

# Corrección de los efectos de las derivas de reloj en microrredes de alterna con inversores de potencia trifásicos

Carlos Arturo Alfaro Aragón

**Resumen-** En las microrredes basadas en inversores, sus controles generalmente son operados por microcontroladores locales, con sus propios relojes. Los microcontroladores tienen una deriva de tiempo con respecto a los demás, lo que afecta a las señales de reloj que se utilizan para controlar los sistemas en tiempo real. Estas desviaciones en el tiempo de cada microcontrolador se llaman derivas de reloj. Las derivas de reloj tienen un efecto negativo en el control de los inversores de las microrredes cuando intentan compensar los errores en estado estacionario en la frecuencia generada por el método Droop. Es por eso por lo que este trabajo tiene como principal objetivo compensar estos efectos negativos al proponer 3 esquemas de control. El trabajo incluye el análisis descriptivo de tres propuestas de control y resultados de simulación de la implementación de los tres esquemas de control en una microrred modelada en MATLAB-SIMULINK y TrueTime.

## 1. Introducción

Actualmente, el incremento de la demanda eléctrica, las políticas y tratados por generar energía de manera más limpia, y los intereses en las propuestas en eficiencia energética, ha provocado un auge en la creación de nuevos puntos de generación de energía. Haciéndose así cada vez más fuerte el concepto de generación distribuida. Surgiendo de esta manera en los últimos años conceptos como las microrredes.

Es a partir de esto que se realizan investigaciones que permitan crear estrategias de control y gestión de las microrredes, para un mejor desarrollo de estas tecnologías permitiendo así la implementación de estas de manera óptima. Teniendo así distintas estrategias de control que permiten que las microrredes funcionen de la forma deseada. Así para una microrred trifásica de alterna, que es el caso de estudio de este proyecto, en la interconexión entre los distintos suministros de energía se tienen inversores trifásicos los cuales trabajan como fuentes de voltaje en paralelo, VSI por sus siglas en inglés (Voltage-Source Inverters). Inversores los cuales, para este caso de estudio, trabajan en compartición de potencia con el método de control “droop”, que permite trabajar a cada inversor de manera autónoma sin comunicaciones logrando de manera eficaz la compartición de potencia entre los inversores. Además, utilizando un control secundario local basado en filtros de paso bajo distribuido, “distributed low-pass filters”

(DLPF), que tiene como objetivo reducir el error en frecuencia de los inversores.

Así a partir de la necesidad de implementar soluciones que permitan brindar una mayor calidad e integración del suministro eléctrico de una microrred. Y partiendo de previas investigaciones de los impactos de las derivas del reloj de los microcontroladores en las microrredes, trabajando en compartición de potencia y utilizando un control secundario local DLPF presentados en [1]. Se tiene la motivación de realizar este proyecto, que busca la implementación de nuevas estrategias de control que permitan mitigar los efectos causados por las derivas de reloj de los microcontroladores.

Siendo el objetivo principal del proyecto la corrección de los efectos negativos de las derivas de reloj de los microcontroladores sobre las microrredes con inversores trabajando como fuente de voltaje.

Para lograr este objetivo se plantearán 3 estrategias de control que permitan corregir los efectos negativos de las derivas de reloj. Dichas estrategias serán descritas y desarrolladas matemáticamente de forma teórica.

Por último, como parte práctica se realizaron simulaciones de una microrred por medio de “Matlab-Simulink” utilizando la herramienta de “trueTime” para simular el comportamiento de un microcontrolador. De esta manera se busca simular las derivas de reloj de cada uno de los microcontroladores de cada inversor.

## 2. Control Jerárquico de las microrredes

El control de las microrredes puede operar de manera jerárquica, teniendo tres niveles de control. Dichos niveles permiten el control y gestión de las microrredes. Este trabajo se centrará únicamente en los controles primario y secundario.

A continuación, se presentan los lazos de control primario y secundario de una microrred, cabe resaltar que no son las únicas estrategias de control, pero son las utilizadas en este caso de estudio.

### 2.1. Control Primario: Droop Control

Este método consiste en reducir las referencias de voltaje y frecuencias en función de las potencias activas y reactivas [2]. Logrando así tener una máquina de inercia virtual que reaccione a las perturbaciones de las cargas. El esquema del Droop control es el mostrado en la figura 1, y es expresado de la siguiente manera.

$$\omega^* = \omega_o - m \times P \quad \text{Ec. 1}$$

$$E^* = E_o - n \times Q \quad \text{Ec. 2}$$

Donde  $E_o$  y  $\omega_o$  son el voltaje nominal y frecuencia angular de referencia,  $n$  y  $m$  son las pendientes, las cuales deberán ser reguladas para un buen funcionamiento del control,  $P$  y  $Q$  son las potencias activas y reactivas previamente calculadas, y  $E^*$  y  $\omega^*$  son la amplitud y frecuencia angular de referencia.

