

**D2 – Sistemas de Información y Telecomunicaciones****Ensayo y comparación de métodos de transmisión de sincrofasores sobre redes Ethernet.**

P.E. LEIBOVICH*
IITREE-FI-UNLP
Argentina

F. ISSOURIBEHERE
IITREE-FI-UNLP
Argentina

J.C. BARBERO
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Resumen – Se describen en forma teórica diferentes métodos de transmisión de sincrofasores ya conocidos, los cuales fueron utilizados en transmisiones reales y se presentan los resultados de estas experiencias, empleando PMUs con conexiones cableadas a Internet. Los métodos analizados se encuentran descritos en la norma IEEE C37.118.2-2011 y son los habitualmente utilizados en aplicaciones de PMUs comerciales y descritos en la literatura afín. Se realiza una completa descripción de los mismos, analizando las principales características, ventajas y desventajas, teniendo en cuenta los algoritmos de eficiencia en el uso de la red que pueden afectar las transmisiones de las PMUs. En sistemas de potencia de países en desarrollo donde se instalan PMUs, la disponibilidad de enlaces Ethernet dedicados o de fibra óptica utilizables para estas aplicaciones puede resultar muy limitada, por lo que las conexiones a través de internet se convierten en una solución alternativa para el enlace de datos. En el presente trabajo se analiza el desempeño de las PMUs vinculadas a través de internet, en términos de calidad de paquetes de datos y latencia, mediante pruebas diseñadas para tal fin. Se presentan análisis estadísticos a partir de resultados obtenidos de experiencias reales y su comparación con los requerimientos de aplicaciones prácticas.

Palabras clave: Internet – Latencia – Unidad de medición fasorial – Sincrofasor – Métodos de transmisión

1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos interconectados son una de las principales infraestructuras de cualquier país o región. Debido a su importancia crítica, el control de su estado de funcionamiento y la capacidad de estimación de su comportamiento son dos de los principales objetivos de los administradores de los mismos [1].

Históricamente, para medir y analizar el funcionamiento de un sistema de potencia, ha sido utilizado el sistema de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA, por sus siglas en inglés). Sin embargo, las mediciones obtenidas a través del sistema SCADA tienen importantes limitaciones debido a su escasa resolución temporal, su alta latencia y la carencia de sincronización temporal con mediciones de otros puntos del sistema.

Las Unidades de Medición Fasorial (PMU, por sus siglas en inglés) se utilizan para medir no solo el estado estacionario del sistema, sino también para implementar mecanismos automáticos de control del mismo. Una PMU es un dispositivo que provee mediciones sincronizadas de fasores en tiempo real relativos a la ubicación en el sistema donde se encuentra instalada. La sincronización se logra mediante la utilización del Tiempo Universal Coordinado (UTC, por sus siglas en inglés) y las señales de temporización provistas por el Sistema de Posicionamiento Global (GPS, por sus siglas en inglés). Dicha sincronización permite al controlador del sistema obtener fasores de diferentes puntos de la red teniendo los mismos una referencia de fase en común. Es por ello que a dichos fasores se los denomina sincrofasores.

La estructura típica de estos sistemas de monitoreo incluye no solo las PMUs, sino también Concentradores de Datos (PDCs, por sus siglas en inglés). Los PDCs reciben los datos de diferentes PMUs para luego

* P.E. Leibovich, IITREE-FI-UNLP, calle 48 y 116, B1900AMF, La Plata, Argentina – pabloleibo@iitree-unlp.org.ar

combinar y ordenar los mismos temporalmente de manera tal de, finalmente, ponerlos a disposición para el procesamiento y análisis del usuario.

Para definir las resoluciones temporales y latencias, la norma IEEE C37.118.1-2011 [2] y sus modificaciones establecen la máxima latencia de transmisión de datos aceptable desde una PMU. Para definir los requerimientos de latencia de los PDCs, la norma IEEE C37.244-2013 [3] especifica diferentes límites referidos a los retardos entre la entrada y salida de datos de los mismos. Para cumplir estos requerimientos, es necesaria una buena infraestructura de comunicaciones dado que cualquier falla o retardo no controlado en el enlace de comunicaciones afectará el proceso de monitoreo y control del sistema de potencia.

