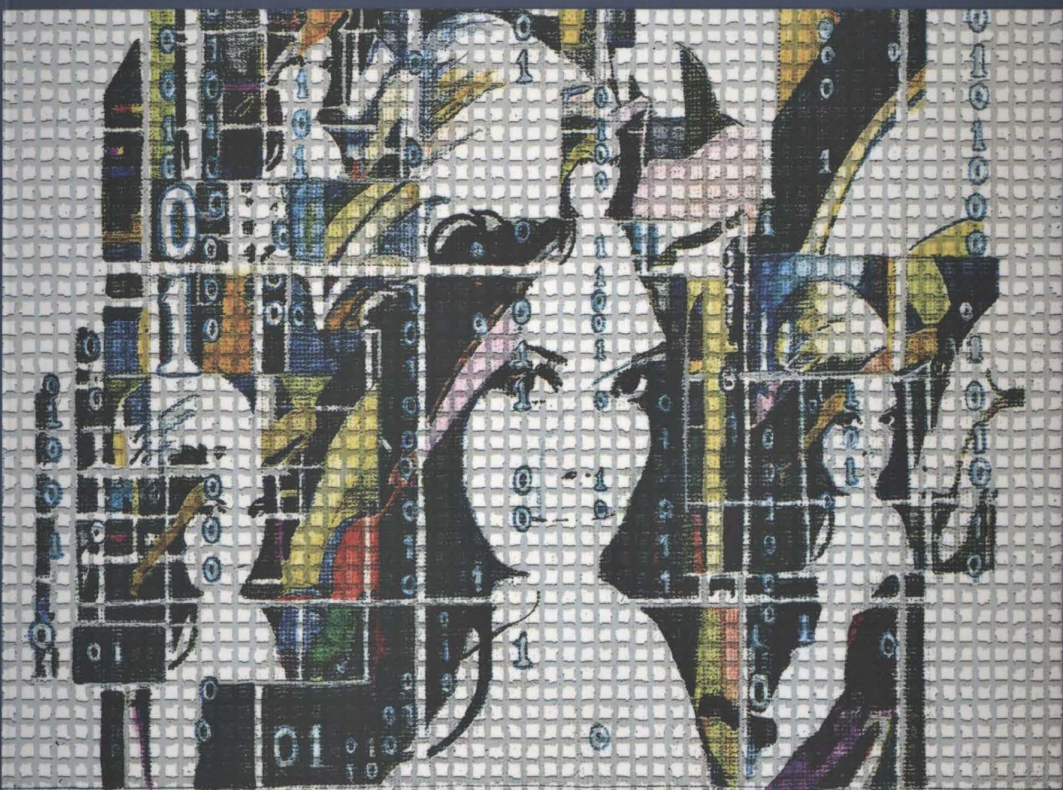


Colección CBI

Para entender las tecnologías de la información y las comunicaciones

o el extraño caso de la chica del sombrero



GERARDO A. LAGUNA SÁNCHEZ

RICARDO MARCELÍN JIMÉNEZ

MIGUEL LÓPEZ GUERRERO

MAURICIO LÓPEZ VILLASEÑOR

ENRIQUE RODRÍGUEZ DE LA COLINA

MICHAEL PASCOE CHALKE



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA
Unidad Iztapalapa

Para entender las tecnologías de la información y las comunicaciones *o el extraño caso de la chica del sombrero*



GERARDO A. LAGUNA SÁNCHEZ

RICARDO MARCELÍN JIMÉNEZ

MIGUEL LÓPEZ GUERRERO

MAURICIO LÓPEZ VILLASEÑOR

ENRIQUE RODRÍGUEZ DE LA COLINA

MICHAEL PASCOE CHALKE



UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA
METROPOLITANA
Unidad Iztapalapa



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
Unidad Iztapalapa

Dr. Salvador Vega y León
Rector General

Mtro. Norberto Manjarrez Álvarez
Secretario General

UNIDAD IZTAPALAPA

Dr. Javier Velázquez Moctezuma
Rector

Dr. Miguel Ángel Gómez Fonseca
Secretario

Dr. José Antonio de los Reyes Heredia
*Director de la División
de Ciencias Básicas e Ingeniería*

Dra. Milagros Huerta Coria
Coordinadora de Extensión Universitaria

Lic. Adrián Felipe Valencia Llamas
Jefe de la Sección de Producción Editorial

Para entender las tecnologías de la
información y las comunicaciones
o el extraño caso de la chica del sombrero

Primera edición: 2013

© UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-
IZTAPALAPA

Av. San Rafael Atlixco No. 186, Col. Vicentina,
Del. Iztapalapa, C. P. 09340, México, D. F.

ISBN Colección: 978-607-477-998-1

ISBN Volumen: 978-607-28-0081-6

Impreso y hecho en México / Printed in Mexico

Diseño de portada: Dr. Sergio Antonio Gómez Torres

Índice

Prefacio	9
El extraño caso de la chica del sombrero	15
Escena 1: Alguien me envía, por fragmentos, la imagen de la chica del sombrero	15
Capítulo 1	
El génesis: al principio fue la palabra	19
1.1. Los primeros años y el salto a la Historia.....	20
1.2. La domesticación del rayo y la invención del telégrafo.....	22
1.3. El teléfono y la masificación de las comunicaciones.....	23
1.4. La Guerra Fría.....	26
1.5. La arquitectura de una red	27
1.6. Los albores de la Internet	31
1.7. La Biblioteca de Babel.....	34
Bibliografía del Capítulo 1	36
Escena 2: Todo comenzó con una solicitud en Facebook, seguida de un largo intercambio de e-mails	39
Capítulo 2	
El lenguaje humano y sus medios de comunicación	43
2.1. El lenguaje humano	43
2.2. El proceso de comunicación	49
2.3. La analogía de la comunicación epistolar	52
Bibliografía del Capítulo 2	58
Escena 3: Comencé a recibir cuadros de una película, uno cada día, era como si el tiempo se alargara	61
Capítulo 3	
La medición del tiempo como motor tecnológico	65

3.1. La medición del tiempo y las TIC	65
3.2. Historia de la medición del tiempo o cronología de la cronometría	67
3.3. Reminiscencias de la medición del Tiempo en el México antiguo	72
3.4. El Tiempo Universal Coordinado y sus aplicaciones	79
3.5. La era del reloj atómico	82
3.6. Los relojes y su calidad	84
Bibliografía del Capítulo 3	88

Escena 4: Lo único que me vinculaba con la chica del sombrero era la feria tecnológica	91
---	-----------

Capítulo 4	
La evolución de las comunicaciones electrónicas	93
4.1. La comunicación humana a distancia	93
4.2. Voz a distancia con señales analógicas	95
4.3. Voz a distancia con señales digitales	99
4.4. Telefonía «inteligente»	100
4.5. Telecomunicaciones y proveedores versátiles	101
4.6. ¿Las telecomunicaciones nos mantienen más comunicados?	103
Bibliografía del Capítulo 4	104

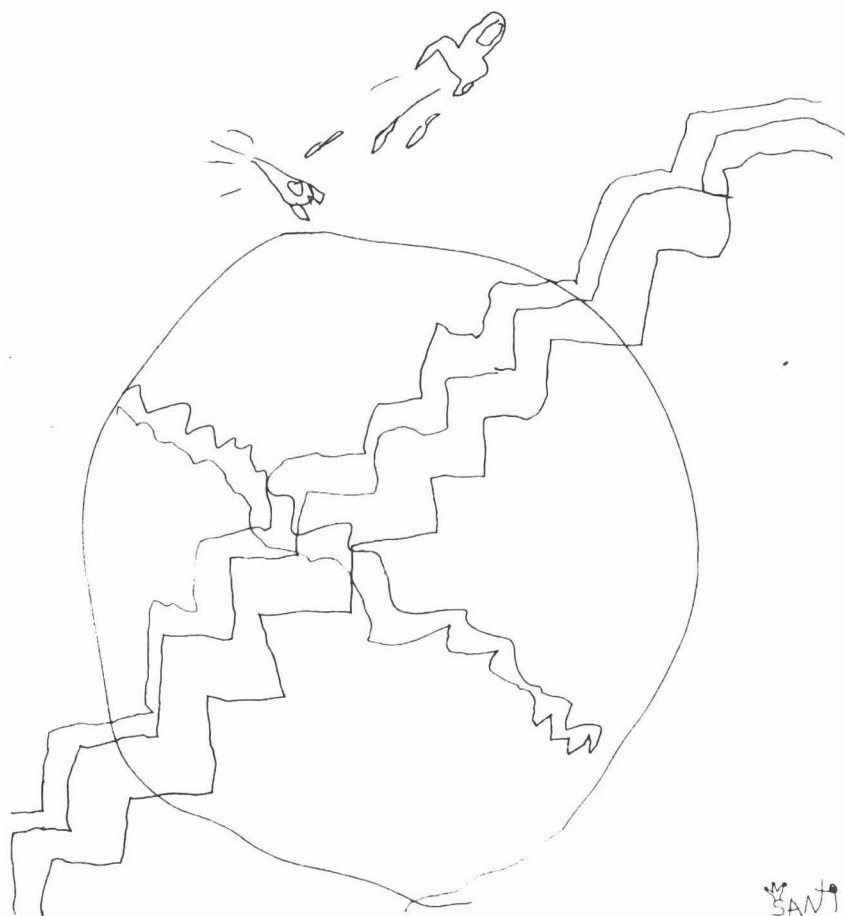
Escena 5: El asesino jamás supo que había sido fotografiado con un teléfono de bolsillo	107
--	------------

Capítulo 5	
Los cien años de avances en electrónica que hicieron posible la era de la información	111
5.1. Los albores de la tecnología electrónica	111
5.2. De la rectificación a la amplificación	113
5.3. Pioneros de Silicon Valley	119
5.4. La integración de circuitos	121
5.5. Surgimiento y caída de la tiranía de los números	123
5.6. Las tiranías caen pero las leyes de la termodinámica permanecen	125
5.7. Inicia la era de la información	127

Bibliografía del Capítulo 5	128
Escena 6: Entonces fui con mi amigo, un policía experto en procesamiento de imágenes	131
Capítulo 6	
La Transformada Rápida de Fourier:	
El salto de lo posible a lo realizable	135
6.1. La FFT como motor en el desarrollo de las TIC	135
6.2. Aportes de matemáticos, físicos e ingenieros	136
6.3. Mecenaz por conveniencia	138
6.4. La fórmula más extraordinaria de las matemáticas	139
6.5. Menos ruido visual	141
6.6. Matemáticas imaginarias	142
6.7. Mentes brillantes y convoluciones cerebrales	143
6.8. Efectos térmicos	145
6.9. Un genio pragmático y su máquina analítica	146
6.10. Lady Ada tejiendo álgebra	149
6.11. FFT: como tejer rápido la identidad de Euler	150
Bibliografía del Capítulo 6	154
Escena 7: La imagen del asesino tenía mucho ruido.....	157
Capítulo 7	
La Teoría de la Información y la lucha contra el ruido y los errores.....	
7.1. La naturaleza del ruido	161
7.2. La probabilidad de error como medida de desempeño	164
7.3. La solución a los errores está en la redundancia	167
7.4. Claude Shannon y su Teoría de la Comunicación	169
7.5. Algunos conceptos de la Teoría de la Comunicación de Shannon	174
7.6. Implicaciones del trabajo de Shannon para la codificación y la corrección de errores	178
7.7. Aparece Richard Hamming en escena	186

7.8. Los códigos de Richard Hamming	188
7.9. Códigos correctores en todas partes	190
Bibliografía del Capítulo 7	192
Escena 8:	
¿A cuántos grados de separación me encontraba de quien me había enviado las imágenes?	195
Capítulo 8	
La necesidad de las redes de comunicación y sus retos	197
8.1. La red como un producto de la mejora continua	197
8.2. Nace la red de comunicaciones y surgen nuevos retos	199
8.3. La Internet: red de redes de comunicación electrónica	201
8.4. Riesgos virtuales	204
Bibliografía del Capítulo 8	205
Escena 9: La respuesta está en la red	207
Capítulo 9	
Redes de comunicación inalámbrica más allá de lo evidente	211
9.1. Convergencia tecnológica	211
9.2. La telefonía celular más las redes de datos: un estuche de monerías	213
9.3. El problema de la escasez del espectro	214
9.4. Radios programables y radios cognitivos	218
9.5. Redes sin infraestructura fija o <i>ad hoc</i>	219
9.6. La magia de las TIC	224
Bibliografía del Capítulo 9	225
Escena 10: Habían querido usarme como testigo de un montaje	227
Capítulo 10	
Implicaciones socioculturales y ambientales de las TIC	231
10.1. Las preferencias individuales y el uso de los «nuevos» medios de comunicación	231

10.2. La seducción de los medios	234
10.3. Las no tan verdes TIC	240
10.4. No todo es rosa, ni todo es negro	244
Bibliografía del Capítulo 10	246
Escena 11: Tiempo después.....	249
Capítulo 11	
Epílogo	251
A manera de conclusión.....	251
Sobre Lenna Söderberg, la encantadora chica del sombrero	253



Hoy el Hombre puede contemplar su hogar, la Tierra, desde el espacio exterior. Esto es gracias al avance que la ciencia y la tecnología han alcanzado, partiendo del momento en que surgió como especie, hasta nuestros días. Entonces, parafraseando a Newton, «Si es que podemos ver más lejos, es porque estamos parados sobre los hombros de gigantes».

Prefacio

«Los constructores de herramientas habían sido rehechos por sus propias herramientas... Y en algún momento de los oscuros milenios pasados, habían inventado el instrumento más especial de todos, aun cuando no pudiera ser visto ni tocado. Habían aprendido a hablar, logrando la primera gran victoria sobre el Tiempo. Ahora, el conocimiento de una generación podía ser transmitido a la siguiente... A diferencia de los animales, que conocían sólo el presente, el Hombre había adquirido un pasado, y estaba comenzando a andar a tientas hacia un futuro.»

Arthur C. Clarke (2001: Una odisea espacial)

Las sempre cambiantes tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) son un aspecto común para la mayoría de los jóvenes a inicios de este siglo XXI. Su desarrollo ha sido espectacular en los últimos 50 años y su penetración ha crecido exponencialmente en los mercados de consumo masivo. No obstante, su realización se debe al esfuerzo de muchas generaciones de hombres, desde los tiempos más remotos.

En general, se usan estas tecnologías sin averiguar nada más acerca de sus principios de operación o de sus creadores. La aceptación de estos dispositivos es amplia e inmediata, ya que, no obstante sus reducidas dimensiones, incorporan diversas y muy útiles funciones de comunicación, intercambio, almacenamiento y procesamiento de datos, grabación, edición y reproducción de multimedia (audio, imágenes y video), entre otras. En general, incluyen diversos accesorios e instrumentos para fungir como cámaras fotográficas, cámaras de video, monitores de posicionamiento geográfico (GPS, por sus siglas en inglés), termómetros, fotómetros y acelerómetros, por mencionar algunas de las aplicaciones más populares.

Por si fuera poco, algunos de estos dispositivos ofrecen la funcionalidad de una computadora de propósito general. Estos dispositivos pueden ejecutar aplicaciones para navegación en la *web*, correo electrónico y herramientas de oficina como lo son un procesador de palabras, una hoja de cálculo, un administrador de bases de datos, agenda, etc. Siendo dispositivos de propósito general, incluso pueden ejecutar aplicaciones de la más *diversa* naturaleza, incluyendo videojuegos y otras, que normalmente se ejecutan en las computadoras personales.

Así, estos dispositivos resultan de una conveniente combinación de funciones que originalmente aparecieron en forma individual (teléfono, radio, televisión, computadora, etc.) pero ahora sus señales y registros, debidamente archivados en formato de bits y bytes, pueden ser almacenados, transmitidos e intercambiados, directamente desde los aparatos de captura, a cualquier parte del globo terráqueo donde haya conexión a la red mundial de información.

Los autores, todos miembros del Área de Investigación en Redes y Telecomunicaciones, del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UAM-Iztapalapa, hemos decidido preparar este material de divulgación para presentar al lector que no es un especialista, algunos de los desarrollos científicos y tecnológicos, así como a algunos de sus protagonistas, que, voluntaria o involuntariamente, han contribuido para que cada vez trasmitamos más datos, más rápido, con más contenidos y a un menor costo.

Nuestra intención, al presentar una breve retrospectiva histórica y algunas reflexiones sobre las implicaciones, pasadas, presentes y futuras, en el desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones, es motivar la curiosidad sobre aspectos que tienen en común ser causa o efecto, directa o indirectamente, de la tecnificación de la comunicación, tanto entre las personas como entre los artefactos que hemos inventado, a lo largo de la historia de la humanidad.

En particular, las implicaciones sociales de estas tecnologías son de gran interés ya que, por una parte, existe evidencia de que han permitido la creciente formación de comunidades virtuales que se reúnen en sitios de redes sociales, donde existe la posibilidad de cierta interacción social, del intercambio de experiencias y de contenidos e información pero, por la otra y paradójicamente, no en todos los casos garantizan que la sociedad y las personas estén realmente más informadas y mejor comunicadas.

El material presentado se puede leer de diversas maneras. Una forma es la lectura de la creación literaria, en forma de cuento, que se ha distribuido como preámbulo en cada uno de los capítulos. Aunque el cuento *El extraño caso de la chica del sombrero* es independiente y tiene su propio argumento, permite al lector identificar los aspectos de la vida cotidiana donde intervienen las tecnologías de la información y las comunicaciones. Visto por un lector distraído, el cuento sólo está relacionado con el material del libro en el hecho de girar alrededor de tópicos relativos a las TIC pero, incluso con esa perspectiva, la lectura del material de los capítulos tal vez le ayude a esclarecer el extraño caso de la chica del sombrero.

Otra forma de leer el material, es en orden, capítulo por capítulo. En esta forma, el lector hará un viaje en orden cronológico, a través de los logros y desarrollos que hemos seleccionado, para ilustrar el devenir de las actuales tecnologías de la información y las comunicaciones.

Una tercera forma de leerlo, es elegir el tópico de interés y leerlo en forma aislada. Todos los capítulos son independientes y autocontenidos. Al final de cada capítulo se ofrecen algunas referencias bibliográficas que pueden resultar de utilidad para aquellos lectores que deseen profundizar más en cada tema.

Esperamos, sinceramente, que el material del libro sea de interés y utilidad. Si logramos que el lector, después de su lectura, identifique y reconozca algunas relaciones entre la tecnología de la información y las comunicaciones que usa cotidianamente y alguno de los temas, personajes o culturas protagonistas de este libro, sembrando con ello la semilla de la curiosidad para investigar más detalles al respecto, entonces nos daremos por bien servidos.