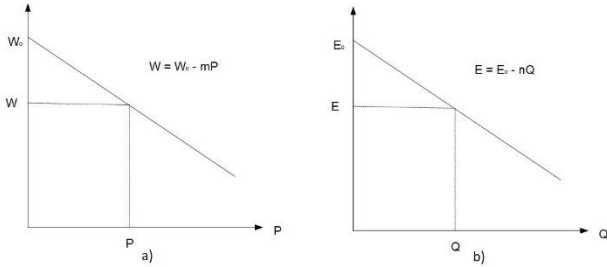


Figura 1: Gráficas del método droop

Una vez obtenidas estas referencias de amplitud y frecuencias se construye la referencia de voltaje que luego será utilizada por un lazo de voltaje.

El Droop control además de brindar las referencias de voltaje e inercia virtual a los inversores, dado que se trabajará con VSI trabajando en paralelo, permite a los inversores trabajar en compartición de potencia. Lo cual es muy útil ya que de esta manera se evita el sobre esfuerzo de los inversores permitiendo que todos trabajen con la misma potencia.

Para ello se tiene como objetivo de control el presentado en la ecuación 3 definido a continuación:

$$P_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $P_j$  es la potencia de los inversores y  $N$  es el número de inversores conectados.

Otra de las características más importantes del Droop control es que no necesita de comunicaciones. Por lo que puede trabajar con varios inversores conectados a la vez y funcionar perfectamente sincronizando todos los inversores a un mismo voltaje y frecuencia.

## 2.2. Control Secundario local: (DLPF)

Para corregir los errores de frecuencia en estado estacionario que el control primario no puede corregir se utiliza un control secundario. El cual agrega un término más a la ecuación del droop, Re-expresando dicha ecuación de la siguiente manera:

$$\omega^* = \omega_o - m \times P + \delta \quad \text{Ec. 4}$$

Donde  $\delta$  es el término del control secundario, en el cual pueden utilizarse distintos métodos de control, pero todos buscando el mismo objetivo de control, presentado en la ecuación 5. Este término modifica la ecuación de la recta generado por el Droop tal como se muestra en la figura 2, permitiendo que la frecuencia local se acerque cada vez a la frecuencia nominal querida.

$$\omega_{es} = \omega_o \quad \text{Ec. 5}$$

Donde  $\omega_{es}$  es la frecuencia angular en estado estacionario y  $\omega_o$  es la referencia.

Para este caso de estudio el control secundario utilizado es el DLPF. La expresión del término  $\delta$  es la presentada a continuación.

$$\delta = \omega_s \int (\alpha(\omega_o - \omega_i) - \delta) dt \quad \text{Ec. 6}$$

Donde  $\omega_s$  y  $\alpha$  son la frecuencia de corte y ganancia del filtro paso bajo, y  $\omega_i$  es la frecuencia angular local.

## 2.3. Impedancia virtual

Dado que el Droop control es un lazo de control con una respuesta transitoria lenta este necesita de otro control para lograr conectar dos o más VSI en paralelo. Para lograr esto

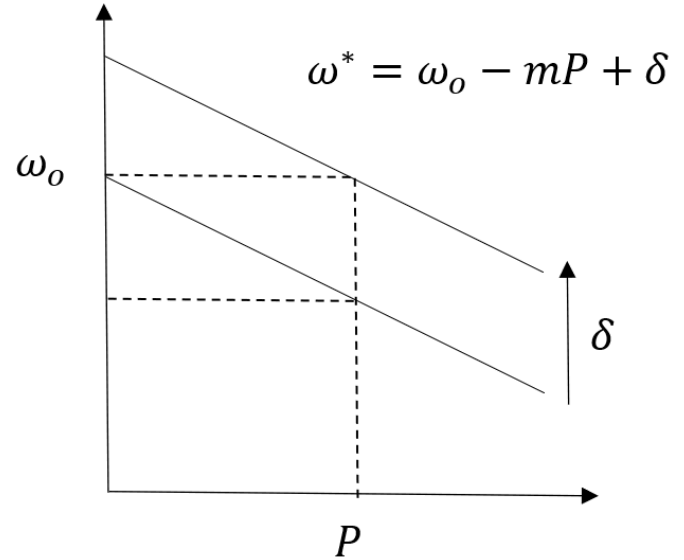


Figura 2: Gráfica del efecto del control secundario en la ecuación del droop

se necesitaría físicamente impedancias variables que se ajusten a cada uno de los inversores para que puedan brindar el mismo voltaje a la carga. Ya que esto es caro, se utilizan impedancias virtuales, que emulan los efectos de las impedancias reales. Permitiendo así balancear los voltajes de los inversores y logrando trabajar con fuentes de voltaje en paralelo.

