

Análisis del desempeño del protocolo HART sobre par trenzado en diferentes configuraciones.

Asfur Barandica López¹

(1) Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

*Universidad del Valle **

asfur.barandica@correounivalle.edu.co

Recibido 25 de Mayo de 2010. Aceptado 01 de Mayo de 2011

Received: May 25, 2010 Accepted: May 01, 2011

RESUMEN

En este artículo se hace una revisión del protocolo HART (Transductor Remoto Direccional de Alta Velocidad) con especial énfasis en su desempeño en diferentes condiciones de operación. Además de las características básicas del protocolo, se analiza la forma de operación del mecanismo de acceso al medio y sus efectos sobre el desempeño según existan un solo maestro, dos maestros, un dispositivo en modo ráfaga o combinaciones de los anteriores; el análisis teórico es contrastado con datos obtenidos en laboratorio. Finalmente se hacen algunos comentarios acerca de lo que podría ser el futuro del protocolo HART en el concierto de la automatización.

Palabras clave: Transmisores inteligentes, protocolo HART, comunicaciones industriales, control de acceso al medio.

Performance analysis of the HART protocol over twisted pair in different configurations

ABSTRACT

In this article is done a review of the HART (Highway Addressable Remote Transducer) protocol with special emphasis on his performance in different conditions of operation. Besides the protocol basic characteristics, analyzes the operation form of the medium access mechanism and his effects on the performance with only one master, two masters, a burst mode device or combinations of these; the theoretical analysis is contrasted with data obtained in the laboratory. Finally are made several comments about the future of HART protocol in the automation concert.

Keywords: Smart transmitter, HART protocol, industrial communications, medium access control.

1. INTRODUCCIÓN

Se habla en todo el mundo acerca de la automatización de las industrias de manufactura y de procesos mediante la utilización de redes en los niveles de celda, estación y máquina. Los apelativos que reciben estas redes son diversos: *fielbuses* o *buses* de campo, redes industriales (*industrial networks*), buses industriales, redes de piso de planta (*factory floor networks*), etc. Las redes industriales, en esencia, permiten que múltiples dispositivos utilicen el mismo medio físico para intercambiar información en formatos digitales; se logra con ello disminuir el cableado, incrementar la cantidad y calidad de información que puede entregar cada aparato, facilitar las tareas de configuración y diagnóstico de los mismos, permitir rápida reconfiguración del sistema y, en algunos casos, flexibilizar la asignación de tareas de control entre los diferentes dispositivos conectados a la red.

El propósito fundamental del protocolo HART no era la conformación de redes. En su génesis, sus creadores idearon la forma de dotar a los equipos convencionales cuya salida es analógica en un rango de 4 a 20 mA, con la capacidad de entregar y recibir información adicional por medio de una señal digital transportada en forma simultánea y sobre los mismos hilos de la señal analógica; para poder acceder a la señal digital, debía utilizarse una terminal de mano. Los usuarios aceptaron esta iniciativa, teniendo en cuenta que era perfectamente compatible con sus sistemas instalados, y por el contrario, rechazaron en principio cualquier formato completamente digital que los amarrara a un fabricante particular. Así, las técnicas digitales permitían almacenar dentro del equipo información sobre el fabricante, el sensor, el proceso y las variables, además de incluir técnicas sencillas de procesamiento de la señal, lo que impulsó de forma dramática la masificación del protocolo.

En este artículo se presentan de forma breve las características básicas del protocolo HART, se analiza el desempeño del protocolo en diferentes condiciones de operación y finalmente se hace una

discusión sobre lo que podría ser el futuro del protocolo HART.

1.1. Principales Características del protocolo HART

En el ambiente de la automatización la mayoría de los ingenieros e instrumentistas saben que HART es un protocolo de comunicaciones que superpone información digital a la señal de 4-20 mA usada por transmisores y actuadores propios del control de procesos, como se ilustra en la Fig. 1. Sus características más difundidas son:

- La información digital se modula en frecuencia (FSK-Frecuency Shift Keying) con 1200 Hz para representar el "1" y 2200 Hz para el representar el "0". Un adecuado filtrado evita que la señal digital interfiera sobre la información analógica.
- La transferencia de información se realiza de forma asíncrona a 1200 bps. Cada carácter incluye bit de inicio, 8 ocho bits de datos, bit de paridad impar y un bit de parada, para un total de 11 bits por carácter. Una red HART se puede conectar al puerto serial o USB de un PC por medio de un dispositivo de interfaz, conocido como un modem HART (Fig. 2).

