



GUÍA DE APLICACIÓN DE SOFT-TARTER Y VARIADORES DE FRECUENCIA EN BOMBEO.

Manual No. IBEE-03-2015

1ª actualización Mayo del 2015

Ing. Juan Del Castillo R.

Ingeniería de Bombeo, Electricidad y Electrónica
IBEE

info.ventas@stemd.com.mx
www.stemd.com.mx

Tel: 01 [444] 1660078

Santa Rosa de Lima No. 1321,
Fracc. Santa Monica
Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.	4
OBJETIVO.	4
INTRODUCCIÓN.	4
1.- CONCEPTO DE FUENTE DE VOLTAJE CONSTANTE; FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE Y V/f; EL SOFT SATRTER Y EL VARIADOR DE FRECUENCIA.	5
1.1.- Fuente de voltaje constante; definición y ejemplos.	5
1.2.- Fuente de corriente constante; definición y ejemplos.	6
1.3.- El concepto de V/f.	6
1.4.- El Soft-Starter.	7
1.5.- El variador de frecuencia.	8
2.- PROTECCIONES NECESARIAS PARA MOTORES DEL TIPO SUMERGIBLE Y FLECHA HUECA.	9
2.1.- Arranque y paro suave.	9
2.2.- Variación en la magnitud y desbalance del voltaje de suministro.	10
2.3.- Descargas eléctricas.	11
2.4.- Sobre carga y desbalance de la corriente de consumo del motor.	12
2.5.- Tiempos de espera entre arranques para el enfriamiento del motor.	13
2.6.- Carga baja (sub corriente) de consumo del motor.	13
2.7.- Temperatura máxima del agua que se bombea.	14
2.8.- Nivel dinámico mínimo (sumergencia).	15
2.9.- Temperatura máxima en los devanados del motor.	15
2.10.- Fuga a Tierra (aterrizamiento del circuito líneas-motor).	16
2.11.- Suministro de alimentación sin corrientes armónicas presentes.	16
2.12.- Número de intentos de arranque en modo automático.	17
2.13.- Camisa de enfriamiento y trampa de sólidos para motores sumergibles.	17
3.- DESCRIPCIÓN DE CONCEPTOS DE CONTROL EN BOMBEO.	18
3.1.- Control manual.	18
3.2.- Control automático.	18
3.3.- Variable de control y variable permisiva.	18
3.4.- Control automático horario o por tiempo en horas.	18
3.5.- Control automático calendario o por tiempo en días.	19
3.6.- Control automático por nivel dinámico mínimo (sumergencia).	20
3.7.- Control automático a presión constante.	20
3.8.- Control automático a caudal constante.	21
3.9.- Control automático por flujo de corriente (carga baja).	22
3.10.- Control automático en condiciones de sobrecarga (REARME).	22
3.11.- Control automático en condiciones de sobre temperatura (REARME).	23
3.12.- Control automático en condiciones de anomalías en voltaje de suministro (REARME).	23

4.-REQUERIMIENTOS Y CONDICIONES DE CONTROL PARA LAS APLICACIONES MÁS COMUNES.	24
4.1.- Bombeo a una pila o cisterna cercana.	24
4.2.- Bombeo a una pila o cisterna lejana.	27
4.3.- Bombeo a una red de agua potable.	30
4.4.- Bombeo a una red de riego por aspersión o por goteo.	32
5.- TABLAS COMPARATIVAS DE PRESTACIONES, APLICACIONES Y COSTOS RELATIVOS.	35
5.1.- Tabla de prestaciones en arrancadores a tensión plena (ATP's); arrancadores a tensión reducida (ATR's), Soft-Starter y Variadores de Frecuencia.	35
5.2.- Tabla de selección de equipo según la aplicación.	38
5.3. Tabla de costos relativos entre ATP's, ATR's, Soft-Starter y Variadores de Frecuencia. ..	38
6.- CONSIDERACIONES ADICIONALES EN LA INSTALACIÓN. .	40
6.1.- Instalación de los soft-starter.	40
6.2.- Instalación de variadores de frecuencia.	41
GLOSARIO.	43
BIBLIOGRAFÍA.	47

RESUMEN.

- Se da a conocer conceptos eléctricos que distinguen a *los soft-starter* y a los *variadores de frecuencia* de los arrancadores electromecánicos convencionales a tensión plena (*ATP's*) y a tensión reducida (*ATR's*).
- Se hace notar las protecciones obligatorias para motores en bombeo como motores sumergibles, flecha hueca y horizontales.
- Describimos brevemente los términos de control empleados en bombeo.
- Especificamos las posibilidades y/o requerimientos de control en las aplicaciones más comunes en bombeo.
- Evidenciamos las diferencias de aplicaciones, prestaciones y costos entre arrancadores a tensión plena (*ATP's*), a tensión reducida (*ATR's*), *soft-starter* y *variadores de frecuencia*.
- Damos un breve listado de consideraciones en la implementación de *soft-starter* y de *variadores de frecuencia*.

OBJETIVO:

Tener conocimiento en equipos de vanguardia como son los soft-starter y los variadores de frecuencia para fundamentar su implementación no solo como una mejora técnica en la solución de problemas complejos, sino como la mejor inversión costo-beneficio en motores enfocados al bombeo.

INTRODUCCIÓN:

A la fecha el mercado de los equipos de arranque y protección aplicados al bombeo está dominado por los arrancadores electromecánicos a tensión plena (*ATP's*) y los arrancadores electromecánicos a tensión reducida con auto-transformador (*ATR's*); hemos visto que la causa principal de esta preferencia no es realmente el costo económico, es más bien por la justificada renuencia a implementarlos debido a la desinformación que hay en torno a los equipos electrónicos como los *soft-starter* y los *variadores de frecuencia* en cuanto a sus alcances, prestaciones, funcionamiento y costos.

En estos tiempos de economías raquíticas, los costos son sin duda importantes; sin embargo, podemos decir que ya hay en mercado equipos electrónicos (*soft-starter*) con precios semejantes (o incluso

menores) a un arrancador a tensión reducida (*ATR*) de la misma potencia y que además ofrecen muchas más prestaciones en control y protección; bajo la premisa de sopesar costos, *¿Qué es más caro?, ¿el costo social de no contar con el Servicio de Agua Potable?, o ¿el costo extra de implementar un equipo con todas las protecciones y una gama de posibilidades de control que los equipos convencionales nunca podrán ofrecer?....*

1.- CONCEPTO DE FUENTE DE VOLTAJE CONSTANTE; FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE Y V/f.

Evitaremos ecuaciones matemáticas y solo llegaremos a definiciones concretas de estos conceptos básicos y fundamentales para entender la diferencia operativa entre los equipos electrónicos (*soft-starter* y *variadores de frecuencia*) y los equipos electromecánicos (*ATP's* y *ATR's*).

1.1.- FUENTE DE VOLTAJE CONSTANTE:

Definimos a una fuente de voltaje constante, como aquel dispositivo o aparato eléctrico, que proporciona a su carga conectada, un voltaje invariable en magnitud y frecuencia, independientemente de la corriente en magnitud y forma que la carga misma le demande.

Un ejemplo sencillo es un transformador conectado a la red que alimenta un equipo de bombeo y que trabaja normalmente; esto es muy válido, todos suponemos a los voltajes de suministro constantes e invariantes ante las cargas pero sabemos que esto no es del todo cierto, existen fluctuaciones causadas tanto por las cargas como por el suministro en media tensión pero aun así nuestros equipos trabajan por lo que para fines prácticos, consideramos a un transformador como una fuente de voltaje y frecuencia constante; *un soft-starter se comporta como fuente de voltaje y frecuencia constante para su carga en la medida que lo es el circuito red-transformador que lo alimenta, pero un variador de frecuencia se comporta para su carga como una fuente de voltaje y frecuencia constante además de balanceado incluso si la fuente de alimentación no lo es.*

1.2.- FUENTE DE CORRIENTE CONSTANTE:

Definimos a una fuente de corriente constante, como aquel dispositivo o aparato eléctrico, que proporciona a su carga conectada, una corriente invariable, independientemente de las variaciones de impedancia que la carga misma presente.

Dar un ejemplo práctico es un poco más complejo, pero pensemos en un transformador de corriente (CT) tipo dona, de los que se usan para medir la corriente de un motor sin abrir el circuito, supongamos que queremos medir 400 amperios trifásicos; normalmente usamos tres CT's relación 600:5 (o más según criterio) y se interconectan en estrella (o 3 circuitos monofásicos) con un relevador bimetálico clase 10 para protección por sobrecarga (de bajo amperaje); el punto es, que los CT's, cuando por los cables en el circuito del motor (primario) circulan 600 amperios, van a proveer (circuito secundario) solamente 5 amperios y no más!!...debe saber que el relevador bimetálico tiene una resistencia interna por fase entre 0.1Ω y 2Ω que además varía con la temperatura; esta corriente secundaria de 5 amperios será la misma ante estas variaciones incluso, si estuviesen conectados los circuitos secundarios de los CT's en franco cortocircuito, este comportamiento es típico de una fuente de corriente constante; *un soft-starter puede comportarse como una fuente de corriente constante al arranque y paro de un motor; un variador de frecuencia lo puede hacer al arranque, paro e incluso en operación continua.*

1.3.- EL CONCEPTO DE V/f:

El concepto de (V/f) "*voltaje en la frecuencia*", es un término mayormente utilizado cuando se habla de aplicaciones con *variadores de frecuencia*; de hecho, la principal forma de control de un *variador de frecuencia* a un motor es esta precisamente (V/f lineal), siguiéndole otras como el modo "vector", modo "sensorless" o modo con retroalimentación por encoder o tacogenerador para aplicaciones a velocidad constante.