Al implementar impedancias virtuales al voltaje de referencia obtenido por el Droop control se le resta un nuevo término tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$V_{ref} = E^* \times \sin(\omega^* t) - i \times Z_o \quad \text{Ec. 7}$$

Donde  $i$  y  $Z_o$  son la corriente del inversor y la impedancia virtual, respectivamente.

## 2.4 Control Implementado

Para el desarrollo del control de la microrred modelada y simulada en este trabajo se utilizaron los algoritmos de control antes mencionados. En la figura 3 se muestra el diagrama de control que fue implementado para este trabajo. En este trabajo se van a proponer 3 modificaciones sobre este control básico que solucionan el problema de las derivas de reloj en la microrred.

## 3. Efectos de las derivas de reloj en la microrred

Las derivas de reloj en los osciladores electrónicos son producidas por efectos de temperatura y gravitatorios que afectan en la medida del tiempo de cada microcontrolador de manera local. Este efecto hace que los microcontroladores no vayan a la misma velocidad temporal entre ellos, haciendo

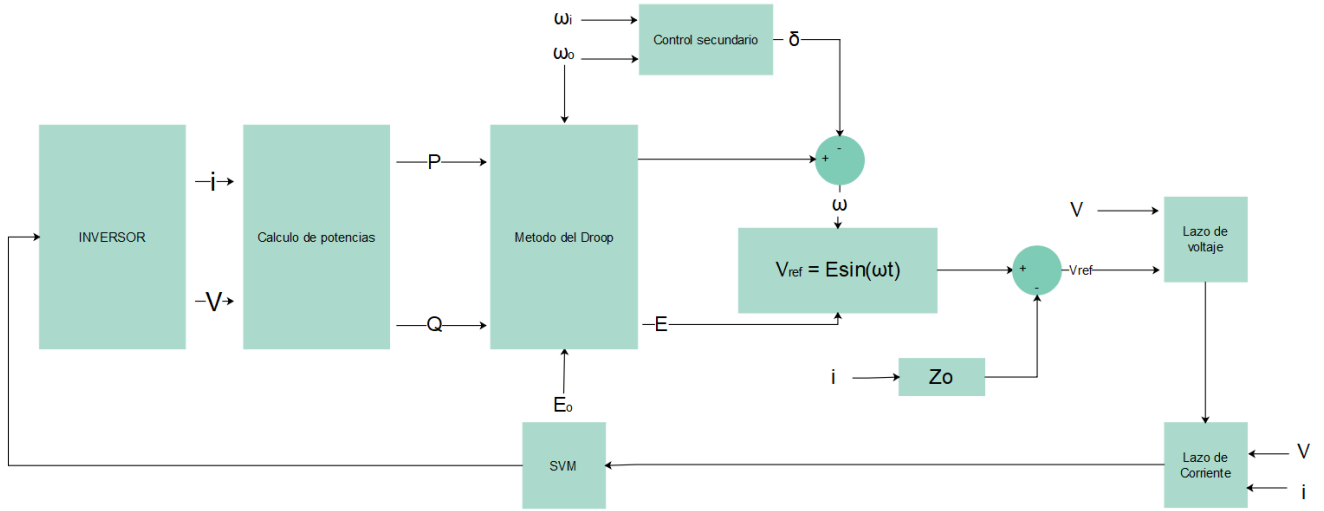


Figura 3: Diagrama de control implementado en la microrred

diferir sus tiempos locales con respecto al de los demás microcontroladores y al tiempo global.

Matemáticamente se puede expresar el tiempo local de cada microcontrolador en función del tiempo global y las derivas de reloj de la siguiente manera, tal y como se describe en la ecuación 8

$$t_i = t(1 + d_i) \quad \text{Ec. 8}$$

Donde  $t_i$  es el tiempo local y  $d_i$  es la deriva o desviación del tiempo, la cual suele estar en el rango de los nanosegundos o menos.

Estos efectos de las derivas de reloj en las microrredes ya han sido estudiados anteriormente, por lo que es sabido que el control primario por el método de Droop por si solo es robusto a estas derivas [1]. Pero en investigaciones recientes se ha estudiado el impacto de estas en los controles utilizadas para compensar el error en estado estacionario de la frecuencia, en otras palabras, el control secundario, obteniendo resultados negativos en la compartición de potencia, objetivo de control del método Droop [1].