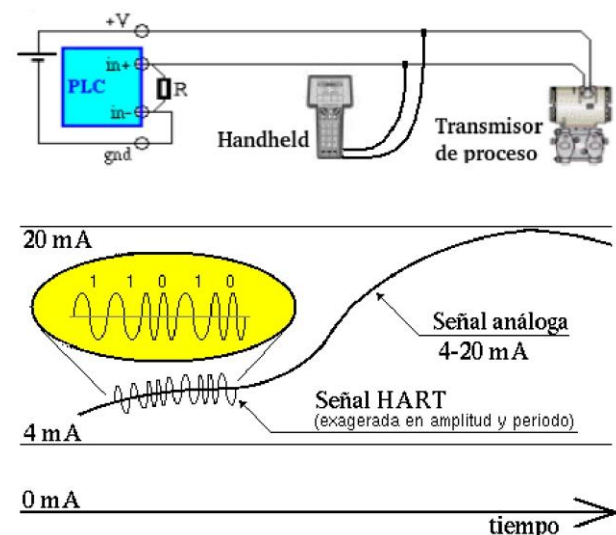


Fig. 1. Señal digital superpuesta a la analógica.

- La trama consta de un preámbulo para efectos de sincronización de al menos 5 bytes, un carácter delimitador de inicio, un campo de dirección de 5 caracteres (un solo carácter para el comando 0), un carácter que indica el comando o servicio, un byte para el conteo de los datos, los datos asociados al servicio y, finalmente, un byte de chequeo de errores.
- A pesar de ser un protocolo del tipo maestro-esclavo, es posible la coexistencia de dos maestros, característica útil en la industria, dado que un operario puede conectar una terminal de mano al instrumento de campo en cualquier momento para cambiar sus parámetros o verificar su funcionamiento, mientras se mantiene la comunicación con un sistema supervisor.
- Los comandos se clasifican en tres categorías. Los comandos universales y de práctica común están completamente especificados por la Fundación de Comunicación HART (HART *Communication Foundation* – HCF); los universales son de implementación obligatoria mientras que los de práctica común son opcionales. Los comandos específicos son definidos por el fabricante para cada equipo particular.

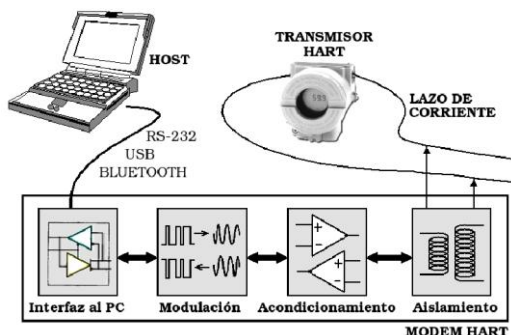


Fig. 2. Estructura de un modem HART.

- Al conectar varios dispositivos en red, la rata de actualización de las variables disminuye conforme aumenta la cantidad de dispositivos.

Las características del protocolo HART lo hacen especialmente útil durante la configuración inicial del equipo y durante rutinas de mantenimiento, dado que permite acceder a todos los parámetros y suministra información sobre el estado del aparato. Salvo las limitaciones impuestas por la rata de actualización de las variables, no existe impedimento para mantener comunicación permanente entre el equipo de campo y un *host* para efectos de mantenimiento, supervisión o para el control del proceso.

Entre las características menos conocidas o que son causa de confusión, están:

- La capacidad de transferencia de datos en modo ráfaga (*burst mode*), en el cual el esclavo transmite información sin solicitud previa por parte del maestro. Su implementación es opcional (por medio de comandos de práctica común) y sólo un dispositivo de la red puede estar operando en este modo.
- La posibilidad de colocar múltiples dispositivos en paralelo para conformar una red, en la cual cada equipo puede ser configurado y monitoreado independientemente, además de suministrar las respectivas variables de proceso.
- La capacidad de incluir algoritmos de control como PID en los dispositivos de campo. En tal caso, la señal de 4-20 mA que entrega el dispositivo de campo está dirigida al elemento actuador. Pueden conectarse varios lazos de control en red, como se muestra en la Fig. 3. Esta característica es implementada por medio de comandos específicos.
- La capacidad de comunicar en forma permanente variables adicionales a la variable primaria. Se pueden seleccionar hasta 4 variables dinámicas entre todas las variables de dispositivo. Las primeras se pueden conocer con comandos universales, mientras que las segundas requieren el uso de comandos de práctica común. La Fig. 4

ilustra la relación entre estos dos tipos de variables.

