



Premio Turing 2022:

# Robert Metcalfe, coinventor de Ethernet, el estándar para redes de área local



**JOSÉ URZÚA**

Magíster en Ciencias mención Computación por la Universidad de Chile e ingeniero civil en computación por la Universidad de Chile. Profesor Experto Externo del Departamento de Ciencias de la Computación de la Universidad de Chile y Académico Jornada Parcial de la Facultad de Economía de la Universidad de Chile. Jefe del Área de Desarrollo de Sistemas de NIC Chile. Sus intereses incluyen aplicaciones web y tecnologías relacionadas, desarrollo de aplicaciones en red, Sistema de Nombres de Dominio (DNS) y el desarrollo de Internet en general. Lideró el Grupo de Trabajo Técnico de LACTLD (Latin American and Caribbean Top Level Domains) y actualmente lidera el desarrollo de proyectos colaborativos de la región.

 <https://jose.cl>

 [jose@urzua.cl](mailto:jose@urzua.cl)

 @jourzua



**RESUMEN.** Hace 24 años, mientras era alumno de la carrera de Ingeniería en computación, cursé un ramo que me presentó la programación de software de sistemas y, en particular, la programación de aplicaciones que funcionan en red. Creo que fue uno de los ramos que confirmó mi interés en la computación y en desarrollar aplicaciones que usan una red de datos para intercambiar información o ejecutar tareas de forma remota o lo que se nos pudiese ocurrir. En estas dos décadas y media creo que hemos tenido tantos avances, que casi de forma natural hoy asumimos que la conexión a una red de datos es un servicio omnipresente, disponible en cualquier dispositivo y que nos permite estar conectados, generando y recibiendo datos sin interrupción, incluso mientras dormimos. ¿Quiénes crearon lo necesario para permitirnos usar las redes tal como las usamos hoy? Entre estos creadores está Robert “Bob” Metcalfe. Su nombre lo leí por primera vez cuando tuve mis inicios en la docencia en cursos de Redes de Computadores, su trabajo era descrito en las fuentes bibliográficas y se reconocía como el coinventor de Ethernet, la tecnología desarrollada hace 50 años que sigue siendo el estándar de red más popular del mundo, el cual permite conectar computadores personales y dispositivos en una red local y con Internet global.

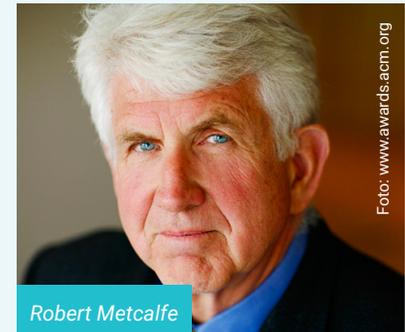
## Ethernet

Cuando usted está conectado a la red de su lugar de estudio, trabajo o vivienda, lo más probable es que esté haciendo uso de Ethernet, el estándar para redes de área local. La historia de Ethernet, comienza a principios de 1970 en Hawái con el investigador Norman

Abramson y sus colegas de la Universidad de Hawái, quienes intentaban conectar a usuarios de islas remotas al computador principal de Honolulu con su sistema ALOHANET. Considerando la poca factibilidad para conectar cables bajo el océano Pacífico, buscaron una solución diferente usando terminales de radio de dos frecuencias: un canal ascendente en dirección al computador central y un canal descendente desde el computador central. Cuando un usuario deseaba comunicarse con el computador central, usaba el canal ascendente para enviar un paquete de datos, si nadie más estaba usando el canal, probablemente el paquete saldría, sería recibido y en el canal descendente recibiría su confirmación. Si había congestión en el canal ascendente, el terminal del usuario detectaba la falta de confirmación y realizaba otro intento de envío. Considerando que el canal de confirmaciones (canal descendente) sólo era usado por el computador central, no existían colisiones en él. Este sistema funcionaba muy bien en condiciones de poco tráfico, pero si el tráfico ascendente aumentaba, el sistema dejaba de funcionar.