Este efecto se debe a que el control secundario busca corregir los errores en frecuencia haciendo uso de las frecuencias locales, tal como se muestra en la ecuación 6, esto causa que en estado estacionario las frecuencias se comporten de la siguiente manera.

$$(d_i + 1)\omega_{i,es}^* = \omega_{i,es} \quad \text{Ec. 9}$$

Donde  $\omega_{i,es}$  es la frecuencia global en estado estacionario de cada inversor y  $\omega_{i,es}^*$  es la frecuencia local de referencia. Pero además en sistemas de potencia la frecuencia es una variable global, por lo que  $\omega_{i,es}$  tenderá a  $\omega_{es}$  [1]

$$\omega_{i,es} = \omega_{es} \quad \text{Ec. 10}$$

Por lo que para que las frecuencias locales tiendan a este valor deberán ser compensadas por el control primario afectando así a la compartición de potencias.

#### 4. Propuestas de control

Debido a los efectos ocasionados por las derivas de reloj, en este trabajo se proponen 3 estrategias de control que permitan corregir estos efectos negativos. Para ello se propone un nuevo término  $\varphi_i$  que estará conformado por un lazo de control de potencias, el cual será utilizado para las tres propuestas.

$$\varphi_i = K_{pot} \int (P_{prom} - P_i) dt \quad \text{Ec. 11}$$

$$P_{prom} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j \quad \text{Ec. 12}$$

Donde  $P_j$  son las potencias activas de cada uno de los inversores, la cual deberá ser comunicada a todos los inversores para la implementación del control.

El término propuesto es utilizado por cada uno de los controles para hacer modificaciones en los controles primario o secundario que permitan modificar las referencias de frecuencias locales de cada inversor afectadas por las derivas del reloj. De esta manera se busca compensar con este término las derivas de reloj modificando las referencias de frecuencias locales, las cuales a causa de estas derivas difieran de la frecuencia global.

A continuación, se presentan cada una de las propuestas.

##### 4.1. Propuesta de control 1: Lazo de potencia como tercer término del método droop

Como ya se mencionó antes el objetivo de este trabajo es la corrección de los efectos de las derivas de reloj en las microrredes. Para ello se han propuesto 3 controles, siendo el primer de ellos la adición de un tercer término,  $\varphi_i$ , a la ecuación del Droop. Buscando así con el nuevo término compensar la desviación de la frecuencia local con respecto a la global debido a las derivas de control.

La nueva ecuación del Droop con la adición de este término es la siguiente:

$$\omega^* = \omega_o - m \times P + \delta + \varphi \quad \text{Ec. 13}$$

Este término funciona igual que el control secundario, con la diferencia que busca compensar el error en estado estacionario de la compartición de potencias. De esta manera este control busca modificar la recta descrita en la ecuación del Droop tal como se muestra en la figura 4.

Se espera que el término  $\varphi$  modifique a la ecuación del Droop en función de la deriva de reloj de cada inversor, haciéndola así, subir o bajar en función de la desviación de los relojes locales.

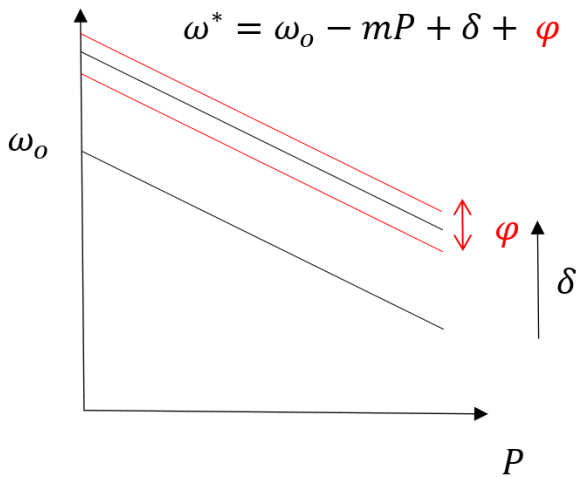


Figura 4: Efecto de la propuesta de control 1 sobre la ecuación del droop

#### 4.2 Propuesta de control 2: Modificación de la pendiente $m$ por medio de un lazo de potencia

La segunda propuesta de control, al igual que la primera, busca modificar por medio del control primario las referencias de frecuencias locales. Para ello se propone la modificación de la pendiente  $m_i$  de cada inversor por medio del término  $\varphi_i$ . Haciendo ahora que la pendiente sea una variable en función del error en compartición de potencias y no una constante como suele serlo. Donde la nueva pendiente sería:

$$m_i = km_i \pm \varphi_i \quad \text{Ec. 14}$$

Donde  $km_i$  es la parte constante de la pendiente.

