



GE Consumer & Industrial

**VARIADORES DE FRECUENCIA
PARA SISTEMAS DE BOMBEO
CON ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA**



INDICE

1	INTRODUCCIÓN	3
2	CONVERTIDOR PWM CON CIRCUITO INTERMEDIO DE TENSIÓN	4
3	ANALISIS CIRCUITO ENTRADA	6
4	ALGORITMO VCC CONSTANTE	8
4.1	Control PID de la tensión continua de las placas FV.....	10
4.2	Conexión de potencia.....	11
4.3	Conexión de control.....	11
4.4	Programación del variador.....	12
5	REFERENCIAS CRUZADAS BOMBA / VARIADOR / PLACAS	13
5.1	Tensión 220V	13
5.2	Tensión 380V	13
5.3	Ejemplo de selección.....	14
6	Interruptores Automáticos de protección	15
6.1	Tensión 220V	15
6.2	Tensión 400V	15
7	Envoltorios	16
7.1	Tensión 220V	16
7.2	Tensión 400V	16
8	ANEXO 1. Algoritmo VCC=CTE versus algoritmo P.M.P	17
9	ANEXO 2. Posibilidades de ahorro energético	18
9.1	Modificar la ley cuadrática V/f.....	18
9.2	Función de ahorro energético.....	19
10	ANEXO 3. Instalación de filtros "Surge Absorber"	20
11	ANEXO 4. Motores Síncronos	21
12	CONCLUSIONES	22



1 INTRODUCCIÓN

El empleo de placas fotovoltaicas para la alimentación de sistemas de riego, bombes, trasvases, etc., es una alternativa a tener en cuenta allí donde es difícil el acceso de la red eléctrica y en la medida que evoluciona el empleo de inversores electrónicos que permiten accionar bombas de pequeña potencia y gran rendimiento hidráulico.

Es en el empleo de inversores electrónicos donde los variadores de frecuencia están adquiriendo una relevancia notable, al tratarse de productos estándares y por tanto más económicos y fáciles de conseguir, que aportan a su vez la posibilidad de poder accionar bombas con tensiones nominales de motor estándares (220V ó 400V) teniendo en cuenta dos premisas fundamentales:

1. El variador se ha de alimentar directamente de la tensión continua procedente de placas solares fotovoltaicas (FV), con un nivel que dependerá de la tensión nominal de la bomba.
2. Teniendo en cuenta que las placas fotovoltaicas mantienen bastante constante su tensión de salida independientemente de la radiación solar, se utiliza como algoritmo de control precisamente el mantener constante dicha tensión de continua mediante un regulador PID interno que acepte la tensión del bus de continua como señal de realimentación

La **primera premisa** es la que impone más condicionantes a esta aplicación:

1. El rango máximo de alimentación (**sin tolerancias**) procedente de las placas solares será según los casos:
 - **254 Vcc a 342 Vcc.** Para variadores de 200V que accionan bombas de 220 Vca, el nivel aconsejado estaría en 311 Vcc.
 - **483 Vcc a 712 Vcc.** Para variadores de 400V que accionan bombas de 380 Vca, el nivel aconsejado estaría en 537 Vcc
2. La máxima potencia a utilizar para bombas de alimentación trifásica 220V es de **11 kW** (variador U3SN011K0S __), y para bombas de alimentación trifásica 400V es de **15 kW** (variador U3SX015K0S __).

La **segunda premisa** facilita un control simple capaz de adecuar la potencia de suministro de la bomba (variando la velocidad de giro) a la potencia de radiación solar manteniendo constante la tensión suministrada por las placas. Este control se ejecuta configurando una de las salidas analógicas programables, como nivel de tensión del bus de continua, y conectada a una entrada analógica programable configurada como señal de realimentación del PID. Este algoritmo no tiene en cuenta la pérdida de rendimiento de las placas en función de la temperatura.



2 CONVERTIDOR PWM CON CIRCUITO INTERMEDIO DE TENSIÓN

El variador de frecuencia más usual es el que está formado por un rectificador trifásico o monofásico de entrada, un circuito intermedio donde se almacena la energía en forma de tensión y el inversor de salida que es el que a partir de una fuente de corriente continua permite obtener una salida trifásica de tensión y frecuencia variable.