La norma C37.118.2-2011 [4] define diferentes mensajes, incluyendo su formato y contenido, para la comunicación entre PMUs y PDCs. Sin embargo, solo realiza una descripción de los diferentes métodos de transmisión que pueden ser utilizados para la red sin especificar un único enlace que deba ser empleado. En la tecnología de vanguardia de PMUs y PDCs, los enlaces seriales y Ethernet son los más utilizados, siendo estos últimos los más aplicados en sistemas de monitoreo de área amplia, (WAMS, por sus siglas en inglés), sistemas de monitoreo y control de área amplia (WAMC, por sus siglas en inglés) y sistemas de monitoreo, control y protección de área amplia (WAMPAC, por sus siglas en inglés). En el caso de Ethernet, el Protocolo de Control de Transmisión (TCP, por sus siglas en inglés) y el Protocolo de Datagramas de Usuario (UDP, por sus siglas en inglés) son los protocolos de transferencia de datos comúnmente utilizados.

A medida que las redes de PMUs crecen o se instalan en sistemas de potencia o redes de distribución más antiguas, la disponibilidad de enlaces dedicados Ethernet o de fibra óptica se reduce, de manera tal que redes compartidas, como conexiones a internet cableadas, se convierten en la principal alternativa. En el presente trabajo se analizan dos métodos de transmisión de sincrofasores. Los mismos fueron ensayados en condiciones reales utilizando conexiones a internet cableadas. Para evaluar los protocolos de comunicaciones típicos, se implementó una conexión TCP, basada en una topología cliente-servidor, que en lo que sigue se denomina “*método comandado*”. Se realizó, también, la implementación de una conexión UDP, basada en una topología multidifusión, que en el presente trabajo se denomina “*método espontáneo*”.

A su vez, se presenta un análisis estadístico del desempeño de las comunicaciones, evidenciando las ventajas y desventajas de cada método y los diferentes errores que se producen cuando se utilizan conexiones a internet. Se analizan los retardos de datos obtenidos y se los compara con los máximos retardos aceptables para sistemas de monitoreo y sistemas de control basados en PMUs.

2 MÉTODOS DE TRANSMISIÓN

Los enlaces de comunicaciones más utilizados para la transferencia de datos entre PMUs y PDCs se basan en redes IP. Si dichos enlaces son analizados con el Modelo OSI [5], se obtiene que los mismos utilizan el método de direccionamiento IP para la capa de red y los protocolos TCP o UDP para la capa de transporte.

2.1 Método de transmisión TCP

El protocolo TCP se basa en una arquitectura orientada a la conexión entre transmisores y receptores. Esto implica que se requiere de negociaciones entre los mismos para establecer y mantener la conexión punto a punto. Este método establece una conexión para transferir comandos del PDC a la PMU y datos en el sentido opuesto. En este caso, la PMU se comporta como un servidor de manera tal que el cliente (el PDC) debe conocer la dirección IP del servidor (la PMU) para poder establecer la conexión y transferencia de datos.

Las conexiones a internet cableadas comerciales utilizan, usualmente, el direccionamiento IP dinámico. Este tipo de administración de direcciones provoca que las direcciones IP de las PMUs instaladas en locaciones remotas sean, típicamente, desconocidas. Esta es la principal causa por la cual las PMUs publican sus direcciones mediante diferentes métodos como, por ejemplo, sistemas dinámicos de nombres de dominio (DDNS, por sus siglas en inglés).

Al igual que una típica transferencia de datos TCP, la transferencia de datos desde una PMU mediante TCP cuenta con diferentes métodos de control y seguridad de la comunicación, detectando pérdidas de paquetes y reorganizando paquetes desordenados. Estas capacidades de administración de la conexión requieren, como consecuencia, un mayor ancho de banda y tasa de transferencia de datos.

Para obtener un mejor desempeño y mejorar el uso del ancho de banda, el protocolo TCP cuenta con diferentes métodos para reducir la transferencia de datos. Uno de los métodos más utilizados es el denominado Algoritmo de Nagle [6]. Este algoritmo establece que si una pequeña cantidad de bytes debe ser transmitida (menor a la cantidad total de un paquete de datos) y aún hay algunos datos en tránsito de los

cuales no se recibió confirmación de su recepción, el transmisor puede esperar hasta recibir más datos a enviar (los suficientes como para completar un paquete de datos TCP) o hasta recibir las confirmaciones de recepción faltantes, de manera que no haya más datos en tránsito.