Para saber el signo del término  $\varphi_i$  se realizó el siguiente análisis, partiendo de resultados obtenidos en investigaciones anteriores [1], donde se puede concluir que para derivas de reloj mayores a 0 se tendrá un incremento en la potencia del inversor.

Además, en el dominio global del tiempo y debido al control secundario, en estado estacionario se cumple que:

$$(d_i + 1)\omega_i^* = \omega_o \quad \text{Ec. 15}$$

Por lo que si la deriva de reloj es positiva la frecuencia local de referencia será menor a la frecuencia nominal.

Partiendo que en estado estacionario se debe cumplir la ecuación 15, y que un cambio en  $m_i$  tiene un efecto inversamente proporcional a la frecuencia de referencia, implica que si  $m_i$  es modificada, para que se cumpla la ecuación 15 el método de Droop afectará a la potencia de manera inversa a los cambios en  $m_i$ . Además, si se sabe que una deriva de reloj positiva implica un aumento en la potencia del inversor y viceversa, podemos decir que las derivas de reloj afectan de manera inversa al término  $\varphi_i$ .

Por lo tanto, para derivas de reloj positivas se desea que el inversor inyecte una menor potencia, por lo que el valor de  $m_i$  deberá de ser mayor. Y de manera contrario si las derivas de reloj son negativas para compensar el error en compartición de potencia el valor de  $m_i$  deberá ser menor. Para que esto se cumpla la ecuación 13 deberá expresarse de la siguiente manera.

$$m_i = km_i - \varphi_i \quad \text{Ec. 16}$$

Donde sí sustituimos la ecuación 16 en la ecuación 6 obtenemos:

$$\omega_i^* = \omega_o - (km_i - \varphi_i) \times P_i + \delta_i \quad \text{Ec. 17}$$

Este control, a diferencia del control secundario que modifica la recta de la ecuación del Droop subiendo o bajándola, busca modificar el punto de trabajo de los inversores modificando todas las pendientes, haciendo que la ecuación del Droop se comporte tal y como se muestra en la figura 5.

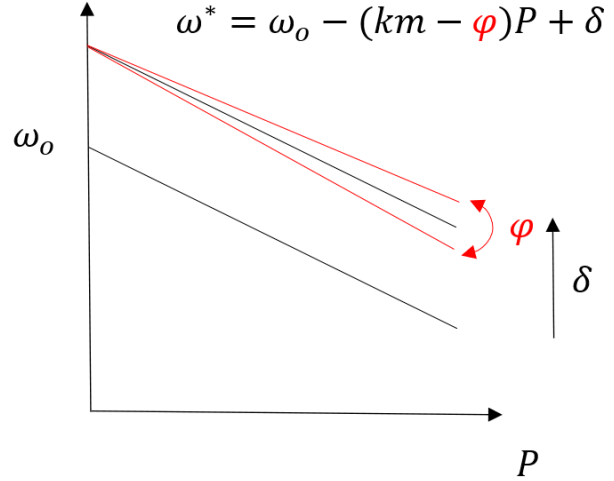


Figura 5: Efectos de la propuesta de control 2 sobre la ecuación del droop

Con esto el control logra modificar el punto de trabajo en función de las derivas de reloj por medio del término  $\varphi$ .

#### 4.3 Propuesta de control 3: Modificación de la referencia de frecuencia del control secundario por medio de un lazo de potencia

La tercera propuesta de control pretende hacer modificaciones al control secundario, agregando el término  $\varphi$  para modificar el lazo de frecuencias del control secundario, a diferencia de las dos anteriores que buscaban modificar el control primario. De esta manera esta propuesta tiene como objetivo atacar directamente el problema visto en la ecuación 9 ajustando el valor de  $\omega_i$  para compensar las diferencias entre la frecuencia en tiempo local y la frecuencia en tiempo global. La nueva expresión del control secundario queda de la siguiente manera

$$\delta_i = \omega_s \int (\alpha(\omega_o - \omega_i \times (1 \pm \varphi_i)) - \delta_i) dt \quad \text{Ec. 18}$$

La adición del término  $\varphi$  en el control secundario permitirá compensar el error en compartición de potencias sin necesidad de hacer modificaciones en el control primario. Haciendo que el término  $\varphi_i$  sea no lineal con respecto a  $\omega_i$ . Para saber el signo del término  $\varphi_i$  se partió de que en estado estacionario se debe cumplir que.