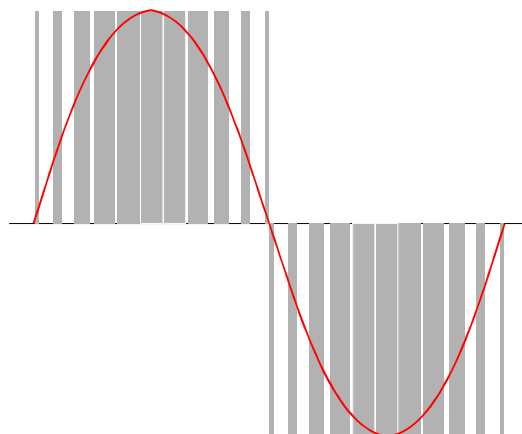
Por lo tanto la estructura de un convertidor de frecuencia con circuito intermedio de tensión queda definido como tres etapas:

1. Convertidor CA \Rightarrow CC.
2. Bus de continua.
3. Inversor CC \Rightarrow CA de salida.

El VAT300 permite ser utilizado sólo como inversor para aplicaciones en que varios inversores se alimentan de un bus de continua común. Una aplicación particular es cuando el VAT300 como inversor se alimenta de placas FV.

1. Bus de continua.
2. Inversor CC \Rightarrow CA de salida.

La forma de la tensión de salida son pulsos cuadrados de anchura variable pero la corriente es prácticamente senoidal.

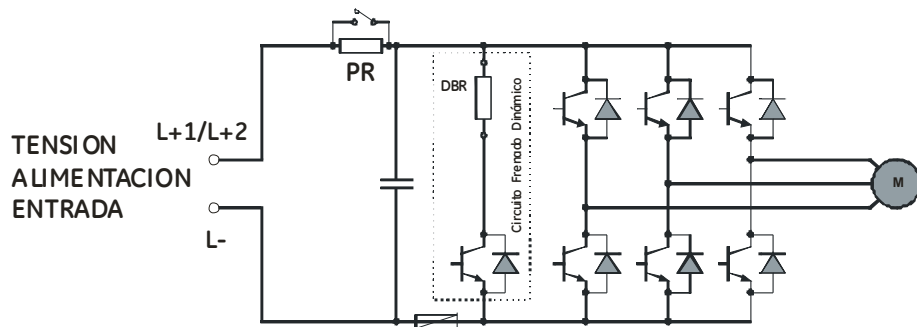




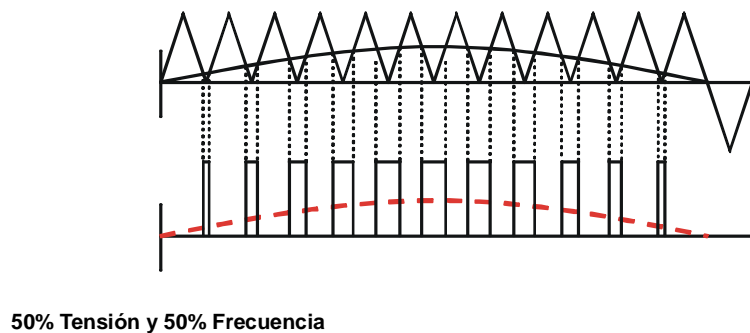
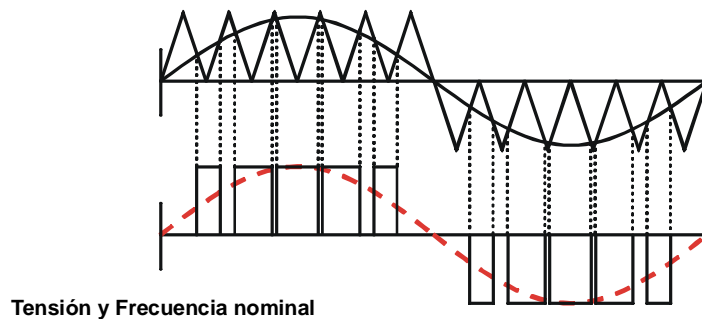
GE Consumer & Industrial

El detalle de los componentes de cada una de las etapas queda según la figura:

1. Bus de continua: Circuito de precarga y condensadores de elevada capacidad.
2. Inversor CC \Rightarrow CA de salida: Puentes de 6 transistores IGBT totalmente controlado con diodos de recuperación.



La lógica de conmutación PWM de los transistores IGBT se muestra a continuación:





3 ANALISIS CIRCUITO ENTRADA

Si en la introducción indicábamos que los variadores de 200V podían ser alimentados con tensiones desde 254 Vcc hasta 342 Vcc, en el caso de utilizar una bomba de 220 Vca, el valor óptimo de la tensión suministrada por las placas FV debe ser de 311 Vcc. Con valores inferiores (mínimo 254Vdc) no se podrá obtener la potencia nominal de la bomba. Con valores superiores (hasta 342Vcc) no representa un problema, ni para el equipo ni para la bomba, si bien tendremos un mal rendimiento de las placas FV.

Por tanto convendrá acotar la combinación de las placas para que suministren entre 254 Vcc y 311 Vcc con la consideración arriba indicada.

Vamos a estimar la potencia de placas necesaria para trabajar con una tensión óptima de placas de 311 Vcc.

