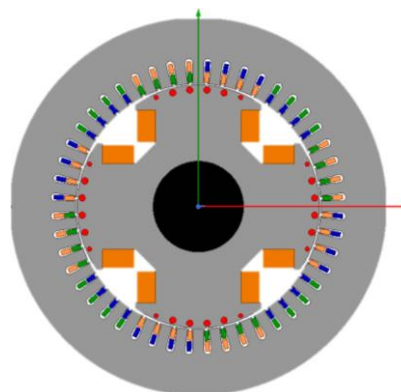




## Influencia del Paso de Devanado en el Alternador

Claudia Cristina Jansen  
WEG Energia  
Brasil  
claudia1@weg.net



### 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este artículo es tratar el efecto del paso sobre el paralelismo de los generadores y presentar las ventajas y desventajas del paso de devanado del estator, así como la forma en que afecta al rendimiento y al contenido armónico del alternador.

### 2. ARMÓNICOS DE TENSIÓN

El alternador genera una forma de onda de tensión que se describe en términos de magnitud de tensión, su frecuencia fundamental y la magnitud de los armónicos de tensión en sus frecuencias. Los armónicos son múltiplos de la frecuencia fundamental de la forma de onda generada por el alternador. Debido a que los alternadores son magnéticamente simétricos, solo los armónicos impares son perjudiciales y los armónicos de menor orden, pues cuanto mayor el orden menor la magnitud de la armónica.

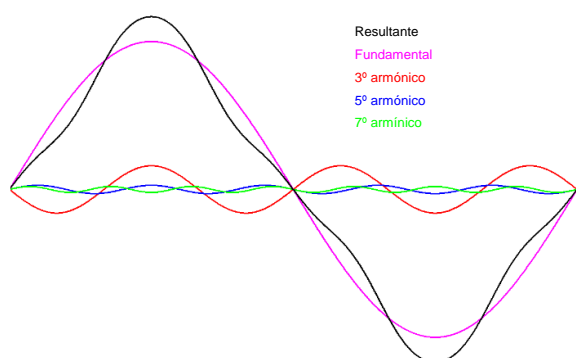


Figura 1: Relación de la forma de onda con los armónicos

La Figura 1 muestra la forma de onda resultante junto con los armónicos de 3°, 5° y 7° orden y el fundamental. Se nota que hay hundimientos en la forma de onda resultante cuando el armónico de 3° orden es negativo y un pico cuando el armónico de 3° orden es positivo, esto ocurre con los otros armónicos también, pero en este ejemplo el armónico de 3° orden tiene una magnitud más alta.

### 2.1. Efectos de los armónicos

Los armónicos generan efectos indeseables en el alternador que pueden provocar fallos en la máquina y en las cargas alimentadas.

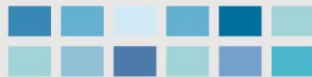
El problema más crítico es el calentamiento del devanado, del núcleo y del rotor que generan los armónicos, ya que puede sobrecalentar la máquina.

Los armónicos de 3° orden dan como resultado una corriente neutra, que puede fluir entre máquinas en paralelo o si el neutro de una conexión en estrella está conectado a tierra, esta corriente puede crear voltajes permanentes en tierra y causar problemas en el sistema de telecomunicaciones. Además, también dificulta el diseño de los paneles eléctricos, ya que los instrumentos que no son True RMS no pueden realizar la lectura y los relés de protección pueden no actuar correctamente.

Sin embargo, los armónicos de 5° y 7° orden resultan en un aumento de las pérdidas de hierro y cobre debido al efecto skin porque están en una frecuencia más alta. Si la carga es un motor, los armónicos de alta frecuencia inducirán el doble de sus propias frecuencias en el rotor del motor, generando así un sobrecalentamiento que reducirá la vida útil del aislamiento del motor.

Cuando la carga es capacitiva, los armónicos de 5° y 7° orden reducen la reactancia capacitiva, lo que permite un aumento en el flujo de corriente armónica, lo que resulta en una distorsión de la forma de onda. Las cargas no lineales generan corrientes armónicas elevadas que generan distorsión en la forma de onda del alternador, si son monofásicas y están conectadas de forma equilibrada en el alternador trifásico, las corrientes del 3° armónico se suman en neutro dando como resultado una corriente neutra elevada.

Otro factor es la forma de onda de la tensión, porque cuanto más armónicos haya en una onda generada, mayor será la distorsión de la onda de tensión. Cuando la distorsión es demasiado alta, el regulador de voltaje tendrá dificultades para detectar, haciendo que las lecturas sean inexactas y dificultando el ajuste del voltaje.



### 3. PASO DEL DEVANADO

El paso de devanado es la disposición geométrica de los devanados en las ranuras del estator. Hay máquinas de paso completo y de paso fraccionado. El paso completo es cuando la disposición del devanado es exactamente un paso de polo del rotor (Figura 2), mientras que el paso fraccionario es cuando la disposición del devanado es inferior a un paso de polo del rotor (Figura 3 y Figura 4).