El espíritu del este libro es mostrar que, al hacer uso de las actuales tecnologías de la información y las comunicaciones, en realidad somos beneficiarios de los logros y desarrollos acumulados por muchas generaciones de hombres y culturas formidables. Sin embargo, y a pesar de los avances logrados, aún quedan retos importantes que superar, tanto en lo técnico como en lo social. Así que, en el futuro, todavía tendremos mucho de que hablar respecto a las pujantes TIC y sus más insospechadas relaciones de causa y efecto.

Los autores agradecemos sinceramente a la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Iztapalapa, por el apoyo para la publicación de este trabajo y, muy especialmente, a los revisores

anónimos del mismo, ya que sus comentarios, sugerencias y acertadas precisiones lo han enriquecido de una manera sustancial. En lo personal, quiero agradecer a mi esposa, Gabriela D. Román Flores, y a mi hijo, Santiago Tonatiuh, por su generosa colaboración para la ilustración de este libro. Ella, con la producción gráfica que da realce al cuento y él con el aporte de sus dibujos preescolares (realizados entre los cuatro y los seis años de edad) que, con elocuente inocencia, nos invitan a iniciar la lectura de cada capítulo con un ánimo pleno de renovada esperanza en las nuevas generaciones.

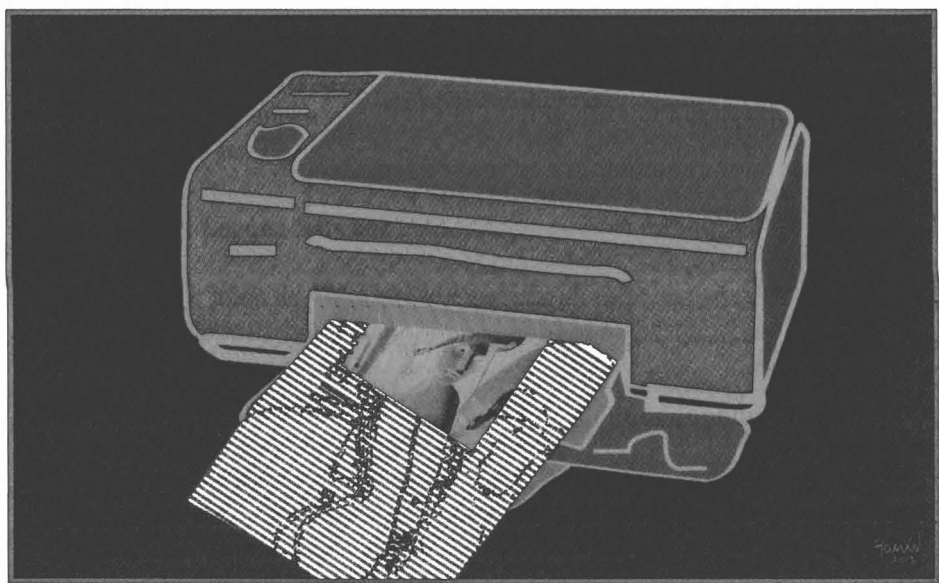
Para terminar, y muy a propósito del espíritu de este libro, recordaremos las palabras de Isaac Newton, uno de estos grandes personajes de los que hablamos: «Si es que puedo ver más lejos, es porque estoy parado sobre los hombros de gigantes». Con ello, el genio inglés reconocía que no podría haber hecho mucho de no ser por los aportes de los grandes hombres que le precedieron y que él tomaba como punto de partida.

Dr. Gerardo Abel Laguna Sánchez

Coautor y editor

UAM, Iztapalapa, junio de 2013





El extraño caso de la chica del sombrero

Escena 1: Alguien me envía, por fragmentos, la imagen de la chica del sombrero

La figura emergía de la impresora línea tras línea, quizá sería más correcto decir punto por punto. Estaba imprimiendo una imagen que se convertiría en un cartel, hecho con varias hojas de tamaño carta. Había venido imprimiendo una hoja diferente cada día. Se trataba de una adivinanza que viajaba en pequeños paquetes, quien sabe desde donde, atravesando el mundo quizá. Hacía varios días que alguien me estaba mandando en varios e-mails los pedazos de este rompecabezas. Cada hoja me recordaba a esos cuadros puntillistas o impresionistas que, vistos de cerca, sólo parecen un grupo de manchas de color, sin sentido aparente. El contenido, o sea, la imagen, surge solamente cuando es visto en conjunto. Es decir, cuando nos alejamos y perdemos el detalle de cada mancha, para reconocer una forma y, al final, una composición.

Las primeras hojas que imprimí parecían figuras abstractas. Cuando iba a la mitad de mi rompecabezas pude intuir que se trataba de una joven que me miraba serenamente, mientras me encargaba de recomponer su rostro en la pared. Sólo un fragmento de su belleza emergía como manchón de pintura, día con día. Cada hoja impresa era diferente, con zonas de mucho contraste entre los colores claros y oscuros, en otras zonas había transiciones de color muy delicadas.

También observé líneas suaves y otras discontinuas.

En algún momento de este juego, se imprimió una hoja con caracteres como si hubieran salido de una vieja máquina de escribir. Aquello parecía una especie de ejercicio para aprendiz de mecanógrafo. Pensé que era un error, pero al poco tiempo me percaté que la hoja cobraba sentido si se le ponía en el lugar que le correspondía dentro de la secuencia que iba reconstruyendo. Cada segmento formaba parte del mismo mensaje, aunque cambiara la modalidad de presentación. La nueva sección del cartel dibujaba otra parte del cuerpo, esta vez usando caracteres de imprenta.

En el último tramo de la imagen, las impresiones volvieron a cambiar, ahora ya no eran caracteres del alfabeto, sólo eran renglones de unos y ceros que servían para terminar el mensaje, o sea, la imagen de la chica con el sombrero.

Aquella imagen terminada me planteaba un acertijo. Vista de arriba hacia abajo parecía que se iba transformando en formas o símbolos cada vez más sencillos. Vista de abajo hacia arriba parecía que la imagen surgía como aquel cuadro de la Venus, a partir un mar de símbolos binarios. Por un momento, tuve la tentación de compartir el acertijo con Violeta, mi hermana gemela: desde niños ambos gozamos con la resolución de acertijos, pero desistí, ella ya tenía suficientes problemas con su última pareja, un tipo al que yo no conocía, un supuesto artista, que creí pintor, o algo así. Violeta, Violeta Culhuac, tú y yo tan parecidos en todo: ahorrativos, solitarios, reservados y tan ingenuos. El messenger no fue suficiente. Si tan solo hubiéramos convivido más de cerca en los últimos meses, tal vez hubiera conocido tu secreto.



La encantadora chica del sombrero.



**El Hombre logró «domesticar al rayo» y lo hizo
viajar por un cable.**

Capítulo 1

El génesis: al principio fue la palabra

«Desde hace mucho tiempo la invención ha alcanzado sus límites, y me parece imposible que en el futuro puedan darse nuevos desarrollos»

Julius Frontinus, famoso ingeniero romano del siglo I d.C.

Para gran parte de los jóvenes nacidos hacia finales del siglo XX, la Internet es una presencia normal, cotidiana, ubicua. Despiertan y escriben toda clase de chismes que «suben» a su «red social». Comparten «enlaces» hacia temas «trendy» y, a veces, consultan la Wikipedia u otros sitios que les pueden ayudar a hacer la tarea. Por su parte, sus padres revisan las noticias, mandan correos electrónicos a sus amigos y compañeros de trabajo (a veces conteniendo también una cierta dosis de banalidades y «spam»). Los más osados llegan a hacer compras por este medio. No obstante, en los años sesenta del siglo pasado, en plena Guerra Fría, apenas se gestaban los fundamentos de esta tecnología que llegaría a transformar nuestras vidas de una forma tan radical.

A lo largo del tiempo, la comunicación humana se ha visto sometida a «presiones evolutivas» propiciadas por las necesidades de cada época, éstas trajeron consigo un aumento en la complejidad de los mensajes que pudimos intercambiar, y con ello, un aumento en la complejidad de los sistemas que soportaron su transmisión y recepción. No es sólo que los mensajes fueron cada vez más elaborados, sino que quisimos enviarlos cada vez más lejos, cada vez más rápido, comunicando cada vez a un mayor número de personas.

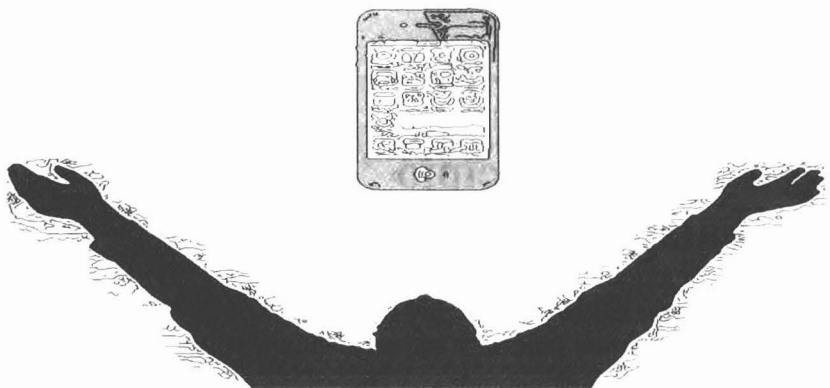


Figura 1.1: El portento tecnológico de los actuales «teléfonos inteligentes» pasa inadvertido para la mayoría, es cosa común, ya no sorprende a nadie. Acaso, ¿ya hemos perdido la capacidad para sorprendernos?

Esta es la historia a vuelo de pájaro de los grandes saltos tecnológicos que nos condujeron hasta el punto donde nos encontramos, una situación en la que contamos con una red mundial de telecomunicaciones cuya cobertura y capacidades sigue creciendo y que, al día de hoy, nos ofrece la posibilidad de soportar tantos, o más, equipos de comunicación como habitantes hay en el planeta.

1.1. LOS PRIMEROS AÑOS Y EL SALTO A LA HISTORIA

En su origen, la comunicación se formaba por mensajes sencillos que podían representarse mediante un pequeño conjunto de fenómenos físicos: el humo, el sonido producido por el caparazón de un caracol de mar o un tambor, una o varias fogatas encendidas en lo alto de una cima, un juego de espejos, de banderas, las luces de un faro, sólo por citar algunos ejemplos. Los mensajes, en sí, representaban una colección fija y muy limitada de significados, por ejemplo: 'ataque', 'retirada', 'adelante', 'deténgase', 'peligro', 'victoria'.



Figura 1.2: Ancestrales vestigios de la expresión humana. Pinturas rupestres del «Hombre de Lauricocha», en una cueva del Perú, con antigüedad mayor a nueve mil años.

El primer gran salto vino con la necesidad de transportar mensajes con contenido variable. La solución: se inventaron los alfabetos [4]. Esta invención abrió la posibilidad de transmitir ideas más complejas, planes de batalla, acuerdos comerciales, cartas de amor, novelas, etc. Entonces, se necesitó escribir el mensaje y entregárselo a un portador: un ser humano, o quizá algún animal entrenado, por ejemplo, una paloma. Sin embargo, el problema con los mensajeros humanos es que, para algunas aplicaciones, pueden ser muy lentos, indiscretos o poco confiables. Por su parte, una vez entrenadas, las palomas jamás leerán los mensajes que transportan, pero su desventaja es que sólo pueden cubrir una ruta fija y preestablecida.

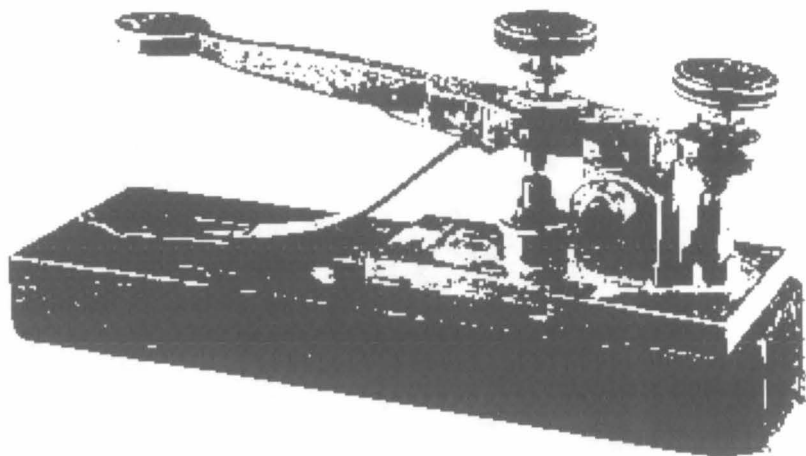


Figura 1.3: Uno de los primeros mecanismos telegráficos del siglo XIX.

1.2. LA DOMESTICACIÓN DEL RAYO Y LA INVENCION DEL TELÉGRAFO

El próximo hito en la historia de las comunicaciones está representado por la invención del telégrafo. Con esto fue posible transportar una señal electromagnética a grandes distancias y a la velocidad de la luz. El problema técnico consistió en haber utilizado un limitado conjunto de señales eléctricas para representar las letras del alfabeto [2]. Entonces la solución fue el código Morse y con ello había nacido la comunicación binaria. Aquí, se amerita hacer un alto para revisar cómo ha aumentado la complejidad de los sistemas de comunicación. Primero se inventaron alfabetos y se diseñaron reglas para combinar sus letras, de manera que se construyeron mensajes con significados variables. Después, se representaron las letras con secuencias de símbolos más sencillos, como puntos y rayas. Finalmente, se «domesticó al rayo» y se le hizo viajar por un cable, en pequeños pulsos, para representar los puntos y las rayas del código Morse [1].

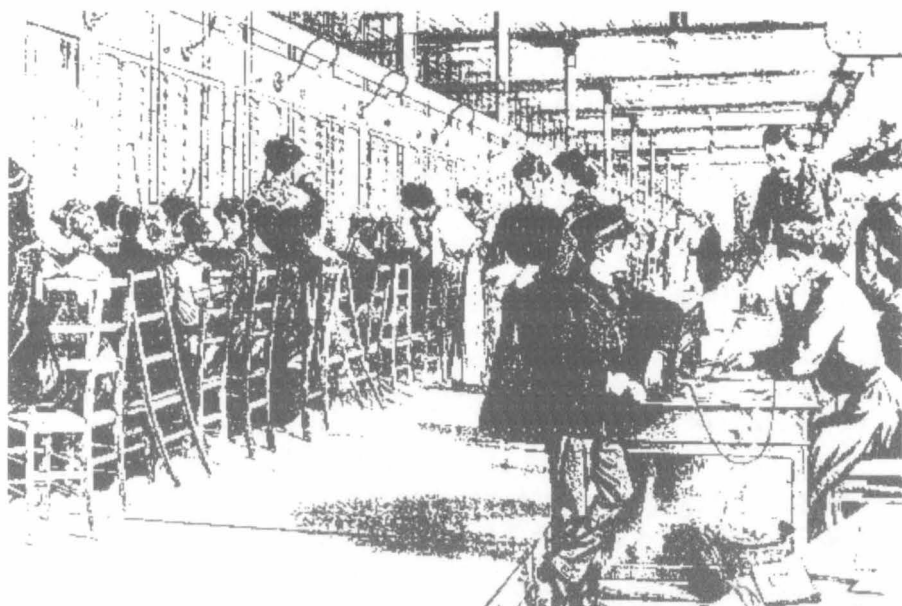


Figura 1.4: Central telefónica con operadoras al inicio del siglo XX.

1.3. EL TELÉFONO Y LA MASIFICACIÓN DE LAS COMUNICACIONES

La invención del teléfono, cuya autoría finalmente fue reivindicada a Antonio Meucci, trajo consigo la necesidad de comunicar a un número creciente de usuarios. Hasta entonces, la infraestructura de comunicaciones se reducía a un aparato transmisor, un aparato receptor y un medio de comunicación, que normalmente era un cable, uniendo a ambos equipos. Sin embargo, no se puede tender permanentemente un cable entre cada par de teléfonos que requieran comunicarse. Se está ante un problema de escala. Los primeros ingenieros de telefonía decidieron que cada teléfono se conectara mediante un cable, exclusivo de cada aparato, hasta una oficina de servicio atendida por operadores humanos. Éstos se encargaban de registrar las solicitudes de servicio y enlazar a los teléfonos que requirieran participar en una conversación. Ello se hacía conectando el cable del aparato transmisor con el cable del aparato receptor, para formar un solo circuito. Dicha conexión era temporal y duraba el tiempo que tomaba la conversación telefónica. Posteriormente,

los operadores fueron sustituidos por equipos automáticos capaces de registrar las solicitudes y darles curso. Habían nacido las redes de conmutación de circuitos.

Al principio, las comunicaciones a distancia eran un recurso exclusivo de los poderosos: los gobernantes, los militares, los comerciantes. Sin embargo, en algún momento, las comunicaciones se masificaron y, por lo tanto, se convirtieron en un servicio público. Los proveedores del servicio se vieron frente a una serie de problemas de logística que impulsaron la creación de las telecomunicaciones modernas.

Así, podemos mencionar como factores que modelaron las telecomunicaciones a: la distancia (que fue aumentando), el tiempo para establecer una conexión (que se fue acortando) y el uso colectivo de la infraestructura de la comunicación. A su vez, el uso colectivo de la infraestructura hizo viable un servicio público y obligó a pensar en soluciones masivas.

Un aspecto muy importante de la comunicación digital es que tanto el transmisor como el receptor conocen por adelantado los símbolos que van a intercambiar, es decir, los tipos de pulsos o señales que representan a los unos y ceros lógicos. De hecho, es justamente esta definición de un conjunto finito de símbolos, lo que distingue a la comunicación digital de la comunicación analógica donde, en principio, el conjunto de posibles señales es infinito.

Tenemos que observar también cómo el proceso de comunicación implica, desde el lado transmisor, descomponer los mensajes en unidades más pequeñas, que luego pueden representarse con un conjunto de símbolos más simples. En tanto, del lado receptor, ocurre el proceso inverso, reconocemos símbolos binarios que agrupamos para transformarlos en mensajes.

Por ejemplo, si las letras del alfabeto corresponden a los símbolos, podemos agruparlas para formar palabras y con ellas, a su vez, construir mensajes. Si el proceso de descomposición, en el transmisor, y de composición, en el receptor, son vistos como flujos verticales, entonces cada nivel constructivo especializado puede ser visto como una capa. Decimos entonces que la comunicación se sustenta por capas. Así, del lado transmisor, un mensaje va descendiendo por capas sucesivas y transformándose en símbolos más sencillos. Mientras que, del lado receptor, los símbolos van ascendiendo y se van agrupando de acuerdo con las reglas de cada capa para, finalmente, recuperar un mensaje del medio de comunicación. Volveremos a esta observación cuanto abordemos el concepto de arquitectura de una red.