$$\omega_{i,es} = \omega_o(d_i + 1) \quad \text{Ec. 19}$$

Donde agregando el nuevo término de control obtenemos:

$$\omega_{i,es}(1 \pm \varphi_i) = \omega_o(d_i + 1) \quad \text{Ec. 20}$$

Dado se busca que en estado estacionario se cumpla que  $\omega_o$  sea igual  $\omega_i$  podemos expresar el término  $\varphi_i$  en función de  $d_i$  como

$$\pm \varphi_i = d_i \quad \text{Ec. 21}$$

Para que esto se cumpla, debido a que para derivas de reloj positivas el termino  $\varphi_i$  es negativo y viceversa, el signo del control deberá ser negativo, sino este será inestable. Expresando así la ecuación 17 de la siguiente manera

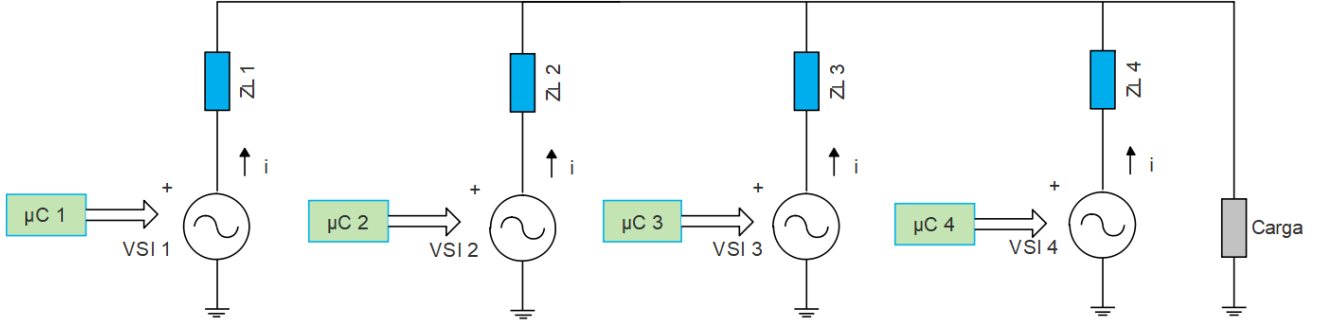


Figura 6: Modelo de la microrred simulada

$$\delta_i = \omega_s \int (\alpha(\omega_o - \omega_i \times (1 - \varphi_i)) - \delta_i) dt \quad \text{Ec. 22}$$

Además, partir de la ecuación 22 tenemos un parámetro para asignarle un valor a la constante  $K_{pot}$  de la ecuación 11.

## 5. Simulación y resultados

En esta sección se mostrarán los resultados de las simulaciones realizadas de la microrred. Estas simulaciones se realizaron con “MATLAB-SIMULINK”, en el cual se modeló los inversores y cargas del sistema. Para la simulación de los microcontroladores se hizo uso de la herramienta TrueTime[3].

### 5.1. Configuración de la simulación

El modelo de la microrred simulada es el mostrado en la figura 6. Donde tal como se puede observar es una microrred que consta con 4 inversores en paralelo alimentando a una misma carga. Cada inversor trabaja de manera independiente como fuente de voltaje, y contando con su propio microcontrolador y con cargas de línea propia. La configuración de la microrred y las cargas a la cual fue sometida se muestran en la Tabla 1.

Para el control de los inversores se hizo uso del control primario por el método de Droop, además se implementó un control secundario DLPF. Los parámetros de control, tanto del control primario, de las impedancias virtuales y de control secundario, se muestran en la tabla 2.

Tabla 1: Parámetros de la microrred modelada

Símbolo	Descripción	Valor nominal
$N$	Número de inversores	4
$ZL1$	Carga de línea 1	$0,46 \Omega, 40,71^\circ$
$ZL2$	Carga de línea 2	$0,37 \Omega, 37,75^\circ$
$ZL3$	Carga de línea 3	$0,48 \Omega, 34,31^\circ$
$ZL4$	Carga de línea 4	$0,45 \Omega, 43,8^\circ$
$R_i$	Carga Resistiva Inicial	$0,21 \Omega$
$R_f$	Carga Resistiva final	$0,45 \Omega$
$f$	Frecuencia nominal	60 Hz
$V_o$	Voltaje nominal	110 Vrms

Tabla 2: Constantes del control primario y secundario

Símbolo	Descripción	Valor nominal
$m$	Pendiente Droop	$1 \times 10^{-5} \text{rad}/(\text{W s})$
$\omega_s$	Frecuencia de corte DLPF	$20\pi \text{ rad/s}$
$\alpha$	Ganancia DLPF	$40 \text{ W}^{-1}$
$Z_o$	Impedancia virtual	$4,83 \times 10^{-3} \Omega, 90^\circ$