Típicamente, éste es un método eficiente para reducir el uso del ancho de banda en transmisiones a través de internet. Sin embargo, en aplicaciones de tiempo real donde los datos deben ser transmitidos inmediatamente, el Algoritmo de Nagle puede generar problemas de disponibilidad de datos debido a los tiempos de espera para la transmisión de datos anteriormente. Las transmisiones de PMUs a través de internet pueden verse afectadas por la aplicación de estos métodos de reducción de uso de ancho de banda en diferentes nodos de la red.

2.2 Método de transmisión UDP

El protocolo UDP se basa en un modelo de intercambio de datagramas, sin la existencia de conexiones. Esto implica que ambos extremos del enlace transmiten datos sin mecanismos de negociación ni control entre ellos. Si se lo compara con el protocolo TCP, no existen en este caso métodos de control y seguridad de la comunicación. El protocolo UDP solo provee control de errores en los datos para detectar transmisiones erróneas. Como consecuencia, con respecto al método TCP, se requieren tanto menor ancho de banda como menor tasa de transferencia de datos.

Las PMUs implementan, habitualmente, dos tipos de comunicaciones UDP. El primero de ellos, al igual que el método TCP, se basa en una arquitectura cliente-servidor donde la PMU funciona como servidor y es controlada por el PDC (el cliente) con los correspondientes comandos. El segundo tipo se denomina método espontáneo de transmisión de datos [4].

El método espontáneo de transmisión de datos se basa en un enlace de datos unidireccional. En este caso, los datos son transmitidos desde la PMU a PDCs predefinidos sin la existencia de comandos u otro tipo de mensajes enviados en el sentido opuesto. Esto implica, entonces, que sólo deben conocerse las direcciones IP de los PDCs que son configurados en la PMU. Este requerimiento es más simple de cumplir para sistemas de monitoreo y control donde las PMUs son instaladas en lugares remotos y conectadas a través de conexiones a internet cableadas mientras que los PDCs son instalados en lugares donde diferentes proveedores de conexiones a internet están disponibles, incluyendo servicios de direccionamiento IP fijo.

En este caso, la PMU envía automáticamente los datos a las direcciones IP predefinidas. Los PDCs no pueden enviar comandos o pedidos de configuración a las PMUs. Por esta razón, la PMU transmite periódicamente su configuración, generalmente una vez por minuto. Éste método se encuentra disponible en gran variedad de PMUs comerciales [7] – [9].

El método espontáneo no solo reduce el ancho de banda requerido. Dado que no es posible enviar comandos a las PMUs, las mismas pueden ser instaladas protegidas por cortafuegos u otros sistemas de seguridad, bloqueando cualquier tráfico de datos entrante. Esta característica le brinda al sistema de medición mayor seguridad, obteniendo por ejemplo inmunidad a ataques de denegación de servicio (DoS, por sus siglas en inglés).

En la Tabla I, se muestra la cantidad de datos transmitidos por la PMU, el tamaño mínimo del conjunto de datos y el ancho de banda requerido para una PMU midiendo 6 sincrofasores con una tasa de 50 mediciones/s utilizando tanto el protocolo TCP como el protocolo UDP. Las mediciones realizadas se supone son transmitidas con la precisión de coma flotante.

TABLA I. CANTIDAD DE DATOS Y ANCHO DE BANDA – TCP Y UDP

Descripción	TCP	UDP
Sincrofasores desde PMU	74 bytes	74 bytes
Encabezado mínimo	20 bytes	8 bytes
Paquete de red mínimo	94 bytes	82 bytes
Ancho de banda mínimo	59,6 kbps	54,4 kbps

3 LA PLATAFORMA PMU: ENSAYOS IMPLEMENTADOS

Con el objetivo de obtener resultados basados en experiencias reales de transmisión de sincrofasores, los métodos de comunicaciones de las PMUs fueron implementados en un hardware de PMU real y en un PDC funcionando en una computadora personal.

La PMU fue instalada en Concordia, Argentina, a 370 km. del PDC. La conexión comercial cableada a internet cuenta con 12 nodos de red entre la PMU y el PDC.