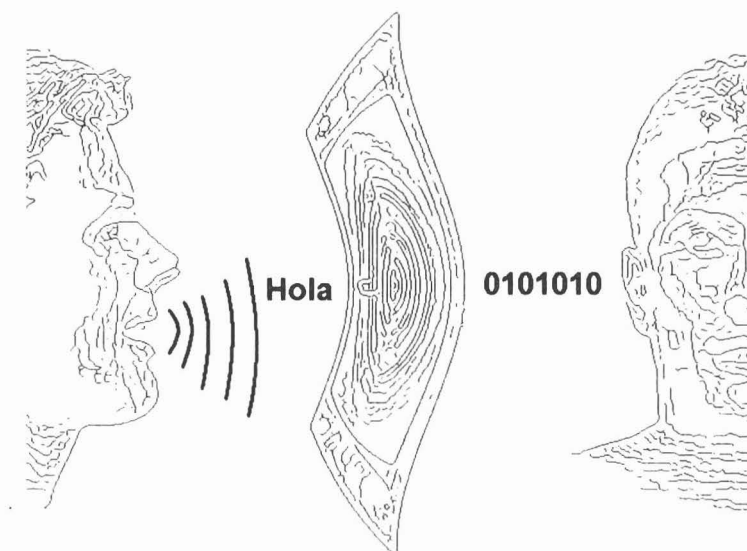


Figura 1.5: El paso de la electrónica analógica a la digital permitió que muchas de las operaciones que antes se hacían con hardware ahora se hagan con software.

En este punto, es pertinente aclarar la diferencia entre las comunicaciones digitales y las analógicas. En las primeras, se tiene un conjunto finito y numerable de señales que, a su vez, representan valores discretos. Así, mediante este conjunto finito de señales, se representan los mensajes que son transportados por el medio. Podemos, por ejemplo, usar dos niveles de voltaje diferentes para representar al 0 y al 1. Luego, como hemos mencionado, se trata de codificar o representar todo mensaje en formato binario, para transmitirlo con señales que sí pueden viajar por el medio con el que disponemos. Esto es todo lo que se necesita en un sistema digital.

Por otra parte, en las comunicaciones analógicas se usan señales que pueden tomar cualquier valor en un intervalo continuo. El ejemplo más común es la voz humana, pero también podemos mencionar la señal producida por un sismo, un electrocardiograma y el sonido de un instrumento acústico (como el de una guitarra). En el caso del teléfono analógico, se registra la voz que es una señal mecánica y, mediante un micrófono, se toma una copia de ésta en formato eléctrico. Posteriormente, se hace viajar por un canal hasta un aparato receptor, donde se realiza una conversión

inversa, es decir, se transforma la señal eléctrica, mediante una bocina, en una señal acústica o mecánica.

Es importante aclarar que en sus orígenes la telefonía usó señales analógicas. Al terminar la Segunda Guerra Mundial, como resultado de los trabajos pioneros de Claude Shannon y John Nyquist se demostró que toda señal analógica podía convertirse a su equivalente binario y que, en consecuencia, todas las comunicaciones podrían manejarse con este principio (ver el Capítulo 7). Esta es la razón fundamental por la que las comunicaciones modernas tienen una operación esencialmente digital.

1.4. LA GUERRA FRÍA

A mediados de los años sesenta del siglo XX, el gobierno de los Estados Unidos temía un ataque en su infraestructura de telecomunicaciones que pudiera dejarla fragmentada en zonas o regiones. A través de su agencia de investigaciones de proyectos avanzados (ARPA), buscó aglutinar diferentes sistemas locales de telecomunicaciones, para ofrecer una red alternativa que uniera al país en una situación de emergencia.

Los primeros estudios del tema sugirieron la viabilidad de una red pensada, no para transmitir voz, sino para intercambiar texto y datos. Los trabajos precursores de Paul Baran y Leonard Kleinrock señalaron que la gestión de los recursos de telecomunicaciones debe atender a la naturaleza del tráfico que soportan. Esto significa que el modelo de administración de una llamada telefónica sirve para transportar voz, pero no es el indicado para transportar datos. Como alternativa, propusieron un modelo parecido a los servicios de paquetería y correo postal.

En el modelo propuesto, la información viajaría desde su equipo remitente para recibirse en cierta clase de «oficina» local, donde se determinaría su longitud. Si ésta excediera cierta medida, denominada MTU (Unidad Máxima de Transferencia), entonces se cortaría en pedazos, denominados «paquetes», para que cada uno fuera menor que la MTU. Luego, cada uno de los «paquetes» resultantes se «envolvería» y «etiquetaría» con los datos de su origen y destino antes de enviarlo hacia la siguiente «oficina», que se encargaría de reunir y transportar la carga regional (todos los paquetes de la zona). Dependiendo de la distancia a recorrer, la carga podría reexpedirse hacia una o más «oficinas» que concentraran el tráfico de

mayor jerarquía. Finalmente, en algún momento, los paquetes llegarían a la «oficina» local receptora, de donde se reexpedirían hacia el equipo destinatario.

El siguiente paso en esta historia que conduce a la Internet se debe al esfuerzo pionero de Vinton Cerf, Robert Kahn y Lawrence G. Roberts, quienes desarrollaron los primeros protocolos que dieron sustento al sistema ARPANET el que, luego de su fase experimental, se transformaría en la Internet en los años setenta y ochenta. Para entender el alcance de esta contribución, debemos detenernos un momento a revisar el concepto de arquitectura de red. Se trata de aplicar un enfoque de sistemas para abordar el vasto problema y, al mismo tiempo, articular las operaciones de una red de computadoras.

1.5. LA ARQUITECTURA DE UNA RED

La idea básica en el diseño de una red de comunicaciones consiste en reconocer todas las tareas que dan soporte a una aplicación, para luego agruparlas en niveles o capas especializadas, de acuerdo con el problema que resuelven y la complejidad de la información que manejan. En este contexto, la complejidad de la información se refiere al grado de agregación y a sus significados. Ya hablamos de esto cuando abordamos la invención del telégrafo. Cada equipo que participa en una arquitectura establecida debe atenerse o sujetarse a una convención (acuerdo) para el intercambio de datos, es decir, debe implantar las funciones de cada capa o nivel que hacen posible la transmisión y la recepción de los mensajes de una aplicación [3].

En el lado transmisor, el mensaje pasa por capas sucesivas que lo van desagregando o descomponiendo en elementos más simples, hasta convertirlo en secuencias de bits que pueden codificarse mediante señales eléctricas. Por su parte, en el receptor ocurre el proceso inverso, es decir, la información se extrae, a partir de las mismas señales eléctricas, y se va turnando por capas sucesivas que van reensamblándola para componer significados más complejos. En cada entidad participante (transmisor o receptor), cada nivel maneja un tipo de unidad de información o unidad de datos. Así, en un extremo, la unidad se descompone en elementos más sencillos, para que, en el otro extremo, se recomponga obedeciendo ciertas reglas de comunicación denominadas protocolos. En el proceso de transmisión, cada capa se encarga de agregar información de control dirigida a su contraparte, en el lado receptor, con las instrucciones para el reensamblado del mensaje original.

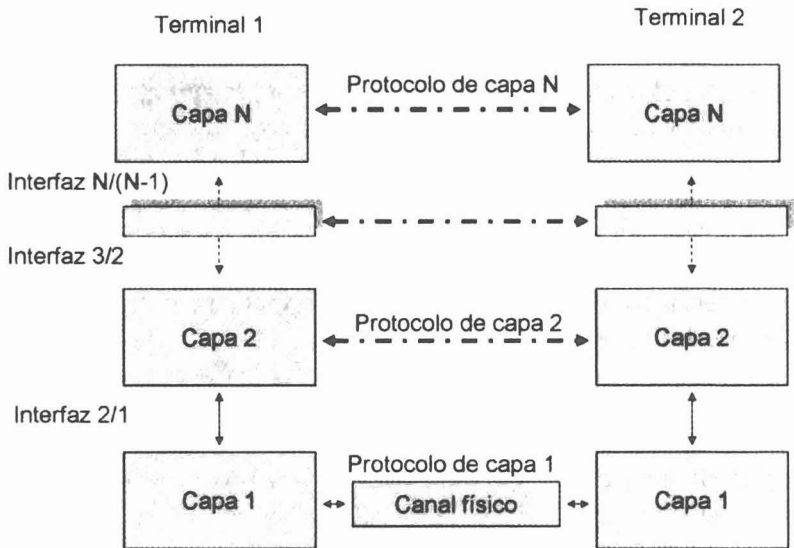


Figura 1.6: Modelo general para la arquitectura de una red con base en capas o niveles.

Algunas analogías pueden ayudar a clarificar todas estas ideas. El proceso de lectura-escritura, por ejemplo, es una operación de comunicación en la que el transmisor, o escritor, transforma sus más complejos mensajes en párrafos, compuestos de oraciones, que luego se pueden pensar como secuencias de palabras. Las palabras, a su vez, se codifican como secuencias de letras. Por el lado del receptor, o lector, éste conoce las reglas sintácticas para agrupar las letras en palabras y las palabras en oraciones; las reglas semánticas para formar oraciones con sentido y las reglas de redacción y estilo para agrupar las oraciones en párrafos. Sin embargo, sólo los signos más elementales, las letras, son aquellos que se transportan por el medio, es decir, el papel. Es claro que todas las tareas se realizan en pasos o niveles que los participantes, tanto el escritor como el lector, conocen bien.

El escritor Juan José Arreola nos ofrece una analogía fantástica, pero igualmente efectiva, para entender el concepto que nos ocupa. El escritor se pregunta ¿cómo hacer pasar un camello por el ojo de una aguja? y sugiere la siguiente solución: en un extremo, descomponer al sujeto de experimentación en un chorro de átomos,

que sí podría atravesar por el ojo de la aguja, para que, en el otro extremo, la recomposición diera lugar a estructuras biológicas cada vez más complejas (proteínas, células, tejidos, órganos, etc.) hasta reconstruir al camello original.

En general, la arquitectura de comunicación en capas permite que las capas superiores deleguen a las inferiores la resolución de algún problema de comunicación particular. Para ello, una capa superior comparte con la capa inferior una interfaz y cierto mecanismo de comunicación que permite que la capa superior solicite servicios a la inferior (primitivas de servicio). Por otro lado, entre niveles, de extremo a extremo (de terminal a terminal), también comparten el interés por cierta información (mensajes) y un “canal” de comunicación, que puede ser físico o virtual, con el que pueden intercambiar contenidos mediante ciertas señales y reglas (protocolo).

Particularmente, el Nivel Físico, el nivel más bajo, es el único que establece un canal real o físico con su par en el otro extremo (terminal). Todos los demás niveles establecen únicamente enlaces virtuales con sus pares en el otro extremo, pero se apoyan en el Nivel Físico para lograr una comunicación efectiva. De manera simplista, podemos ver el flujo de los datos entre las capas de las terminales como si, para compartir un mensaje, las capas de un mismo nivel en dos terminales diferentes tuvieran que vencer una “barrera de lenguaje” para comunicárselo directamente entre ellas. Entonces, la solución es que se apoyen en niveles inferiores “políglotas” que les permiten resolver el problema mediante una comunicación indirecta y efectiva, solicitándoles el servicio de “traducción” a los niveles inferiores que sí pueden comunicarse entre ellos. En el caso de las comunicaciones digitales, es nada menos el Nivel Físico el que funge como “políglota” para vencer el problema de “la barrera de lenguaje” (las señales físicas que pueden cambiar al viajar de un extremo al otro).

Una interesante analogía puede ayudar a visualizar la conveniencia de plantear el procesamiento de los elementos de una comunicación por capas, vistas como bloques funcionales especializados, a fin de superar un problema de comunicación. Se trata del primer encuentro entre Hernán Cortés y la embajada de Moctezuma II (*Motecuhzoma Xocoyotzin*) en las costas del golfo de México por el año de 1519. En particular, nos referimos a la labor de traducción de Malinali, bautizada por Cortés como Doña Marina y conocida popularmente como “Malinche”, y del náufra-go español Jerónimo de Aguilar.

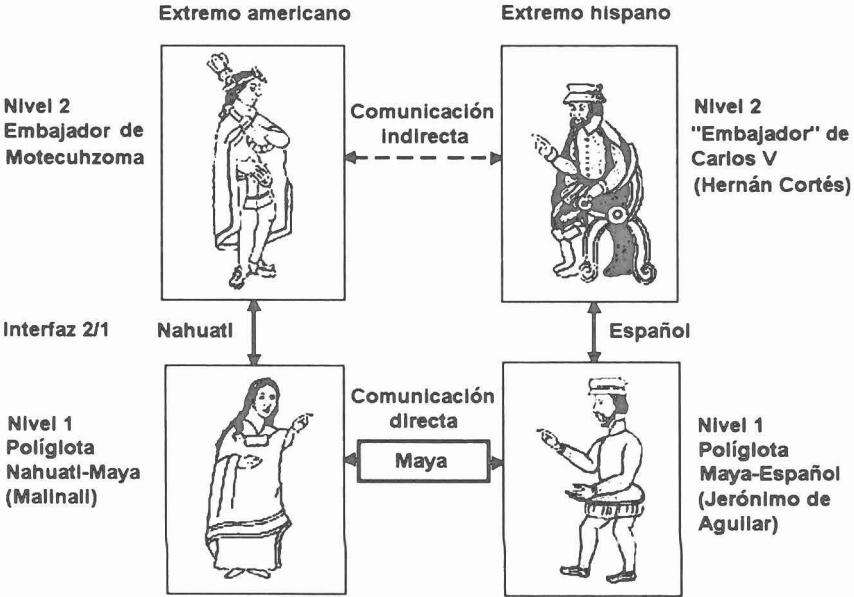


Figura 1.7: Analogía de la resolución de un problema de comunicación con capas o niveles especializados.

Este caso nos muestra cómo el flujo de una comunicación por capas especializadas pueden ayudar a superar problemas específicos del medio de comunicación: en este caso, el hecho de que Cortés no hablaba nahuatl y de que los embajadores de Moctezuma no hablaban castellano. Jerónimo de Aguilar, había naufragado 8 años antes frente a las costas de Cozumel, en la península de Yucatán, y había aprendido una variante de la lengua maya. Por su parte Malinali, hablaba perfectamente el maya y el nahuatl.

Entonces, el proceso de comunicación se dio siguiendo un mecanismo por capas: Cortés no se comunicaba directamente con los embajadores, primero hablaba en castellano a Jerónimo de Aguilar quien, a su vez, hablaba en maya a Malinali. Luego, Malinali hablaba a los embajadores en nahuatl. En sentido inverso, los embajadores respondían a Malinali en nahuatl, Malinali respondía en maya

a Jerónimo de Aguilar y, finalmente, éste traducía la respuesta en castellano para Cortés.

Así, en un primer sentido, empezando en el lado emisor, la comunicación fluyó en forma descendente de Cortés a Aguilar para luego, en el lado receptor, fluir en forma ascendente de Malinali a los embajadores. En el segundo sentido, empezando en el lado emisor, la comunicación fluyó en forma descendente de los embajadores a Malinali para luego, en el lado receptor, fluir en forma ascendente de Aguilar a Cortés. La comunicación pudo llevarse a cabo superando la barrera de la lengua, gracias a las habilidades lingüísticas (funciones especializadas) de los soportes de comunicación (capas) que representaron en su oportunidad Malinali y Jerónimo de Aguilar a los remitentes y destinatarios (entidades) últimos (usuarios finales).

1.6. LOS ALBORES DE LA INTERNET

En la historia de la *web* (técnicamente, la World Wide Web, *www* o «red informática mundial») encontramos que no todos sus precursores fueron constructores que realmente aportaron un nuevo componente funcional al sistema. En muchos casos se trata de visionarios cuya contribución consistió en inspirar a otros, proponiendo formas alternativas de entender el almacenamiento y el intercambio de documentos.

Por más de dos mil años, nuestra civilización había visto al libro de papel como el medio documental más efectivo para el registro y la transmisión de contenidos. El siguiente hito consistió en repensar al libro mismo a la luz de las oportunidades que planteaban el surgimiento de nuevas tecnologías para el registro de la información y su catalogación. Este es el caso de Vannevar Bush, quien sugirió la construcción de un dispositivo para almacenar libros, grabaciones y comunicaciones, a fin de facilitar la búsqueda y recuperación de sus contenidos.

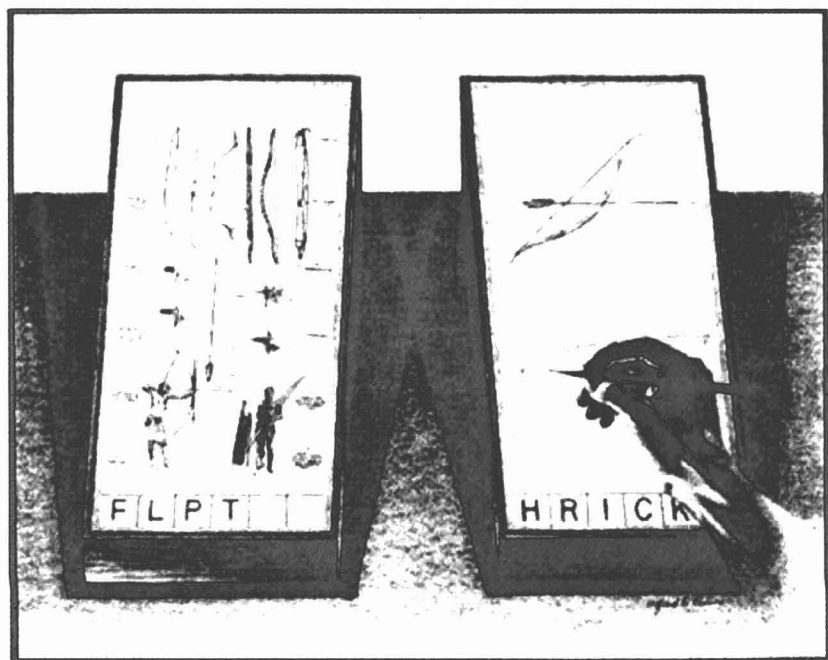


Figura 1.8: Pantallas de visualización y captura para el sistema MEMEX, tal y como se imaginaban a mediados del siglo XX.

El MEMEX¹, así fue como Bush bautizó a este proyecto, jamás vio la luz, pero sirvió de inspiración para la siguiente generación de ingenieros que vieron en la Internet la base sobre la que habrían de cristalizar esta idea.