El variador de frecuencia controla linealmente ambas cosas, la frecuencia y la magnitud de voltaje de salida al motor; ¿Para qué?...para mantener un flujo magnético (ϕ) constante sin saturar el núcleo del motor y disponer del par nominal del motor desde velocidades muy bajas, hasta la velocidad nominal.

El **soft-starter** y el **ATR** solo reducen el voltaje de salida al motor al arranque o paro sin posibilidad de variar la frecuencia; esto provoca que el motor al tratar de mantener su par-motor, no tenga otra opción más que incrementar la corriente de 250% a 600% de su valor nominal.

1.4.- EL SOFT-STARTER:

La clasificación dentro de la electrónica de potencia de **un soft-starter** o arrancador electrónico suave con tiristores es de **“Variador de corriente alterna trifásico controlado por ángulo de fase”**; pertenece a los **“Convertidores CA-CA”** y la **regulación de energía, se logra controlando el ángulo de fase de activación ciclo a ciclo de dos tiristores conectados en anti-paralelo por cada una de las tres fases (6 pulsos por cada ciclo).**

La **ley de control** o forma de operar de un **soft-starter** puede ser de arranque con rampa de voltaje (fuente de voltaje constante), limitación de corriente al arranque o paro del motor (fuente de corriente constante) o una combinación de ambas; es decir, rampa de voltaje con limitación de corriente al arranque, esto es, ambas formas de operación como fuente de voltaje constante y/o fuente de corriente constante.

El arranque con rampa de voltaje (fuente de voltaje constante) es usado en cargas de baja inercia como las bombas, bandas transportadoras, ventiladores, etc; arranques con limitación de corriente, se usan en cargas con mucha inercia o que requieren de mucho par-motor inicial tales como quebradoras, molinos, grúas y compresores; **LOS SOFT-STARTER NO SON PARA LA REGULACIÓN DE LA VELOCIDAD DEL MOTOR.**

Existen **soft-starter** de estado sólido (puros), estos son de enfriamiento forzado con ventiladores en operación todo el tiempo, esto los hace ser voluminosos y no muy aptos para ambientes agresivos (con polvo o muy húmedos), tienden a ser sustituidos por **soft-starter híbridos**; es decir, tienen tiristores (**SCR's**) pero usan contactores para operación permanente; estos pueden ser internos o se deban instalar de manera externa.

En lo que concierne a las protecciones hay **soft-starter** analógicos que no ofrecen protecciones y solo son para arranque y paro suave; es decir, solo tienen ajuste por potenciómetros de “aceleración”, “desaceleración” y “par”; sin embargo, los hay digitales programables (altas prestaciones) con una gama muy amplia de protecciones en voltaje, corriente, medición y funciones especiales; casi todas las marcas ofrecen ambos tipos **de soft-starter**.

POR ÚLTIMO DIREMOS QUE LOS **SOFT-STARTER** GENERAN **CORRIENTES ARMÓNICAS** SOLO CUANDO ESTÁN EJECUTANDO EL ARRANQUE O EL PARO DEL MOTOR; estas **corrientes armónicas son de 5º, 7º, 11º, 13º orden** predominantemente; se le considera al **soft-starter** y a su motor como carga

electrónica o *carga no lineal* transitoria; es decir, solamente lo es en el arranque y en el paro suave de su motor; en régimen permanente se considera *carga lineal*.

1.5.- EL VARIADOR DE FRECUENCIA:

Los “*variadores de frecuencia*” son equipo de estado sólido puro; es decir, tienen casi en su totalidad *semiconductores, requieren forzosamente de ventilación por lo que hay que tener mucho cuidado en este punto al implementarlos*; se consideran dentro de la electrónica de potencia como equipos de doble conversión; esto es, primero son convertidores de energía alterna a energía de corriente directa (*convertidor CA-CD*) y luego convierten esa energía de corriente directa a energía de corriente alterna (*convertidor CD-CA*); el *convertidor CA-CD* puede ser a base de *diodos (1 cuadrante)* trifásico (6, 12 o más pulsos) o *regenerativos (4 cuadrantes)* a base de *tiristores o IGBT's* igualmente de 6, 12 o más pulsos según sea la potencia que manejan; almacenan energía CD en *capacitores electrolíticos*, la segunda etapa de conversión (*convertidor CD-CA*) esa base de *IGBT's* con salida trifásica; el control voltaje en la frecuencia (V/f) se logra modulando la *anchura del pulso (PWM)* para el voltaje y la duración de *ciclo* de salida al motor (frecuencia), ambos, de manera independiente.

La *ley de control* de un *variador de frecuencia* puede ser de operación continua a voltaje constante (fuente de voltaje constante), limitación de corriente en operación continua (fuente de corriente constante) o una combinación; es decir, voltaje constante con limitación de corriente (ambas formar, fuente de voltaje constante y/o fuente de corriente constante); **EL VARIADOR DE FRECUENCIA ES ESPECÍFICAMENTE PARA CONTROL DE LA VELOCIDAD DE MOTORES.**

El campo de aplicación de un *variador de frecuencia* es muy amplio; mediante la regulación de la velocidad sin *saturación magnética* (como si lo hacen un *ATR* o el *soft-starter*) lograr variar el par-motor para control de gasto o flujo de agua en bombas y aire en ventiladores, movimiento de bandas transportadoras, grúas, compresores, tubuladoras, roladoras, inyectoras, etc. en la industria metal-mecánica; además de dar un grado muy alto de control en los procesos, se logran ahorros de energía considerables.

Por lo general los *variadores de frecuencia* son digitales programables de gama media y alta; es decir, todos tienen de programación media a muy elevada donde ofrecen prestaciones muy complejas.

EL *VARIADOR DE FRECUENCIA* GENERA *CORRIENTES ARMÓNICAS* TODO EL TIEMPO; estas corrientes armónicas son de *orden 5º, 7º, 11º y 13º*

predominantemente; se le considera al variador de frecuencia y a su motor, *carga electrónica o carga no lineal* constante.

2.- PROTECCIONES NECESARIAS PARA MOTORES DEL TIPO SUMERGIBLE Y FLECHA HUECA.

No pretendemos dar una descripción detallada de los motores sumergibles o flecha hueca porque no es el objetivo de este tratado; sin embargo, diremos que las aplicaciones y eficiencias de estos motores obedecen muchas veces a las condiciones físicas del pozo o depósito que aportará el agua tales como la profundidad, verticalidad, cantidad de sólidos en el agua (arena), temperatura del agua, etc; la eficiencia (η) de los motores en bombeo varía del 80% al 95%.

Los motores sumergibles a la fecha no están normalizados como lo están los motores verticales flecha hueca y los motores horizontales en los que podemos encontrar "Calidad Premium"; esto por desgracia significa, que hay mucha variación de calidad de materiales y de la técnica de construcción electro-mecánica de una marca a otra en motores sumergibles.

Desgraciadamente esto dificulta enormemente la estandarización de la especificación de límites de condiciones de operación segura en cuanto a *régimen transitorio* como lo un arranque (o varios consecutivos en pruebas de puesta en marcha), o también una sobrecarga necesaria como en el llenado de una tubería (presión cero, caudal infinito) antes de suministrar agua a los usuarios a presión estable; de igual forma, se dificulta establecer protecciones en *régimen de avería* como una pérdida de fase o motor a *rotor bloqueado*.

A continuación enunciamos las protecciones necesarias para motores verticales tipo flecha hueca muy usados en bombeo de pozos profundos, motores verticales aplicados a re-bombeo y los de tipo sumergible que son a nuestros ver, los más propensos a daños.

2.1.- ARRANQUE Y PARO SUAVE:

- El arranque suave requiere de graduar la energía eléctrica de alimentación al motor para lograr que al iniciar la operación las partes mecánicas como flechas, *arañas, base de rangua, impulsores*, tuberías, *válvulas* unidireccionales (*check*), filtros para arena, etc, no se dañen con el alto par y la sobre presión que el motor podría proporcionar durante un arranque a tensión plena; igualmente con un arranque a tensión plena, los componentes varios

del circuito eléctrico como el transformador, fusibles, interruptores, cableado, juntas o conexiones, base socket de medición y contactores recibirán un estrés, desgaste y deterioro excesivo en cada puesta en marcha por la sobre corriente en el arranque; se trata de no causar caídas de voltaje por sobre corrientes de arranque que abran fusibles, interruptores o afecten a terceros conectados a la misma acometida en la red eléctrica.