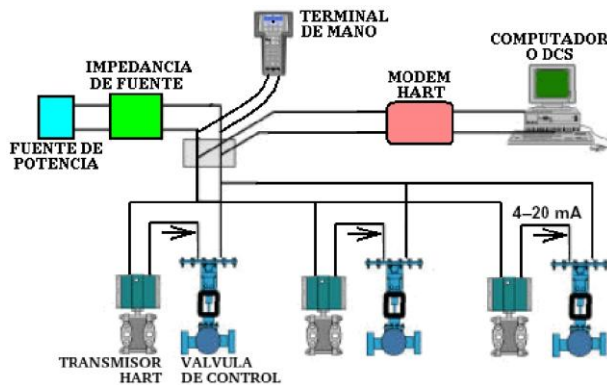


Fig. 3. Múltiples lazos de control HART.

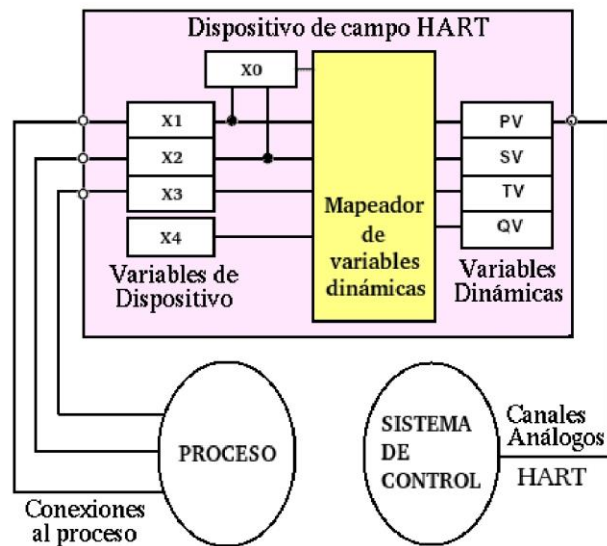


Fig. 4. Variables dinámicas y de dispositivo.

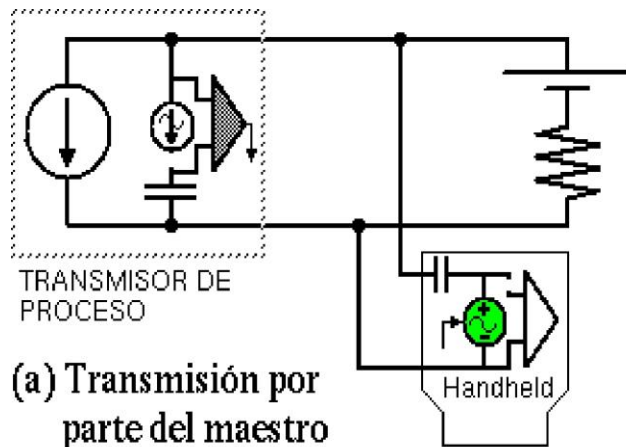


Fig. 5. Transmisión de maestro y esclavo.

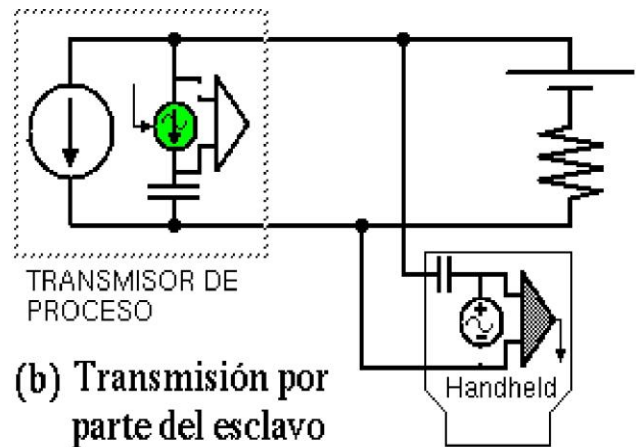
- La aparición de HART inalámbrico en la revisión 7 del protocolo, con capa física basada en la norma IEEE STD 802.15.4-2006, lo que garantiza chips de bajo costo y múltiples fabricantes. Esta capa física permite la conformación de redes tipo malla, con transmisión de datos a razón de 250 kbps y una carga útil de hasta 127 bytes [1].

1.3. Forma de operación del protocolo con transmisores de proceso

Durante la emisión de la trama de solicitud por parte del maestro (*handheld*, PC, PLC u otros), se generan las señales modulando el voltaje. Del análisis por leyes de Kirchoff de la Fig. 5(a) se puede verificar que las variaciones de voltaje aparecen en terminales del dispositivo de campo, ya sea que el maestro se conecte en paralelo con éste o con la resistencia del lazo. Para la generación de la respuesta, el transmisor de proceso superpone la corriente modulada a la de 4-20 mA, lo cual ocasiona también variaciones en el voltaje que pueden ser detectadas por el maestro, lo cual se aprecia en la Fig. 5(b).