El siguiente paso en el camino hacia la *web* fue la concepción del hipertexto, propuesto por Doug Engelbart. Se le llama así a un texto que se despliega en un dispositivo electrónico y que permite llegar hasta otros contenidos relacionados, partiendo de un texto inicial, al pulsar con el «ratón» ciertas zonas sensibles del texto. Denominamos «navegador» o «visualizador» al programa que sirve para desplegar hipertextos y seguir sus enlaces. Así, el hipertexto nos plantea la posibilidad

1 Acrónimo de Memory - Index, aunque algunos autores opinan que el origen del término es Memory - Extender.

de construir un «libro» infinito o, en todo caso, uno que puede leerse de varias formas (como la obra *Rayuela* de Julio Cortázar).

En 1989, el Centro Europeo para la Investigación Nuclear o CERN, por sus siglas en francés, contaba con el nodo de Internet más importante en Europa. A pesar de que los científicos venían usando la Internet desde hacía más de una década, para compartir información especializada en formato digital, fue el joven Tim Berners-Lee, que entonces se encontraba trabajando en el CERN, quien pudo reconocer la necesidad de la comunidad científica de contar con un mecanismo ágil para el intercambio de documentos electrónicos.

Berners-Lee desarrolló las ideas fundamentales que estructuran la *web* como hoy la conocemos. Él y su grupo crearon lo que se denomina lenguaje HTML (*Hyper Text Markup Language*) o 'lenguaje de etiquetas de hipertexto', el protocolo HTTP (*HyperText Transfer Protocol*) para el intercambio de documentos y el concepto de URL (*Uniform Resource Locator*) o 'localizador de recursos uniforme'. Un localizador de recursos uniforme es una secuencia de caracteres que, de acuerdo con un formato normalizado, se usa para nombrar recursos en la Internet para su localización o identificación como, por ejemplo, texto, imágenes, videos y audio. Los localizadores uniformes de recursos fueron una innovación fundamental en la historia de la Internet.

El primer servidor *web* se encontraba en el CERN y fue puesto en línea el 6 de agosto de 1991. A partir de los noventa fuimos testigos del acelerado crecimiento de la *web* o, podríamos decir, de la irrupción de la *web* en nuestras vidas: al principio mandamos correos electrónicos, ahora estamos conectados con redes sociales y sostenemos videoconferencias con personas en cualquier parte del mundo. Hemos visto la aparición de nuevos servicios ofrecidos por entidades públicas y privadas. Hemos presenciado la guerra de los navegadores, el nacimiento, la gloria y el ocaso de la famosa burbuja de las empresas «.com». También hemos presenciado el surgimiento de entidades que, como el «*Big Brother*» de la novela 1984 de G. Orwell, nos tienen bajo su lupa. Igualmente, hoy las «nuevas» formas de entretenimiento parecen amenazar a las «antiguas», las que surgieron y conocimos hasta el siglo XX, para someterlas a lo que podríamos llamar una «presión evolutiva»: renovarse o morir.

1.7. LA BIBLIOTECA DE BABEL

Para terminar este breve recuento, mencionaremos el surgimiento del «equipo personal de comunicaciones», una mezcla de teléfono y computadora, que nos convierte no sólo en consumidores de contenidos sino, además, en generadores de éstos.

Hasta hace algunos siglos, en tiempos de paz, el hombre común pasaba la mayor parte de su vida en una región que abarcaba unas decenas de kilómetros. A lo largo de su existencia interactuaba, sobre todo, con los vecinos de su comunidad. La gente rara vez recibía noticias de sitios más allá de su entorno inmediato. Sin embargo, las telecomunicaciones y los medios de transporte vinieron a transformar nuestro sentido de pertenencia a un colectivo (identidad).

El día de hoy podemos vernos como comunidades libres de las restricciones de la distancia: comunidades que, sin importar la distancia, interactúan a través de las redes de telecomunicaciones. Podemos y debemos estar al tanto de los acontecimientos que ocurren al otro lado del mundo ya que, por increíble que parezca, pueden tener impacto en nuestro quehacer cotidiano.

Nos encontramos, quizá, ante el nacimiento de nuevas entidades colectivas: aglomerados sociales con vínculos virtuales que, a la manera de «monstruos» contruidos con partes de múltiples organismos, cuentan con «cabezas» interconectadas mediante la red de información y comunicaciones (denominada simple y llanamente como la *red*), para sincronizar tareas a fin de concretar metas y objetivos comunes.

Por ejemplo, la red ha propiciado nuevas formas de interacción entre las personas y ha servido también como catalizador de ideas y movimientos sociales, como lo hemos atestiguado con la llamada «Primavera árabe de 2011», con el movimiento global de «Los indignados» o, más recientemente en México, con el movimiento de jóvenes «#YoSoy132».

¿Cuáles son los problemas de nuestra sociedad para los que la red podría contribuir a su solución?, ¿cuáles son los problemas que la red plantea para nuestra convivencia en el siglo XXI? Por un lado, nos ofrece la oportunidad de mejorar la cobertura de muchos servicios que hasta ahora no han podido brindarse a toda la población. La educación podría ser uno de estos servicios beneficiados. Por otro lado, la red plantea nuevos retos como el derecho a conocer la información de interés público y el derecho a proteger la información personal.

Jorge Luis Borges escribió un fantástico cuento titulado *La Biblioteca de Babel*, cuya idea central plantea la existencia de una colección, aparentemente infinita, de libros arbitrariamente ordenados. Se trata de un cuento lleno de simbolismos y significados escondidos que, por años, ha sido un divertimento intelectual pero, además, ha servido de inspiración para especialistas en áreas tan diversas como la sicología, la biología, las matemáticas y la computación. ¿Podría esta biblioteca ser una metáfora de la Internet?



Figura 1.9: Julian Assange, de la organización Wikileaks, en apoyo al grupo de jóvenes #YoSoy132 (La jornada, 25 de febrero de 2013).

Umberto Eco, por su parte, plantea algunos paralelismos entre su novela *El nombre de la rosa* y el cuento de Borges. Para Eco, la biblioteca es el símbolo del conocimiento, de las caras que puede tener el infinito. ¿Qué somos?, ¿qué significado tiene el mundo?, ¿qué podemos conocer?, ¿existirá un «libro» dentro del Universo que explique al mismo Universo?, ¿podremos ir en su búsqueda?

Entonces, estamos ante las puertas de un repositorio, aparentemente infinito, de información y contenidos que, quizá, representa un nuevo paso significativo en nuestro camino como especie. Hemos creado un sistema cuya complejidad nos rebasa. Al igual que la economía global, se trata de un sistema cuyo derrotero sólo puede predecirse en el corto plazo, el futuro lejano aún no se escribe. Somos noso-

tros los que decidiremos el futuro de «La Biblioteca de Babel», que sólo se materializará con nuestras decisiones.

En todo este libro aparecerá constantemente la palabra comunicación, pero ¿qué es?, ¿cómo surgió y se desarrolló en la especie humana? Algunas respuestas a esta pregunta las encontraremos en el siguiente capítulo.

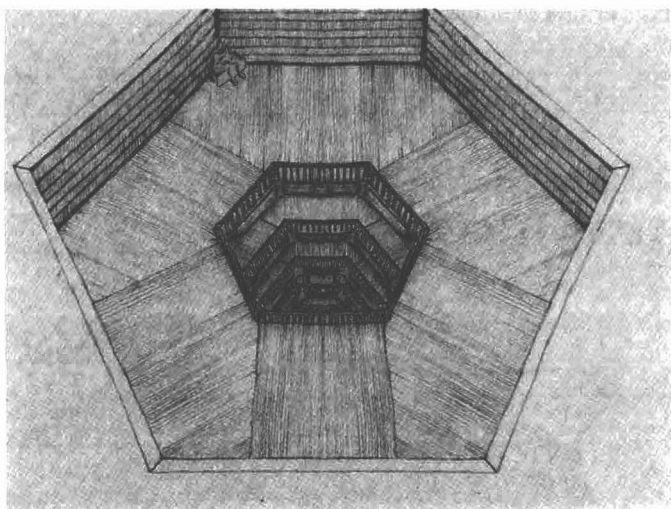
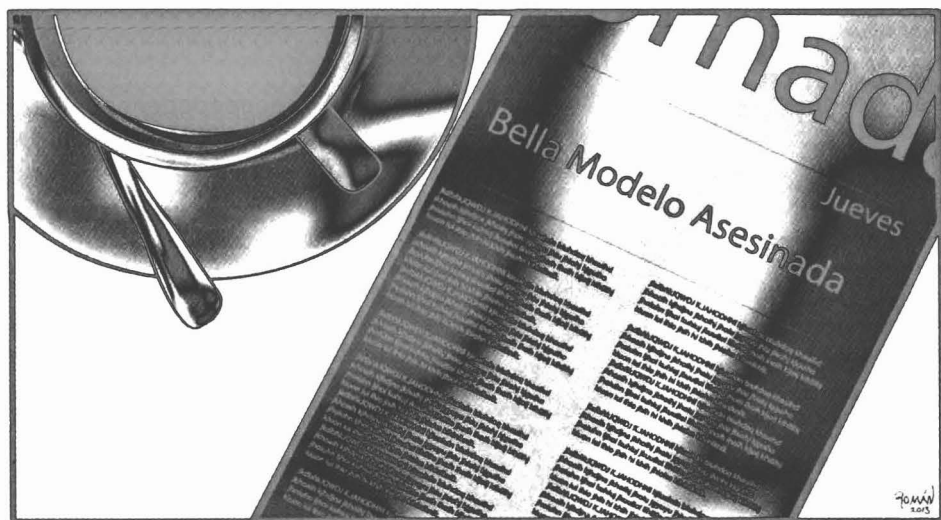


Figura 1.10: La imaginaria Biblioteca de Babel.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO 1

- [1] F. Alba-Andrade. *El desarrollo de la tecnología - La aportación de la física*. FCE, 1987. Serie La ciencia para todos - 123.
- [2] Eliezer Braun. *Electromagnetismo: de la ciencia a la tecnología*. FCE, 1992. La ciencia desde México - 112.
- [3] F. Kuhlman and A. Alonso. *Información y Telecomunicaciones*. FCE, 1996. Serie La ciencia desde México - 149.
- [4] Peter Watson. *Ideas: historia intelectual de la humanidad*. Crítica, 2006.



Escena 2: Todo comenzó con una solicitud en Facebook, seguida de un largo intercambio de e-mails

Al fin tuve armado el rompecabezas con la chica del sombrero, luego de varios días en que fui recibiendo los fragmentos del cartel. La chica del sombrero estaba parada delante de un gran espejo que reflejaba parte de su cuerpo y parte de la recámara en la que se encontraba. Mi interlocutora, quien se había tomado el cuidado de partir la imagen en pequeños pedazos, me había contactado inicialmente por una invitación a mi cuenta de Facebook. Estaba seguro que se trataba de la misma chica que adornaba mi pared.

Luego del primer contacto, pasamos a un intercambio más privado a través de nuestras cuentas de e-mail. Como podía leer mi correo desde mi teléfono, entonces entramos en una etapa en la que intercambiábamos mensajes de todo tipo y a todas horas. «Platicamos» sobre muchas cosas. Entonces, ella me dijo que iba a mandarme un «rompecabezas»: Ignoraba a dónde iba a terminar este juego y por un momento tuve miedo, pero rápidamente lo superé ante las otras posibilidades que se me presentaban. Sabía perfectamente de quién se trataba, o al menos eso pensé: la había conocido en una feria tecnológica. Acepté el juego que me estaba proponiendo, aun presentándose con otra identidad. Cuando el cartel estuvo casi terminado acordamos reunirnos en un pequeño y acogedor rincón de Coyoacán, allá por la calle de Francisco Sosa.

Llegué muy puntual y decidí esperar antes de tomar algo, como una atención con ella. Luego, fueron pasando los minutos que se hicieron cada vez más largos. Durante la espera pensé en Violeta, tenía meses que no la veía, desde que había discutido con ella porque quería prestarle los ahorros de

toda su vida a su novio, un tipo a quien apenas conocía. Tan solo intercambiaba mensajes breves con ella. Tuve un presentimiento y un súbito impulso de llamar a Violeta inmediatamente: le marqué, pero nunca contestó.

Como estaba desesperándome decidí pedir un café. La mesera me ofreció el periódico del día. Estaba a mitad de un sorbo, ojeando las páginas, cuando tuve un sobresalto que me volteó la taza sobre las piernas: encontré el rostro de la chica del sombrero en una nota policiaca. ¡Estaba muerta!, había sido horriblemente asesinada y su rostro desfigurado por el impacto de una bala. La nota decía que la mujer de servicio había encontrado su cuerpo en el flamante chalet-estudio de un fotógrafo, en una exclusiva zona de Cuajimalpa. Sólo habían podido reconocerla por las pertenencias que llevaba consigo. Todo cambió de sentido, el estómago me daba vueltas y corrí al baño, para vomitar, del puro pánico. Como pude, pagué la cuenta y salí del lugar. En ese momento mi teléfono me hizo saber que tenía un nuevo e-mail, era la misma imagen, esta vez completa, que había construido sobre el muro de mi estudio.



Historieta del Hombre Fuerte
19/05/2012



SANTI
FIN

Un niño normal adquiere casi por completo el lenguaje de su comunidad a los 6 años. Si se ha desarrollado en un entorno social apropiado, es capaz de expresar emociones, necesidades, nombres, descripciones y preguntas.

Capítulo 2

El lenguaje humano y sus medios de comunicación

«Entonces tuvieron apariencia humana, y hombres fueron; hablaron, dijeron, vieron, oyeron, anduvieron, asieron»

Popol Vuh

En este fragmento del *Libro del Consejo (Popol Vuh)*[1], con el que inicia este capítulo, el pueblo Quiché habla del génesis del Hombre con profundo sentido poético. Llama la atención el orden en el que se mencionan las habilidades humanas: lenguaje, percepción sensorial y habilidad motriz. Lo más importante, si asumimos que las habilidades humanas se mencionan en orden de importancia, es el lenguaje. Pero, ¿qué es el lenguaje?, ¿cómo surge el lenguaje humano?, ¿cuáles son los elementos de toda comunicación? y, finalmente, ¿cuáles son los elementos que tienen en común la comunicación humana y los actuales esquemas de comunicación digital? En este capítulo intentaremos dar respuesta a estas preguntas.

2.1. EL LENGUAJE HUMANO

Para empezar, podemos afirmar que todo proceso de comunicación implica:

- El uso de una señal física a la que se le asocia un elemento del mensaje (símbolo).
- La construcción de mensajes complejos usando símbolos elementales.
- El empleo de reglas sintácticas y semánticas que gobiernan la agregación y desagregación de los símbolos en un mensaje (composición y descomposición del mensaje).



Figura 2.1: «Entonces tuvieron apariencia humana, y hombres fueron; hablaron, dijeron, vieron, oyeron, anduvieron, asieron» (*Popol Vuh*).

Según la Real Academia Española (RAE), en su acepción más general, el lenguaje es el «Conjunto de señales que dan a entender algo». Así tenemos que esta definición tan amplia comprende tanto al lenguaje humano como al de los animales. En un video documental reciente, sobre simios, se mostraba la capacidad de los chimpancés para utilizar herramientas, simples palos y rocas, para abrir nueces y cómo, mediante un sutil lenguaje de gestos corporales, un chimpancé hembra solicitaba prestada una piedra al macho que la usaba. Si los animales también usan cierta clase de lenguaje, entonces ¿qué es lo que distingue al lenguaje humano del de los animales? El lenguaje humano permite [2]:

- nombrar,
- describir,
- narrar y
- preguntar.

El Hombre no solamente designa objetos percibidos por los sentidos sino, más importante, objetos y conceptos abstractos. Así, el *Homo sapiens*, surgido aproximadamente hace 130 mil años [7], se distingue por ser esencialmente un *Homo symbolicus*, como lo afirmó Ernst Cassirer [3].

A tal punto ha sido importante nuestra capacidad para el lenguaje, sobre todo en nuestro desarrollo como especie humana, que algunos científicos, como Jared Diamond, han afirmado que esta capacidad permitió dar un «gran salto hacia adelante» [5].

La gran pregunta es ¿cómo surgió el lenguaje humano? Esta pregunta no tiene una respuesta verificable y es, de hecho, uno de los grandes misterios de la historia de la humanidad, a la par del misterio de su propio origen como género y como especie. No va a ser fácil, y tal vez sea imposible, saber el momento y la forma exacta en que apareció el lenguaje humano, pues es como el caso de la pregunta ¿qué fue primero, el huevo o la gallina? ¿Qué fue primero, el Hombre o el lenguaje?, ¿apareció primero el Hombre y luego éste desarrolló el lenguaje?, ¿fue la aparición del lenguaje lo que condujo al Hombre? O, tal vez, ¿el Hombre y el lenguaje aparecieron al mismo tiempo?

Algunos sugieren que el Hombre desarrolló primero su habilidad para construir herramientas y que el habla surgió después, como resultado de entrenar a su mente con la constante resolución de problemas prácticos y a fin de satisfacer la necesidad de coordinación de los esfuerzos de su comunidad para lograr propósitos comunes, como la obtención de alimento mediante la cacería en equipo. Éste es el caso del escritor y científico Arthur C. Clarke, que en su novela 2001: *Una odisea en el espacio* sugiere que nuestros ancestros homínidos «aprendieron» a construir herramientas y armas antes que a hablar.

Otros investigadores como Noam Chomsky, sugieren que el Hombre tiene una predisposición natural e innata al lenguaje [4], lo que se confirma, de alguna manera, al observar cómo los niños, con un mínimo de elementos lingüísticos, son capaces de aprender y dominar la lengua que se habla a su alrededor antes de los cinco años. No obstante, la capacidad del habla es una habilidad que se desarrolla sólo con ayuda de la comunidad. Se han documentado casos de niños que permanecieron incommunicados durante sus primeros años de vida (niños criados por animales o niños aislados víctimas de mentes psicópatas) que no pudieron desarrollar un

lenguaje humano durante su primera infancia y que no pudieron adquirirlo después, pese a los esfuerzos de especialistas. En efecto, la ventana de tiempo para desarrollar un lenguaje en forma «fácil» es muy breve: la máxima receptividad está presente hasta antes de los cinco años y va disminuyendo gradualmente hasta que, después de los quince años, es notoriamente menor [7].

Hoy, el consenso general es que si el Hombre de hace 130 mil años ya tenía características anatómicas y mentales idénticas a las actuales, es muy probable que también presentara las mismas habilidades en el uso de un lenguaje complejo y en el diseño y construcción de herramientas. Antes de esta época, sólo se puede especular acerca de si existía alguna clase de lenguaje nominativo y descriptivo.