- En el paro; sobre todo en bombas con tuberías muy largas (y pocas **válvulas check**) cuando se apagan, reciben un impacto mecánico debido al peso de la columna de agua que desplazan llamado golpe de ariete, este impacto es capaz de reventar tuberías y dañar la **base de rangua** en el motor sumergible; el paro suave de **un soft-starter** o un **variador de frecuencia** minimiza o elimina este fenómeno destructivo.
- Lo anterior quiere decir que en lo posible designe equipos de arranque y paro suave en motores a partir de 15 HP @ 440Vca y 7.5HP o 10 HP @ 220Vca trifásicos.
- Aunque más adelante hay una tabla descriptiva y comparativa entre equipos electromecánicos y electrónicos (ver tabla 5.3), cabe mencionar que el **ATR** con autotransformador es un equipo de **transición abierta**; es decir, entre el proporcionar el 65% del voltaje (primer paso) en el arranque, al 100% en el segundo paso (todos sabemos que es de solo 2 pasos) deja un instante (100 a 300 milisegundos) al motor sin alimentación generando a fin de cuentas un arranque casi a tensión plena; por otro lado, eso no ocurre en un **soft-starter** o en un **variador de frecuencia** (que son equipos de **transición cerrada**); este último, ofrece el mejor arranque de todos los equipos disponibles.

2.2.- VARIACIÓN EN LA MAGNITUD Y DESBALANCE DEL VOLTAJE DE SUMINISTRO:

- **Si el voltaje aumenta**; también lo hace la relación voltaje en la frecuencia (v/f) y consecuentemente el flujo (ϕ) que nos puede hacer creer que la potencia en (HP) se incrementa también ($HP \propto \phi$); sin embargo, no es así, la curva magnética no es lineal y aunque aumente el voltaje, dado que el motor sin duda alguna está al punto más alto de la curva magnética calculada al voltaje nominal por razones comerciales, solo generará calor adicional en el núcleo sin proporcionar más potencia. De igual manera, la saturación magnética en el núcleo causada por el incremento en voltaje generará un aumento significativo en las corrientes de motor en vacío (corrientes magnetizantes) y alta

distorsión en las mismas (*corrientes armónicas de bajo orden 5º, 7º, etc.*); *se estipula un rango de tolerancia de variación en voltaje no mayor a + 10% (por norma + 5%) del voltaje nominal para no caer en la saturación magnética.*

- *Si el voltaje disminuye; de igual manera disminuye la relación (v/f), el flujo (ϕ) y la potencia (HP); también disminuyen la eficiencia (η) y el Factor de Potencia (FP) reduciendo aún más la potencia en (HP) disponible en la flecha del motor. Esto hace que el motor se precipite sobre su curva de corriente incrementándola por el drástico aumento del deslizamiento (s; diferencia de velocidad del rotor a la velocidad polar); cabe decir, que con la relación cuadrática entre la potencia (HP) y del gasto (Q), no es fácil determinar el valor de sobre corriente al que se llegará. Al igual que para el sobre voltaje, se estipula una **caída de no más del -10% (por norma -5%) del voltaje nominal** para operación en condiciones aceptables.*
- No existe un sistema de suministro trifásico perfectamente balanceado; es decir, siempre hay diferencias entre los 3 voltajes de suministro que causan desbalances o asimetrías aún mayores en las corrientes de consumo del motor, sobre todo cuando el motor trabaja por debajo de su potencia nominal. *El problema es crítico cuando hay desbalances de más del 5% y el motor toma su plena corriente o la excede, este fenómeno daña a corto o mediano plazo las conexiones y los aislamientos de la fase más sobrecargada; una protección adecuada por desbalance o **asimetría (menor al 5%) refuerza la protección por pérdida de fase.***

2.3.- DESCARGAS ELÉCTRICAS:

- *El motor en bombeo casi sin excepción, presenta la peculiaridad de estar muy bien aterrizado; esto es verdad si observamos, que si bien el motor no está inmerso en el agua (motor sumergible), está sentado y conectado a una tubería metálica muy larga que sobrepasa en mucho al área de la(s) varilla(s) de aterrizamiento del transformador de alimentación; esto garantiza que en el mayor de los casos, **el motor está mejor aterrizado que ni el transformador de suministro mismo;** esto se pensaría como un punto bueno; sin embargo, **es el camino más fácil para las corrientes de descarga por sobretensiones.***
- *La protección mínima consiste en instalar una arreglo de varistores de óxido metálico (MOV's) que no son otra cosa que **semiconductores** sensibles al nivel de voltaje con alta capacidad de conducción de corriente*

y de muy alta velocidad de respuesta; *este arreglo de semiconductores debe de ser conectado firmemente a tierra (ademe o tuberías enterradas) para que canalice las corrientes de descarga en la trayectoria ademe- tierra y no en la trayectoria devanados del motor-agua-ademe.*

2.4.- SOBRECARGA Y DESBALANCE DE LA CORRIENTE DE CONSUMO DEL MOTOR.

- *Todos los motores están limitados por su capacidad de absorción de corriente de la fuente de suministro por razones térmicas; en otras palabras, por razones de pérdidas de Joule (I^2R), las sobrecorrientes pueden elevar la temperatura de los devanados más allá del máximo para lo que están diseñados los aislamientos de los conductores en pocos minutos dañándolos irreversiblemente. Existen otras circunstancias en donde la corriente no sobrepasa el valor nominal pero a falta de enfriamiento (aire forzado en motores de superficie o falta de agua en motores sumergibles) pueden causar sobrecalentamiento y daño; por esta razón, se deben tomar criterios precautorios al implementar variadores de frecuencia en cualquier tipo de motor y particularmente en la implementación de las bombas sumergibles en bombeo de agua caliente o instaladas en norias o llamados.*
- *El desbalance de corrientes puede ser generado por varias circunstancias; un ligero desbalance en voltaje de suministro (3% o menos) puede causar un desbalance de más del 10% en corrientes al motor sobre todo si el motor opera por debajo del 75% de su capacidad de carga. Las pequeñas diferencias de construcción mecánica (dimensión de bobinas, errores de espiras, puntos calientes en núcleos, etc) de los devanados del motor potencializada con las conexiones en estrella, hacen que se demanden corrientes desbalanceadas aun con voltajes ligeramente asimétricos; sin embargo, este fenómeno no es crítico cuando el promedio de las corrientes no excede el valor nominal de placa (considerando el Factor de Servicio, si lo dispone), cuando el promedio de estas corrientes si excede el nominal o incluso, si alguna de las tres magnitudes excede el nominal ya es problemático y digno de atención. No se recomiendan desbalances sobre corriente nominal (promedio) más allá del 5% o 6%.*

2.5.- TIEMPOS DE ESPERA ENTRE ARRANQUES PARA EL ENFRIAMIENTO DEL MOTOR.

- ***Cuando los motores son puestos en marcha*** accionados por ***ATP's, ATR's o Soft-Starter*** las corrientes de arranque alcanzan por tiempos que van de 0.1 segundo a 10 segundos el 600%, 400% y 350% respectivamente sobre el valor de corriente nominal; las constantes térmicas de los motores; dicho en otras palabras, el tiempo en que alcanzan una temperatura estable (dejan de seguirse calentando) rondan de 10 minutos a 60 minutos entre 10 HP y 300 HP; lo anterior significa que ***se pueden alcanzar temperaturas cercanas o más altas a las de régimen permanente o de trabajo continuo en varios arranques de prueba consecutivos (entre 3 a 7 arranques consecutivos).***
- ***El tiempo de espera es un tiempo estimado precisamente para dejar que el motor se enfríe después de la operación continua*** generalmente, este tiempo es empírico por desconocimiento de las condiciones particulares y reales del circuito eléctrico-térmico; ***los valores más usados son de 5 a 10 minutos en motores hasta 75 HP, de 10 minutos a 20 minutos en motores de 100 HP y hasta 200 HP ; 30 minutos o más en motores de mayor potencia;*** lo anterior no garantiza que el enfriamiento llegue a ser igual que la temperatura del agua o del medio enfriante, solo reduce en algunos grados para poder volver a arrancar y/o poner en operación continua; ***lo mejor indiscutiblemente, es medir directamente la temperatura de los devanados del motor.***
- Por otro lado, cabe decir, que los motores accionados con ***soft-starter***, deben disponer de un contactor adicional que da paso a los capacitores para la corrección del factor de potencia; ***el tiempo de espera entre arranques también sirve para dar tiempo a los capacitores a descargarse y volver a ser conectados a la red en régimen de operación continua;*** de no hacerlo, se pueden causar sobrecorrientes tan altas (choque de impedancias fuente-capacitores) que abren interruptores termomagnéticos o dañan a los capacitores mismos.

2.6.- CARGA BAJA, SUB-CORRIENTE DE CONSUMO DEL MOTOR.

- Por lógica parecería que no hay problema si un motor demanda menos corriente que la nominal de placa (con o sin Factor de Servicio); para empezar, ***un motor*** bien reparado o bien diseñado no tomará menos corriente que una tercera parte de la corriente nominal esto en vacío; pero como realmente en operación si tienen carga (ligera) como lo son las flechas, los impulsores, etc, ***la corriente de demanda varía entre un rango del 40% al 100% de la nominal de placa*** (y 110% o 115% como máximo considerando el Factor de Servicio).

- Cuando un motor flecha hueca demanda menos corriente que la nominal (60% por ejemplo) no hay tanto problema como en el caso de un motor sumergible; ***el motor sumergible depende totalmente de la cantidad de agua que desplaza para su enfriamiento y lubricación***; si no está desplazando agua, puede ser que esté comprometida su integridad eléctrica y mecánica por elevación de temperatura en devanados, chumaceras, base de rangua, aún con demanda de corriente igual o por debajo de la nominal.
- Comentaremos también, que ***cuando la carga en una bomba sumergible es baja***, se genera un fenómeno denominado ***cavitación***, que es un desplazamiento axial hacia arriba de la flecha e impulsores causando un desgaste mecánico y daño prematuro.