Los enlaces de comunicaciones fueron analizados mediante dos ensayos distintos diseñados para evidenciar los diferentes fenómenos que se suceden durante la transferencia de datos entre la PMU y el PDC. Cabe mencionar que la comunicación entre la PMU y el PDC fue previamente verificada a través de una conexión de área local, obteniendo una transmisión de datos sin errores.

3.1 Análisis del orden de los conjuntos de datos recibidos

Una de las funciones más importantes de un PDC consiste en organizar los sincrofasores recibidos según su estampa de tiempo de manera tal de obtener una transmisión sincronizada y ordenada temporalmente. Para ello, el PDC debe ser capaz de reordenar paquetes de datos entremezclados, logrando alinear temporalmente los fasores recibidos de distintas PMUs.

Para analizar el orden de los datos recibidos, el ensayo se basa en registrar los fasores, en el extremo del PDC del enlace de comunicaciones, a medida que arriban al mismo. Para ello, un registrador de datos de red, funcionando como espía de los datos recibidos, fue desarrollado para funcionar en paralelo con el PDC. Una vez que los datos fueron registrados, se analizó la estampa de tiempo de los sincrofasores recibidos. Esta prueba fue realizada para los dos métodos de transmisión analizados.

3.2 Análisis de los sincrofasores recibidos en paquetes de red

El desempeño de los métodos de transmisión es un parámetro importante en los sistemas WAMS, WAMC o WAMPAC para poder cuantificar la latencia total de datos. Estos sistemas se basan en una arquitectura que incluye cuatro componentes principales: PMUs, PDCs, software de procesamiento de sincrofasores y la red de comunicaciones.

Las conexiones de las PMUs a las barras de las estaciones o subestaciones del sistema de potencia conforman la capa de Adquisición de Datos. La siguiente capa se denomina Organización de Datos, y corresponde al procesamiento de los datos de las PMUs por parte de los PDCs, generando las transmisiones de sincrofasores de múltiples PMUs ordenados temporalmente. Finalmente, la tercera capa se denomina Capa de Aplicación, donde los datos de las PMUs son procesados y monitoreados por diferentes aplicaciones de visualización y control.

Para transferir los datos de una capa a la otra, se utiliza la red de comunicaciones. Dado que todos los datos son transmitidos a través de dicha red, es necesario que la misma sea compatible en términos de ancho de banda y latencia para obtener los datos necesarios en el instante y el lugar que se los requiera.

A partir de lo descrito anteriormente, la calidad de los paquetes transferidos a través de la red debe ser controlada. El ensayo propuesto permite analizar las características de los paquetes recibidos para cada método de transmisión utilizado. El análisis incluye el estudio del efecto de los algoritmos para un uso eficiente del ancho de banda y su influencia en la latencia de datos.

Para implementar la prueba, se desarrolló un software de PDC específico. Toda vez que se recibe un paquete de red, el software decodifica la información para detectar el número de transmisiones de PMUs que incluye el mismo. Una vez que se separan las transmisiones, el algoritmo analiza si cada una de ellas contiene todos los datos o si está incompleta, detectando también cualquier error en los mismos. Esta función se realiza mediante múltiples procesadores de datos funcionando en paralelo, uno por medición de PMU recibida.

Finalmente, el software genera un reporte mostrando el número de transmisiones de datos recibidas en cada paquete, la calidad de las mismas y el número de errores o datos incompletos registrados. En la Fig. 1, se observa un diagrama en bloques del software de procesamiento.

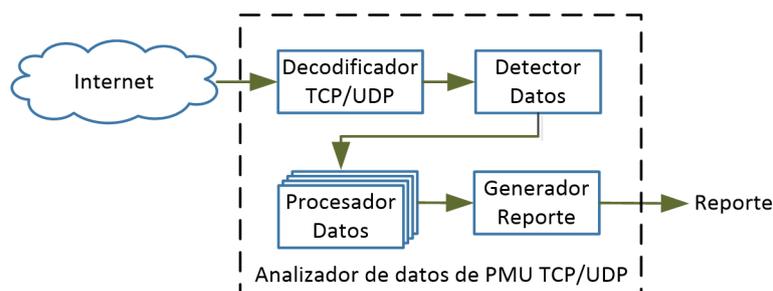


Fig. 1. Diagrama en bloques del software analizador de datos

Este ensayo fue realizado durante períodos de 10 minutos repetidas veces, utilizando tanto el método comandado como el método espontáneo a través de una conexión cableada a internet comercial.