De la etiqueta de características del variador se obtiene el valor de la corriente de entrada trifásica. A partir de este valor se calcula la corriente en el bus de continua y por tanto la que deben suministrar las placas FV funcionando la bomba centrífuga a su potencia nominal.

Variador	KVA entrada	Ica entrada	Icc entrada	Pérdidas variador
N000K7		5,75	7,05	62
N001K5		9,92	12,15	84
N002K2		14,55	17,83	117
N004K0		19,98	24,48	153
N005K5		27,84	34,12	215
N007K5		40,50	49,63	301
N011K0		52,41	64,23	420
X000K7		3,1	3,8	83
X001K5		4,75	5,82	111
X002K2		6,96	8,53	129
X004K0		15,3	18,75	175
X005K5		17,41	21,33	275
X007K5		20,95	25,67	345
X011K0		25,70	31,5	369
X015K0		35,05	42,95	481

Icc = Intensidad de continua de entrada.

Los variadores se eligen según la categoría de Servicio Normal.



GE Consumer & Industrial

En el caso de realizar la combinación óptima de placas FV para proporcionar 311 Vcc, la potencia de placas estimada sería la siguiente:

Variador	KW salida	Ica sali.	VA entrada	Ica entrada	Icc entrada	Potencia Mínima
N000K7	0,75	5,0	2.192	5,75	7,05	2.200
N001K5	1,50	8,0	3.780	9,92	12,15	3.800
N002K2	2,2	11	5.544	14,55	17,83	5.500
N004K0	4,00	16	7.615	19,98	24,48	7.600
N005K5	5,5	22	10.612	27,84	34,12	10.600
N007K5	7,50	33	15.435	40,50	49,63	15.400
N011K0	11	42	19.975	52,41	64,23	20.000

Variador	KW salida	Ica sali.	VA entrada	Ica entrada	Icc entrada	Potencia Mínima
X000K7	0,75	2,5	2.041	3,1	3,8	2.000
X001K5	1,50	3,6	3.125	4,75	5,82	3.100
X002K2	2,2	5,5	4.583	6,96	8,53	4.600
X004K0	4,0	8,6	10.067	15,3	18,75	10.000
X005K5	5,5	13	11.457	17,41	21,33	11.500
X007K5	7,5	17	13.785	20,95	25,67	13.800
X011K0	11	23	16.914	25,70	31,5	16.900
X015K0	15	31	23.065	35,05	42,95	23.000

La relación entre la Icc de entrada y la Ica de entrada se establece en 0,816.

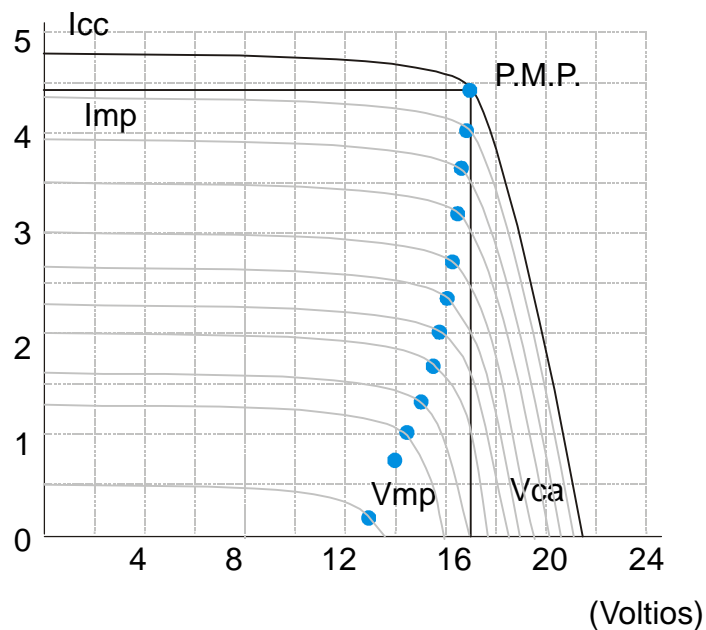


4 ALGORITMO VCC CONSTANTE

De las características facilitadas por un fabricante de paneles solares fotovoltaicos se deduce la curva de funcionamiento de un panel, donde es fácil determinar el Punto de Máxima Potencia (**PMP**) identificando la tensión (V_{mp}) y corriente de este punto (I_{mp}).

PMP :	Máxima potencia de un módulo. Punto de la curva donde el producto $V \times I$ es máximo:	75.00 W
V_{mp} :	Tensión correspondiente al punto de máxima potencia:	17.00 V
I_{mp} :	Intensidad correspondiente al punto de máxima potencia:	4.45 A
I_{cc} :	Intensidad de cortocircuito de un módulo:	4.75 A
V_{ca} :	Tensión en circuito abierto de un módulo:	21.40 V
P_{min} :	Potencia mínima garantizada por un módulo:	70.00 W

(Amperios)



Estos datos corresponden a una radiación de 1000 W/m^2 , a $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para distintas radiaciones corresponderán distintos puntos de máxima potencia, siendo mayores estos puntos cuanto mayor es la radiación. Es importante resaltar que cuando se reduce la radiación se reduce la potencia de la placa pero se mantiene bastante constante la tensión de la misma (ver punto azules).