Tabla 3: Derivas de reloj de los micro controladores

Símbolo	Descripción	Valor nominal
$d_1$	Deriva de reloj $\mu\text{C}$ 1	80 ppm
$d_2$	Deriva de reloj $\mu\text{C}$ 2	20 ppm
$d_3$	Deriva de reloj $\mu\text{C}$ 3	0
$d_4$	Deriva de reloj $\mu\text{C}$ 4	-80 ppm

Tabla 4: Valores de  $K_{pot}$

Símbolo	Descripción	Valor nominal
$Kp_1$	Propuesta de control 1	$7,5 \times 10^{-6}$
$Kp_2$	Propuesta de control 2	$5 \times 10^{-11}$
$Kp_3$	Propuesta de control 3	$5 \times 10^{-11}$

Los microcontroladores simulados tienen incorporado el código del control de los inversores, el cual se ejecuta de manera cíclica con un periodo de ejecución de 100 microsegundos. Las comunicaciones para el control propuesto en la ecuación 11 se ejecutan cada 1 milisegundo. El tiempo total de simulación es de 30 segundos.

En las simulaciones realizadas se hizo una prueba para ver si los controles eran robustos a perturbaciones en la carga, esta prueba consistía en realizar un cambio de carga al segundo 20 de la simulación.

Para la simulación de cada una de las propuestas de control estas fueron activadas al segundo 5. Esto se hizo para poder apreciar los efectos de las derivas de reloj sin los controles propuestos, y como estos corrigen sus efectos negativos. Para la simulación de las derivas de reloj se configuró cada uno de los microcontroladores con diferentes derivas, estas se muestran en la tabla 3. En la tabla 3 ppm significa partes por millón.

Para las simulaciones de las propuestas de control se utilizaron los valores de  $K_{pot}$  mostrados en la tabla 4.

## 5.2. Resultados de la simulación

En la figura 7 se muestra la evolución de las potencias de los 4 inversores simulados sin agregar los esquemas de control propuestos, como se puede notar a causa de las derivas de reloj no se logra cumplir el objetivo de compartición de potencia de la ecuación 3.

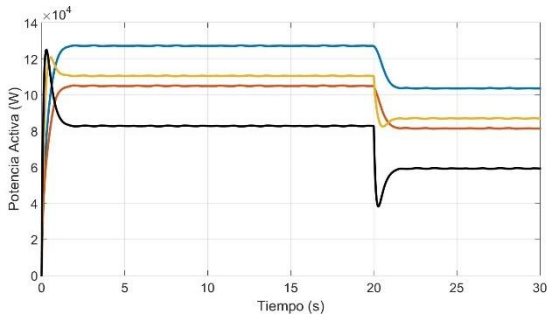


Figura 7: Gráfica de potencias con derivas de reloj

En las figuras 8, 9 y 10 se muestra la evolución de las potencias de los 4 inversores para cada una de las propuestas de control, como se puede notar a causa de las derivas de reloj no se logra cumplir el objetivo de compartición de potencia de la ecuación 3, hasta el segundo 5 donde es activada cada una de las propuestas de control.