La teoría neodarwiniana de la evolución es el marco más difundido para tratar de explicar la evolución del Hombre y, por añadidura, para explicar el surgimiento de las capacidades intelectuales del Hombre, en particular, las del lenguaje. Desde la perspectiva de François Jacob [6], el proceso de evolución por selección natural se parece más a un improvisador (*bricoleur*) que a un diseñador: se toma lo que se tiene al alcance, lo que ya existe, se lo adapta y se le dan nuevas funciones. Así, explica Jacob, la evolución no innova de la nada: combina diversos sistemas existentes para obtener otro más complejo, añadiendo nuevas estructuras a las antiguas, más que reemplazarlas.

Para Jacob, el cerebro de los mamíferos es un claro ejemplo de este enfoque evolutivo. De hecho, lo que les permitió evolucionar rápidamente, desde cierta clase de mamíferos hasta llegar al Hombre, fue la adición de un nuevo neocórtex, que rige la actividad intelectual y cognitiva, al antiguo rinencéfalo, que rige las actividades viscerales y emotivas. Así, en el Ser Humano se tiene a un espécimen que mantiene sus instintos y emociones animales esenciales pero, al mismo tiempo, tiene sobrepuesto un sistema que le permite cierta actividad intelectual y que, incluso, puede llegar a controlar algunas respuestas instintivas. Jacob comenta, con cierta dosis de humor, que esto es como colocar un motor de reacción en una carreta vieja, por supuesto, no sin los consecuentes riesgos del caso [6].

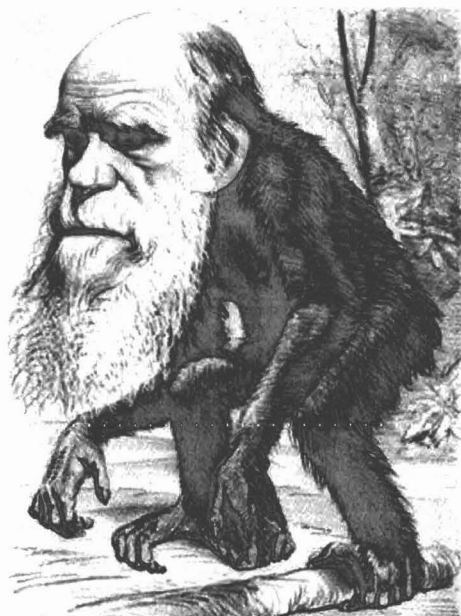


Figura 2.2: ¿Qué fue primero, el Hombre o el lenguaje? En la imagen, caricatura sobre Charles Darwin y su «Teoría de la evolución de las especies» (*The Hornet*, 22 de marzo de 1871).

Un proceso de improvisación similar, pero por iniciativa propia, permitió al Hombre adaptar el uso de pulmones, laringe, faringe, traquea, labios, lengua, dientes, encías, cavidad bucal y fosas nasales, que originalmente no tenían funciones lingüísticas sino relacionados con los procesos de los sistemas respiratorio y digestivo, para producir artificialmente los sonidos articulados empleados en el lenguaje hablado. De manera paralela, el Hombre tuvo que entrenar a su oído para funciones lingüísticas, superponiendo la nueva función a las funciones auditivas originales.

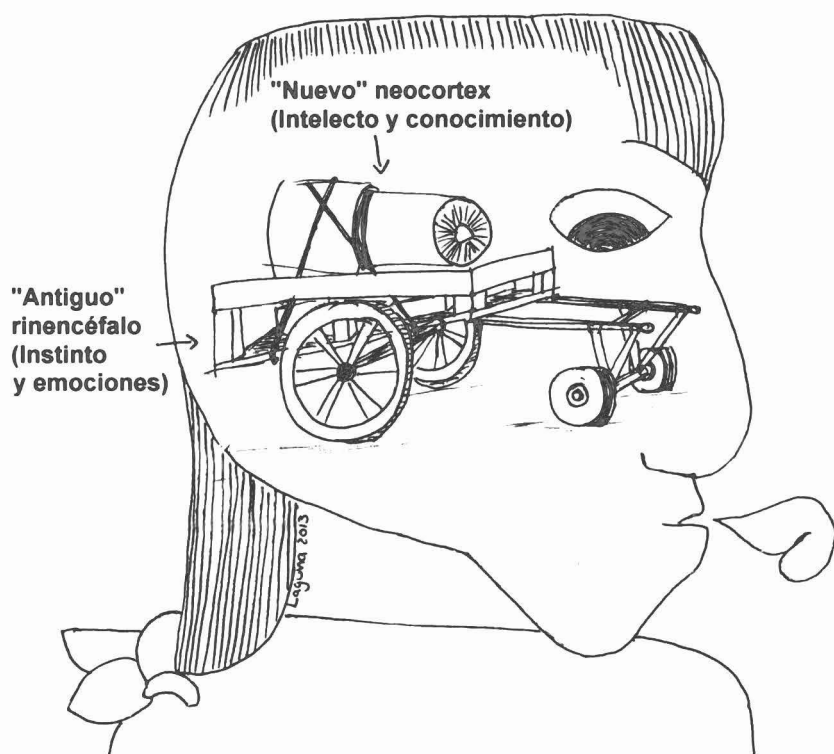


Figura 2.3: Analogía del cerebro humano, según François Jacob, tal como si el desarrollo evolutivo estuviera a cargo de un gran e invisible bricoleur.

Otra atractiva idea de François Jacob, a fin de mejorar nuestro conocimiento sobre los procesos evolutivos, incluyendo el del Hombre, es la de estudiar los procesos del desarrollo embrionario, puesto que muestran etapas muy parecidas a las que probablemente tomó la evolución de los vertebrados: partiendo de los primeros organismos unicelulares, pasando por formas vertebradas primitivas, hasta llegar a su condición actual. Si retomamos esta misma idea y la empleamos para vislumbrar cómo pudo surgir el lenguaje humano, podemos estudiar el desarrollo del lenguaje en los niños. Así, podemos confirmar, como lo hizo el filósofo Friedrich Kainz, que las funciones lingüísticas van apareciendo en los niños (y posiblemente así fue para la humanidad) en las siguientes etapas [2]:

1. Función interjectiva. Expresa emociones, como asombro, sorpresa, dolor y molestia.
2. Función imperativa. Expresa necesidades.
3. Función indicativa-informativa. Expresa los nombres de las cosas y sus descripciones.
4. Función interrogativa. Expresa preguntas.

La función interjectiva no requiere de acervo sintáctico¹ alguno, incluso la función imperativa puede prescindir de éste mediante señas apropiadas, pero es a partir de la función indicativa-informativa que el acervo sintáctico se hace imprescindible. Ya no sólo se trata de expresar emociones o estados de ánimo sino, más bien, de comunicar contenidos mentales. Finalmente, la capacidad de interrogar permite el diálogo y la comunicación. Así, cuando el niño (y el hombre) puede preguntar, se puede afirmar que ya posee un lenguaje humano.

2.2. EL PROCESO DE COMUNICACIÓN

Según la RAE, una de la acepciones para la acción de comunicar es «Conversar, tratar con alguien de palabra o por escrito». Esta definición se refiere a la comunicación humana, pero esta misma definición puede hacerse más general si, en vez de partir de la palabra como unidad básica de comunicación, partimos de una unidad de mensaje más general a la que llamaremos símbolo. Así el mensaje no es mas

1 La sintaxis es la parte de la gramática que enseña a coordinar y unir las palabras para formar las oraciones y expresar conceptos. Entonces un acervo sintáctico no es más que el conjunto de conocimientos sobre las reglas sintácticas del lenguaje empleado.

que un conjunto de símbolos organizados con un significado (contenido semántico). Los símbolos desorganizados que no son de interés se consideran mensajes de interferencia.

A su vez, los símbolos pueden ser representados mediante señales (cualquier variable que se puede medir u observar) y organizados mediante códigos (estructuras predefinidas). Las señales permiten transportar a los símbolos mediante su «montaje» en ellas, lo que técnicamente se conoce como «modulación». Las señales desorganizadas que no son de interés se consideran ruido.

Entonces, codificar un mensaje equivale a expresarlo mediante símbolos organizados en ciertas estructuras y de acuerdo con reglas predefinidas. Sólo el conocimiento de los símbolos, de las estructuras y de las reglas empleadas nos permitirá recuperar el mensaje codificado. Por ejemplo, un chino puede leer el periódico con ideogramas chinos porque los reconoce y sabe las reglas para la construcción de oraciones con ellos.

Continuando con nuestro estudio sobre los elementos de la comunicación, tenemos la siguiente acepción de la RAE. Comunicar es «Transmitir señales mediante un código común al emisor y al receptor». En esta definición se hace explícito que, para que exista comunicación, el código y las reglas empleadas deben ser conocidas tanto por el transmisor como por el receptor, es decir, debe existir un acuerdo común (técnicamente se dice protocolo). También se manifiesta la necesidad de un medio por el que puedan viajar las señales transmitidas. Entonces, cualquier comunicación involucra un intercambio de símbolos, organizados y con significado, entre un transmisor y un receptor, a través de un medio de comunicación. Cuando el medio es ideal no existe ruido, pero en la mayoría de los casos el medio no es ideal y se adicionan señales de ruido, así como mensajes de interferencia, que pueden llegar a distorsionar el mensaje de interés.

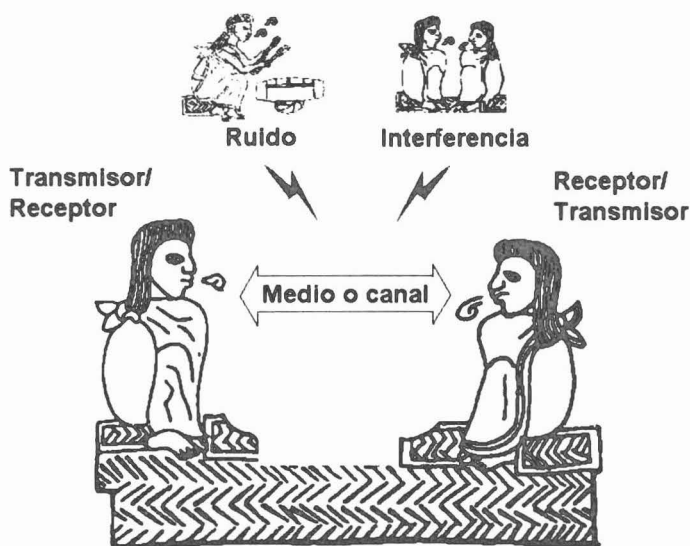


Figura 2.4: Los elementos de un sistema de comunicación.

En resumen, los elementos de un sistema de comunicación son:

- Transmisor. Emite la señal de comunicación.
- Receptor. Recibe la señal de comunicación.
- Medio. Conducto por el que viaja la señal de comunicación y que puede producir cierta atenuación de la misma. Dicha atenuación generalmente aumenta con la distancia.
- Ruido. Señales sin interés.
- Interferencia. Mensajes sin interés.

Estos elementos se pueden identificar tanto en el proceso de comunicación humana como en el de las comunicaciones electrónicas. Sin embargo, en las últimas se cuenta con herramientas y dispositivos que permiten «prolongar» los sentidos del Hombre durante el proceso de comunicación para lograr, al menos, mejoras como:

- Oír a distancia
- Ver a distancia

Entonces, el propósito de un ingeniero en el ámbito de las comunicaciones electrónicas puede justificarse en términos de dos grandes retos:

1. El diseño de mejores dispositivos (más eficientes, más económicos y que contaminen menos).
2. El diseño de técnicas para enfrentar y superar, de la mejor manera, los grandes problemas del medio de comunicación: la atenuación, el ruido y la interferencia.

2.3. LA ANALOGÍA DE LA COMUNICACIÓN EPISTOLAR

Los modernos sistemas de comunicación digital han evolucionado a partir de una primera solución tecnológica en la que el mensaje original se descomponía en partes más pequeñas, de manipulación más simple, a los que se denominó como «paquetes» y que, como tales, se les agregaba cierta información de control. Luego, conforme fueron surgiendo nuevos retos, los sistemas se fueron desarrollando sobre esta misma base operativa. Por lo antes explicado, conviene detenernos a estudiar los principios de operación de esta solución que descompone el mensaje en paquetes para facilitar un mejor procesamiento y un envío exitoso.

Primero, debemos pensar en el proceso de comunicación como un sistema, es decir, como un conjunto de bloques funcionales articulados que tienen como fin lograr una comunicación exitosa. Ya dijimos que se trata de dividir al mensaje original en paquetes más manejables. La información que se agrega a estos paquetes tiene, en esencia, dos propósitos:

- 1 Redundancia, para minimizar los efectos negativos del medio de comunicación.
2. Control, para identificar la naturaleza, función y secuencia de los paquetes.

Entonces, el propósito de obtener paquetes «etiquetados» es que cada bloque por el que pasa un mensaje sepa qué hacer con éste. Así, en el transmisor, después de fragmentar el mensaje original, cada fragmento se «encapsula», en un paquete con cierta función y éste, a su vez, se encapsula en un paquete mayor con otra función específica. En el receptor se realiza el proceso inverso: se «desencapsulan» los paquetes para recuperar los fragmentos del mensaje, los que, finalmente, se colocan en su lugar para reconstruir el mensaje original.

Este proceso es análogo a lo que ocurre con las *matrioskas*, las muñecas rusas de madera, donde cada muñeca está en el interior de otra, hasta obtener una de mayor tamaño. En sentido inverso, podemos retirar las envolturas consecutivas hasta llegar al corazón de la misma, en donde se encuentra la primera muñeca, que es la más pequeña.

Similarmente, en el caso de las comunicaciones digitales modernas, a partir del mensaje original, en el transmisor se generan paquetes pequeños (las matrioskas más pequeñas) y, en sucesivas etapas, se van encapsulando en paquetes mayores (se introducen en las siguientes matrioskas). Este proceso se repite, al ir pasando por las diferentes etapas funcionales, hasta obtener los paquetes más grandes, que se componen del paquete más pequeño pero «cubierto» por una secuencia de «envolturas» con la información necesaria de control y redundancia. Los paquetes más grandes son los que en realidad, de alguna forma, se transmiten por el medio hasta llegar al receptor. Cuando el receptor recibe los paquetes grandes, los va pasando por etapas complementarias que van retirando las envolturas, agregadas por sus contrapartes en el lado transmisor, y verificando que la información de control y redundancia corresponda a lo esperado. Finalmente, se recuperan los paquetes pequeños, con los que se reconstruye el mensaje original y se interpreta. Ilustraremos este proceso con un sencillo ejemplo de la vida real que incluye, a su manera, las etapas fundamentales del proceso de comunicación digital con base en paquetes: se trata del servicio postal.

Supongamos que necesitamos enviar el contenido de un libro a un lugar distante. No contamos con servicio de paquetería, ni con máquina de escribir, ni con computadora alguna, pero sí contamos con el servicio postal. Podemos transcribir a mano el contenido del libro y enviar las hojas resultantes, en pequeños paquetes, empleando el servicio postal. Pero, tenemos otro problema: nuestra caligrafía es pésima, incluso nos es difícil leer nuestra propia letra, por ejemplo, escribimos muy similares la letra «v» y la letra «r»; la letra «e» y la letra «c», la «h» y la «n», etc. Entonces, acordamos con nuestro interlocutor las reglas para lograr una comunicación exitosa (definimos un protocolo). El acuerdo incluye, para empezar, la forma en que se fragmentará el contenido del libro y el código que se empleará para evitar malos entendidos debido a nuestra mala caligrafía (ruido).

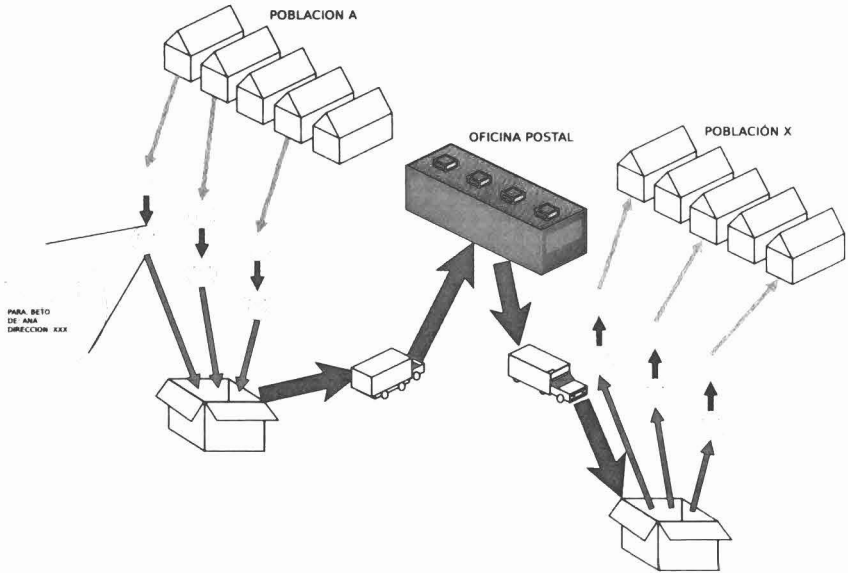


Figura 2.5: La analogía de la comunicación epistolar.

Una solución para fragmentar el contenido del libro sería dividirlo por páginas, transcribir cada página a hojas y enviar las hojas resultantes de cada página en un mismo sobre al destinatario. Se puede usar una codificación tan simple como el empleo de puras mayúsculas con caracteres de molde. Aquí la redundancia se traduce en letras que ocupan mayor espacio con tal de que su reconocimiento sea más confiable. Por lo demás, podemos emplear el servicio postal en la forma tradicional, anotando, como es usual, la información del remitente y del destinatario en el sobre que contendrá el paquete de nuestro mensaje escrito. Así, en el lado del transmisor, el procesamiento del mensaje original, para la obtención de los paquetes adosados con la información de redundancia y control, sería el siguiente:

1. Se codifica (transcribe) el contenido del libro a hojas, usando el código elegido.
2. Se etiqueta cada hoja con el número de la página fuente del libro y con el número de secuencia que le toca (por ejemplo, la etiqueta 1:2, indicaría la hoja 2 transcrita a partir de la página 1 del libro).

3. Se arman paquetes con las hojas correspondientes a cada página del libro. Cada paquete se introduce en un sobre (primer encapsulamiento) y se envía al buzón con la siguiente información de control:
 - Remitente.
 - Destinatario.
 - Timbre postal con el porte del servicio.
4. El personal recolector recupera los sobres del buzón y los almacena en una valija formando un paquete mediano. Este es el segundo encapsulamiento.
5. En la oficina postal local, un despachador verifica que el porte esté pagado y reclasifica los sobres según su destino. Aquí, se arman paquetes grandes con destinos comunes. A cada paquete se le agrega información de control con la dirección de la oficina postal destino. Éste es el tercer encapsulamiento.
6. Se confinan los paquetes en un contenedor para su traslado a la oficina postal destino. Éste es el cuarto, y último, encapsulamiento (el mayor de los paquetes) antes de iniciar el viaje por un medio físico (ya sea terrestre o aéreo).