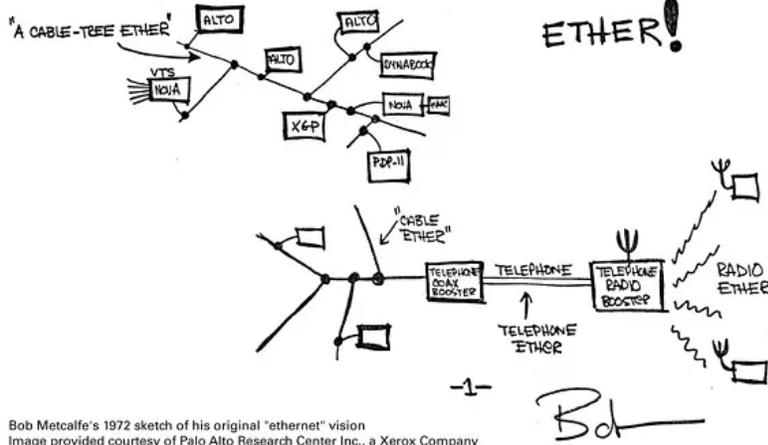
En esos años, Robert Metcalfe estaba realizando sus estudios de doctorado en la Universidad de Harvard trabajando para ARPANET (Advanced Research Projects Agency Network) y en una visita a la casa de Steve Crocker (inventor de los RFC de Internet) leyó en una revista científica sobre la red ALOHA y el trabajo de Norm Abramson. En ese momento, el problema principal al que se enfrentaban era cómo compartir el acceso a la red entre muchos usuarios. En el caso de las redes telefónicas, el problema se abordó de la forma más simple: una conexión entre dos partes bloqueaba el canal de comunicación durante la duración de la llamada; esto implicaba que ese canal no pudiese ser usado por otros usuarios, incluso si no se estaba usando en su máxima capacidad. Para las conversaciones telefónicas puede no ser un gran problema porque no se quedan en silencio por mucho

### Ganador del Premio Turing 2022



tiempo, pero los computadores se comunican en ráfagas cortas que pueden estar separadas por largos periodos de tiempo sin comunicación.

Después de graduarse en Harvard, Metcalfe viajó a Hawái para conocer y trabajar un verano con Abramson. Después de esta experiencia, comenzó a trabajar en el Centro de Investigación de Palo Alto de Xerox (PARC). En este lugar, conoció el desarrollo de los primeros computadores personales que trabajaban aislados, por lo que aplicó el conocimiento del trabajo de Abramson y junto a su colega David Boggs, diseñó e implementó la primera red de área local. A este trabajo lo bautizaron con el nombre Ethernet por la teoría física (hoy abandonada) según las cuales las ondas electromagnéticas viajaban por un fluido llamado éter que se suponía llenaba el espacio. En este caso, el éter era el cable coaxial de más de 2.5 kilómetros de largo con repetidoras cada 500 metros. El sistema podía conectar hasta 256 máquinas por medio de transceptores (dispositivos que pueden transmitir y recibir comunicaciones) acoplados al cable (ver Figura 1). A diferencia de ALOHANET, en Ethernet los computadores escuchaban el cable antes de transmitir para determinar si alguien más estaba transmitiendo. Si alguien estaba transmitiendo, el computador esperaba a que terminara dicha transmisión. De esta forma, se aumentaba la eficiencia de la red porque se evitaba interferir con las



Bob Metcalfe's 1972 sketch of his original "ethernet" vision  
Image provided courtesy of Palo Alto Research Center Inc., a Xerox Company

Actualmente, Ethernet es el medio principal de las comunicaciones de red por cable en todo el mundo.

los transmisores y se espera un tiempo aleatorio antes de reintentar transmitir. En caso de colisión en la transmisión, se duplica el tiempo de espera. De esta forma se lograba separar las transmisiones que están compitiendo por el canal y se da la oportunidad de lograr transmitir exitosamente. En la Figura 2 se puede ver la arquitectura original de Ethernet.

Figura 1. Diagramas hechos a mano en la primera página del memorando de mayo de 1973 en el que Metcalfe expuso Ethernet.

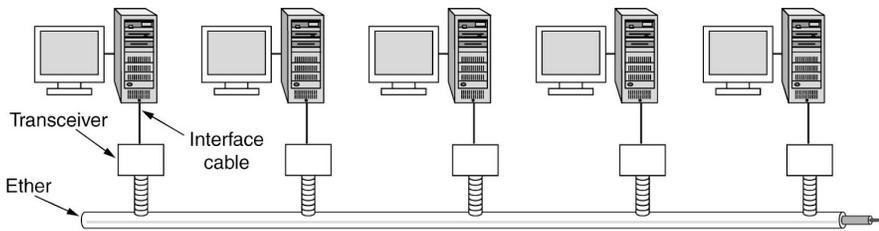


Figura 2. Arquitectura original de red Ethernet.