2.7.- TEMPERATURA MÁXIMA DEL AGUA QUE SE BOMBEA.

- Al no estar definida en algunas marcas la clase térmica en motores del tipo sumergible, pensar en considerar 40°C de incremento como estándar en los devanados sobre una temperatura ambiente o del medio enfriante (el agua) de 30°C como nos lo sugieren algunas fábricas podría ser coherente puesto que aritméticamente la suma resulta 70°C, adicionalmente sabemos que se usan alambres magneto especiales (magneto-plásticos 75°C); lo anterior es válido si las densidades eléctricas y magnéticas de diseño o reparación son razonables; por el contrario, de no ser así, o de haber una temperatura mayor del agua, la temperatura en régimen permanente podría superar la temperatura segura de los devanados del motor degradándolos paulatinamente hasta la falla por aterrizamiento aún con la corriente nominal; como regla empírica, ***por cada 10°C de incremento sobre la temperatura de diseño, se reduce la vida del motor por mitad.***
- ***MEDIR LA TEMPERATURA DIRECTAMENTE EN LOS DEVANADOS DEL MOTOR, ES LA ÚNICA SOLUCIÓN REAL A LA INCERTIDUMBRE QUE PROVOCAN LAS CONDICIONES COMERCIALES DE DISEÑO Y A LAS CONDICIONES PARTICULARES DE APLICACIÓN A CADA EQUIPO.***

2.8.- NIVEL DINÁMICO MÍNIMO (SUMERGENCIA).

- Los especialistas en hidráulica de bombeo predicen un vórtice o cono de absorción desde la succión de la bomba hasta poca distancia o a nivel del impulsor superior; este fenómeno de absorción de agua y aire provoca erosión mecánica prematura en impulsores y/o tazones y empuje axial *positivo* “cavitación” (*mismo fenómeno que con carga baja*); *esto puede ocurrir cuando la sumergencia de la bomba es poca en pozos profundos por instalación errónea o porque el pozo se abate.*
- *La sumergencia o el nivel dinámico mínimo es crítico para garantizar la lubricación y el enfriamiento del motor y bomba.*
- La sumergencia de la bomba es recomendada empíricamente según capacidad de bomba dentro de un rango de **5 metros hasta 30 metros como nivel mínimo de sumergencia para evitar la cavitación (consultar a la fábrica o a taller autorizado).**

2.9.- TEMPERATURA MÁXIMA EN LOS DEVANADOS DEL MOTOR.

- Los devanador de los motores sumergibles están fabricados con conductores especiales para inmersión en el agua con aislamientos “termoplásticos” estándar de 75°C @ 600V; sin embargo, los hay de 90°C en el mismo voltaje y menos comunes de 3kV o 5kV @ 75°C para motores en media tensión (2.3 kV y 4.2 kV).
- *La temperatura máxima de operación en régimen continuo independientemente de las características particulares del conductor usado, no debe exceder la temperatura del material de construcción de menor capacidad térmica; en este caso, el conductor de los devanados; la temperatura máxima de operación, deberá ser especificado por la fábrica o por el taller de reparación.*
- *La regla empírica sobre 20, 000 horas de expectativa de vida, especifica que, la vida térmica de los aislamientos se reduce a la mitad por cada 10°C de incremento sobre la temperatura máxima; pero, también la vida térmica de los aislamientos se duplica, cuando la temperatura de los devanados está 10°C por debajo de la temperatura especificada como máxima.*

2.10.- FUGA A TIERRA (ATERRIZAMIENTO DEL CIRCUITO LINEAS-MOTOR).

- La detección oportuna del aterrizamiento del circuito líneas-motor puede ahorrar tiempo y costo en equipos de bombeo sumergible al detectar una fuga a tierra constante de manera prematura.
- Al arrancar un motor sumergible a mucha profundidad, se comporta como un capacitor que está siendo “cargado”; pero pasado este transitorio, la protección debe ser permisiva en tiempo y magnitud; se recomiendan emplearlo en bombas sumergible con ajustes menores a 2 Aca de fuga con tiempos de respuesta de 3 segundos.

2.11.- SUMINISTRO DE ALIMENTACIÓN SIN CORRIENTES ARMÓNICAS PRESENTES.

- *La inyección de corrientes armónicas de la red al motor provoca, en general, el aumento del valor eficaz (RMS) aumentando la temperatura del devanado.*
- La inyección de corrientes triplen o de secuencia cero (3, 9, 12...) aumenta el valor eficaz (RMS) y la temperatura del devanado.
- La inyección de corrientes armónicas de secuencia negativa (5, 11, 17...) aumentan el valor eficaz (RMS), la temperatura del devanado y disminuyen la eficiencia (η) al crear un contra par.
- La inyección de corrientes armónicas de secuencia positiva (7, 13...) aunque pretenden elevar la velocidad del rotor (par adicional), solo aumentan el valor eficaz (RMS) de la corriente y la temperatura de los devanados.
- *El entorno de contaminación eléctrica en voltaje sobre fundamental debe ser inferior al 5%THDV_f aplicado a motores a plena carga; la polución armónica en corriente deberá ser análoga.*
- Un motor *con saturación magnética* más allá de la región lineal de su *curva B-H* (densidad versus intensidad magnética) se convertirá en un generador de corrientes armónicas, mismas que se propagarán por la red.

2.12.- NÚMERO DE INTENTOS DE ARRANQUE EN MODO AUTOMÁTICO.

- Cuando el equipo se usa en modo automático por alguna **ley de control** como se explica en el capítulo 3 y ocurre una anomalía tal como una sobrecarga, pérdida de fase, abatimiento del pozo o sobre-temperatura en el motor; el equipo estando en modo automático detecta, apaga y espera cierto tiempo a volver a poner en marcha la bomba; sin embargo, si la falla es recurrente debe existir un límite de intentos de puestas en marcha por seguridad del equipo mismo y de todo el circuito en general; **a este límite de puestas en marcha bajo régimen de avería se le denomina número de intentos de arranque.**

2.13.- CAMISA DE ENFRIAMIENTO Y TRAMPA DE SÓLIDOS PARA MOTORES SUMERGIBLES.

- **Los motores sumergibles están diseñados para auto-enfriarse con un flujo mínimo o caudal** mismo que deberá de recorrer la superficie exterior del motor para eliminar el exceso de calor generado; **este flujo (proporcionado a veces como velocidad del agua) se especifica según modelo y marca.**
- **Las condiciones de flujo axial del agua necesarias para el suficiente enfriamiento del motor no se cumplen en caso de motores sumergibles aplicados en cárcamos, pozos profundos con aportes por encima de la succión de la bomba, en norias, en llamados o en piletas.**
- En los casos anteriores **se deberá instalar forzosamente una camisa de enfriamiento.**
- **Para pozos con sólidos (arenas);** se logra aumentar la vida útil del motor adecuando la camisa de enfriamiento (alargándola hacia abajo entre otras cosas), esta **trampa de sólidos logra que por gravedad se precipiten al fondo del pozo y así eliminar parte de los sólidos de mayor tamaño** y no hacerlos pasar por la bomba; sin embargo, podría requerirse de un estudio más exhaustivo para dar solución integral a una problemática como esta.

3.- DESCRIPCIÓN DE CONCEPTOS DE CONTROL EN BOMBEO.

Queremos explicar brevemente la acción que implica los diferentes tipos de control aplicados al bombeo para homologar conceptos y establecer lineamientos claros en la selección de equipos.

3.1.- CONTROL MANUAL.

- **Acción de poner en marcha o apagar** una bomba desde su arrancador *por mano y voluntad propia mediante botoneras.*

3.2.- CONTROL AUTOMÁTICO.

- **Acción de poner en marcha o apagar** una bomba desde su arrancador *sin la intervención humana basado en alguna ley de control.*

3.3.- VARIABLE DE CONTROL Y VARIABLE PERMISIVA.

- **Variable de control:** las variables de control son *aquellos parámetros que “deciden” si se arranca o se apaga la bomba de manera automática* sin cause de alarmas o bloqueos definitivos; por ejemplo, carga baja, nivel alto en el llenado en una pila, nivel dinámico mínimo en el pozo, tiempos en horas de apagado o encendido, tiempo de espera entre arranques, etc.
- **Variable permisiva:** las variables permisivas son aquellos *parámetros que causan alarmas o bloqueos definitivos*; por ejemplo, cortocircuito, fuga a tierra, descargas eléctricas; eventualmente pueden ser el nivel dinámico mínimo, sobrecarga o falla de fase.

3.4.- CONTROL AUTOMÁTICO HORARIO O POR TIEMPO EN HORAS (TANDEO).

- **Acción de poner en marcha o apagar** una bomba desde su arrancador *sin la intervención humana basado en control automático por horas.*
- El ajuste de horas de operación es variable (por ejemplo de 1 a 10 horas).
- El ajuste de horas apagado es variable (por ejemplo de 1 a 10 horas).