GE Consumer & Industrial

Para distintas temperaturas corresponden distintas curvas de funcionamiento, observándose que con el aumento de la temperatura se produce una pérdida de rendimiento.

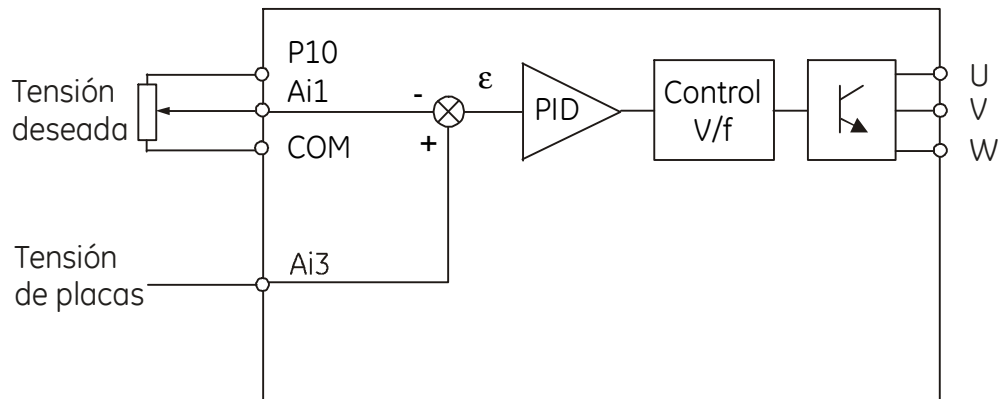
Por lo tanto el punto PMP de la placa fotovoltaica puede ir variando en función de varios factores, como la radiación solar y la temperatura de la placa. El control óptimo sería aquel que hiciese trabajar siempre la placa en su punto de máxima potencia. Esto obliga a implementar un sistema que efectúe el seguimiento de éste punto, lea continuamente la tensión (V) y la intensidad (I) de las placas y calcule cual es el punto donde el producto de ambas magnitudes ($V \times I$) sea el mayor posible. Esto a priori requiere de una implementación un tanto compleja

El planteamiento que aquí se indica se basa en elegir una tensión de trabajo de las placas solares y mantener esta tensión constante. Este criterio tiene unas pérdidas muy bajas con respecto al seguimiento del punto PMP y su utilización es muy sencilla. Con bajas potencias de radiación, el variador reducirá las revoluciones de la bomba y en consecuencia el caudal, para mantener la tensión de placas. De forma similar cuando la potencia radiada aumenta, el sistema aumenta las revoluciones y por tanto la potencia entregada a la bomba, manteniéndose constante la tensión de las placas.

La implementación del algoritmo Vcc constante con el variador se lleva a cabo mediante el uso de un controlador PID integrado en el propio variador:



4.1 Control PID de la tensión continua de las placas FV.

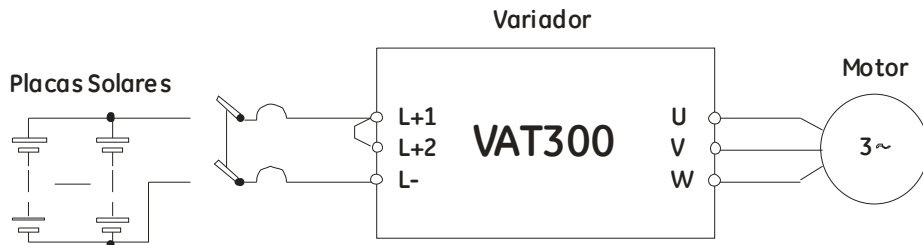


La tensión continua de las placas FV es conocida por el variador por ser la misma que la del bus de continua interno. La tensión del bus de continua es una función analógica interna que puede asignarse a una salida analógica programable. Se utiliza la tensión de 0 a 10 Vcc de esa salida analógica como señal de realimentación (5 Vcc equivalen a 300 Vcc en equipos de 200V y a 600V en equipos de 400V).

Se trata de una realimentación positiva, ya que cuando aumenta la señal de realimentación con respecto a la señal de referencia o deseada, aumenta la señal de error y por tanto la variable de control, es decir aumenta la tensión y frecuencia de salida, lo que conlleva a una disminución de la señal de realimentación.