## Estandarización

Después de dejar Xerox en 1979, Metcalfe siguió guiando el desarrollo de Ethernet y trabajando para garantizar la adopción de estándar abierto en la industria. Lideró un esfuerzo de Digital Equipment Corporation (DEC), Intel y Xerox para desarrollar una especificación de Ethernet de 10 Mbps y fue llamado estándar DIX. Se formó el comité IEEE 802 con el objetivo de establecer un estándar de red de área local (LAN) y una ligera variante de DIX se convirtió en el primer estándar IEEE 802.3 que sigue vigente en la actualidad.

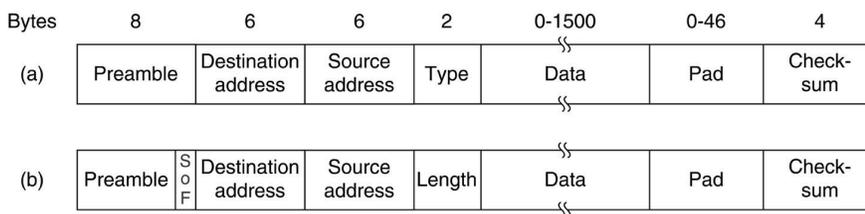


Figura 3. Formato de la trama Ethernet. (a) Estándar DIX (b) Estándar IEEE 802.3.

transmisiones existentes. En ALOHA-NET era imposible detectar la transmisión de otra terminal en una isla distante; este problema lo resolvía Ethernet al usar un cable único de conexión.

Otra mejora considerada en Ethernet, es para el caso en que dos o más

computadores están esperando para transmitir y al mismo tiempo determinan que pueden hacerlo. Para estos casos, consideraron que cada computador escuche el cable durante su propia transmisión con el fin de detectar interferencias. En caso de detectarla, se envía una señal para alertar a todos

La estructura de una trama (*frame*) original DIX contiene dos direcciones, una para el destino y otra para el origen (ver Figura 3 (a)). En el estándar de banda base de 10 Mbps usan sólo direcciones de 6 bytes. Se distingue entre direcciones ordinarias y direcciones de grupo, de acuerdo al valor de bit de mayor orden de la dirección de destino, con valor 0 para direcciones ordinarias o 1 para direcciones de grupo. Estas direcciones de grupo permiten que varios computadores escuchen en la misma dirección y cuando una trama se

Desde el año 2006 existe “Ethernet Alliance”, un consorcio global de proveedores de sistemas y componentes, expertos de la industria y profesionales universitarios y gubernamentales comprometidos con la expansión de la tecnología Ethernet.

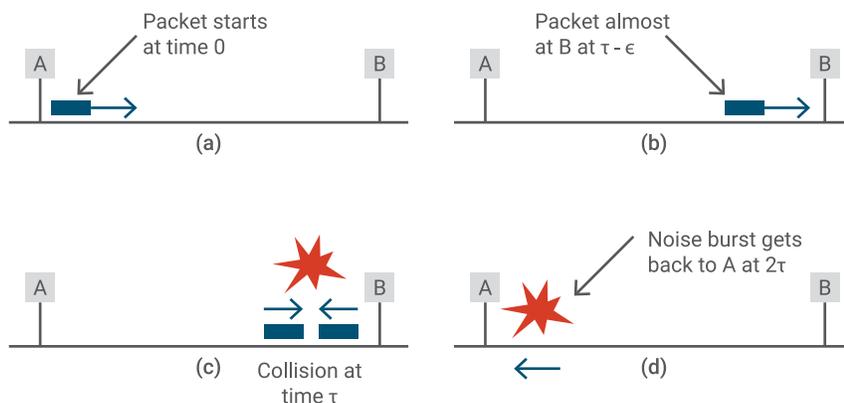


Figura 4. Detección de una colisión.

envía a una dirección de grupo, todas las estaciones del grupo la reciben. Este tipo de envío se llama multidifusión (*multicast*). También se consideran envíos para difusión (*broadcast*), en estos casos la dirección de destino consiste sólo en bits con valor 1, de esta forma, la trama es aceptada en todos los computadores de la red.