En el lado del receptor, el procesamiento correspondiente del contenedor recibido, desagregando los paquetes y verificando la información de control, sería el siguiente:

1. En la oficina postal destino se abre el contenedor y se sacan los paquetes grandes. Aquí, se verifica (para ello sirve la información de control) que la oficina destinatario sea la correcta. Éste es el primer desencapsulamiento.
2. El despachador del servicio postal extrae las cartas del paquete grande y las distribuye a las valijas de los carteros repartidores, de acuerdo con el destino final. Se verifica que la dirección del destinatario coincida con la zona postal atendida. Éste es el segundo desencapsulamiento.
3. El cartero repartidor entrega el sobre en el buzón del destinatario final, después de verificar la dirección. Éste es el tercer desencapsulamiento.
4. El destinatario final extrae el sobre del buzón, verifica que esté dirigido a él y abre el sobre para extraer su contenido. Éste es el cuarto, y último, desencapsulamiento para extraer los paquetes codificados (transcritos).
5. Se ordenan los paquetes recibidos, conforme a la secuencia de hojas y a los números de páginas correspondientes.
6. Se decodifica (lee) el mensaje para recuperar el contenido original.

En este ejemplo con el servicio postal, se puede apreciar cómo en cada etapa del proceso de comunicación se cumplen funciones específicas que se apoyan en la correspondiente información de control.

Aunque, en lo general, la analogía epistolar corresponde fielmente a su equivalente en las comunicaciones digitales, conviene aclarar que en lo relativo al medio de comunicación digital (conocido técnicamente como «Nivel Físico») normalmente no se cuenta con capacidad para el traslado simultáneo de todos los paquetes resultantes en un único viaje. En realidad, se cuenta con medios limitados que solamente permiten transmitir elementos de información muy simples. Estos elementos se denominan símbolos (en nuestra analogía epistolar serían las letras) y los sistemas se ven obligados a transmitirlos, uno por uno, más que agrupados.

Así, una mejor analogía, para la operación del Nivel Físico de un sistema de comunicación digital, es el sistema de poleas que se usa en algunos edificios para secar la ropa a la intemperie. Se trata de un cordel, amarrado en sus extremos, que pasa por dos poleas, una en cada uno de los dos extremos: el muro de enfrente y el muro propio. En este sistema, se cuelga la ropa en el cordel, se fija con pinzas y se jala el cordel libre para llevar la ropa al extremo opuesto. El proceso se puede repetir mientras haya cordel libre.

Para usar el sistema de cordel y poleas, en vez de mover todos los paquetes de sobres con un contenedor, entre las oficinas postales remitente y destinatario, supondremos que podemos trasladar el contenido de nuestros paquetes letra por letra en una secuencia ordenada.

Los sistemas de comunicación digital funcionan con base en un conjunto de bloques funcionales que agregan información de control y redundancia en el lado transmisor, mientras que la retiran y procesan en el lado receptor. En las comunicaciones digitales podemos identificar, al menos, los siguientes bloques funcionales acomodados en capas (como una pila de cajas). A saber, de arriba hacia abajo:

- Nivel de Aplicación. Donde se encuentra el mensaje original con un significado (contenido semántico). En nuestro ejemplo, este nivel corresponde a las personas que pueden leer el libro, tanto el que lo envía como el que lo recibe.
- Nivel de Transporte. Donde se dividen mensajes muy grandes en fragmentos más pequeños y manipulables. En nuestro ejemplo, este nivel corres-

ponde a la división del contenido del libro en páginas y a su correspondiente reconstrucción.

- Nivel de Red. Donde se encaminan los paquetes a su destino. En nuestro ejemplo, este nivel corresponde al trabajo realizado por las oficinas postales.
- Nivel de Enlace. En este nivel, a fin de garantizar una comunicación libre de errores, en el transmisor se agrega información redundante, mientras que en su contraparte receptora se verifica y retira la misma. En nuestra analogía epistolar, este nivel corresponde a la codificación (transcripción) y decodificación (lectura) de las letras, así como al etiquetado de las hojas resultantes con la secuencia correcta.
- Nivel Físico. Donde se trasladan los paquetes finales, símbolo por símbolo, mediante señales que viajan por un medio físico o canal. En nuestra analogía, este nivel corresponde al traslado de todas las letras en papel.

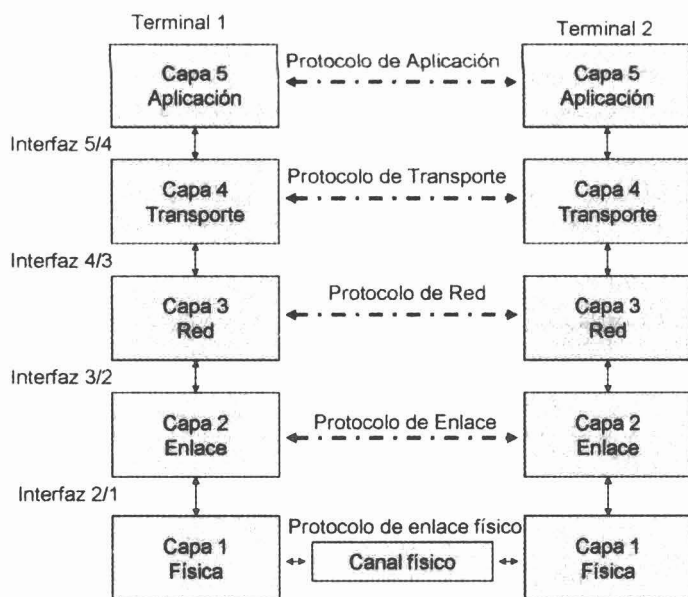


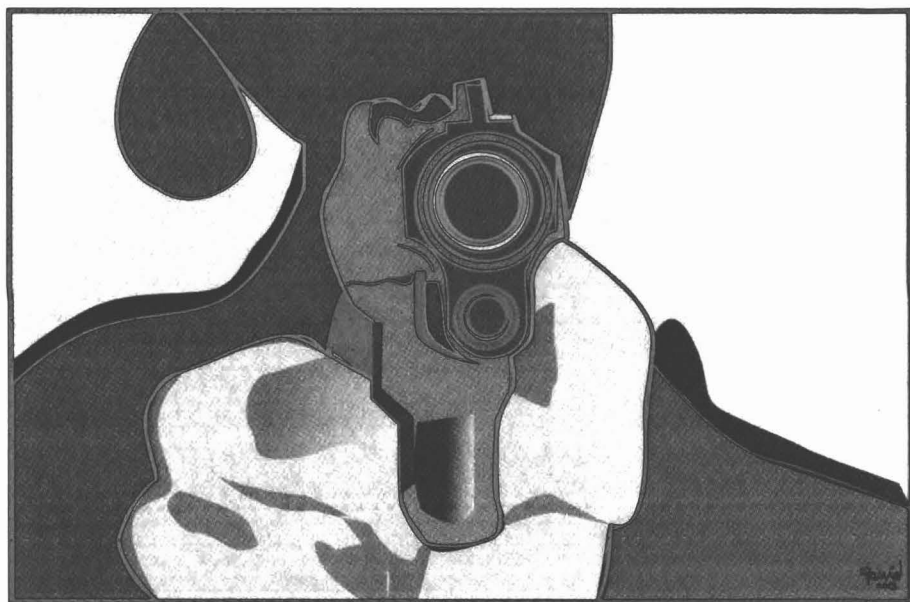
Figura 2.6: Capas especializadas relevantes en los sistemas de comunicación digital.

Hasta ahora hemos hablado de la comunicación humana y de la motivación del Hombre para desarrollar herramientas tecnológicas que la faciliten y mejoren. Parecería que en este campo todos los esfuerzos se enfocaron, desde el principio, para este propósito. Sin embargo, no fue así en realidad. En éste, como en otros casos, muchos de los desarrollos tecnológicos han ido incorporando y aprovechando soluciones ideadas originalmente para la resolución de problemas en otros campos, aparentemente inconexos. En particular, se han aprovechado en el desarrollo tecnológico que conduce a las actuales tecnologías de la información y las comunicaciones, por su utilidad, muchos de los desarrollos tecnológicos que surgieron como resultado del constante esfuerzo del Hombre, a lo largo de toda su historia, para medir el tiempo.

En el siguiente capítulo se abordarán algunos aspectos interesantes sobre el desarrollo y evolución de las diferentes técnicas, mecanismos y estrategias que ha desarrollado la humanidad en su empeño por medir el tiempo con mayor precisión.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO 2

- [1] Anónimo. El libro del consejo (*Popol Vuh*). UNAM, 2004. Traducción y notas de G. Raynaud, J.M González y M.A. Asturias.
- [2] J. M. Briceño-Guerrero. *El origen del lenguaje*. Monte Avila Editores, 1970.
- [3] Ernst Cassirer. *Antropología filosófica: introducción a una filosofía de la cultura*. FCE, 2010.
- [4] N. Chomsky. *Estructuras sintácticas*. Siglo XXI, 2010.
- [5] J. Diamond. *El tercer chimpancé*. Debate, 2007.
- [6] F. Jacob. *El juego de lo posible*. FCE, 2005.
- [7] Carlos Prieto. *Cinco mil años de palabras*. FCE, 2005.



Escena 3: Comencé a recibir cuadros de una película, uno cada día, era como si el tiempo se alargara

Al pasar los días, el mensaje cambió. El remitente, quien quiera que fuera, dejó de enviarme fragmentos de la imagen. Ahora llegaban cuadros completos en cada ocasión. Al principio pensé que estaba mandando la misma figura que ya había transmitido con tanto detalle, como para reafirmar: «Esto es lo que debiste armar en la pared si entendiste el juego». Pero, después de varios días consecutivos, recibiendo en apariencia el mismo cuadro, me percaté de que había pequeños cambios entre imágenes sucesivas. Entonces, comprendí que el juego había cambiado, o tal vez era la continuación del primero. Ahora, parecía una película que se estaba transmitiendo cuadro por cuadro. Había un pequeño número en la esquina inferior derecha de cada cuadro, que indicaba la secuencia. Como pude, arreglé las imágenes para poder revisarlas en la computadora de forma «continua», recreando el efecto de movimiento de una animación del género stop motion.

Pasaron algunos días para que pudiera descubrir que la imagen reflejada en el espejo estaba cambiando: surgía una silueta de algo o alguien que debía estar frente a la chica del sombrero. Entonces, pude ver, por el reflejo del mismo espejo, que había alguien más en la habitación. La imagen era difusa y costaba reconocer al otro. Observé intrigado, durante un par de cuadros, que un punto de luz surgía de la figura en penumbras y se iba moviendo hacia la chica del sombrero. Era un disparo, ¿cuántos cuadros tendría que recibir para observar cómo aquella bala había impactado en su objetivo? Tendría

que esperar varios días para producir una animación de apenas un segundo. Era como si el tiempo se alargara y no pudiera alcanzarlo para detener esa bala. Sentía ansiedad e impotencia, que se convirtieron en miedo cuando, seguido del disparo, una intensa luz iluminó al agresor. Fue un breve destello, que había permitido capturar aquel instante y me lo entregaba congelado. Sentí que el tiempo avanzaba para mí a una velocidad distinta a la del resto de la gente.



La navegación interoceánica fue uno de los principales factores que impulsó la construcción de relojes con fines cartográficos.

Capítulo 3

La medición del tiempo como motor tecnológico

«Sabia virtud de conocer el tiempo»

Renato Leduc

El tiempo es un concepto que ha atraído, por igual, la atención de filósofos, científicos, técnicos y artistas. Para todos representa un reto, no sólo por que es difícil definirlo, sino porque también es difícil medirlo. No es un fenómeno tangible, avanza en una sola dirección, no se puede detener y mucho menos almacenar. Sin embargo, sus efectos son evidentes y universales [10]. La historia de la civilización va de la mano de la historia de la medición del tiempo. Hay quienes consideran al reloj como la madre de las máquinas modernas, pues durante su perfeccionamiento fue necesario inventar nuevos componentes que hoy tienen aplicaciones muy distintas a la original. Como veremos en este capítulo, el reloj derrumbó los muros que separaban distintas áreas de conocimiento. Los progresos en su construcción se lograron gracias a la creatividad, pericia y colaboración de muchos científicos, artesanos y técnicos.

3.1. LA MEDICIÓN DEL TIEMPO Y LAS TIC

La necesidad de medir el tiempo con precisión se encuentra incrustada en el corazón de la sociedad moderna, más de lo que podría esperarse. Las mediciones más precisas que se conocen hoy en día tienen que ver con el tiempo, hasta el punto de usarle para la determinación de otras cantidades fundamentales como el volt, el ampere, el ohm y el metro [2]. Las tecnologías de la información y las comunicaciones, de ninguna manera son ajenas a la medición precisa del tiempo, al contrario, dependen fuertemente de ello.

En general, cualquier dispositivo digital incluye un reloj electrónico que se emplea, a la vez, como motor y como referencia temporal del sistema. Se trata del corazón de los sistemas digitales: les proporciona vitalidad y ritmo. Más aún, los

relojes no sólo se emplean en el propio *hardware*¹ del sistema, es muy común emplearlos para propósitos de etiquetado temporal de eventos mediante *software*² de aplicación específica. Los relojes también son fundamentales para la sincronización de los sistemas que, aunque independientes y separados espacialmente, requieren tener la misma referencia temporal.

Con base en un sistema de relojes atómicos, los modernos receptores del sistema global de posicionamiento (*Global Positioning System* o GPS) garantizan las operaciones de navegación mundial, con una precisión sin precedentes. Igualmente, en la era de la Internet, la cuenta del tiempo se usa para administrar los flujos de información que se transmiten entre los nodos de las redes de telecomunicaciones.

No obstante los avances espectaculares en la construcción de los relojes, la medición del tiempo sigue siendo uno de los grandes retos de la tecnología, en general, y de las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), en particular. Actualmente, en todos los ámbitos técnicos, la disponibilidad de una medida universal del tiempo es una imperiosa necesidad, sobre todo, para la sincronización y el etiquetado de eventos de manera precisa y sin ambigüedades.

1 La parte tangible del equipo, los «fierros» del mismo.

2 La parte intangible del equipo, las «instrucciones» para el mismo.

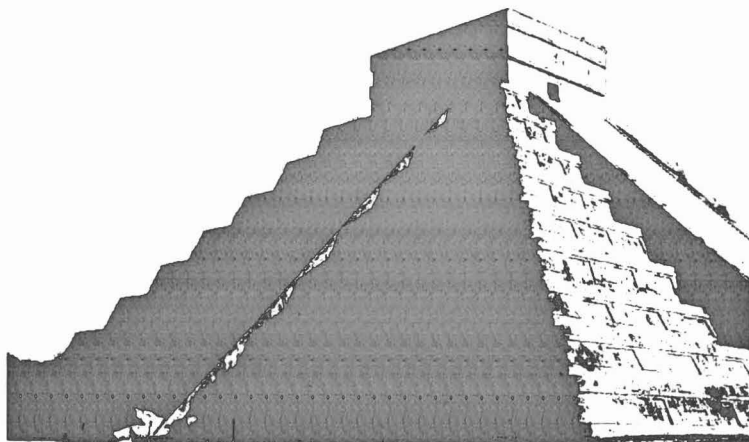


Figura 3.1: En el México antiguo, los edificios de los centros ceremoniales estaban perfectamente alineados con ciertos eventos astronómicos periódicos, en particular con eventos solares como los solsticios, equinoccios y pasos cenitales. Así, la pirámide de Chichén-Itzá también fungió como marcador calendárico al proyectar en el costado de una de sus escaleras, alrededor del equinoccio de primavera, una silueta ondulante que remata en la base con la cabeza de una hermosa serpiente esculpida.

3.2. HISTORIA DE LA MEDICIÓN DEL TIEMPO O CRONOLOGÍA DE LA CRONOMETRÍA

Entre los vestigios más fascinantes de algunas civilizaciones antiguas, se encuentran sus elaborados observatorios astronómicos. En México, por ejemplo, se construyeron edificios monumentales en Xochicalco, Chichén-Itzá, Monte Albán y Malinalco para el estudio del movimiento de los cuerpos celestes. Precediendo a la escritura, a menudo por siglos, esta especie de relojes y calendarios fueron desarrollados por todos los pueblos de las culturas originarias. A las altas culturas mesoamericanas se deben los calendarios más elaborados y precisos, no sólo de su época, sino incluso de siglos posteriores (ver sección 3.3).

Se sabe que los babilonios y los egipcios comenzaron a medir el tiempo hace 5000 años. Los babilonios crearon el calendario lunar que después adaptaron, mediante complicadas reglas, para predecir las estaciones a lo largo de ciclos de diecinueve años.

Por su parte, los egipcios fueron los primeros en medir la duración del año solar y en darle un uso práctico. Sin embargo, el año solar no tiene exactamente los 365 días estimados por los egipcios y esto hizo que, a lo largo de los siglos, cada uno de los meses se desplazara hacia una estación diferente (la Tierra tarda aproximadamente 365.25 días en darle una vuelta al Sol y la Luna gira en torno a la Tierra unas 13 veces en 364 días). Esto significa que, de no haber ajuste alguno, el mismo mes ocurría inicialmente en primavera, posteriormente en verano, luego en otoño y, finalmente, en invierno, hasta completar un ciclo en mil cuatrocientos sesenta años. El calendario egipcio era, con todo, el más útil de su tiempo. Sobrevivió, en su forma esencial, a la Edad Media y todavía fue utilizado por Copérnico.

Fue hasta tiempos de Julio César, en el año 46 a.C., cuando se instituyó el calendario de 365 días más el ajuste correspondiente a los años bisiestos. Sin embargo, este ajuste no es completamente correcto: un año bisiesto cada cuatro años, introduce un retraso de 12 minutos, en promedio, cada año solar. Así, casi mil años después de se que estableciera el calendario juliano, este pequeño error anual se había acumulado hasta llegar a cerca de 6 días de atraso.