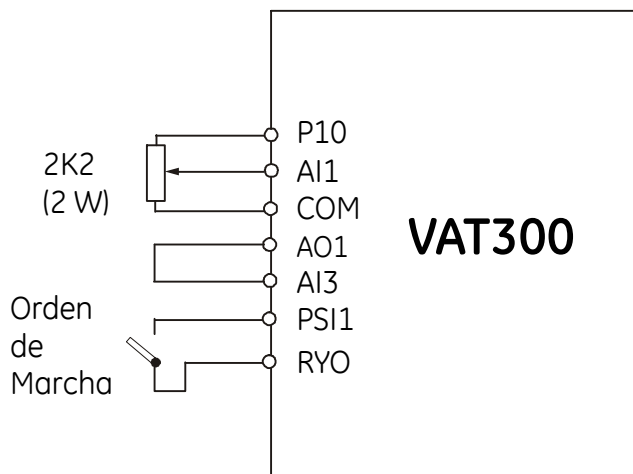
4.2 Conexión de potencia



Las placas solares se conectan a los L+1 o L+2 y L- (no quitar el puente entre L+1 y L+2). El número de placas a conectar dependerá de la tensión nominal de cada placa, de la tensión de continua deseada y de la potencia que se necesite.

En el ejemplo del apartado **X.X** se ha conectado una serie de 18 placas de 17V nominales cada una para conseguir 306 Vcc en el bus de continua. Con tres series de 18 placas en paralelos se obtienen 4.086 W.

4.3 Conexión de control.



La orden de marcha se establece uniéndolo común (RYO) con el borne de entrada PSI1.

Esta señal puede ser la procedente de un reloj horario como permisivo de marcha.



GE Consumer & Industrial

El terminal de la salida analógica AO1 programado como señal del bus de continua se une al terminal de entrada analógica AI3.

Se conecta un potenciómetro como señal de referencia tal como se indica en la figura anterior para seleccionar diferentes niveles de tensión en placas según la época del año. También se puede utilizar registros internos y seleccionarlos mediante la activación de entradas digitales.

4.4 Programación del variador

Los datos básicos para que funcione la aplicación son los siguientes:

Parámetro	Valor	Descripción
A02-3	5%	Ley cuadrática V/f
A03-1	1 seg.	Reducir el frenado con corriente continua
A05-0	1	Visualizar las funciones extendidas
A05-1	1	Visualizar las funciones de software
A05-2	1	Visualizar las funciones de hardware
B00-0	3 ó 1	3 para 220V y 1 para 380V
B40-0	5	Activar la función PID
B43-0	3	Ganancia proporcional del PID
B43-1	defecto	Tiempo integración PID
B43-2	defecto	Tiempo derivación PID
B43-8	2	Selección PID inverso
C03-C	16	Habilitar control PID
C07-5	4	Realimentación PID en entrada AI3
C08-0	2	Autoarranque sin "pick-up"
C12-8	2	Modo entrada AI3 de 0 a 5V
C13-1	7	Salida analógica AM configurada como tensión del bus de CC.
C20-3	10 seg.	Retardo de la orden de marcha



GE Consumer & Industrial

5 REFERENCIAS CRUZADAS BOMBA / VARIADOR / PLACAS

5.1 Tensión 220V

BOMBA		
Potencia Activa (kW)	Intensidad	Potencia Aparente (VA) $\sqrt{3} \cdot 220 \cdot A$
0,75	3,5	1.333
1,5	7	2.667
2,2	9	3.429
4	16	6.096
5,5	21	8.002
7,5	27	10.288
11	40	15.242

VARIADOR		
Modelo	Intensidad entrada Ica - lcc	Intensidad nominal salida (Servicio Normal)
U3SN000K7S__	5,75 - 7,05	5,0
U3SN001K5S__	9,92 - 12,15	8,0
U3SN002K2S__	15,55 - 17,83	11
U3SN004K0S__	19,98 - 24,48	16
U3SN005K5S__	27,84 - 34,12	22
U3SN007K5S__	40,5 - 49,63	33
U3SN011K0S__	52,41 - 64,23	42

PLACAS SOLARES	
Potencia (W)	Tensión en Placas (Vcc)
> 2.200	311
> 3.800	311
> 5.500	311
> 7.600	311
> 10.600	311
> 15.400	311
> 20.000	311

5.2 Tensión 380V

BOMBA		
Potencia Activa (kW)	Intensidad	Potencia (VA) $\sqrt{3} \cdot 380 \cdot A$
0,75	2	1.316
1,5	3,5	2.303
2,2	5	3.290
4	9	5.923
5,5	12	7.898
7,5	16	10.530
11	22,5	14.809

VARIADOR		
Modelo	Intensidad entrada Ica - lcc	Intensidad nominal salida (Servicio Normal)
U3SX000K7S__	3,10 - 3,80	2,5
U3SX001K5S__	4,75 - 5,82	3,6
U3SX002K2S__	6,96 - 8,53	5,5
U3SX004K0S__	15,3 - 18,75	8,6
U3SX005K5S__	17,41 - 21,33	13
U3SX007K5S__	20,95 - 25,67	17
U3SX011K0S__	25,70 - 31,5	23

PLACAS SOLARES	
Potencia (W)	Tensión en Placas (Vcc)
> 2.000	537
> 3.100	537
> 4.600	537
> 10.000	537
> 11.500	537
> 13.800	537
> 16.900	537

Nota: El variador se ha elegido para suministrar la intensidad de la bomba y las placas se han dimensionado con respecto al variador utilizado y no con respecto a la bomba.