4 IMPLEMENTACIÓN EN HARDWARE REAL

El análisis del orden de los paquetes de red recibidos fue realizado tanto para el método comandado como para el método espontáneo, y los resultados obtenidos pueden observarse en las Figs. 2 y 3. Cada caso fue ensayado para una tasa de transmisión de sincrofasores de 25 mediciones/s y de 50 mediciones/s.

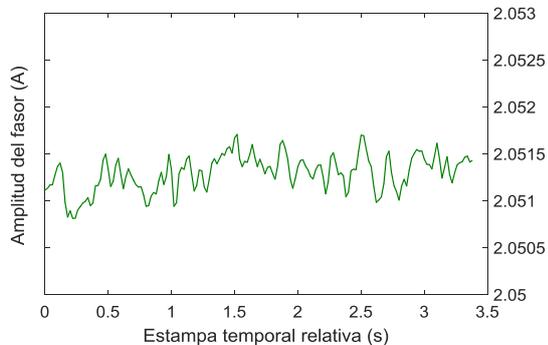


Fig. 2-(a). Orden de paquetes – Método comandado 25 mediciones/s

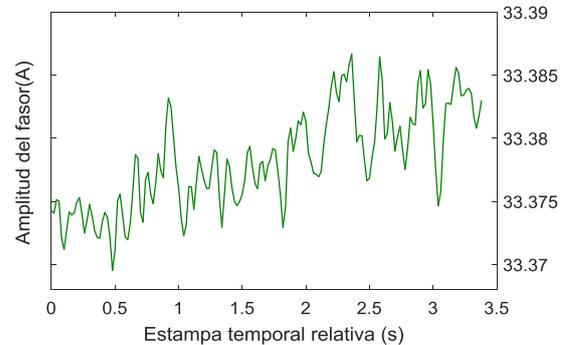


Fig. 2-(b). Orden de paquetes – Método comandado 50 mediciones/s

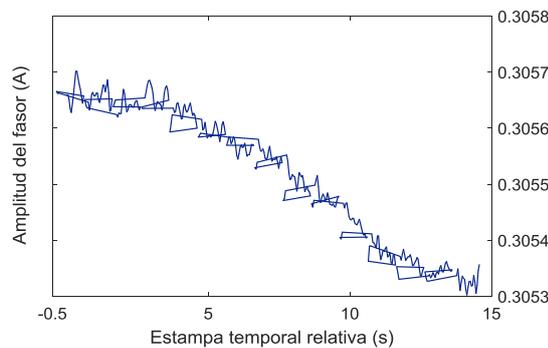


Fig. 3-(a). Orden de paquetes – Método espontáneo 25 mediciones/s

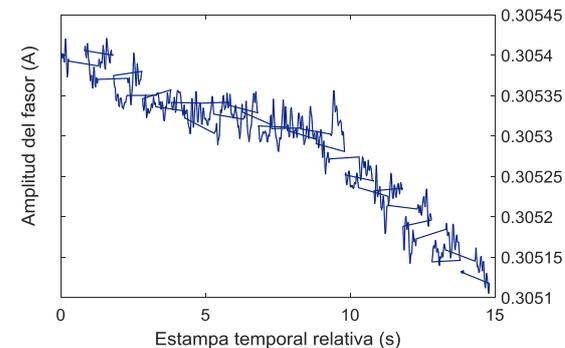


Fig. 3-(b). Orden de paquetes – Método espontáneo 50 mediciones/s

En dichas figuras se observa la amplitud del primer fasor recibido de la PMU en función de su correspondiente estampa temporal relativa, con el objetivo de analizar el orden cronológico de los paquetes de red. La estampa temporal relativa significa que el primer paquete de red recibido (que no es necesariamente el primer paquete enviado por la PMU) se corresponde con el tiempo cero, de manera tal que las estampas temporales recibidas a continuación son procesadas en forma relativa a ella. Por ejemplo, el valor 1 en el eje temporal se corresponde con la estampa temporal generada 1 segundo después de la primera estampa recibida. Un valor negativo en el eje temporal significa que la primera estampa temporal recibida no fue la primera estampa enviada. Es decir, en el extremo del PDC del sistema, algunos paquetes de red recibidos con posterioridad son anteriores a la primera estampa temporal recibida.