En el direccionamiento de una trama Ethernet es interesante la diferenciación de direcciones locales y globales. Las direcciones locales son asignadas por cada administrador de red y no son conocidas fuera de la red. Por otro lado, las direcciones globales son asignadas por IEEE y deben asegurar que no existan dos computadores con la misma dirección global en el mundo. Considerando que se usan 6 bytes para la dirección de destino, esto equivale a 48 bits (desde el bit 0 al bit 47), al usar el bit de mayor orden (bit 47) para diferenciar entre direcciones ordinarias o de grupo y al usar el bit 46 para diferenciar entre

direcciones locales y globales, quedan 46 bits (del 0 al 45) disponibles para direcciones globales (de orden de  $7 \times 10^{13}$  direcciones). De esta forma, se puede indicar la dirección exclusiva de cualquier otra estación usando el número correcto de 48 bits.

La trama Ethernet (ver Figura 3 (a)) también considera un campo que indica el tipo, el cual informa al receptor qué es lo que debe hacer. Esto permite usar múltiples protocolos y el receptor identifica el proceso al cual debe entregar la trama, de acuerdo al tipo informado. A continuación, vienen los datos con un espacio disponible de hasta 1500 bytes. Este límite se determinó al definir el estándar DIX, considerando que un transceptor necesita suficiente memoria RAM para mantener toda una trama y la RAM era muy costosa en 1978. Usar un límite mayor habría significado disponer de transceptores más costosos. También se consideró un tamaño mínimo para una trama Ethernet, de esta forma se

puede diferenciar tramas válidas de basura, por lo que se revisa que la longitud mínima sea 64 bytes desde la dirección de destino a la suma de verificación, incluyendo ambas. En caso que la parte de datos de una trama sea menor que 46 bytes se usa el campo *relleno* para llegar al tamaño mínimo.

El tamaño mínimo de una trama también tiene importancia para evitar que una estación conectada a la red termine la transmisión de una trama corta antes que el primer bit llegue al extremo más lejano en el cable, donde podría ocurrir una colisión con otra trama.

En el momento 0, la estación A ubicada en un extremo de la red envía una trama (ver Figura 4 (a)). Consideremos el tiempo de demora en llegar al otro extremo con el nombre  $\tau$ . Supongamos que la estación más distante B comienza a transmitir en el momento  $\tau - \epsilon$  (ver Figura 4 (b) y (c)), justo antes que llegue la trama. Cuando B detecta que está recibiendo más potencia que lo que está enviando, sabe que ha ocurrido una colisión y aborta su transmisión y genera una ráfaga de ruido de 48 bits para avisar a las demás estaciones. De esta forma llena el cable para asegurarse que el emisor tome conocimiento de la colisión. Luego, aproximadamente en el momento  $2\tau$  el emisor nota la ráfaga de ruido (Figura 4 (d)), aborta también su transmisión y espera un tiempo aleatorio para volver a transmitir.

Si una estación intenta transmitir una trama muy corta, es probable que ocurra una colisión, pero puede que la transmisión se complete antes de que la ráfaga de ruido llegue de regreso en el momento  $2\tau$ . En este caso, el emisor erróneamente supondrá que el envío de la trama fue exitoso. Para evitar esto, todas las tramas deberán tardar más de  $2\tau$  para enviarse, así la transmisión aún está en curso cuando la ráfaga de ruido llega al emisor. En una LAN de 10 Mbps con una longitud máxima de 2500 metros y