GE Consumer & Industrial

5.3 Ejemplo de selección

Supongamos que una instalación de bombeo consta de una bomba con motor de 2K2 (kW), con una intensidad nominal de 9 (A) a 220V.

El variador de referencia U3SN002K2S_ _ puede suministrar hasta 11 (A) de salida por lo que está dimensionado con respecto a los 9 (A) necesarios.

Se van a utilizar placas solares de potencia nominal máxima de 75 (W), tensión de 17 (V) y corriente de 4,45 (A).

Se establece en 311 Vcc el nivel de tensión constante como criterio de funcionamiento.

Según la tabla anterior la potencia de la placa en el caso de que el variador suministrase 11(A) a 220V es de 5.500 (W).

Con 18 placas en serie suministramos 1.362 (W) con una tensión en placas de 306 Vcc.

Con 3 series de 18 placas en paralelo se obtendrán 4.086 (W), es decir con un total de 54 placas.

En este caso los 4.086 (W) serán suficientes ya que no serán necesarios los 11 (A) del variador sino solamente 9 (A).



6 Interruptores Automáticos de protección

6.1 Tensión 220V

VARIADOR
Modelo
U3SN000K7S__
U3SN001K5S__
U3SN002K2S__
U3SN004K0S__
U3SN005K5S__
U3SN007K5S__
U3SN011K0S__

6.2 Tensión 400V

VARIADOR
Modelo
U3SX000K7S__
U3SX001K5S__
U3SX002K2S__
U3SX004K0S__
U3SX005K5S__
U3SX007K5S__
U3SX011K0S__



7 Envolvertes

7.1 Tensi3n 220V

VARIADOR
Modelo
U3SN000K7S_ _
U3SN001K5S_ _
U3SN002K2S_ _
U3SN004K0S_ _
U3SN005K5S_ _
U3SN007K5S_ _
U3SN011K0S_ _

7.2 Tensi3n 400V

VARIADOR
Modelo
U3SX000K7S_ _
U3SX001K5S_ _
U3SX002K2S_ _
U3SX004K0S_ _
U3SX005K5S_ _
U3SX007K5S_ _
U3SX011K0S_ _



8 ANEXO 1. Algoritmo VCC=CTE versus algoritmo P.M.P.

En este apartado nos remitimos al artículo "Utilización de convertidores de frecuencia en sistemas de bombeo de agua con energía solar fotovoltaica" editado en la revista ERA SOLAR y firmado por M. Alonso-Abella, F. Chenlo, J. Blanco y D. Manso.

En ella se detalla un minucioso estudio realizado en el Laboratorio de Energía Solar Fotovoltaica del Departamento de Energías Renovables (CIEMAT), donde se compara un sistema que utiliza el algoritmo PMP, es decir, hacer trabajar las placas solares en su punto de máxima potencia en todo momento, con el algoritmo de tensión constante de las placas.

Este segundo método muy fácil de implementar, no requiere de accesorios adicionales. Tiene una serie de limitaciones, ya que no tiene en cuenta la pérdida de rendimiento en función de la temperatura, pero aún así se demuestra que las pérdidas con respecto al seguimiento del PMP no son superiores al **2%** anual.

Este porcentaje se reduce al **0,7%** en el caso de que se añada una sencilla tarjeta que adapte la tensión que se desea mantener constante en placas en función de la temperatura, siendo mayor en los meses fríos (>311 Vcc) y menor en los meses cálidos (>254 Vcc).

En resumen, los usuarios disponen de un sistema que a través del potenciómetro recomendado en los esquemas, ajustan un valor de tensión más elevado en placas para los meses más fríos y unos valores más reducidos para los meses más cálidos, obteniendo unos rendimientos hidráulicos francamente interesantes.