La Fig. 2 muestra una amplitud continua del fasor, sin cruces en el trazo, indicando de esta manera una correcta recepción de los datos. La Fig. 3, en cambio, muestra una amplitud discontinua del sincrofasor incluyendo cruces en el trazo, lo que demuestra una recepción errónea de los datos. Como consecuencia, puede afirmarse que el método comandado no evidenció ningún error en el orden de recepción de los datos, mientras que el método espontáneo sí lo hizo. Este fenómeno se debe a la capacidad de retransmisión y reordenamiento de datos que posee el protocolo TCP a diferencia del protocolo UDP. Por lo tanto, en este último caso, el PDC se ve obligado a realizar el reordenamiento.

Al igual que en el ensayo descrito anteriormente, el análisis de los sincrofasores recibidos en cada paquete de red se realizó tanto para el método comandado como para el método espontáneo utilizando como enlace de comunicaciones una conexión a internet comercial cableada. Se registraron los paquetes de red recibidos en cada caso durante un período de aproximadamente 10 minutos repetidas veces. Para cada registro, se

procesó el número de datos sincrofásicos recibidos en cada paquete con el objetivo de realizar un análisis estadístico.

En la Tabla II, se muestran los resultados obtenidos de una de las pruebas realizadas para cada método. Es posible observar el número de paquetes de red TCP/UDP recibidos, el número de conjuntos de datos recibidos y una clasificación de los paquetes según la cantidad de datos recibidos incluidos en ellos.

TABLA II. REGISTRO DE PAQUETES Y DATOS RECIBIDOS

	Comandado	Espontáneo
Total de conjunto de datos recibidos	26406	26894
Paquetes recibidos	24971	26894
1 conjunto/paquete	24475	26894
2 conjunto/paquete	147	0
3 conjunto/paquete	66	0
4 conjunto/paquete	55	0
5 conjunto/paquete	48	0
6 conjunto/paquete	48	0
7 conjunto/paquete	23	0
8 conjunto/paquete	7	0
9 conjunto/paquete	6	0
10 conjunto/paquete	42	0
Conjuntos con errores	54	0

Se llevó a cabo un análisis estadístico sobre todas las pruebas realizadas para cada caso. En la Fig. 4, se observa el porcentaje de paquetes recibidos conteniendo un único conjunto de datos en cada caso analizado.

La Tabla II y la Fig. 4 demuestran que la combinación de conjuntos de datos en un único paquete de red no se produce para el caso de transmisiones UDP mediante el método espontáneo, mientras que sí se produce en el caso del método comandado aplicando TCP. Por lo tanto, es posible concluir que los algoritmos diseñados para realizar un uso eficiente del ancho de banda afectan solo al método comandado, dado que el mismo se basa en el protocolo TCP.

Basada en los resultados estadísticos, es posible observar en la Fig. 5 el porcentual de paquetes de red que contienen entre 2 y 10 conjuntos de datos respecto al número total de paquetes de red recibidos. Es posible concluir, entonces, que el efecto más importante de los algoritmos para el uso eficiente del ancho de banda consiste en generar paquetes que contienen, en la mayoría de los casos, 2 conjuntos de datos combinados en su interior.

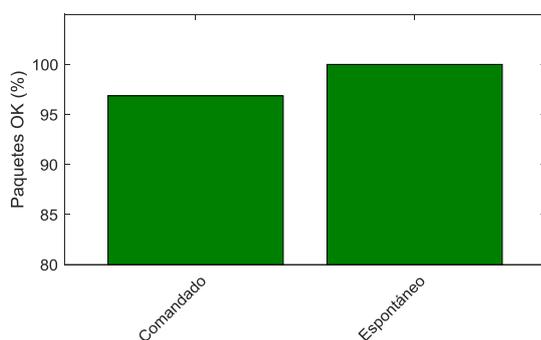


Fig. 4. Paquetes de red con un único conjunto de datos

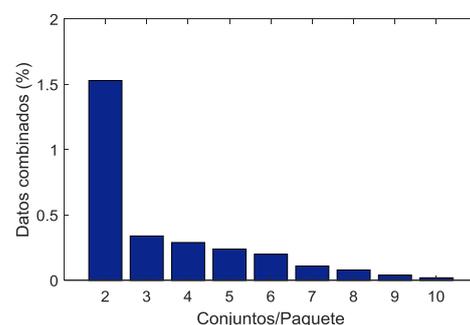


Fig. 5. Cantidad de paquetes con múltiples conjuntos

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Tal como se describe en [10]-[12], la latencia de datos es crítica y tiene diferentes requerimientos según la aplicación analizada. Los resultados obtenidos de los ensayos realizados muestran como se deben considerar, en una transmisión de sincrofases basada en TCP e internet, el efecto de los diferentes nodos de la red y los