Para el año de 1582, el error acumulado había crecido tanto que el papa Gregorio XIII modificó el calendario que regía al mundo occidental. El calendario juliano y las reglas que lo sustentaban sufrieron los siguientes cambios: Primero, los años que iniciasen un nuevo siglo y no fuesen múltiplos de 400, no serían años bisiestos (por ejemplo, el año 2000 fue bisiesto, pero 1900 no). Este cambio reduce el error a cerca de un día cada 3300 años. Segundo, por única vez, se adelantaría la fecha para que el calendario coincidiera con las estaciones. Así, el 4 de octubre de 1582 fue seguido por el 15 de octubre de 1582, con lo que se eliminaban los 10 días de retraso acumulado. Estos ajustes permitieron que el año siguiente (1583) el equinoccio de primavera ocurriera, como lo indica el calendario de las estaciones, el 21 de marzo y no el 11 de marzo. Inicialmente, por motivos políticos y religiosos, Inglaterra y sus colonias se negaron a aceptar el calendario gregoriano y, de hecho, toda disposición proveniente de Roma. Fue hasta 1752 cuando los países protestantes se convencieron de las ventajas del calendario gregoriano y lo aceptaron. Por su parte, la Iglesia Ortodoxa de Oriente ha conservado el calendario juliano para determinar la fecha de la Pascua, según sus usos y costumbres. A pesar de todo, el calendario gregoriano es el que actualmente se usa en la mayor parte de mundo occidental [5].

Al volverse más compleja su forma de vida, la humanidad requirió de mecanismos más precisos para medir el tiempo, lo que llevó a la invención del reloj. Los relojes más antiguos de los que se tiene registro fueron construidos en Egipto. Sus fabricantes recurrieron al Sol y al agua para medir el tiempo. Por siglos, los griegos y los romanos mantuvieron su confianza en el funcionamiento de los relojes de agua y de arena.

Los chinos, por su parte, construyeron un reloj que tenía algunas propiedades que después serían comunes en los relojes mecánicos. El reloj chino era todavía un reloj de agua, pero ésta servía para hacer girar una rueda con pequeños recipientes colocados, a intervalos iguales, sobre su perímetro. De esta manera, en cuanto un recipiente se llenaba con agua, se volvía lo suficientemente pesado para vencer a un nivelador y permitir que el recipiente siguiente se colocase en su lugar. Así, la rueda giraba de manera intermitente y era utilizada para medir el tiempo.

En el año 1090, el emperador chino en el poder ordenó a uno de sus funcionarios, *Su Sung*, la construcción de un «mecanismo celestial» para uso privado del «Hijo del cielo» [11]. El reloj «celestial», de nueve metros de alto, tenía una estructura semejante a una pagoda de cinco pisos. En la plataforma superior, a la que se llegaba por una escalera exterior independiente, se encontraba una enorme esfera mecánica de bronce, dentro de la que giraba automáticamente un globo celeste. En la parte de afuera, de cada uno de los cinco pisos, una procesión de maniqués que llevaban *gongs* y campanas estaba programada para sonar a las horas convenidas. El interior de la torre principal estaba ocupado, desde el suelo hasta el tercer piso, por un gran mecanismo de relojería impulsado por agua que corría a nivel del suelo y que permanentemente llenaba y vaciaba las palas de una rueda vertical giratoria. Toda la estructura retumbaba, cada cuarto de hora, con el ruido de las campanas y los *gongs*, el chapoteo del agua, los crujidos de las ruedas gigantescas y el desfile de los maniqués.

El primer reloj mecánico se construyó en 1283, en el priorato de Bedfordshire, Inglaterra. El mecanismo se movía gracias a un peso sostenido por una cuerda enredada en un cilindro. El cilindro, a su vez, estaba conectado a una rueda engranada o corona que giraba, en forma intermitente, debido a la acción de un mecanismo vertical llamado *escape*. Todo esto hacía sonar una campana en intervalos uniformes de tiempo. La necesidad de medir mecánicamente el tiempo y la propia

lógica de la máquina impusieron una percepción nueva y uniforme del tiempo: ahora lo que media el tiempo era el martillar de una campana. Para 1300 ya se construían relojes para las iglesias de Francia e Italia.

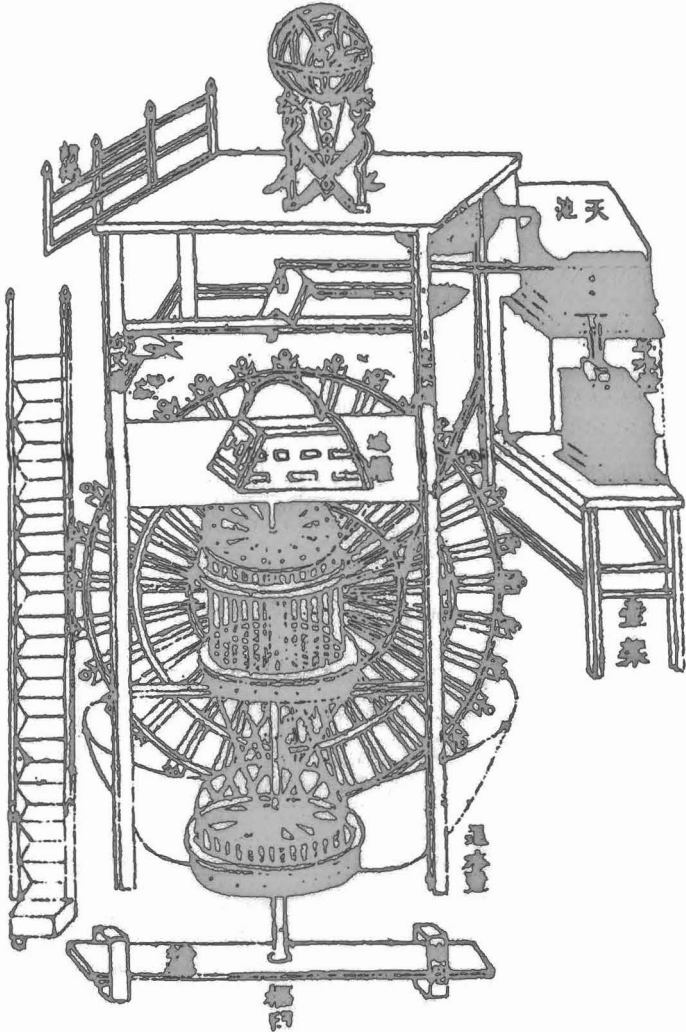


Figura 3.2: Diagrama del reloj «celestial» de Su Sung.

Galileo Galilei fue el primero que reconoció las posibilidades del péndulo para determinar la frecuencia (ciclos por segundo) de un reloj. Sin embargo, fue Christian Huygens quien, en 1656, construyó el primer reloj de péndulo y logró una precisión de un segundo por cada día. Al mismo tiempo, Robert Hooke se encontraba experimentando con la idea de usar un resorte de metal para regular la frecuencia de un reloj. Sin embargo, fue Huygens quien, de nuevo en 1675, construyó exitosamente el primer reloj controlado por resorte.

La navegación interoceánica fue uno de los principales factores que impulsó la construcción de relojes con retrasos no mayores a algunos minutos, aun después de meses de operación continua. Sobre cualquier punto de la superficie terrestre, el Sol viaja de este a oeste con una rapidez de 15° en una hora, es decir, de un grado cada cuatro minutos. De manera que si un navegante cualquiera cuenta con un reloj preciso indicando la hora del meridiano cero (meridiano de Greenwich), puede fácilmente calcular su longitud geográfica conociendo la hora local (la que se deduce de la posición del Sol): por cada cuatro minutos que la hora local difiera de la hora de Greenwich, se encontrará a un grado de longitud alejado del meridiano cero. Durante la noche, el navegante puede saber la hora local, y por ende su posición, mediante la observación de dos o más estrellas.

Entonces, tanto las necesidades de navegación como las cartográficas hicieron indispensable que se contara con relojes precisos y confiables a bordo de los barcos lo que, a su vez, motivó a los inventores a diseñar y construir mejores relojes. En estas condiciones, el péndulo, que había sido un gran adelanto sobre todos los otros mecanismos para medir el tiempo, se volvió inoperante con el vaivén de los barcos.

En 1713, el gobierno británico ofreció un premio de 20,000.00 libras a quien construyera un cronómetro que permitiese determinar la longitud geográfica con una precisión de medio grado [5, 12]. Un relojero inglés, llamado John Harrison, pasó más de cuarenta años desarrollando un mecanismo que resistiera el vaivén del mar, los cambios de temperatura (que causan dilataciones de los más delicados resortes metálicos) y la sal marina (que lo corroe todo). En 1761, William Harrison, hijo de John, fue enviado en un viaje a Jamaica para probar el instrumento. A pesar de una severa tormenta, que duró varios días y que desvió terriblemente al barco, el cronómetro resultó tremendamente preciso, con una diferencia inferior a un minuto después de un período de varios meses, haciendo posible la determina-

ción de la longitud en el mar con una precisión de 18 minutos de arco, es decir, menos de un tercio de grado.

A finales del siglo XIX, Siegmund Riefler desarrolló un reloj de alta precisión que se usó como estándar en muchos observatorios astronómicos del mundo. Su innovación consistía en usar una cámara de vacío, con temperatura controlada, para minimizar cualquier efecto barométrico o de dilatación en el mecanismo de péndulo que se alojaba en su interior. El regulador de Riefler, como también se le conoce, consiguió una precisión en el orden de décimas de segundo por día.

Entre 1928 y 1929, Warren A. Marrison descubrió que los cristales de cuarzo vibran con una gran estabilidad cuando se les excita con un voltaje, lo que les hacía elegibles para la construcción de relojes con una calidad superior. A finales de la Segunda Guerra Mundial, los relojes de cuarzo ofrecían precisiones equivalentes a una diferencia de un segundo cada 30 años.

En 1950, Harold Lyons y su equipo propusieron la construcción de un nuevo reloj con base en la referencia temporal más estable de la que se tenía noticia: la frecuencia natural de resonancia de los átomos. Con ello, iniciaba el desarrollo del reloj atómico de cesio.

3.3. REMINISCENCIAS DE LA MEDICIÓN DEL TIEMPO EN EL MÉXICO ANTIGUO

El tiempo es uno de los conceptos que han cautivado al hombre desde tiempos inmemoriales. En todas las culturas, la concepción del tiempo refleja su particular cosmovisión. Tres son los grandes troncos culturales originarios: La cultura del trigo (Occidente), la cultura del arroz (Oriente) y la cultura del maíz (América antigua) [4]. En Occidente, el tiempo es lineal e irreversible. Para Oriente, el tiempo es cíclico. Para el México antiguo el tiempo era una espiral ascendente [3], como la dibujada por las pencas del maguey en su tronco durante su crecimiento y desarrollo. Es el tiempo que, siendo cíclico, es a la vez evolutivo: una oportunidad para que el hombre mejore todo lo que hace a la luz de su historia. Una vieja conseja dice que «La ley de la mazorca manda que todo hijo debe ser mejor que su padre».

Particularmente, el tiempo en Mesoamérica³ llegó a medirse con un calendario cuya exactitud fue superior a la de sus equivalentes occidentales. Esto se debe a que los sabios del México antiguo eran formidables observadores [7], considerados como *tlamatini*, ‘los que conocen a través de sus sentidos’. Observando el movimiento de los astros en la bóveda celeste, los antiguos sabios mexicanos descubrieron que sus movimientos eran, de alguna manera, cíclicos y que, en el transcurso, describían trazos específicos alrededor de la eclíptica celeste (la línea curva por donde se observa el paso del Sol visto desde la Tierra). Estos movimientos los seguían y registraban, sistemáticamente, todas las noches con la ayuda de espejos de agua, marcas y puntos de referencias apropiados. El registro del movimientos de los astros en la bóveda celeste⁴ les rememoró el juego de pelota y su cancha. Así el *Citlaltlachtli*, el ‘juego de pelota de los astros’ se volvió una hermosa metáfora de lo observado en el cielo. Su observación no fue ajena a lo más sutil: los efectos cíclicos de los astros fueron registrados en todo lo que sus sentidos podían percibir. Así, desarrollaron un calendario que no sólo consideraba la posición de los astros visibles (las estrellas, el Sol y sus planetas) sino también de los efectos de los ciclos astronómicos sobre la vida en la tierra.

Como ejemplo de la arraigada percepción temporal de los antiguos mexicanos, resultante de la aguda observación de los ciclos de su entorno (terrestre y celeste), consideremos algunos vocablos en lengua mexicana nahuatl para conceptos relacionados con los ciclos y el paso del tiempo [9]:

- *Cauitl*-Tiempo. Lo que va quedando con el ir y venir.
- *Xiuitl*-Año y también hierba. Los ciclos de la tierra se repiten cada año, mostrando periodos de sequía y verdor.
- *Ilhuítl* -Día de fiesta. Los días festivos se repiten cada año.
- *Cenilhuítl*-Día completo. El día con su noche.
- *Ilhuicatl*-El cielo. La bóveda celeste tiene un movimiento aparente de ir y venir, mostrando la misma panorámica después de un año.

3 Mesoamérica es un concepto propuesto originalmente por Paul Kirchhoff y se refiere a una región cultural, más que a una región geográfica, antes de la llegada de los españoles. Incluye a los pueblos que compartían elementos culturales tales como “el cultivo del maíz”, “escritura jeroglífica” y el empleo del “13 como número ritual” sobre todo en el calendario. Estos pueblos se encontraban distribuidos desde el río Pánuco, en Sinaloa, hasta el lago de Nicaragua, en Sudamérica [3].

4 El *Citlalohtli*, el ‘camino de estrellas’, o también *Ilhuicaohltli*, el ‘camino del cielo’.

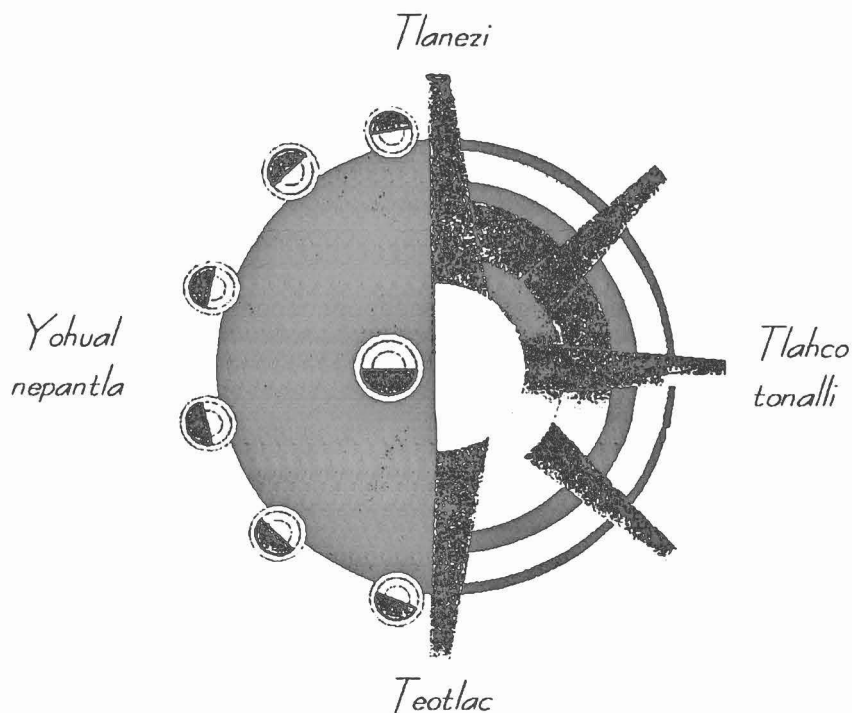


Figura 3.3: Glifo del códice Borgia para representar al concepto *Cenilhuittl*, el día con su noche. *Tlanezi* es el amanecer, *Tlahco tonalli* es el medio día, *Teotlac* es la puesta del Sol y *Yohual nepantla* es la media noche [9].

En la lengua mexicana, *tl* es la terminación de los sustantivos y denota, de manera implícita, el artículo del mismo. En estos ejemplos, observamos que los fonemas *hu*, *u* o *uh* implican un cierto «ir y venir»⁵. Esto es, justamente, lo observado en el caso de la hierba en sus ciclos anuales: nace y reverdece, muere y se seca, y así año con año. Entonces *Cahuítl*, el Tiempo, es para los antiguos mexicanos lo que está, lo que es, lo que va quedando (ca) en el continuo ir y venir de los fenómenos naturales.

La correlación exacta (la correspondencia de fechas del calendario mexicano con fechas del calendario juliano o gregoriano) para el calendario de los antiguos mexicanos es, aún, un tema de polémica. No obstante, es importante mencionar que una fecha que debe ser tomada en cuenta para este propósito es la rendición de la ciudad de *Mexico-Tenochtitlan*, en un día *Ce Coatl* (Uno Serpiente), de la veintena de *Tlaxochimaco* (cuando se ofrendan flores), de un año *Yei Calli* (Tres Casa), registrada como 13 de agosto de 1521 del calendario juliano vigente en ese entonces. Esta fecha fue registrada por los cronistas, tanto indígenas como hispanos, para un mismo evento pero empleando sus respectivos calendarios, ya fuera el mexicano o el juliano. Por ello, la importancia de esta fecha como referencia de correlación [9].

La complejidad para llegar a una correlación exacta, entre el calendario mexicano y el calendario occidental, es entendible si consideramos que no se cuenta con ninguna otra fecha con un registro confiable, para un mismo evento en ambos calendarios, y que el calendario mexicano no necesitaba ajustes por bisiestos mientras que el juliano y el gregoriano sí.

Sin duda, se trata de un problema de sincronización. Por ejemplo, debido a que el calendario gregoriano no entró en vigor en todo el mundo occidental al mismo tiempo, se encuentran casos de ambigüedad en el registro de fechas importantes. El día de la muerte de Miguel de Cervantes está registrada con la misma fecha de la muerte de William Shakespeare, un 23 de abril de 1616, sin embargo, la fecha del fallecimiento de Cervantes está registrada en calendario gregoriano, mientras que la de Shakespeare fue registrada en el juliano. Por lo tanto, Cervantes murió realmente diez días antes que Shakespeare.

5 De hecho, también aparecen en las raíces de los verbos de tránsito como *yauh* (ir), *huitz* (venir), *huica* (llevar), *yauahua* (dar la vuelta), *yualoa* (rodear) y en el sufijo direccional *-tiuh* (que indica que se va de aquí para allá).

En el México antiguo, la precisa observación de los ciclos anuales resultó en una perfecta sincronización de su calendario con cuatro fenómenos astronómicos: los dos solsticios (el arribo de la eclíptica del Sol a sus extremos norte y sur) y los dos pasos cenitales del Sol en la latitud de Mesoamérica. Pero ¿qué evidencia hay de la exactitud del calendario mexicano en comparación con el calendario occidental (con todo y sus ajustes)? Tomemos un caso ilustrativo: el solsticio de invierno. En la mayoría de las culturas que se desarrollaron en el hemisferio norte, el solsticio de invierno se asociaba con el «nacimiento del Sol nuevo» (expresión equivalente al actual «año nuevo»). En el solsticio de invierno, en el hemisferio norte, la eclíptica solar alcanza su extremo sur (al salir el sol por el oriente, aunque muy cargado al sur). Es el momento cuando el día cuenta con luz solar por menos tiempo y cuando la eclíptica del sol, al iniciar su retorno hacia el norte, parece que se detiene por unos días.