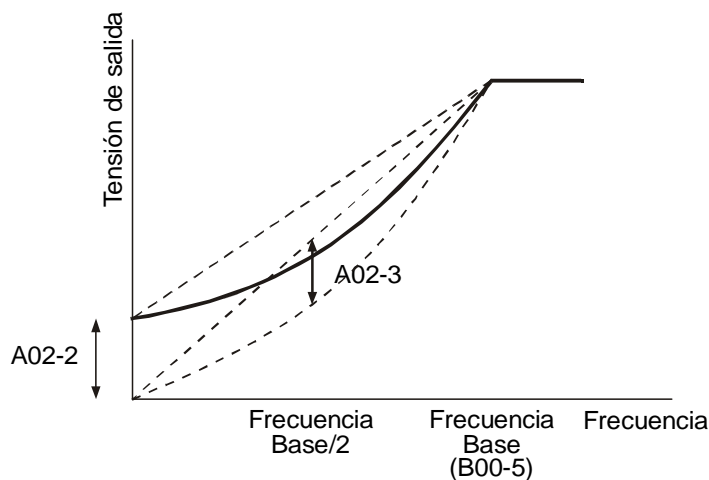
9 ANEXO 2. Posibilidades de ahorro energético

Los variadores de frecuencia incorporan una serie de funciones orientadas a reducir el consumo de energía en función de la velocidad de giro de la bomba o lo que es lo mismo la potencia hidráulica solicitada.

De entre estas funciones cabe destacar las siguientes:

9.1 Modificar la ley cuadrática V/f.

Esta función ofrece la posibilidad de adaptar el par motor al par resistente de la carga de forma que, en lugar de mantener un par constante en toda la gama de velocidades, se obtiene un par motor reducido en el inicio el cual evoluciona de forma cuadrática con la velocidad adaptándose al par resistente que presentan accionamientos tales como bombas y ventiladores.



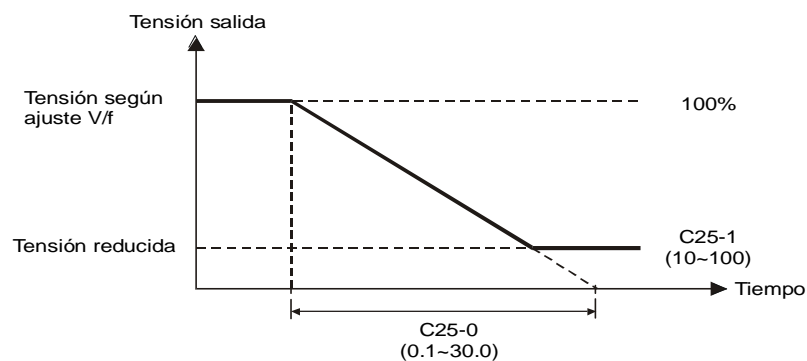


9.2 Función de ahorro energético.

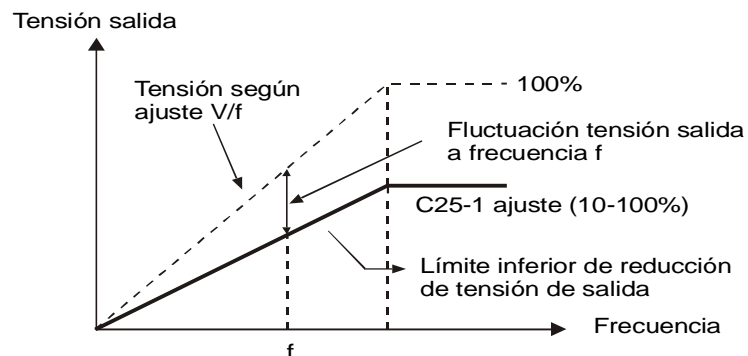
Se trata de una función seleccionable la cual una vez se ha alcanzado la velocidad de régimen, disminuye la tensión automáticamente si el motor no trabaja a plena carga, logrando una disminución de la intensidad del motor. De esta forma se obtiene un mayor rendimiento del motor.

Esa función lleva asociados una serie de parámetros:

Tiempo reducción tensión Ahorro de energía: es el tiempo para reducir la tensión de salida desde el valor actual, según el ajuste V/f hasta 0V, después de que la frecuencia de salida haya alcanzado la frecuencia de ajuste.



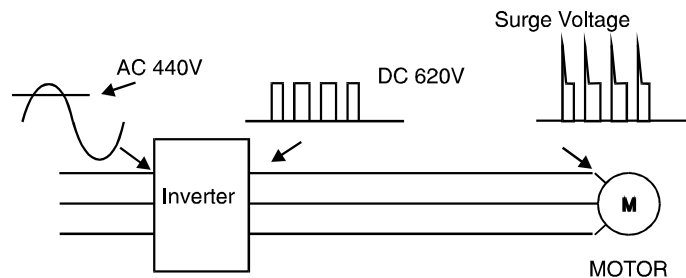
Límite inferior de tensión en función Ahorro de energía: Este parámetro controla el límite inferior de tensión para la función ahorro de energía, es decir la disminución máxima permitida.