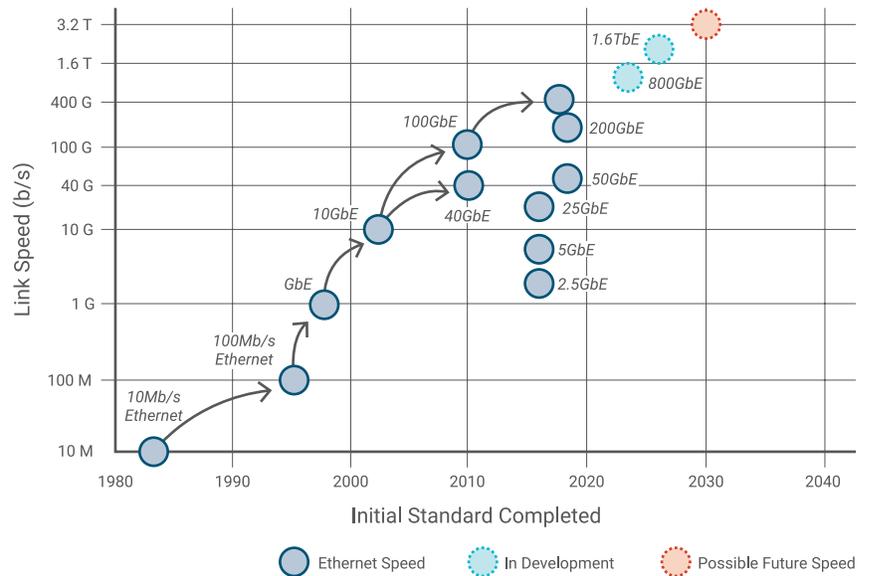
cuatro repetidores, el tiempo de ida y vuelta se ha determinado aproximadamente en  $50\mu\text{seg}$  (microsegundos, millo-nésima parte de un segundo) en el peor caso, incluyendo el tiempo que pasa por los repetidores. La trama de tamaño mínimo debe tomar por lo menos ese tiempo en transmitir. A 10 Mbps un bit tarda 100 nseg, por lo que 500 bits es la trama más pequeña que se garantiza que funcionará. Para tener un margen de seguridad, este número se redondeó a 512 bits o 64 bytes. De esta forma, las tramas con tamaño menor a 64 bytes se rellenan con 64 bytes en el campo *relleno*.

En la medida que aumenta la velocidad de la red, también debe aumentar la longitud mínima de la trama o debe disminuir la longitud máxima del cable, de forma proporcional. Si tenemos una LAN operando a 1 Gbps con 2500 metros, el tamaño mínimo de la trama tendría que ser de 6400 bytes. Pero, si la distancia máxima entre dos estaciones es de 250 metros, el tamaño mínimo de la trama podría ser de 640 bytes. En redes con velocidades de decenas de Gbps estas restricciones se van haciendo más complejas.

Al final de una trama Ethernet está el campo de la *suma de verificación*. Es un código de 32 bits calculado a partir de los datos. Si alguno de los bits de datos se recibe erróneamente por ruido en el cable, con una alta probabilidad la suma de verificación estará mal y se detectará el error.

Cuando se estandarizó Ethernet por parte de IEEE (ver Figura 3 (b)), el comité realizó dos cambios al formato DIX. Redujo el preámbulo a 7 bytes y usó el último byte para delimitar el inicio de la trama por compatibilidad con otros estándares. También cambió el campo tipo por un campo longitud. Con este último cambio, el receptor no sabía qué hacer con la trama que estaba recibiendo, pero esto se resolvía agregando un pequeño encabezado a la porción de datos para informar lo que se debía hacer. Cuando se publicó este estándar, se estaba usando abundante hardware y software para

## ETHERNET SPEEDS



Fuente: <https://ethernetalliance.org/technology/ethernet-roadmap/>

**Figura 5.** Evolución de las velocidades de enlaces Ethernet y el año en que se completó (o se espera completar) el estándar.

Ethernet DIX que pocos usuarios y fabricantes tenían ganas de convertir el campo tipo en uno de longitud. Finalmente, en el año 1997 IEEE no insistió y dijo que las dos formas se ajustaban bien. En esto hubo suerte, pues todos los campos tipo que se usaban antes de 1997 tenían valores sobre 1500, por lo que cualquier valor menor que 1500 se interpretaba como longitud y cualquier valor mayor que 1500 se interpretaba como tipo.

## Comercialización y actualidad

En el año 1979 Metcalfe fundó 3Com Corporation, su propia startup de Internet en Silicon Valley. Con esto, reforzó la comercialización de Ethernet vendiendo software de red, transceptores Ethernet y tarjetas Ethernet para mini computadores y estaciones de trabajo. Aprovechando la presentación del computador personal (PC) de IBM, 3Com

presentó una de las primeras interfaces Ethernet para PC y para los clones que se estaban masificando.