algoritmos que los mismos ejecutan. La combinación de los conjuntos de datos de las PMUs en un único paquete de red TCP genera indisponibilidad de datos durante ciertos intervalos de tiempo, que puede ser analizado como latencia de datos para los conjuntos más antiguos que fueron combinados en dicho paquete. Por ejemplo, si 2 conjuntos de datos son combinados en un paquete de red, se obtiene una latencia mínima de 20 ms (para una transmisión de 50 mediciones/s) que puede aumentar debido a latencias propias de la red y el procesamiento de la medición; 6 conjuntos combinados producen una latencia mínima de 100 ms.

Los fenómenos rápidos y peligrosos que pueden producirse en los sistemas de potencia definen requerimientos temporales muy estrictos en aplicaciones de tipo WAMC o WAMPAC. Estos requerimientos establecen límites a los retardos en la transmisión de datos, en el procesamiento del PDC, en la toma de decisiones y en la acción de control. El retardo en la transmisión de datos, o latencia, es provocado por diferentes factores como el almacenamiento en memoria de mediciones, la distancia entre nodos y el tiempo de procesamiento. Esta latencia en sistemas WAMC/WAMPAC puede ser estimada mediante la Ec. 1.

$$T_T = T_P + T_C + \frac{P}{R} + \frac{n-1}{S} \quad (\text{Ec.1})$$

donde T_T es el retardo total, T_P es el retardo asociado a la medición y procesamiento de señal (30-100 ms), T_C es el retardo en la transmisión de datos a través del enlace de comunicaciones (15-150 ms), P es la cantidad de datos enviados (6 fasores con formato coma flotante utilizan 384 bits), R es la tasa de transmisión del enlace (100 kbps), n es el número de conjuntos de datos combinados (habitualmente 2) y S es la tasa de transmisión de sincrofasores (50 mediciones/s). A modo de ejemplo, la estimación de retardo total resulta de 185 ms aproximadamente para un enlace de comunicaciones dedicado basado en una red de fibra óptica sin combinaciones de datos [13]. Naturalmente, este retardo aumenta cuando se utiliza una conexión a internet.

En un caso límite, para la estabilidad transitoria o estabilidad de primera oscilación del sistema, la acción de control completa (desde la detección de la perturbación hasta la actuación) debe producirse antes que la variación pico del ángulo de fase del modo inter-área (habitualmente 1 a 1,5 s) [14]. Si se considera también el tiempo de apertura o cierre del interruptor, la acción de control basada en mediciones sincrofasoriales debe realizarse en 0,3 segundos, incluyendo la transmisión y procesamiento de los sincrofasores.

Estos límites temporales pueden ser utilizados como requerimientos para evaluar cada método de transmisión a través de internet según la aplicación de sincrofasores que se analice. El método comandado provee siempre datos ordenados pero con indisponibilidad temporal de los mismos, debido al Algoritmo de Nagle. El método espontáneo provee alta disponibilidad de datos, pero desordenados.

En el caso de sistemas WAMS, ambos métodos pueden ser utilizados aplicando diferentes algoritmos para el procesamiento de datos. En el caso del método comandado, los datos recibidos más antiguos en un paquete de red combinado pueden ser visualizados en simultáneo con el dato más reciente o descartados. En el caso del método espontáneo, los datos desordenados pueden ser almacenados y ordenados o descartados.

Para sistemas WAMC o WAMPAC, la disponibilidad de datos es crítica para detectar condiciones peligrosas del sistema y realizar las acciones de control correspondientes. Los algoritmos de detección y control requieren alta disponibilidad de datos y cuentan con diferentes métodos para procesar información desordenada. A partir de estas características, la Tabla III muestra la máxima latencia aceptable [12] y los métodos de transmisión sugeridos para las diferentes aplicaciones, donde S denota método *sugerido* y NS método *no sugerido*.