1.3. Técnica de control de acceso al medio

En una red HART pueden convivir dos maestros, un dispositivo esclavo en modo ráfaga y un número de



esclavos que no estén en modo ráfaga. Un esclavo en modo ráfaga se comporta como un maestro, dado que puede tomar la iniciativa para enviar mensajes sin solicitud previa. Todos los posibles casos serán considerados a continuación bajo el supuesto de que los mensajes de solicitud constan de 14 bytes y los de respuesta de 21 bytes (lo cual concuerda con el formato de trama para el comando 1 con 5 bytes de preámbulo) y que no se presentan errores de comunicación.

La definición de la subcapa de control de acceso al medio (MAC- *Medium Access Control*) [2] presenta los diagramas que aparecen en la Fig. 6. El primero corresponde a las reglas de asignación del medio en ausencia de un dispositivo en modo ráfaga y el segundo, cuando está presente uno de tales dispositivos. A manera de ejemplo con el diagrama inferior, el maestro primario envía un mensaje tipo solicitud (STX1), con lo cual el derecho a usar el medio pasa al esclavo direccionado en el mensaje. La trama del esclavo es del tipo respuesta (ACK1), y hace que el derecho a usar el medio sea del dispositivo en modo ráfaga, el cual envía su trama tipo ráfaga (BACK2), después de la cual el derecho a usar el medio es del maestro secundario.

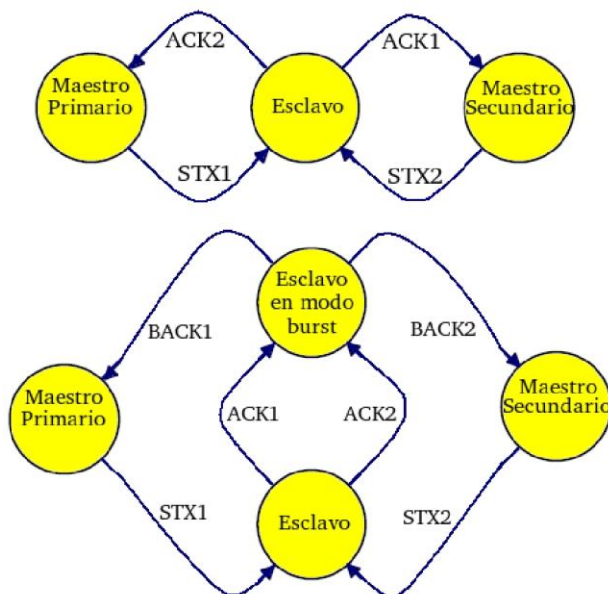


Fig. 6. Reglas de asignación del medio.

La especificación indica que el mecanismo de acceso es paso de testigo implícito; esto significa

que en realidad el testigo no existe en forma de una secuencia binaria particular, como sí ocurre con el paso de testigo clásico. El testigo es indicado por el tipo de mensaje y la dirección del maestro, lo que significa que la operación correcta del MAC depende de la identificación de:

- actividad sobre la red;
- el tipo de trama y la dirección del maestro para determinar el paso del testigo; y
- el final de un mensaje, para saber cuándo comenzar una nueva transmisión.

La ausencia o corrupción de cualquiera de los mensajes mostrados en los diagramas produciría la pérdida del testigo, razón por la cual son definidas ventanas de tiempo para la emisión de mensajes de tipo solicitud (STX), respuesta (ACK) o ráfaga (BACK).

Los tiempos máximos para generar los mensajes son determinados por las constantes HOLD, STO, RT1(primario), RT1(secundario) y RT2, que aparecen en la Fig. 7.

2. METODOLOGÍA

2.1 . Análisis de desempeño en diferentes configuraciones

Con los diagramas de la Fig. 6, los diagramas de estados para operación de maestros [2] y esclavos y los valores de los tiempos establecidos para la capa física FSK, se ha construido el diagrama de la Fig. 7, el cual ilustra todas las posibles situaciones en una red HART con actividad continua o "sincronizada", de acuerdo con la definición de la especificación.

Caso (a): actividad continua de los dos maestros.