- ***El ciclo de operación puede ser único***; esto es, se inicia el ciclo arrancando, trabaja las horas de operación especificadas y posteriormente el equipo apaga la bomba finalizando el ciclo.
- ***El ciclo de operación puede ser continuo***; esto es, se determinan las horas de operación y también las horas de apagado; el ciclo comienza arrancando y operando las horas especificadas, terminado esto, se apaga la bomba por el tiempo en horas especificadas de no operación y luego se vuelve a poner en operación repitiendo el ciclo indefinidamente.
- ***El ciclo de operación puede ser con retardo a la puesta en operación (on-delay)***; se especifican las horas de apagado y las horas de operación; el ciclo comienza esperando primero el tiempo de apagado y luego pone en operación la bomba el tiempo ajustado; el ciclo como el apartado anterior se repite indefinidamente.

3.5.- CONTROL AUTOMÁTICO CALENDARIO O POR TIEMPO EN DÍAS DE LA SEMANA (TANDEO).

- ***Acción de poner en marcha o apagar*** una bomba desde su arrancador *sin la intervención humana basado en control calendario o por horas de cada día en una semana.*
- Según la cantidad de memorias disponibles en los relevadores horarios, ***se pueden programar varios juegos de horarios de encendido y apagado en un solo día.***
- Según la cantidad de memorias disponibles en los relevadores horarios, ***se pueden programar varios juegos de horarios de encendido y apagado repetitivos en solo algunos o en todos los días de la semana.***

3.6.- CONTROL AUTOMÁTICO POR NIVEL DINÁMICO MÍNIMO (SUMERGENCIA).

- **Acción de poner en marcha o apagar** una bomba desde su arrancador *sin la intervención humana basado en control por monitoreo o sensado del nivel dinámico mínimo (sumergencia).*
- **El nivel dinámico mínimo puede ser simplemente una variable permisiva** de protección que cause alarma y saque de operación o no permita la puesta en marcha de la bomba.
- **El nivel dinámico mínimo puede ser también una variable de control automático combinado con el tiempo de espera entre arranques aplicado a pozos que se abaten.**
- **El nivel dinámico mínimo (o nivel bajo) se usa como variable de control combinado con otro electrodo denominado nivel máximo (o nivel alto) para el vaciado automático de pilas en re-bombeo y/o de pozos que se abaten o bien, en el llenado de cisternas; puede ser combinado con el tiempo de espera entre arranques.**

3.7.- CONTROL AUTOMÁTICO A PRESIÓN CONSTANTE.

- **Acción de poner en marcha o apagar** una bomba desde su arrancador *sin la intervención humana basado en control por monitoreo o sensado de la presión en la tubería de descarga.*
- **El parámetro de presión ya sea como variable de control o variable permisiva requiere de sensores adicionales** al equipo de arranque y control de tipo discreto (on/off) electromecánico o lineales de tipo electrónico (4-20 mA).
- Un valor de presión definido (120 PSI por ejemplo) **puede ser usado simplemente como variable permisiva** para apagar la bomba a modo de protección.
- **Como variable de control**, se debe mantener una presión constante en la tubería en un rango ajustable y definido (0-150 PSI por ejemplo); se aplica una histéresis, tolerancia o margen de error también ajustable y definida (10 PSI por ejemplo).
- Estas aplicaciones en la mayoría de los casos **permite el ahorro de energía (y de costos)** cuando transcurren periodos largos sin uso y/o periodos de bajo consumo de agua.

- Esta aplicación es preferente de los **variadores de frecuencia** en re-bombeos; sin embargo pueden ser usados en pozos profundos con bombas sumergibles acondicionando los **variadores de frecuencia** con filtros de salida.

3.8.- CONTROL AUTOMÁTICO A CAUDAL CONSTANTE.

- **Acción de poner en marcha o apagar** una bomba desde su **arrancador sin la intervención humana basado en control por monitoreo o sensado del caudal o gasto** (Litros por segundo, Lt/s) en la tubería de descarga.
- El parámetro de caudal o gasto como variable de control (no es común como variable permisiva) **requiere de sensores adicionales al equipo** de arranque y control lineal de tipo electrónico (4-20 mA).
- Como variable de control, se debe **mantener un caudal constante** en la tubería en un rango ajustable y definido (5-50 Lt/s por ejemplo).
- Esta aplicación no es tan común pero **ayuda a no sobrecargar mecánicamente la bomba y a no demandar más agua de la que pueda dar el pozo.**
- Esta aplicación preferente de los **variadores de frecuencia** en pozos profundos y re-bombeos.
- Como la relación entre la corriente del motor y el caudal es cúbica ($I_M = Q^3$), es posible transferir la variable caudal (Q) a una variable de control secundaria de corriente (I) denominada “limitación de corriente”, es decir, se limita la corriente de consumo al motor que a su vez limitará el caudal máximo (**variador de frecuencia** usado como fuente de corriente).

3.9.- CONTROL AUTOMÁTICO POR FLUJO DE CORRIENTE (CARGA BAJA).

- **Acción de poner en marcha o apagar una bomba** desde su arrancador *sin la intervención humana basado en control por monitoreo o sensado de la corriente (Aca) de consumo del motor.*
- La relación entre la corriente del motor y el caudal es cúbica ($I_M = Q^3$), **es posible controlar automáticamente la puesta en marcha y el apagado** de la bomba cuando el caudal sea muy bajo como *en pozos que se abaten sin necesidad* de usar Electronivel (*electrodos específicamente*).
- El control automático por flujo de corriente **elimina en la mayoría de los casos la necesidad de usar electrodos en pozos profundos que se abaten.**
- El parámetro de carga baja puede ser **usado también como variable permisiva.**
- El parámetro de carga baja **puede ser usado para llenar cisternas muy lejanas adicionándoles una válvula tipo flotador**; de tal manera, que cuando comienza a llenarse la cisterna, la válvula flotador comienza a estrangular, el caudal disminuye paulatinamente igual que la corriente de consumo del motor y esto es detectado por el control ordenando el bloqueo; esto debe combinarse con el tiempo entre arranques.

3.10.- CONTROL AUTOMÁTICO EN CONDICIONES DE SOBRECARGA (REARME).

- **Acción de poner en marcha o apagar** una bomba desde su arrancador *sin la intervención humana basado en control por monitoreo de condiciones de sobrecarga.*
- La condición de sobrecarga **es permisiva** y normalmente es usada para apagar el equipo; sin embargo, **al usarse en modo automático (rearre) debe ser en combinación con el tiempo de espera entre arranques y el número de intentos de arranque** para evitar daños irreversibles.

3.11.- CONTROL AUTOMÁTICO EN CONDICIONES DE SOBRE TEMPERATURA (REARME).

- *Acción de poner en marcha o apagar* una bomba desde su *arrancador sin la intervención humana basado en control por monitoreo de la temperatura de los devanados del motor.*
- La condición de sobretemperatura *es permisiva* y normalmente es usada para apagar el equipo; sin embargo, *al usarse en modo automático (rearme) debe ser en combinación con el tiempo de espera entre arranques y el número de intentos de arranque* para evitar daños irreversibles.

3.12.- CONTROL AUTOMÁTICO EN CONDICIONES DE ANOMALÍAS EN VOLTAJE DE SUMINISTRO (REARME).

- *Acción de poner en marcha o apagar* una bomba desde su arrancador *sin la intervención humana basado en control por monitoreo del voltaje de suministro.*
- La condición de pérdida de fase, alto voltaje, bajo voltaje o desbalance de voltaje *es permisiva* y normalmente es usada para apagar el equipo; sin embargo, *al usarse en modo automático (rearme) debe ser en combinación con el tiempo de espera entre arranques y el número de intentos de arranque* para evitar daños irreversibles.

4.- REQUERIMIENTOS Y CONDICIONES DE CONTROL PARA LAS APLICACIONES MÁS COMUNES.

En este apartado asociamos las condiciones de control automático vistos en el apartado 3 según sea la aplicación; esto, con el fin de mostrar el universo de protecciones y posibilidades de control.

4.1.- BOMBEO A UNA PILA O CISTERNA CERCANA DESDE UN POZO PROFUNDO.

✓ *Usando una bomba sumergible:*

▪ Protecciones Necesarias:

-
- ✓ Por alto voltaje.
 - ✓ Por bajo voltaje.
 - ✓ Por pérdida de fase.
 - ✓ Por desbalance de voltaje.
 - ✓ Por descargas eléctricas.
 - ✓ Por sobrecarga.
 - ✓ Por carga baja.
 - ✓ Por cortocircuito.
 - ✓ Por fuga a tierra.
 - ✓ Por sobretemperatura en motor con sensor en devanados y con camisa de enfriamiento (cuando se requiera).
 - ✓ Tiempo de espera entre arranques.
 - ✓ Por nivel dinámico mínimo (sumergencia).

▪ Tipos De Control (Ley De Control) Aplicables:

✓ Arranque suave y paro suave (no aplica a motores monofásicos).

✓ Llenado automático de cisterna con electroniveles.

✓ Llenado automático de cisterna desde un pozo que se abate con Electronivel y pera, por flujo de corriente y pera o flujo de corriente y válvula flotador.

✓ Control de pozo que se abate con electroniveles o por flujo de corriente a sistema cisterna-red.

✓ Control por horas o control calendario (tandeo automático).

✓ Operación continua en régimen de avería (rearme).

✓ Control por flujo constante para ajustar la bomba al pozo y no extraer más agua que la que aporta (bomba muy grande) o por pozo que se abate.

✓ Combinaciones de todo mientras no sea **control redundante**.

✓ Usando un motor de superficie flecha hueca:

▪ Protecciones Necesarias:

✓ Por alto voltaje.

✓ Por bajo voltaje.