TABLA III. REQUISITOS DE LATENCIA Y COMPATIBILIDAD DE MÉTODOS DE TRANSMISIÓN

Fenómeno	Aplicaciones	Latencia [s]	TCP	UDP
Estimación de estados	Análisis de contingencias Flujo de potencia	1	S	S
Estabilidad transitoria	Protección de carga Protección de generación Formación de Islas	0,3	NS	S
Estabilidad de pequeña señal	Modos de oscilación Forma de los modos Amortiguamiento Actualización de PSS en línea	1	S	S
Estabilidad de tensión	Conmutación de capacitores Desconexión de cargas Formación de Islas	1 a 5	S	S

6 CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una descripción teórica y ensayos de diferentes métodos de transmisión de sincrofasores aplicados a experiencias reales de conexiones de PMUs a través de conexiones a internet comerciales cableadas.

Se han analizado los dos métodos principales de transmisión desde una PMU a un PDC, que son los más difundidos en PMUs comerciales en la actualidad. Se realizó una completa descripción de ellos, mostrando sus principales características y diferencias. También se analizaron diferentes factores propios de redes de internet comerciales que pueden afectar a la transmisión de sincrofasores.

El desempeño de cada método fue estudiado mediante dos ensayos propuestos en este trabajo que permiten analizar diferentes factores de desempeño y latencias de datos. La latencia de datos fue examinada y comparada con los requerimientos típicos de aplicaciones basadas en PMUs, realizando también sugerencias respecto al método más conveniente a ser aplicado en cada caso cuando se utiliza internet como enlace de comunicaciones.

En el caso de transmisiones de sincrofasores a través de internet, se detectó la obtención de un mejor desempeño cuando el método utilizado es el espontáneo.

A su vez, los registros de datos y su análisis confirmaron que los efectos de los algoritmos de eficiencia aplicados en cada nodo de la red (que no pueden ser controlados por el administrador del sistema de PMUs) son muy importantes en términos de latencia de datos. Esta es una situación típica de transmisión de sincrofasores a través de internet empleando TCP.

7 REFERENCIAS

- [1] A. G. Phadke and J.S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*. New York: Springer, 2008.
- [2] *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*. IEEE Std. C37.118.1. Dec, 2011.
- [3] *IEEE Guide for Phasor Data Concentrator Requirements for Power System Protection, Control, and Monitoring*. IEEE Std. C37.244. May, 2013.
- [4] *IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems*. IEEE Std. C37.118.2. Dec, 2011.
- [5] *Information technology -- Open Systems Interconnection -- Basic Reference Model: The Basic Model*. ISO Std.7498-1. Jun, 1996.
- [6] E. Hall, *Internet Core Protocols: The Definitive Guide*. Sebastopol: O'Reilly, 2000.
- [7] General Electric's Grid Solution, "MiCOM P40 Agile P847 Technical Manual", 2015.
- [8] Arbiter Systems, "MODEL 1133A Power Sentinel GPS-Synchronized Power Quality Operation Manual", Jun, 2012.
- [9] Schweitzer Engineering Laboratories, "The Synchrophasor Report. Synchrophasors and Communications Bandwidth", Apr, 2010.
- [10] M. Chenine, I. Al Khatib, J. Ivanovski, V. Maden, L. Nordström, "PMU Traffic Shaping in IP-Based Wide Area Communication", in *Proc. IEEE 2010 International Conference on Critical Infrastructure (CRIS)*, Beijing, Sept. 2010.
- [11] B. Yang, K. Katsaros, W. Chai, and G. Pavlou, "Cost-Efficient Low Latency Communication Infrastructure for Synchrophasor Applications in Smart Grids", *IEEE Systems Journal*, vol. 12 No 1 pp. 948-958, Mar. 2018.
- [12] P. Kansal and A. Bose, "Bandwidth and Latency requirements for Smart Transmission Grid Applications", *IEEE Trans. on Smart Grids*, vol. 3 No. 1 pp. 948-958, Sept. 2012.
- [13] D. Cai, "Wide Area Monitoring, Protection and Control in the future Great Britain Power System", Ph.D. dissertation, Univ. Manchester, Manchester, 2012.
- [14] C. Martinez, M. Parashar, J. Dyer, and J. Coroas, "Phasor data requirements for Real Time Wide-Area Monitoring, Control and Protection Applications", Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, Berkeley, Jan. 2005.