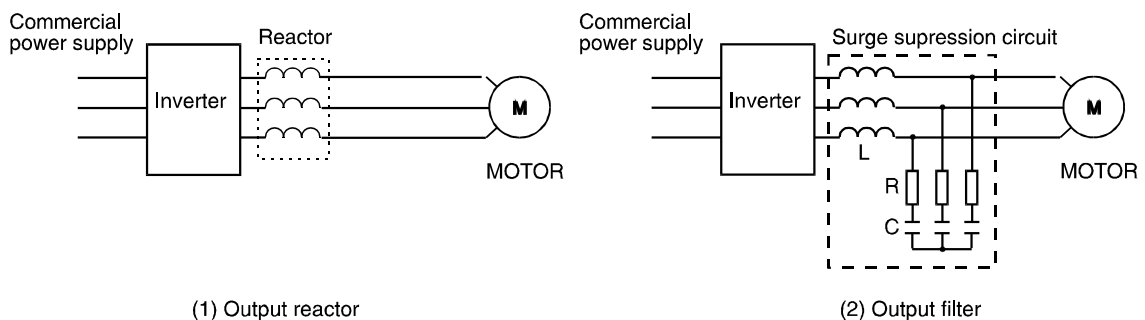
10 ANEXO 3. Instalación de filtros "Surge Absorber"

Si la distancia del cable entre variador y motor es importante (aprox. más de 30 m) y en función de las características del cable, debido a la elevada frecuencia de conmutación de los transistores, pueden presentarse en bornes del motor, picos de tensiones muy elevadas del orden de dos veces el valor del bus de continua (1200V en la figura siguiente), que pueden provocar averías por pérdida de aislamiento y perforación de cojinetes.



En realidad se produce un efecto avalancha producido por la resonancia de la resistencia, inductancia y capacidad parásita que presenta el cable y la primera medida a tener en cuenta es reducir la frecuencia de conmutación.

Si la medida anterior no es suficiente queda la posibilidad de colocar un filtro R-L-C a la salida del variador.

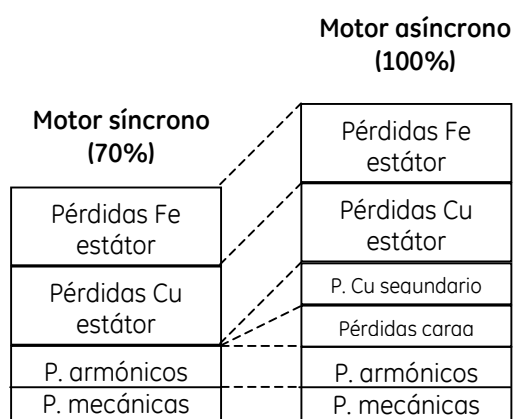




11 ANEXO 4. Motores Síncronos

En los últimos años se está contemplando al motor síncrono de imanes permanentes como una alternativa al motor asíncrono en determinadas aplicaciones.

El rendimiento de un motor síncrono es del orden de un 30% superior al equivalente asíncrono, lo que permite que a igualdad de potencias un motor síncrono sea un tamaño inferior.



Las aplicaciones donde intervienen bombas y ventiladores con velocidades variables son donde mejor se aprecia esta mejora de rendimiento.

Uno de los problemas que se ha de tener en cuenta es que el motor síncrono necesita de un encoder que proporcione dos señales, una para medición de velocidad y otra para la conmutación electrónica de las fases.

La siguiente tabla establece una comparación entre los dos tipos de motores:

Potencia (kW)	Rendimiento		Tamaño	
	M. síncrono	M. asíncrono	M. síncrono	M. asíncrono
3,7	88	85,9	90L	112M
5,5	90	86,4	112M	132S
7,5	90	88,1	112M	132M
11	91	87,6	112M	160M
15	91	89,2	132S	160S
18,5	93	89,2	132M	180M
22	93	89,8	160M	180M
30	93	89,2	160M	180L



12 CONCLUSIONES

El empleo de variadores de frecuencia de aplicaciones de propósito general conjuntamente con bombas de tensiones estandarizadas, permite obtener instalaciones de bombeo, utilizando placas fotovoltaicas como fuente de energía, a un precio más reducido que los sistemas específicos que hasta ahora existían.

Por otra parte en instalaciones donde se necesita un gran caudal de agua, estos sistemas pueden controlar bombas de elevada potencia.

La elasticidad de la programación de los variadores permite adaptar el funcionamiento a cada instalación y en función de las condiciones climáticas del lugar. A su vez, las distintas funciones de ahorro de energía permiten rentabilizar las instalaciones.

La posibilidad de poder trabajar con distintos tipos de motores (asíncronos y síncronos) hace que el potencial uso de estos sistemas aumente considerablemente.

Para finalizar, la simplicidad del control utilizado abre las puertas a que instaladores no especializados en aplicaciones de energía solar se vean capaces de acometer instalaciones de bombeo con placas fotovoltaicas con lo que se aumentará la utilización de las energías renovables.