✓ Por pérdida de fase.

- ✓ Por desbalance de voltaje.
- ✓ Por descargas eléctricas.
- ✓ Por sobrecarga.
- ✓ Por carga baja.
- ✓ Por cortocircuito.
- ✓ Por fuga a tierra (sugerido).
- ✓ Por sobretemperatura en motor con sensor en devanados (sugerido).
- ✓ Tiempo de espera entre arranques.
- ✓ Arranque suave y paro suave.

▪ Tipos De Control Aplicables:

- ✓ Llenado automático de cisterna con electroniveles.
- ✓ Llenado automático de cisterna desde un pozo que se abate por flujo de corriente y pera o flujo de corriente y electroniveles.
- ✓ Control de pozo que se abate por flujo de corriente o por caudal constante (bomba muy grande) a sistema cisterna-red.
- ✓ Control por horas o control calendario (tandeo automático).
- ✓ Operación continua en régimen de avería (rearme).
- ✓ Combinaciones de todo mientras no sea **control redundante**.

4.2.- BOMBEO A UNA PILA O CISTERNA LEJANA.

✓ *Usando una bomba sumergible:*

- **Protecciones Necesarias:**
 - ✓ Por alto voltaje.
 - ✓ Por bajo voltaje.
 - ✓ Por pérdida de fase.
 - ✓ Por desbalance de voltaje.
 - ✓ Por descargas eléctricas.
 - ✓ Por sobrecarga.
 - ✓ Por carga baja.
 - ✓ Por cortocircuito.
 - ✓ Por fuga a tierra.
 - ✓ Por sobret temperatura en motor con sensor en devanados y con camisa de enfriamiento (cuando se requiera).
 - ✓ Tiempo de espera entre arranques.
 - ✓ Por sumergencia mínima.
 - ✓ Arranque suave y paro suave (no aplica a motores monofásicos).
-

- **Tipos De Control Aplicables:**
 - ✓ Llenado automático de cisterna por flujo de corriente y válvula flotador (contrapresión); por flujo de corriente, sensor de presión y válvula flotador (contrapresión asistida) o telemetría.
 - ✓ Llenado automático de cisterna desde un pozo que se abate con Electronivel, flujo de corriente y válvula flotador o telemetría.

- ✓ Control de pozo que se abate con electroniveles o por flujo de corriente a sistema cisterna-red.
- ✓ Control por caudal constante a cisterna-red en caso de bomba muy grande o adaptación de bomba a pozo con poco aporte.
- ✓ Control por horas o control calendario (tandeo automático).
- ✓ Operación continua en régimen de avería (rearme).
- ✓ Combinaciones de todo mientras no sea *control redundante*.

✓ *Usando un motor de superficie flecha hueca:*

▪ **Protecciones Necesarias:**

- ✓ Por alto voltaje.
- ✓ Por bajo voltaje.
- ✓ Por pérdida de fase.
- ✓ Por desbalance de voltaje.
- ✓ Por descargas eléctricas.
- ✓ Por sobrecarga.
- ✓ Por carga baja.
- ✓ Por cortocircuito.
- ✓ Por fuga a tierra (sugerido).
- ✓ Por sobretemperatura en motor con sensor en devanados (sugerido).
- ✓ Tiempo de espera entre arranques.

▪ TIPOS DE CONTROL APLICABLES:

✓ Arranque suave y paro suave.

✓ Llenado automático de cisterna con sensor de presión, flujo de corriente y válvula flotador (contrapresión) o por telemetría.

✓ Llenado automático de cisterna desde un pozo que se abate por electroniveles, flujo de corriente y válvula flotador (contrapresión).

✓ Control de pozo que se abate por flujo de corriente o electroniveles a un sistema cisterna-red.

✓ Control por horas o control calendario (tandeo automático).

✓ Operación continua en régimen de avería (rearme).

✓ Combinaciones de todo mientras no sea *control redundante*.

4.3.- BOMBEO A UNA RED DE AGUA POTABLE.

✓ *Usando una bomba sumergible:*

▪ **Protecciones Necesarias:**

- ✓ Por alto voltaje.
- ✓ Por bajo voltaje.
- ✓ Por pérdida de fase.
- ✓ Por desbalance de voltaje.
- ✓ Por descargas eléctricas.
- ✓ Por sobrecarga.
- ✓ Por carga baja.
- ✓ Por cortocircuito.
- ✓ Por fuga a tierra.
- ✓ Por sobretemperatura en motor con sensor en devanados y con camisa de enfriamiento (cuando se requiera).
- ✓ Tiempo de espera entre arranques.
- ✓ Por sumergencia mínima.
- ✓ Por sobrepresión en la red.

▪ **Tipos De Control Aplicables:**

- ✓ Control de pozo que se abate con electroniveles o por flujo de corriente a la red.
- ✓ Control por horas o control calendario (tandeo automático).
- ✓ Control a presión constante.
- ✓ Control a caudal constante para adaptación de bomba a pozo con aporte limitado o por bomba muy grande.
- ✓ Operación continua en régimen de avería (rearme).

- ✓ Combinaciones de todo mientras no sea **control redundante**.

✓ **Usando un motor de superficie flecha hueca:**

▪ **Protecciones Necesarias:**

- ✓ Por alto voltaje.
- ✓ Por bajo voltaje.
- ✓ Por pérdida de fase.
- ✓ Por desbalance de voltaje.
- ✓ Por descargas eléctricas.
- ✓ Por sobrecarga.
- ✓ Por carga baja.
- ✓ Por cortocircuito.
- ✓ Por fuga a tierra (sugerido).
- ✓ Por sobretensión en motor con sensor en devanados (sugerido).
- ✓ Tiempo de espera entre arranques.
- ✓ Por sobrepresión en la red.

▪ **Tipos De Control Aplicables:**

- ✓ Control de pozo que se abate por electroniveles o por flujo de corriente a la red.
- ✓ Control por horas o control calendario (tandeo automático).
- ✓ Control a presión constante.
- ✓ Control a caudal constante para adaptación de bomba a pozo con aporte limitado o por bomba muy grande.

- ✓ Operación continua en régimen de avería (rearme).
- ✓ Combinaciones de todo mientras no sea **control redundante**.

4.4.- BOMBEO A UNA RED DE RIEGO POR ASPERSIÓN O POR GOTEO.

✓ *Usando una bomba sumergible desde un pozo, noria o cisterna:*

- **Protecciones Necesarias:**

- ✓ Por alto voltaje.
 - ✓ Por bajo voltaje.
 - ✓ Por pérdida de fase.
 - ✓ Por desbalance de voltaje.
 - ✓ Por descargas eléctricas.
 - ✓ Por sobrecarga.
 - ✓ Por carga baja.
 - ✓ Por cortocircuito.
 - ✓ Por fuga a tierra.
 - ✓ Por sobretemperatura en motor con sensor en devanados (opcional).
 - ✓ Con camisa de enfriamiento sobre todo en norias, llamados o cisternas.
 - ✓ Tiempo de espera entre arranques.
 - ✓ Por sumergencia mínima.
-

- **Tipos De Control Aplicables:**

-
- ✓ Control por horas o control calendario (tandeo automático).
 - ✓ Control a presión constante con limitación de corriente (limitación de gasto).
 - ✓ Operación continua en régimen de avería (rearme).
 - ✓ Combinaciones de todo mientras no sea **control redundante**.

✓ *Usando un motor de superficie horizontal u otra bomba de alta presión:*

▪ **Protecciones Necesarias:**

- ✓ Por alto voltaje.
- ✓ Por bajo voltaje.
- ✓ Por pérdida de fase.
- ✓ Por desbalance de voltaje.
- ✓ Por descargas eléctricas.
- ✓ Por sobrecarga.
- ✓ Por carga baja.
- ✓ Por cortocircuito.

▪ **Tipos De Control Aplicables:**

- ✓ Control por horas o control calendario (tandeo automático).
- ✓ Control a presión constante con limitación de corriente (limitación de caudal).
- ✓ Operación continua en régimen de avería (rearme).

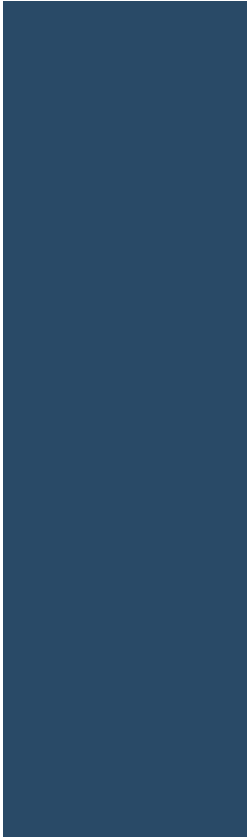
- ✓ Combinaciones de todo mientras no sea *control redundante*.

5.- TABLAS COMPARATIVAS DE PRESTACIONES, APLICACIONES Y COSTOS RELATIVOS.

5.1.- TABLA COMPARATIVA DE PRESTACIONES EN ATP'S; ATR'S, SOFT-STARTER Y VARIADORES DE FRECUENCIA.