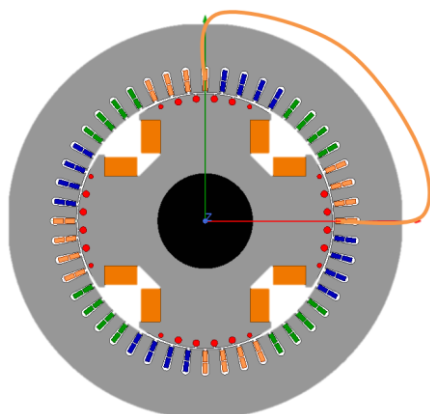


Figura 2: Devanado de paso completo

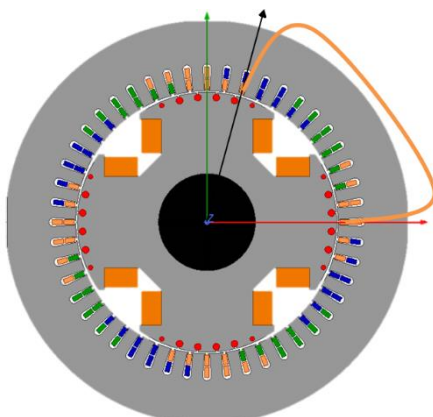


Figura 3: Devanado de paso fraccionario (5/6)

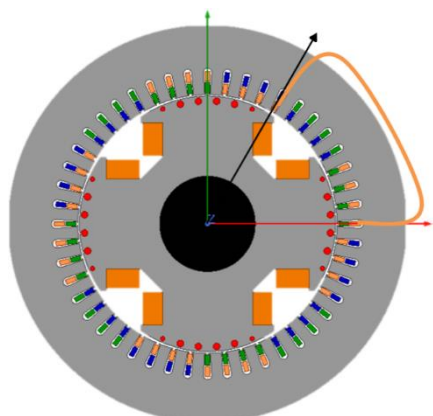


Figura 4: Devanado de paso fraccionario (2/3)

### 4. PASO X ARMÓNICOS

El paso de devanado es uno de los parámetros de proyecto que determina el contenido armónico en la onda de la tensión. Dependiendo del paso utilizado en la máquina, puede eliminar algunos armónicos, pero desafortunadamente no los elimina todos y, en consecuencia, todavía puede aumentar otros armónicos.

Devanados de paso 2/3 eliminan los armónicos de 3° orden, pero, pueden aumentar los armónicos de 5° y 7° orden, conforme Figura 5.

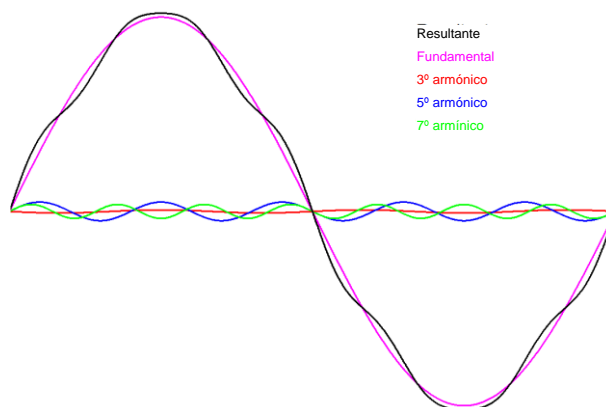


Figura 5: Armónicos con devanado de paso 2/3

Devanados de paso 5/6 eliminan los armónicos de 5° y 7° orden, pero, pueden aumentar los armónicos de 3° orden, conforme Figura 6.

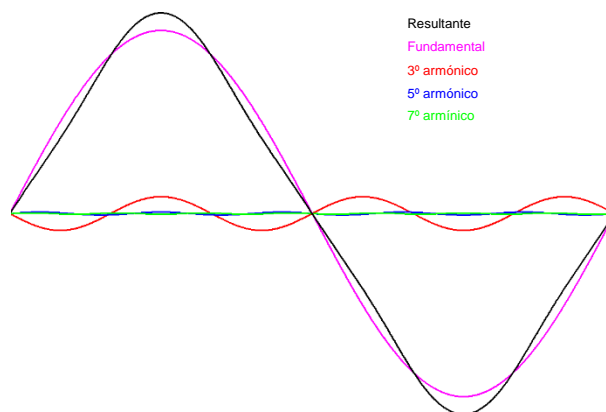
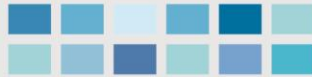


Figura 6: Armónicos con devanado de paso 5/6

### 5. PARALELISMO DE GENERADORES

Hay algunas precauciones que deben tomarse al conectar generadores en paralelo, como un sistema de excitación capaz de asegurar la compartición de kVAr, un motor capaz de compartir kW, ambos generadores con el mismo porcentaje de caída de tensión al inicio de la carga, contenido armónico de la forma de onda, etc.