Acatando las reglas de acceso al medio, los maestros se alternan el uso del medio sin ningún tipo de privilegios. El tiempo de actualización de una variable en cualquiera de los maestros estaría dado por:

$$T_{ac} = 2.T_{stx} + 2.T_{ack} + 2.T_{as} + 2.T_{sa}$$

Los tiempos que toma el envío de las tramas de los tipos STX, ACK y BACK son:

$$T_{stx} = (11 \text{ bits/carácter} * 14 \text{ caracteres}) / 1200 \text{ bits/s} = 128 \text{ ms}$$

$$T_{ack} = T_{back} = (11 \text{ bits/carácter} * 21 \text{ caracteres}) / 1200 \text{ bits/s} = 193 \text{ ms}$$

T_{as} es el tiempo permitido al maestro que obtiene el testigo para que haga uso del medio y no puede ser superior a 20 ms. T_{sa} es el tiempo disponible para que un esclavo responda la solicitud hecha por un maestro y no puede superar los 256 ms.

Se llega entonces a una solución optimista cuando T_{as} y T_{sa} se consideran nulos y a una pesimista cuando se toman sus valores máximos.

$$T_{ac} \text{ mín} = 642 \text{ ms}$$

$$(\text{Fac} \text{ máx} = 1/T_{ac} \text{ mín} = 1.56 \text{ sps})$$

$$T_{ac} \text{ máx} = 1194 \text{ ms}$$

$$(\text{Fac} \text{ mín} = 1/T_{ac} \text{ máx} = 0.84 \text{ sps})$$

Si bien el tiempo T_{as} puede ser muy cercano a cero, T_{sa} en la mayoría de los casos no lo es, debido a que los esclavos generalmente tienen recursos más limitados y deben efectuar procedimientos medianamente complejos para generar una respuesta. Asumiendo $T_{as}=0$ y $T_{sa}=128 \text{ ms}$, un tiempo de actualización que aproxima mejor las situaciones reales sería:

$$T_{ac} = 898 \text{ ms}$$

$$(\text{Fac} = 1/T_{ac} = 1.11 \text{ sps})$$

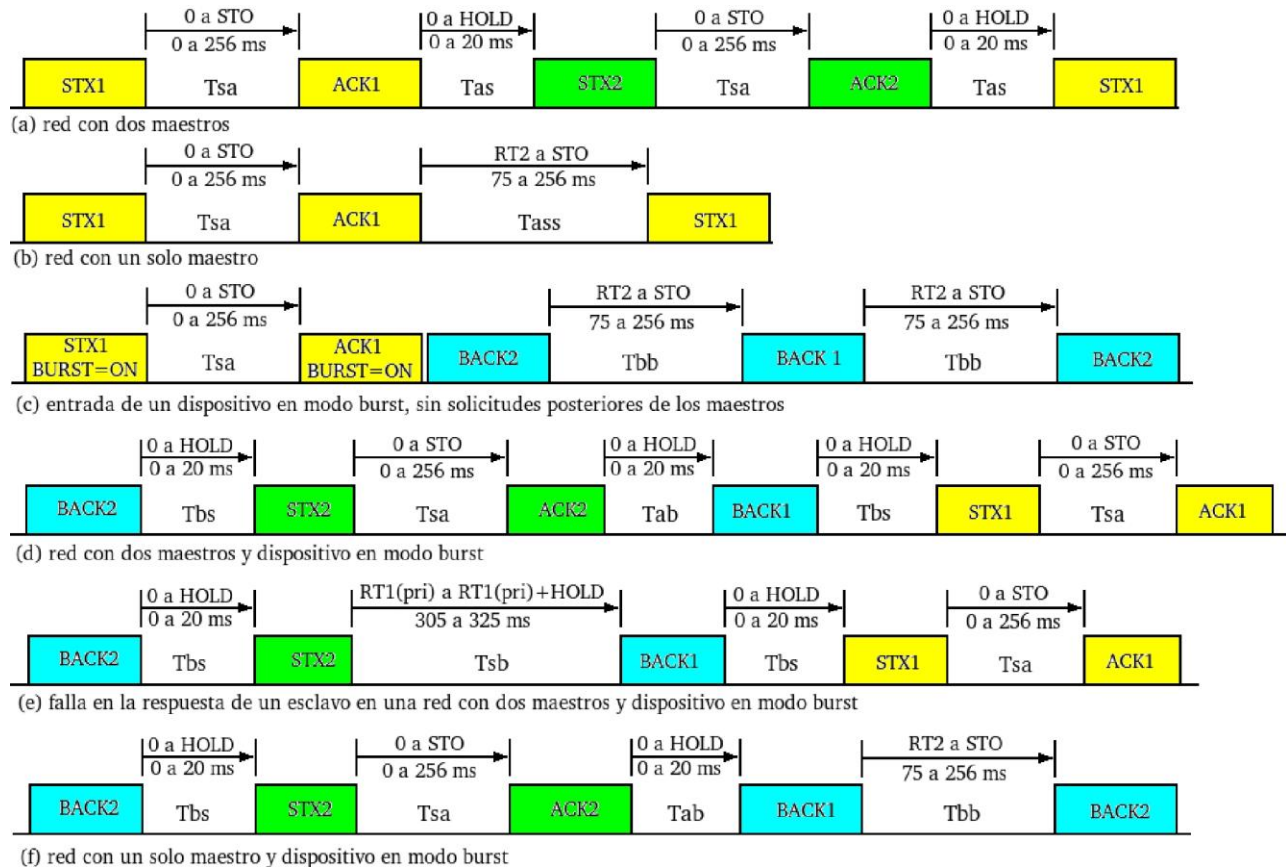


Figura 7. Temporizaciones en diferentes condiciones de operación de una red HART.

Caso (b): actividad continua de un solo maestro.

En este caso el tiempo de actualización de una variable en el maestro está dado por:

$$T_{ac} = T_{stx} + T_{ack} + T_{sa} + T_{ass}$$

Una vez terminada la respuesta del esclavo, el testigo es propiedad del otro maestro durante el tiempo HOLD. Para el caso considerado, se generará un *time-out* ante la ausencia de éste. El tiempo T_{ass} es necesariamente superior a HOLD y la norma lo establece en 75 ms como mínimo. Por tanto:

$$T_{ac} \text{ mín} = 396 \text{ ms} \quad (\text{Fac} \text{ máx} = 2.53 \text{ sps})$$

$$T_{ac} \text{ máx} = 833 \text{ ms} \quad (\text{Fac} \text{ mín} = 1.20 \text{ sps})$$

Se puede esperar que el maestro tenga lista su nueva solicitud al cabo de 75 ms. El tiempo de actualización real estaría alrededor de:

$$T_{ac} = 524 \text{ ms} \quad (\text{Fac} = 1.91 \text{ sps})$$

Caso (c): entrada en modo ráfaga sin solicitudes posteriores de los maestros.

La entrada en modo ráfaga se produce cuando un maestro envía a un esclavo el comando 109. El esclavo debe generar el mensaje de respuesta al comando e inmediatamente después, enviar su primera trama tipo ráfaga. La especificación recomienda no mediar más de un tiempo de bit entre estas dos tramas, debido a que los maestros deben saber lo más rápido posible que un esclavo ha empezado a operar en este modo, lo que representa el cambio del diagrama superior al inferior de la Fig. 6.

El desempeño de un esclavo en modo ráfaga sin solicitudes de maestros es:

$$T_{ac} = T_{back} + T_{bb}$$

$$T_{ac} \text{ mín} = 268 \text{ ms} \quad (\text{Fac} \text{ máx} = 3.74 \text{ sps})$$

$$T_{ac} \text{ máx} = 449 \text{ ms} \quad (\text{Fac} \text{ mín} = 2.23 \text{ sps}).$$

Para hacer una mejor aproximación a la realidad se tomarán 128 ms como intervalo requerido para la generación de una nueva trama, lo que produce:

$$T_{ac} = 321 \text{ ms} \quad (\text{Fac} = 3.12 \text{ sps})$$

Caso (d): dos maestros y dispositivo en modo ráfaga.

Se constituye en el caso más crítico posible si no se considera la presencia de fallas. La velocidad de actualización de la variable del dispositivo en modo ráfaga es exactamente el doble de la de las variables de los maestros, así que se calculará la primera.

$$T_{ac} = T_{back} + T_{stx} + T_{ack} + T_{bs} + T_{sa} + T_{ab}$$

Siguiendo la misma mecánica:

$$T_{ac} \text{ mín} = 514 \text{ ms} \quad (\text{Fac} \text{ máx} = 1.95 \text{ sps})$$

$$T_{ac} \text{ máx} = 810 \text{ ms} \quad (\text{Fac} \text{ mín} = 1.23 \text{ sps})$$

Tomando T_{bs} y T_{ab} nulos y T_{sa} como 128 ms resulta:

$$T_{ac} = 642 \text{ ms} \quad (\text{Fac} = 1.56 \text{ sps})$$

Caso (e): dos maestros y dispositivo en modo ráfaga con ausencia de respuesta del esclavo.