PRESTACIONES	Arrancador a Tensión Plena (ATP)	Arrancador a tensión reducida tipo autotrafo (ATR)	Soft-starter	Variador de frecuencia
REPARABILIDAD	1.- ALTA	1. ALTA	1.- Media; solo por talleres autorizados.	1.- Baja; solo por talleres autorizados.
PROTECCIONES	2.- Sobrecarga clase 10 o 10A. 3.- Pérdida de fase al 66%.	2.- Sobrecarga clase 10 o 10A. 3.- Corto circuito. 4.- Pérdida de fase al 66%.	2.- Sobrecarga clase 1, 5, 10, 20 o 30. 3.- Rotor bloqueado. 4.- Carga baja. 5.- Desbalance corriente. 6.- Ato voltaje. 7.- Bajo voltaje. 8.- Pérdida de fase. 9.- Desbalance voltaje. 10.- Limitación de la corriente en el arranque. 11.- Bajo par de arranque.	2.- Sobrecarga clase 1, 5, o 10. 3. Rotor bloqueado. 4.- Carga baja. 5.- Alto grado de inmunidad al desbalance de corriente de suministro. 6.- Alto voltaje. 7.- Bajo voltaje. 8.- Pérdida de fase. 9.- Limitación de corriente en el arranque. 10.- Limitación de corriente en operación. 11.- Corto circuito. 12.- Variación de par-velocidad. 13.- Velocidad mínima.

				14.- Velocidad máxima.
				15.- Salida motor balanceada.
ARRANQUE	4.- 600% a 800% de la corriente nominal.	5.- 400% de la corriente nominal con menor par.	12.- 350% de la corriente nominal menor par.	16.- La corriente muchas veces no supera el 100%. Del valor nominal; par constante sin saturación magnética.
	5.- Todo el par del motor al arranque.	6.-600% instantáneo de la corriente al pasar a tensión plena.	13.- Arranque suave continuo.	17.- Variación continua del par-velocidad.
PARO	6.- Rueda libre.	7.- Rueda libre.	14.- Paro suave elimina el golpe de ariete.	18.- Paro suave elimina golpe de ariete.
	7- No elimina golpe de ariete.	8- No elimina el golpe de ariete.		
COMPENSACION DE FACTOR DE POTENCIA	8.- Con capacitores simples.	9.- Con capacitores simples.	15.- Con capacitores simples.	19.- Requiere de filtros.
			16.- Requiere de un contactor adicional.	
AMBIENTE DE OPERACIÓN	9.- Ofrecen alta inmunidad a ambientes agresivos.	10.- Ofrecen alta inmunidad a ambientes agresivos.	17.- Ofrecen alta inmunidad a ambientes agresivos.	20.- Requieren de medios no agresivos por usar ventilación forzada.
PRESTACIONES EN CONTROL	10.- Bajas, solo arranque y paro.	11.- Bajas, solo arranque y paro.	18.- Altas; medición de parámetros.	21.- Altas; medición de parámetros.
			19.- Arranque y paro suave.	22.- El mejor arranque y paro suave sin sobrecorrientes.
			20.- Historial de fallas.	
			21.- Configuración	23.- Control continuo de la



de relevadores velocidad (par-
de salida. velocidad).

22.- Ajuste de 24- Ofrece
par inicial de verdaderas
arranque. opciones de ahorro
de energía en

23.- 25.- Historial de
Comunicación fallas.
digital. constante.

25.- Historial de fallas.

26.- Configuración
de relevadores de
salida.

27.- Comunicación
digital.

28.- Posibilidad de
total control en el
gasto.

OBSERVACIONES:

- Arrancadores a tensión plena (*ATP's*); 10 puntos de interés en bombeo mencionados; **6 puntos en contra** y **4 a favor**.
- Arrancadores a tensión reducida (*ATR's*); 11 puntos de interés en bombeo mencionados; **8 puntos en contra** y **3 a favor**.
- Soft-Starter; 23 puntos de interés en bombeo mencionados; **2 en contra** y **21 a favor**.
- Variador de Frecuencia; 28 puntos de interés en bombeo mencionados; **3 en contra** y **25 a favor**.

5.2.- TABLA DE SELECCIÓN DE EQUIPO SEGÚN LA APLICACIÓN.

Para esta tabla definimos como “Bombeo normal” las aplicaciones a donde se bombea agua limpia hacia una cisterna o una red de tuberías de agua potable o agua para riego desde un pozo profundo u otra cisterna.

APLICACIÓN	Arrancador a Tensión Plena (ATP)	Arrancador a tensión reducida tipo autotrafo (ATR)	Soft-starter	Variador de frecuencia
Bombeo normal con motor monofásico.	SI	NO	NO (ver nota 1)	NO
Bombeo normal con motores trifásicos menores a 10 HP a 440 Vca o 7.5 HP a 220 Vca.	SI	NO	SI	NO
Bombeo normal con motores trifásicos mayores a 10 HP a 440 Vca o 7.5 HP a 220 Vca.	NO	SI	SI	NO
Bombeo a presión constante en redes de agua potable, riego por goteo o aspersión (no incluye motores monofásicos).	NO	NO	NO	SI
Bombeo de pozos que se abaten o en el aforo de pozos nuevos (adaptación de la bomba a la capacidad de aporte del pozo modo de flujo constante).	NO	NO	NO	SI

Nota 1:

Actualmente se están desarrollando soft-starter para motores monofásicos de 5 a 20 HP a 220 Vca.

5.3.- TABLA DE COSTOS RELATIVOS ENTRE ATP's, ATR's, SOFT-STARTER Y VARIADORES DE FRECUENCIA.

- Todos los equipos comparados son a 440 Vca, trifásicos, 60 Hz.
- Todos los equipos comparados están en gabinete.
- Todos los equipos comparados tienen interruptor termomagnético.
- Se considera el costo de un reactor de línea adicional únicamente en los variadores de frecuencia.

- La comparación es relativa y se toma como base unitario (1) el precio del equipo menos costoso de una misma capacidad (por renglón); por ejemplo, si se comparan los costos relativos de los equipos de 50 HP, considerando como base el ATP de 50 HP (unitario, 1), el costo del ATR de 50 HP es 2.4 veces mayor que el costo del ATP de 50 HP; el costo del Soft-Starter de 50 HP es 2.7 veces mayor que el del ATP de 50 HP y por último, el costo del variador de 50 HP es 9.5 veces mayor que el del ATP de la misma capacidad. Por otro lado, observe que de 20 HP a 50 HP se presentan valores dobles (entre paréntesis); esto es, si se toma como unitario ahora el ATR porque importa más un arranque a tensión reducida, continuando con el mismo ejemplo del renglón de los equipos de 50 HP y la misma mecánica, el Soft-Starter de 50 HP es 1.14 veces más costoso que el ATR de 50 HP y el variador de frecuencia de 50 HP es 4 veces más costoso que el ATR de 50 HP.
- ✓ Datos basados en equipos de la marca WEG, lista de precios vigente al 2º trimestre del 2015.

HP	ATP's	ATR's	Soft-starter	Variador de Frecuencia
20	1	2.1 (1)	2.43 (1.14)	6.1 (2.88)
30	1	2.4 (1)	2.76 (1.16)	8.1 (3.4)
40	1	2.3 (1)	2.95 (1.19)	9.13 (4)
50	1	2.4 (1)	2.72 (1.14)	9.46 (4)
60	-	1	1.14	4
75	-	1	1.35	3.5
100	-	1	1.14	3.5
150	-	1	1.22	4
200	-	1	1.23	5.4
300	-	1	1.2	4.3

OBSERVACIONES:

- ✓ Los **soft-starter** son apenas entre un 15% y un 40% más costosos que un **ATR**; esta es una de las razones por la que sugerimos usar preferentemente los **soft-starter** en lugar de los **ATR's**.
- ✓ Los **variadores de frecuencia** están entre un 400% y 540% más costosos que un **ATR**; razón por la cual **no se deben usar como simples arrancadores** en bombeo; sin embargo, en aplicaciones donde se requiere control (control a presión constante o control de flujo), esta diferencia se recupera al mediano plazo.
- ✓ **En el caso de bombas de potencias de 100 HP @ 440V con 6 puntas; los soft-starter pueden conectarse de manera especial reduciendo su capacidad en 25%; esto pone los costos de un soft-starter por debajo de un arrancador ATR.**

6.- CONSIDERACIONES ADICIONALES EN LA INSTALACIÓN.

6.1.- INSTALACIÓN DE LOS **SOFT-STARTER**.

En la implementación de un **soft-starter** es muy recomendable considerar los siguientes puntos:

- ✓ Por lo general son equipos NEMA 1 para uso en interiores; no los instale a la intemperie o expuestos a polvo, insectos o químicos.
- ✓ La temperatura de trabajo de un **soft-starter** no debe exceder los 40°C para su buen funcionamiento y durabilidad.
- ✓ Adicione fusibles de estado sólido ultra-rápidos; es más caro reponer un tiristor en una reparación, que un fusible por usted mismo; los interruptores no siempre garantizan protección en régimen de avería como un cortocircuito en la salida del **soft-starter**.
- ✓ Para compensar el bajo Factor de Potencia (FP), nunca conecte capacitores simples en los bornes de salida en paralelo al motor, conéctelos a través de un contactor de paso controlándolo con el relevador de fin de arranque del **soft-starter** mismo, puede alimentarlos del interruptor termomagnético del mismo arrancador.
- ✓ Al instalar capacitores ajuste un tiempo entre arranques para permitir el enfriamiento del motor y la descarga de los capacitores al desconectarlos; recomendamos como mínimo 5 minutos.