En 1987 3Com se fusionó con Bridge Communications, comenzando su expansión más allá de computadores personales, abarcando ahora equipos de red basados en procesadores Motorola 68000. En 1990 la junta directiva de 3COM nombró a Éric Benhamou como director ejecutivo en lugar de Metcalfe, quien luego dejó la compañía.

Actualmente, Ethernet es el medio principal de las comunicaciones de red por cable en todo el mundo y maneja velocidades de datos de 10 Mbps a 400 Gbps, con tecnologías en desarrollo de 800 Gbps y 1.6 Tbps. Ethernet también genera un gran mercado, con ingresos sólo de computadores que superan los \$30 mil millones de dólares en el año 2021 según International Data Corporation. El presidente de ACM, Yannis Loannidis, explica que "las ideas de diseño originales de Metcalfe han permitido que el



ancho de banda de Ethernet crezca de forma exponencial. Es raro ver que una tecnología escale desde sus orígenes hasta la capacidad actual de varios gigabits por segundo”, complementa que “es especialmente apropiado reconocer un invento tan impactante en su aniversario número 50”.

Desde el año 2006 existe “Ethernet Alliance”, un consorcio global de proveedores de sistemas y componentes, expertos de la industria y profesionales universitarios y gubernamentales comprometidos con la expansión de la tecnología Ethernet. Este consorcio tiene como misión apoyar las actividades desde la incubación de tecnología Ethernet hasta demostraciones de interoperabilidad y educación. Entre otras actividades, desde el año 2015 realizan publicaciones de nuevas versiones de la hoja de ruta de las actualizaciones y avances de Ethernet. Para este año, anuncian avances en automatización industrial y edificación, pronostican 700 millones de puertos Ethernet en automóviles para enlaces, mejores experiencias multimedia, sistemas autónomos de asistencia al conductor, entre otros. A nivel de proveedores de servicio, en

## La demanda mundial por consumo de videos continúa ejerciendo presión para aumentar las velocidades de Ethernet, llegando actualmente a 1.6Tbps.

particular con la implementación móvil de redes 5G continúa impulsando el uso de Ethernet a mayores distancias y velocidades. La demanda mundial por consumo de videos continúa ejerciendo presión para aumentar las velocidades de Ethernet, llegando actualmente a 1.6Tbps (ver Figura 5). También se menciona SyncE (Ethernet síncrono) como una tecnología crítica usada por compañías de telecomunicaciones para el despliegue de redes y servicios 5G, con esto, se espera una adopción masiva de esta tecnología en los próximos años.

---

### Epílogo

---

Robert Metcalfe contribuyó de una forma muy relevante con una solución innovadora al desarrollo de las redes de computadores de área local, proponiendo e implementando una forma de con-

trolar el uso del canal de comunicaciones y de detectar las colisiones. No sólo propuso e implementó, también se hizo cargo de la estandarización y comercialización de su invento. Ethernet se ha ido adaptando a lo largo de los años y sigue siendo la base de las redes de datos. El éxito de su trabajo lo podemos disfrutar hoy, 50 años después, al hacer uso de nuestros dispositivos conectados a una red de datos.

A los 76 años, Metcalfe inició un nuevo rumbo en su carrera y ahora es afiliado de investigación en ingeniería computacional en el Laboratorio de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial del MIT, estudiando la aplicación de supercomputadoras a problemas complejos en energía, en particular en el modelado de pozos geotérmicos. “Todavía estoy en la primera parte de la curva de aprendizaje, no sé mucho, pero estoy trabajando para arreglar eso”, dijo. ■

### REFERENCIAS

- [1] “ACM Turing Award Honors, Bob Metcalfe for Ethernet”, <https://amturing.acm.org/>.
- [2] “Computer Networks”, Andrew S. Tanenbaum.
- [3] “Computer History Museum”, <https://www.computerhistory.org/tdih/May/22/>.
- [4] “Bob Metcalfe, Ethernet Pioneer, Wins Turing Award”, <https://www.quantamagazine.org/bob-metcalfe-ethernet-pioneer-wins-turing-award-20230322/>.
- [5] “2023 Ethernet Roadmap”, <https://ethernetalliance.org/technology/ethernet-roadmap/>.
- [6] “Ethernet at 50: Bob Metcalfe pulls down the Turing Award”, <https://www.networkworld.com/article/3691019/ethernet-at-50-bob-metcalfe-pulls-down-the-turing-award.html>.