Con este caso se quiere observar el efecto de la ausencia de respuesta por parte de un esclavo, bajo condiciones similares a las del caso (e). La velocidad de actualización de la variable del dispositivo en modo ráfaga ya no se efectúa a una rata constante, pues de acuerdo con la Fig. 7, cuando el maestro secundario hace su solicitud, la ausencia de respuesta modifica el tiempo entre tramas tipo ráfaga. Se puede entonces obtener una velocidad media así:

$$T_{ac} = T_{back} + T_{stx} + T_{bs} + \frac{1}{2}(T_{ack} + T_{sa} + T_{ab} + T_{sb})$$

$$T_{ac} \text{ mín} = 570 \text{ ms} \quad (\text{Fac} \text{ máx} = 1.76 \text{ sps})$$

$$T_{ac} \text{ máx} = 733 \text{ ms} \quad (\text{Fac} \text{ mín} = 1.37 \text{ sps})$$

Con la velocidad de respuesta supuesta para los esclavos:

Tac = 634 ms (Fac = 1.58 sps)

No hay decremento en la rata de actualización del dispositivo en modo ráfaga debido a que el tiempo adicional de espera es compensado por el tiempo de la trama de respuesta no enviada.

Caso (f): un solo maestro y dispositivo en modo ráfaga.

En este caso la velocidad de actualización de la variable del dispositivo en modo ráfaga tampoco es constante, pero en promedio, duplica a la de la variable del maestro presente.

$$Tac = Tback + \frac{1}{2} (Tstx + Tack + Tbs + Tsa + Tab + Tbb)$$

Tac mín = 391 ms (Fac máx = 2.56 sps)

Tac máx = 630 ms (Fac mín = 1.59 sps)

Con la velocidad de respuesta supuesta para los esclavos:

Tac = 455 ms (Fac = 2.20 sps)

La Tabla 1 resume las frecuencias de actualización en muestras por segundo de los casos analizados. Las columnas Fac máx y Fac mín muestran las frecuencias de actualización máxima y mínima de la variable que más se actualiza en cada caso (sombreadas en la tabla). Bajo la columna Fac real contiene las frecuencias de actualización estimadas para la variable ráfaga y las variables de los maestros, según el caso.

2.2 . Verificaciones experimentales

Los experimentos realizados en Laboratorio de Comunicaciones Industriales de la Universidad del Valle, usando el transmisor de caudal Siemens SITRANS FM MID InterMag 2, el transmisor de temperatura SMAR TT301, el transmisor de nivel Drexelbrook 509-15-X09, el transmisor de temperatura ABB-TH02, el transmisor de presión Moore 340D y el software desarrollado en el mismo laboratorio [3], permitieron contrastar algunos de los valores reales con los supuestos en la discusión

anterior. Estos datos se consignan en la última columna de la Tabla 1.

3 . RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas de laboratorio arrojan como conclusiones las siguientes:

- en general los tiempos de respuesta de los esclavos a las solicitudes del maestro (Tsa) son menores a los 128 ms considerados en los cálculos, ubicándose entre 0 y 60 ms;
- en ningún caso los tiempos permanecen constantes; es así como un mismo equipo puede generar su respuesta antes de que se desactive la portadora de la solicitud o pueden transcurrir hasta 60 ms antes de empezar a transmitirla;
- el tiempo entre tramas tipo ráfaga (Tbb) tiene una variabilidad menor. Sólo el transmisor Siemens tiene habilitada esta característica y el tiempo entre tramas tipo ráfaga estuvo entre 115 y 120 ms .

El desempeño del caso (a) con dos maestros, es 16% superior al del (b) en el que hay un solo maestro. Sería entonces una buena medida que el programa del *host* tuviera como opción el comportamiento simultáneo (no excluyente) como maestro primario y secundario, para habilitarlo en aquellos casos en los que se tiene la seguridad de que no va a ser usada una terminal de mano en campo o cualquier otro tipo de maestro secundario. Esta situación se repite cuando hay un dispositivo en modo ráfaga, pues se podría igualar la rata de actualización de la variable del maestro a la del dispositivo en modo ráfaga (1.56 sps en el caso (d) de la Tabla 1).

3.1. Panorama del protocolo HART

A pesar de tener la mayor base instalada de equipos en todo el mundo [4][5], el protocolo HART no ha sido utilizado en todo su potencial y los usuarios

siguen con la percepción de que es tan solo una herramienta útil para la configuración inicial y para verificación esporádica de equipos. Han sido grandes pero infructuosos los esfuerzos que ha hecho la HCF para erradicar esta idea y ya se nota un mayor crecimiento de otros protocolos como Foundation Fieldbus y Profibus -PA en aplicaciones en las que HART es una opción viable.