- ✓ Use rampas de 10 a 20 segundos de arranque con el par más bajo posible; en bombeo no pasa nada con pares bajos y si el motor termina de arrancar antes, el **soft-starter** le inyecta plena tensión (función de arranque óptimo).

6.2.- INSTALACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA.

En la implementación de **un variador de frecuencia** considere los siguientes puntos:

- ✓ Por lo general son equipos NEMA 1 para uso en interiores; no los instale a la intemperie o expuestos a polvo, insectos o químicos.
- ✓ Los **variadores de frecuencia** necesitan de muy buena ventilación, nunca los encierre en un gabinete hermético, la temperatura ambiente de trabajo no debe exceder 40°C.
- ✓ Adicione fusibles de estado sólido ultra-rápidos; es más caro reponer un semiconductor que un fusible.
- ✓ Adicione un reactor de línea al 3% de impedancia en la alimentación del **variador de frecuencia**; las corrientes de consumo del variador-motor pueden crecer de manera muy rápida cuando se les alimenta de fuentes muy potentes (di/dt); además, esto mitiga los efectos causados por la distorsión armónica que los mismos **variadores de frecuencia** generan.
- ✓ Si la longitud del cable de conexión entre el motor y el **variador de frecuencia** es mayor a 30 metros en circuitos a 440 Vca o 60 metros en circuitos a 220 Vca, interconecte un reactor de línea del 3% (5% inclusive) de impedancia adicional al reactor de entrada (también puede ser un filtro L-C) para mitigar la fatiga térmica prematura de los aislamientos por las sobre tensiones en la conmutación.
- ✓ Para corregir el bajo factor de potencia (FP); utilice filtros sintonizados o desintonizados previo estudio de calidad de energía; recuerde que el bajo factor de potencia es causado principalmente por la distorsión de las corrientes absorbidas y no por corrimiento de fase como ocurre con los motores; los **variadores de frecuencia** son considerados cargas electrónicas o cargas no lineales aun cuando su carga (motor) sea una carga lineal.

GLOSARIO.

- **ATP'S:** Arrancador a tensión plena electromecánico; consta normalmente de contactor, relevador de sobrecarga bimetalico clase 10 o 10 A, botonera y gabinete metálico.
- **ATR'S:** Arrancador a tensión reducida tipo auto-transformador; arranque suave de 2 pasos transición abierta, relevador bimetalica de sobrecarga clase térmica 10 o 10 A; interruptor termomagnético, falla de fase al 66%; gabinete NEMA 12.
- **Flujo magnético (ϕ):** Número de líneas magnéticas por unidad de área en el circuito magnético de los motores (núcleo específicamente).
- **Tiristores:** Semiconductores de potencia (semiconductores de alta corriente y alto voltaje); también llamados (SCR's) son de 4 capas y se controlan por compuerta; son los encargados del arranque y paro controlado en los soft-starter, usados también en variadores de frecuencia en el convertidor CA-CD; su presentación es en módulos aislados conexión serie o en obleas discretas no aisladas.
- **SCR's:** Ver Tiristores.
- **Ley de Control:** Variable(s) principal(es) que determina(n) la operación regulada del equipo de bombeo.
- **Semiconductores:** Dispositivos electrónicos de 2 capas (Silicio dopado con Galio, Indio, Boro, etc) como son los diodos o de 4 capas como los tiristores; los hay especiales como los IGBT's (ver más adelante).
- **Corrientes armónicas:** Flujos de corriente de frecuencia múltiplos de la frecuencia fundamental (60Hz); generalmente no deseadas porque causan sobrecalentamiento y mal funcionamiento.
- **Orden de armónicas:** Número entero de la frecuencia fundamental; por ejemplo, el quinto armónico (5º) es $5 \cdot 60\text{Hz} = 300\text{ Hz}$; etc.
- **Carga lineal:** Carga eléctrica cuya forma de onda de corriente de consumo es igual a la forma de onda de voltaje de suministro como focos incandescentes (ya casi prohibidos) motores, capacitores y transformadores.

- **Carga no lineal:** Carga eléctrica cuya forma de onda de corriente de consumo no es igual a la forma de onda de voltaje de suministro; también llamadas cargas electrónicas porque pertenecen a este género; ejemplos, variadores de frecuencia, lámparas fluorescentes, computadoras, etc.
- **Convertidor CA-CD:** Arreglo de semiconductores (diodos) que convierten energía de corriente alterna (CA) a energía (CD); también llamados rectificadores; los más comunes y eficientes son los monofásicos con 4 diodos de 2 pulsos; trifásicos con 6 diodos de 6 pulsos y también pueden ser semi-controlados (mezcla de diodos y SCR's).
- **Convertidor CD-CA:** Arreglo de 6 IGBT's para convertir energía de corriente directa (CD) a energía de corriente alterna (CA) mediante la técnica de variación de la anchura de pulso y frecuencia (PWM); también llamados onduladores.
- **Cuadrantes en los convertidores:** Los cuadrantes en Electrónica de Potencia se refiere a la polaridad del voltaje que el convertidor proporciona a su carga y la dirección de la corriente del circuito; es un punto complejo pero resolveremos diciendo que cuando la carga solo consume energía los convertidores suelen ser de 1 y 2 cuadrantes y cuando la carga es capaz de regresar energía a la red, los convertidores deben ser de 3 y 4 cuadrantes.
- **Pulsos de los convertidores:** La pulsación refiere al número de cúspides o semi-ciclos en los convertidores; por ejemplo, alimentando monofásicamente la pulsación es 2; suministrando trifásicamente la pulsación es 6.
- **Convertidores regenerativos:** Convertidores de 4 cuadrantes para el caso de regresar energía de la carga a la red de suministro; por lo general son equipos de muy alta potencia.
- **Diodos:** Ver semiconductores.
- **IGBT's:** Dispositivos de estado sólido de potencia (alta corriente y alto voltaje) para switcheo (uso como interruptores) controlados por compuerta; utilizados en convertidores CD-CA; en casos de convertidores de 4 cuadrantes se usan en la conversión CA-CD.
- **Capacitores electrolíticos:** Componentes lineales unipolares de mucha potencia de almacenamiento de energía CD; son parte de los variadores de

frecuencia; la presentación es en cilindros; su especificación es en microfaradios y en voltaje.

- **Modulación de anchura de pulso (PWM):** Técnica en el switcheo (encender-apagar) de tal manera que se logra generar un voltaje y una frecuencia de salida trifásica independiente según la ley de control (V/f), vector, sensorless, etc.
- **Ciclo:** Relacionada con la frecuencia un ciclo o periodo el inverso de la frecuencia.
- **Saturación magnética:** Se dice cuando la densidad magnética (B) en el núcleo excede el valor máximo seguro; esto genera sobrecalentamiento, corrientes armónicas y pérdidas adicionales insustentables en el motor.
- **Régimen transitorio:** Esto es cuando un equipo arranca o para; es decir fenómeno de operación de no estabilidad.
- **Régimen de avería:** Se dice cuando estando el equipo arrancando, en marcha continua o parando le ocurre una falla crítica que puede dañarlo como cortocircuito, fuga a tierra, pérdida de fase, falta de sumergencia, sobrecarga y/o sobretemperatura.
- **Rotor bloqueado:** esto es cuando el motor está completamente trabado sin posibilidad de girar por problema mecánico interno o debido a la carga.
- **Arañas:** componentes mecánicos en las bombas de flecha que utilizan motores tipo flecha hueca.
- **Base de Rangua:** unidad mecánica de soporte y rotación de un motor tipo sumergible.
- **Impulsores:** unidades rotativas de una bomba para crear diferencia de presión y desplazar el agua.
- **Válvulas Check:** dispositivos hidráulicos para permitir el flujo de agua en una sola dirección; minimiza golpe de ariete y son indispensables en un sistema de bombeo.

- **Transición abierta:** se dice de los arrancadores a tensión reducida tipo autotransformador o estrella-delta por hacer un arranque discontinuo en 2 pasos.
- **Transición cerrada:** se dice de los soft-starter o de los variadores de frecuencia que ofrecen un arranque continuo sin interrupciones.
- **MOV's:** dispositivos semiconductores de conducción por ruptura de voltaje; alta velocidad de respuesta y alta corriente de descarga.
- **Curva B-H:** relación de densidad magnética (B) versus intensidad magnética (H) para fines de optimizar el uso del núcleo en un motor.
- **Control redundante:** es cuando la ley de control genera acciones contradictorias en el arrancador bajo ciertas condiciones; por ejemplo, en un re-bombeo desde una cisterna que se abastece de una red, se le ordena bombear si la cisterna de llena para no derramar agua, pero se le ordena parar si la tubería a la que bombea se presuriza a ciertos PSI; si se analizan las situaciones, pueden darse las condiciones de que se llena la pila y está presurizada la tubería al mismo tiempo (por la noche); esto es un caso real.

BIBLIOGRAFÍA.

Carpeta Técnica BAMSA. (2014). *BOMBAS ALEMANAS SA de CV*. Recuperado en Enero del 2015 de: <http://www.dgbiblio.unam.mx/index.php/guias-y-consejos-de-busqueda/como-citar#2-3-documentos-electronicos>.

Mc Person G. (1991). *Manual de máquinas eléctricas y transformadores*; Vol 2. México. Limusa S.A. de C.V.

Rashid M. (1995). *Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*. 2ª. Edición. México: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.