frac{95648}{736} = 130 \text{ CV}$$

Este valor de la energía, tal como veremos más adelante, es un valor teórico, el real es bastante menor debido a pérdidas en el interior de la bomba, rendimiento hidráulico de la máquina inferior a la unidad.

Volviendo a la ecuación de la energía y despejando H_p , se tiene:

$$H_p = z_2 - z_1 + \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} + h_F$$

Esta ecuación representa la energía total teórica añadida al sistema por unidad de peso, en metros de fluido entre las secciones 1 y 2

La ecuación anterior da la altura total teórica o altura dinámica (H_p). La altura real que se alcanza es:

$$H_R = ep * H_p = H_p - H_{int}$$

Donde (ep) es el rendimiento hidráulico de la bomba y H_{int} la pérdida total interior en la máquina.

La Energía teórica total añadida al fluido por la bomba será:

$$E_T = \gamma \cdot Q \cdot H_p (kgm/s) = 1000 \cdot 9.81 \cdot Q \cdot H_p (Wats)$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ kgm/s} &= 9,81 \text{ Wats} \\ 1 \text{ CV} &= 736 \text{ Wats} \\ 1 \text{ CV} &= (736/9.81) = 75 \text{ kgm/s} \end{aligned}$$

$$E_T = \frac{Q \cdot H}{75} (CV)$$

Donde: si Q se expresa en m^3/s , $\gamma = 1.000 \text{ kg/m}^3$;
y si Q viene en l/s , $\gamma = 1 \text{ kg/dm}^3$

7.4. Potencia requerida para mover la bomba

De la ecuación:

$$H_R = ep * H_p = H_p - H_{int}$$

Si H_P tiene que ser igual a H_R y $H_{int} < 0$, entonces:

$$H_{motor} = H_P + H_{int} = H_P / ep,$$

o bien en términos de energía:

$$\begin{aligned} N_{motor} &= \frac{\gamma \cdot Q \cdot H_P}{ep} = \frac{U \cdot g \cdot Q \cdot H_P}{ep} = (\text{Wattios}) = \\ &= \frac{1000 \cdot Q(m^3/s) \cdot H_P(m)}{ep \cdot (736/g)} = \frac{Q(l/s) \cdot H_P(m)}{75 \cdot ep} = (CV) \end{aligned}$$

Si (em) es el rendimiento del motor la potencia requerida vendrá dada por:

$$\begin{aligned} N_{motor} &= \frac{1000 \cdot Q(m^3/s) \cdot H_P(m)}{75 \cdot ep \cdot em} = (CV) \\ N_{motor} &= \frac{Q(l/s) \cdot H_P(m)}{75 \cdot ep \cdot em} = (CV) = \frac{Q(m^3/h) \cdot H_P(m)}{270 \cdot ep \cdot em} = (CV) \end{aligned}$$

En la ecuación de la altura dinámica total de una bomba:

$$H_P = z_2 - z_1 + \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} - \frac{v_1^2}{2g} + h_F$$

El primer término del segundo miembro representa un incremento de la altura dinámica: $((u_2)^2 / 2g) - ((u_1)^2 / 2g)$, lo cual se consigue haciendo que el diámetro de la tubería de descarga (impulsión), sea menor que el de la tubería de aspiración.

El término $((p_2 / \gamma) - (p_1 / \gamma))$, representa un incremento en la altura de presión; $(z_2 - z_1)$ representa diferencias de alturas entre la aspiración y la impulsión. H_F , representa las pérdidas en la tubería más las pérdidas menores.

Si tal como hemos visto en el ejemplo inicial de este tema, una bomba eleva agua entre dos depósitos, y los puntos 1 y 2 se toman en la superficie de los mismos, la ecuación anterior se reduce a:

$$H_P = z_2 - z_1 + H_F$$

Y teniendo en cuenta que H_F representa las pérdidas totales en el sistema, tendremos:

7.5. Pérdidas en tuberías.

Aplicando la ecuación de Darcy – Weisbach:

$$H_{1F} = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot g \cdot A^2}$$

λ = coeficiente de rugosidad

v = Q/A

Las pérdidas menores vienen dadas por:

$$H_{2F} = Km \cdot \frac{v^2}{2g} = Km \cdot \frac{Q^2}{2g \cdot A^2}$$

Luego:

$$H_F = \delta (H_1 \lambda) + \delta (H_2 \lambda) = CQ^2,$$

en donde:

$$C = \delta ((\lambda/2gDA^2) + Km/2gA^2)$$

Y la ecuación de la altura dinámica de la bomba: $H_P = z_2 - z_1 + H_F$, queda:

$$H_P = z_2 - z_1 + CQ^2$$

Donde queda relacionada H_P y Q (altura de bombeo requerida para descargar un determinado caudal).