Buscando subsanar una de las principales deficiencias del protocolo, la cual es su baja velocidad, y simultáneamente tratando de eliminar todos los mitos a su alrededor [6], que están favoreciendo a los protocolos competidores, la HCF omitió un escalón en la evolución del protocolo y determinó la definición de la capa física inalámbrica, con todas las modificaciones que ello implica en las demás capas. Aunque drástica, esta decisión obedece a la marcada tendencia del mercado de la electrónica de consumo e industrial hacia el uso de tales tecnologías.

La aparición de WirelessHART como el primer protocolo inalámbrico estandarizado podría ser la oportunidad para modificar su decreciente posicionamiento, mas sin embargo, la premura por lanzar WirelessHART para competir con proveedores de transmisores inalámbricos, engendró su incompatibilidad con la familia de estándares ISA SP100, aún en desarrollo, la cual tiene como objetivo el establecimiento de normas y otro tipo de información que definan procedimientos para implementar sistemas

inalámbricos en los ambientes de automatización y control, enfocados al nivel de piso de planta [7].

La resistencia natural de los usuarios a introducir tecnologías inalámbricas por cuestiones de confiabilidad y seguridad, es otro factor que juega en contra de WirelessHART, dado que se da tiempo a la aparición de nuevos protocolos, algunos de los cuales serán compatibles con SP100. Muy seguramente, la HCF tendrá que modificar la especificación para lograr también esta compatibilidad.

Al margen de todos los problemas que pueda afrontar el protocolo frente al mercado, es previsible que además de mantenerse, tome nuevo impulso con la tecnología inalámbrica debido a que representa una solución confiable y abierta, y detrás de su desarrollo hay grandes inversiones por parte de gigantes de la automatización industrial como Emerson Process Management, Siemens, Yokogawa, ABB y Honeywell.

4. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

HART representa una creativa forma de incluir técnicas digitales en sistemas analógicos, que facilita las tareas de configuración, calibración, diagnóstico, mantenimiento y administración de equipos de campo para control de procesos.

Tabla 1. Resumen de frecuencias de actualización de variables en sps.

Caso	Fac máx	Fac real				Fac mín	Con datos de laboratorio
		Var. burst	Var. maestro 1	Var. maestro 2	Total		
a	1.56	--	1.11	1.11	2.22	0.84	1.25-1.47
b	2.53	--	1.91	--	1.91	1.20	2.19-2.52
c	3.74	3.12	--	--	3.12	2.23	3.03-3.30
d	1.95	1.56	0.78	0.78	3.12	1.23	1.63-1.81
e	1.76	1.58	0.79	--	2.37	1.37	1.58-1.66
f	2.56	2.20	1.10	--	3.30	1.59	2.16-2.31

La principal limitación del protocolo es la velocidad de comunicación que, como se ha demostrado, en el mejor de los casos y bajo condiciones ideales permite obtener 3.7 muestras por segundo de una variable.

La tecnología HART ha evolucionado permanentemente desde su creación en 1986, a tal punto que la revisión 7 del protocolo establece las condiciones necesarias para la conformación de redes inalámbricas en entornos industriales. Se espera que esta nueva alternativa impulse nuevamente el uso del protocolo y se convierta en competencia real para Foundation Fieldbus y Profibus PA.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] *Wireless HART Technical Datasheet*, HCF_LIT-89. Revision 1.0B. HCF, 2007.
http://www.hartcomm2.org/hart_protocol/wireless_hart/wirelesshart_datasheet.pdf

[2] *HART Protocol Specification: Data Link Layer Specification*, Revision 8.0, HCF, 2001.

[3] Barandica A., Arroyave F.J., Rodríguez M.A., *Aplicación software para el uso del protocolo HART de comunicaciones industriales*, UIS Ingenierías, Vol. 7, No. 2, p 95, Abril 2009.

[4] *Achieving Digital Integration Using the HART Protocol*, HCF, 2002.
www.cbeng.com/resources/whitepaper/BasicsofHART.pdf

[5] Richard Caro, *Fieldbus: Where do we stand?*, Intech, Vol. 54, No. 4, p 38, Abril 2007.

[6] Ronald B. Helson, Vasant V. Chaphekar, *HART to Enterprise Connectivity*, ISA Western Regional Conference & Exhibition, 2002.

[7] Daniel Sexton, *SP100.11a Overview*, ISA, 2007.
<http://tinyos.stanford.edu/ttx/2007/viewgraphs/standards-sp100.pdf>