El problema más crítico es la corriente de circulación entre los generadores. Esta corriente se genera cuando hay una diferencia en la forma de onda de tensión entre las dos máquinas, haciendo la corriente de 3° armónica circular entre las máquinas que tienen una conexión Y con el neutro conectado a tierra, como se muestra en la Figura 7.

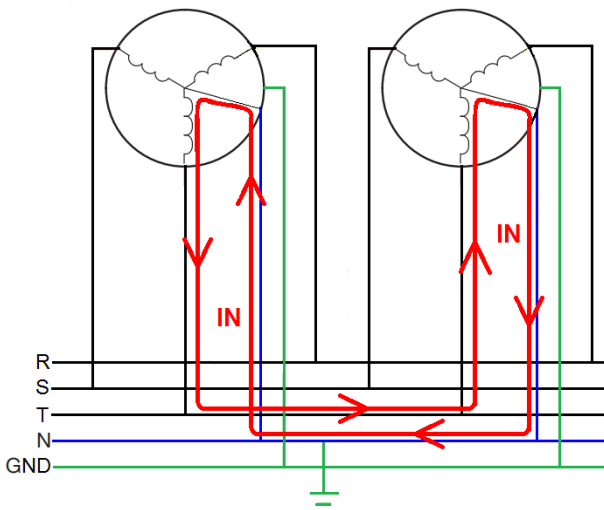


Figura 7: Corriente de neutro circulante

Esta diferencia entre las formas de onda de las tensiones ocurre debido a los armónicos generados. Cuando dos alternadores conectados en paralelo tienen el mismo contenido armónico, no hay corriente de neutro circulante.

Dado que la corriente que circula a través del neutro entre una máquina y otra es la 3° armónica, su amplitud tendrá la mayor influencia.

Así, podemos escribir que la cantidad de corriente neutra que circula entre los generadores en paralelo depende de la diferencia en las amplitudes de las tensiones de 3° armónica generadas y de la reactancia de los generadores, conforme ecuación a continuación:

$$I_{T3} = \frac{V'_3 - V''_3}{(X_{01} + X_{02} + XL)}$$

$I_{T3}$  = Corriente total de la tercera armónica;  
 $V'_3$  = Amplitud de la tercera armónica del primer generador;  
 $V''_3$  = Amplitud de la tercera armónica del segundo generador;  
 $X_{01}$  = Reactancia de secuencia – cero del primer generador;  
 $X_{02}$  = Reactancia de secuencia – cero del segundo generador;  
 $XL$  = Reactancia inductiva de la línea de conexión.

Se puede observar por la ecuación que cuanto mayor sea la diferencia entre las tensiones de 3° armónica y menor sea la reactancia de secuencia cero, mayor será la corriente circulante entre el neutro de los generadores. La Figura 8 muestra la corriente resultante que circula entre dos generadores cuando

tienen una diferencia en la amplitud de la 3° armónica.

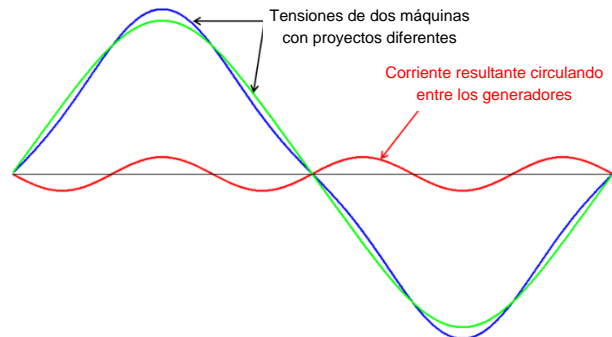


Figura 8: Corriente neutra circulante y tensiones resultantes de las dos máquinas.

Para evitar la corriente neutra circulante, se recomienda que ambas las máquinas tengan el mismo proyecto utilizando el paso 2/3, para que las formas de onda de las tensiones sean iguales, resultando en una corriente nula. Si no es posible tener los proyectos iguales, se aconseja predecir siempre la menor diferencia entre las tensiones de 3° armónica en que las reactancias de secuencia cero no sean tan bajas. Otra solución es utilizar reactores o resistores para limitar esa corriente.

## 6. CONCLUSIÓN

Ambos los pasos de devanado tienen beneficios. La selección correcta para la aplicación es la que traerá más beneficios para el cliente.

El diseñador siempre tratará de optimizar la forma de onda del generador para tener un bajo THD y minimizar el costo, independientemente del tono utilizado. Un generador bien proyectado puede tener un THD bajo con cualquier paso.

La Tabla 1 presenta las aplicaciones en que se recomienda utilizar los pasos de 2/3 y 5/6.

Tabla 1

	Paso 2/3	Paso 5/6
Cargas monofásicas no lineales	X	
Cantidad de material activo menor en la máquina		X
Corriente de falta fase-neutro menor		X
Operación de generadores en paralelo	X	
Sistemas trifásicos de baja tensión de cuatro hilos	X	
Sistemas trifásicos de media y alta tensión		X
Facilidad de proyecto de paneles eléctricos	X	