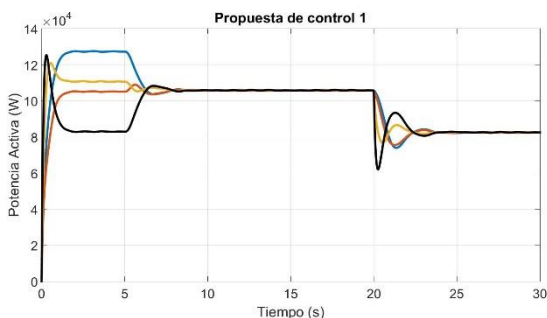


Figura 8: Gráficas de potencias de la propuesta 1

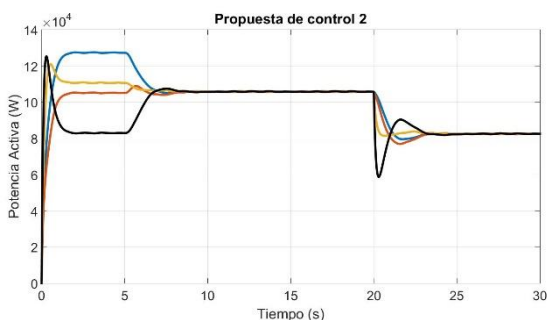


Figura 9: Gráficas de potencias de la propuesta 2

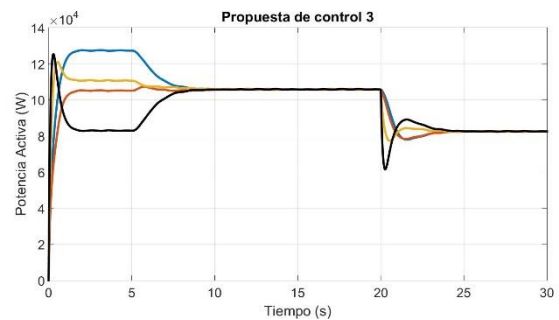


Figura 10: Gráficas de potencias de la propuesta 3

A partir de los resultados de simulación podemos observar como las tres propuestas de control cumplen con su objetivo de corregir el error en compartición de potencia debido a los efectos de las derivas de tiempo. Estos efectos se pueden ver claramente en la figura 7, logrando en estado estacionario un porcentaje de error en potencia de aproximadamente 0%. Además, se aprecia que las propuestas de control no afectan el objetivo del control secundario, manteniendo los errores de frecuencia menores a 30 mHz en todos los casos, los cuales cumplen con normativas de calidad.

También se puede apreciar que se genera un poco de ruido en la potencia, lo cual es normal debido a la integral del lazo de control del término  $\varphi$ , pero esto no generaría ningún problema, ya que este no sobrepasa el 0.2% de porcentaje de error en potencia, además en implementación real debido a la misma dinámica de los inversores se genera ruido de mayor magnitud.

En cuanto a los resultados individuales de cada control podemos destacar la dinámica que aporta cada uno a las potencias al momento de ser activados, pudiéndose observar como la propuesta de control 1 aporta una respuesta más oscilatoria y lenta con respecto a los otros dos; siendo la propuesta de control 3 la que aporta una respuesta más amortiguada y rápida. En cuanto a las potencias es la propuesta 2 la que presenta el menor porcentaje de error.

Otro punto importante que destacar es la diferencia entre las frecuencias del control 1 y 2 con respecto al control 3, y esto es debido a que el tercer control no actúa directamente en la ecuación del Droop, por lo que no busca la compensación de las frecuencias locales de referencia con respecto de la global, usando el término  $\varphi$  para compensar directamente las derivas de tiempo presentes en la frecuencia local.

En la tabla 5 se presenta el resumen de resultados obtenidos en las simulaciones, con los tiempos de respuesta transitoria y el porcentaje de error de la compartición de potencias.

Tabla 5: Resumen de resultados de simulación

Control	Tiempo de respuesta transitoria	Error de potencia máximo en estado estacionario
Propuesta 1	5 segundos	0,20%
Propuesta 2	4,7 segundos	0,18%
Propuesta 3	4,5 segundos	0,20%

## 6. Conclusiones

La principal contribución de este trabajo es la propuesta de tres métodos de control que permiten compensar los efectos de las derivas de reloj de los microcontroladores locales en las microrredes. Las propuestas modifican al control primario, dos de ellas, y al control secundario, una de ellas, agregando un nuevo término que incluye un lazo de error de potencias y un integrador de este lazo, el cual modifica las características de la ecuación del Droop para mejorar la dinámica de la microrred.

Estas propuestas de control fueron probadas en la simulación de una microrred de 4 VSI por medio de MATLAB-SIMULINK y TrueTime, obteniendo de ellas resultados favorables, donde se cumple el objetivo de control de compartición de potencias entre los inversores.

A partir de las simulaciones podemos concluir que la propuesta con mejor respuesta transitoria, justo después de activar los controles propuestos, es la propuesta de control 3, ya que de los resultados se observa una respuesta transitorio más rápida y sin oscilaciones. En cuanto a error en potencia es la propuesta 2 la que presentaba menor porcentaje de error en estado estacionario, aunque en muy poca cantidad, con respecto a las otras dos propuestas. Siendo la peor de ellas la primer propuesta de control, teniendo mayor oscilación en la respuesta transitoria y ligeramente más error en compartición de potencia en estado estacionario.

Como estudios futuros se propone la implementación de estos controles en una microrred física, para de esta manera poder validar los resultados de la simulación con resultados experimentales. También se propone la implementación de estas propuestas en otros esquemas de control secundario o primario.

## Referencias

- [1] M. Castilla, A. Camacho, P. Martí, M. Velasco, and M. MoradiGhahderijani, "Impact of clock drifts on communication-free secondary control schemes for inverter-based islanded microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, in Press.
- [2] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, J. Miret, M. Castilla and L. Garcia de Vicuna, "Hierarchical Control of Intelligent Microgrids," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 4, no. 4, pp. 23-29, Dec. 2010.
- [3] Anton Cervin, Dan Henriksson, Bo Lincoln, Johan Eker, Karl-Erik Årzén: "How Does Control Timing Affect Performance? Analysis and Simulation of Timing Using Jitterbug and TrueTime." *IEEE Control Systems Magazine*, 23:3, pp. 16–30, June 2003.