En la latitud de la ciudad de México, el solsticio de invierno debe ocurrir alrededor del 21-22 de diciembre de cada año. En la época en que llegaron los españoles a México todavía estaba vigente el calendario juliano y observaron que existían celebraciones muy concurridas e importantes en la zona del *Tepeyac* (Tepeyacac) en una fecha que ellos registraron como 12 de diciembre. Estas celebraciones que ahora se asocian con el culto a *Tonantzin* ('nuestra venerada madre'), en realidad se debían a la festividad en torno del fenómeno astronómico que daba inicio a un nuevo ciclo anual, cuando *Totahtzin iuan Tonantzin*, *Tonatiuh*, *Tonacatecuhtli iuan Tonacacihuatl*, 'Nuestro venerado padre y madre, Sol, señor y señora de los carrizos de calor', propiciaría un nuevo ciclo de vida y muerte al reaparecer en su fase como «Niñito-Niñita Sol» [8].

Debido a que los antiguos mexicanos realizaban sus festividades de acuerdo a lo indicado por sus dos calendarios conocidos (uno que se denomina como ritual o *tonalamatl* y otro que era civil o puramente solar), hoy podemos observar reminiscencias tales como la festividad del 11-12 de diciembre, en la que, a pesar de su fuerte sincretismo, podemos confirmar que el calendario mexicano estaba sincronizado con ciertos fenómenos astronómicos (en este caso el solsticio de invierno), mientras que el calendario occidental, vigente en el momento del registro de dichas festividades por los primeros cronistas, daba clara muestra de un retraso respecto de los mismos fenómenos astronómicos de referencia. Así, si el calendario de los europeos hubiera estado perfectamente ajustado, los cronistas hubieran registrado

la festividad del Tepeyac un 21-22 de diciembre y no un 11-12 de diciembre, como es lo usual para el solsticio de invierno en nuestra latitud.

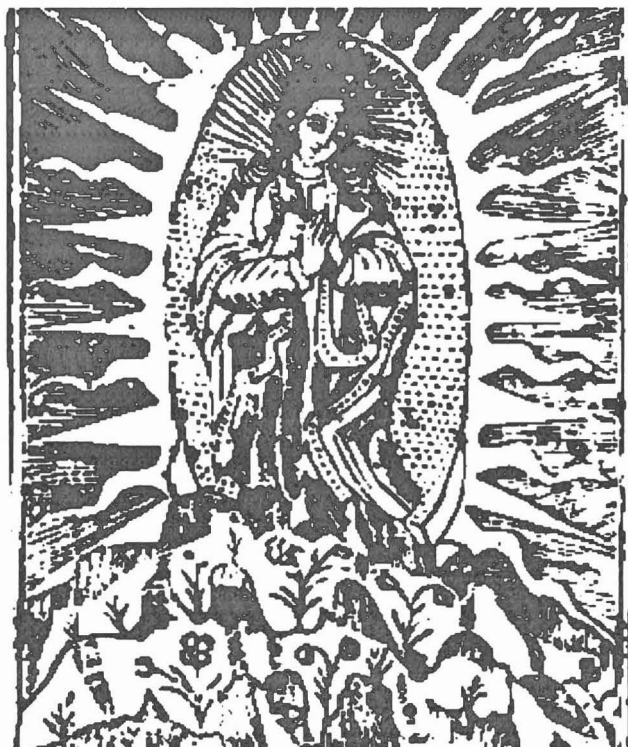


Figura 3.4: Representación, en un folleto mexicano del siglo XVIII, de la Virgen de Guadalupe en el Tepeyac. Es claro el sincretismo entre el culto mariano y la tradición autóctona para el recibimiento de la «Niñita Sol», *Tonantzin*, como símbolo del aspecto femenino o fertilidad de la Tierra (*Coatlicue*) que puede ser «fecundada» por el aspecto masculino del Sol (*Tonatiuh*). Particularmente, en la festividad de *Tonantzin* en el *Tepeyacac* se celebra el evento astronómico del solsticio de invierno donde, en forma figurada, la Tierra «da a luz» al «Sol nuevo» (ver figura 3.5) [8].

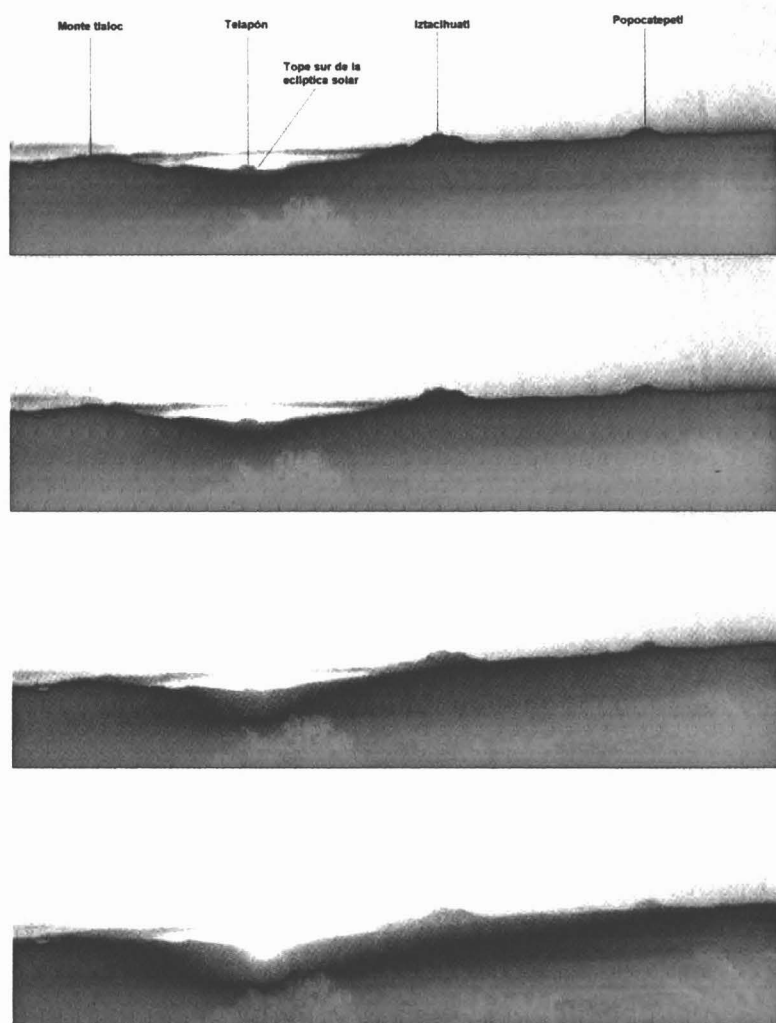


Figura 3.5: Avistamiento de la salida del Sol desde la loma oriente del *Tepeyacac*, el 22 de diciembre. Nótese que, desde esta perspectiva, el tope sur de la salida del Sol por el oriente (solsticio de invierno) coincide con el abrupto borde sur del Telapón, lo que da el efecto visual de que, en esos días, el Sol «nace» de esta peculiar formación geográfica de la Tierra.

Sabemos que el tema de la concepción del tiempo y la dualidad generadora entre los antiguos mexicanos es fascinante, pero las limitaciones de espacio y el alcance del libro no nos permiten detenernos más en ello. Para profundizar en el tema, el lector interesado puede remitirse a los trabajos de los investigadores Guillermo Bonfil Batalla, Miguel León Portilla y Arturo Meza Gutiérrez, referidos en la bibliografía sugerida al final de este capítulo.

3.4. EL TIEMPO UNIVERSAL COORDINADO Y SUS APLICACIONES

Al hacerse más compleja su forma de vida, el hombre requirió de nuevas formas para medir el tiempo. Por miles de años, el «reloj» formado por la Tierra y el Sol fue suficiente para normar las actividades diarias. Sin embargo, a medida que el estudio del Sistema Solar y del Universo añadió nuevos hechos y cifras a los ya conocidos, se hizo posible la medición más precisa de algunos fenómenos que se conocían de manera aproximada. Así, se hizo evidente el hecho de que el reloj Tierra-Sol no es muy estable por varias razones:

- La órbita terrestre alrededor del Sol no es un círculo perfecto sino una elipse, de manera que la Tierra viaja más rápido cuando está más cerca del Sol (en el invierno para el hemisferio norte) que cuando está lejos de éste (en el verano para el hemisferio norte).
- El eje de rotación de la Tierra no es perpendicular al plano de su órbita alrededor del Sol, sino que está inclinado cerca de 23.5° .
- La Tierra gira alrededor de su eje con una rapidez irregular.
- La Tierra cabecea sobre su eje.
- El año, el mes y el día son unidades naturales del tiempo derivadas de tres ciclos astronómicos diferentes:
- El año, también conocido como *año solar*, es el período de una revolución completa alrededor del sol.
- El mes es el tiempo entre dos lunas nuevas sucesivas.
- El día es el tiempo entre dos mediodías sucesivos.

Conforme el hombre fue mejorando la medición del tiempo, empezó a notar que la duración del día medida por un reloj de Sol variaba, respecto del promedio, hasta

en 15 minutos durante febrero y noviembre. Debido a esta variación, se definió un nuevo día llamado *día solar promedio*, que es simplemente la duración promedio de todos los días solares a lo largo del año.

Se define el día solar como el tiempo que transcurre entre dos mediodías sucesivos o, si se está en el Ecuador, dos tránsitos del Sol por el cenit. Pero, ¿qué sucedería si se midiese el tiempo entre dos tránsitos sucesivos de una estrella?, ¿es igual el día estelar al día solar? No, en la segunda noche se tendría que la estrella aparecería en el punto de referencia un poco antes de lo esperado. ¿Por qué? La Tierra gira sobre su eje a la vez que viaja un trecho alrededor del Sol. Debido al efecto neto de estos movimientos mezclados, el día solar promedio es cerca de cuatro minutos más largo que el día determinado mediante el paso de una estrella. Este segundo tipo de medición del día se denomina *día sideral* y, a diferencia del día solar, no varía su duración a lo largo del año.

Fue hasta el desarrollo de los relojes atómicos, a principios de la década de los cincuenta, que fue posible estudiar cuidadosamente las irregularidades en la rotación terrestre, ya que el tiempo atómico es mucho más uniforme que el terrestre. Dichos estudios y algunas observaciones astronómicas indican que existen tres tipos principales de irregularidades [2, 6]:

1. La Tierra está deteniéndose de manera gradual. La duración del día es aproximadamente 16 milisegundos mayor de lo que fue hace mil años. Este frenado se debe a la fricción de los efectos de marea, causados por la Luna, en los océanos terrestres. La evidencia, obtenida indirectamente a partir del tamaño de las bandas de crecimiento anual de los corales fósiles, sugiere que hace seiscientos millones de años el día terrestre era de aproximadamente 21 horas.
2. La posición de los polos norte y sur cambian unos cuantos metros cada año. Las medidas precisas de estas variaciones muestran que pueden causar una discrepancia de hasta 30 milisegundos.
3. Existen fluctuaciones regulares e irregulares sobrepuestas al lento frenado de la rotación terrestre.

Todos estos efectos han llevado al desarrollo de tres patrones de tiempo diferentes para el denominado *Tiempo Universal* (TU): TU0, TU1 y TU2.

1. El TU0 es el patrón generado por el día solar promedio, es decir, el TU0 corrige los efectos de la inclinación del eje de giro de la Tierra y los de su órbita elíptica alrededor del Sol.
2. El TU1 es el TU0 más la corrección del movimiento polar de la Tierra.
3. El TU2 es el TU1 más la corrección por el frenado y la aceleración de la Tierra durante la primavera y el otoño.

Como se ha visto, el patrón de tiempo con base en la rotación de la Tierra sobre su eje resulta irregular. El segundo era originalmente una fracción del día solar promedio: $1/86,400$, ya que existen 86,400 segundos en un día. Sin embargo, el día es variable. Se sabe, por otro lado, de la existencia de sucesos astronómicos que ocurren con mayor regularidad temporal, por lo que parece más indicado usarlos como referencia para el tiempo.

Considerando lo anterior, en 1956, se definió el denominado *tiempo efemérico* (TE). Para la adopción del nuevo estándar, se decidió que el segundo efemérico debía tomar como patrón al segundo solar promedio del año tropical 1900. La gran ventaja del segundo efemérico es que su duración es constante y de gran precisión. Su mayor desventaja es que no es universal ni directamente accesible. Por el contrario, a diferencia del segundo del TE, el segundo del TU es variable y sólo se puede determinar con una precisión relativamente pobre (de, cuando mucho, algunos milisegundos) después de un día de observación de las estrellas. Lo que se necesitaba era un segundo de gran precisión y que se pudiera obtener tras un período de observación tan corto como un día.

Similarmente, hay dos patrones para el año. El primero es el año sideral, que se define como el tiempo de una revolución alrededor del Sol pero haciendo referencia a las estrellas (definición semejante al día sideral). El otro patrón del año es el que usamos comúnmente, es decir, el que se encuentra dividido en cuatro estaciones y que se conoce técnicamente como año tropical. Su duración es de 365.2422 días solares promedio. Existe una discrepancia entre ambas medidas que se debe a que el punto de referencia en el espacio para el año tropical se mueve, ligera y lentamente, respecto de las estrellas.

3.5. LA ERA DEL RELOJ ATÓMICO

A principio de 1950, los científicos habían desarrollado relojes atómicos que funcionaban con precisiones jamás logradas. El reloj atómico usa como referencia de frecuencia la transición cuántica entre dos niveles de energía de un átomo. Los fotones, emitidos o absorbidos por el átomo durante la transición, tienen una frecuencia única proporcional a la diferencia de energías entre los dos niveles y presentan una variabilidad mínima alrededor de este valor. El mayor logro de la metrología para el reloj atómico consistió en «atrapar» la frecuencia de estos fotones, afectando mínimamente la resonancia natural del átomo [2, 6].

Debido a los estudios de Niels Bohr, se sabe que los electrones de un átomo pierden energía, en cantidades discretas (fotones), al brincar hacia órbitas internas bien definidas. La cantidad de energía que liberan se manifiesta como una radiación de una frecuencia particular. A la inversa, un átomo situado en un campo de radiación puede absorber energía sólo en cantidades discretas y, en consecuencia, un electrón brincaré hacia una órbita externa. Si en el campo de radiación no existe la frecuencia que corresponda a la energía asociada con un brinco permitido, entonces no se absorberá energía alguna. El átomo es un resonador⁶ natural, cuya frecuencia resonante es prácticamente inmune a los efectos térmicos y friccionantes de que adolecen los relojes mecánicos. Así, el átomo parecía ser el resonador ideal.

Entonces, surgió el problema de que el TU y el tiempo atómico se desincronizaban a causa de la rotación terrestre. Persistía la necesidad de una escala de tiempo atómico que se mantuviese en una sincronía aproximada con el TU. Dicho objetivo se logró, en 1958, cuando la definición de *facto* para el segundo tuvo como base al tiempo atómico, llamándolo ahora *Tiempo Universal Coordinado: TUC*. También se estableció que esta medida debía permanecer en sincronía con el TU2. También se decidió que habría el mismo número de segundos en cada año y, para ello, se creó el denominado *segundo de hule*. Se propuso que cada año, empezando en 1958, la duración del segundo sería alterada ligeramente, con la esperanza de que el año siguiente tuviera el mismo número de segundos que el año que finalizaba. Se acordó también que siempre que el TUC y el TU2 difiriesen por más de 1/10

6 Un resonador es un sistema que oscila con una frecuencia determinada, después de recibir un impulso (energía) de excitación.

de segundo, el reloj TUC se ajustaría por $1/10$ de segundo para quedar dentro de la tolerancia especificada. Sin embargo, como ya se explicó, la velocidad de la rotación terrestre no es completamente predecible, de manera que no existía forma de asegurar que el segundo de hule propuesto serviría para compensar las eventualidades que surgieran en el futuro.

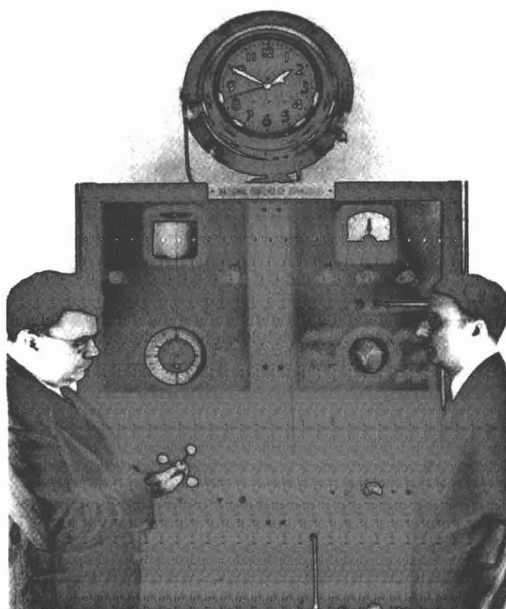


Figura 3.6: Reloj atómico Ammonia construido en 1949 para el, entonces, Buró Nacional Estadounidense de Estándares.

Por fin, en 1967, se definió el segundo exclusivamente en término de la frecuencia de radiación emitida por un átomo de cesio. Para resolver el problema de la asincronía entre el reloj atómico y el terrestre, en 1972 se inventó el segundo «bisiesto». Ocasionalmente, se añade o sustrae dependiendo de lo que requiera la irregular rotación terrestre. La regla es mantener la diferencia entre el TUC y el TU1 por debajo de 0.9 segundos.

El último y más exacto patrón para el tiempo (y su inverso, la frecuencia) es el TUC proporcionado por las oficinas del Buró Internacional de Pesos y Medidas, en París, el que recibe sus entradas desde varios centros de medición del tiempo en

todo el mundo. Los expertos del Buró combinan los datos provenientes de alrededor de 230 relojes atómicos, ubicados en 60 observatorios, para lograr una precisión equivalente a acumular un segundo en 10 millones de años. Así las cosas, en la treceava Conferencia General de Pesos y Medidas se definió al segundo como la «duración de 9,192,631,770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado base de un átomo de cesio 133».

3.6. LOS RELOJES Y SU CALIDAD

En general, se pueden identificar tres partes fundamentales que constituyen a cualquier reloj:

- Debe contar con un componente que produzca un fenómeno periódico, al que se denomina resonador.
- Debe mantenerse el fenómeno periódico del resonador, recargándolo con energía. Al *resonador*, junto con su fuente de energía, se le denomina *oscilador*.
- Debe tener los medios para contar, acumular y mostrar las oscilaciones o «tics» del oscilador, algo así como las manecillas de un reloj mecánico.

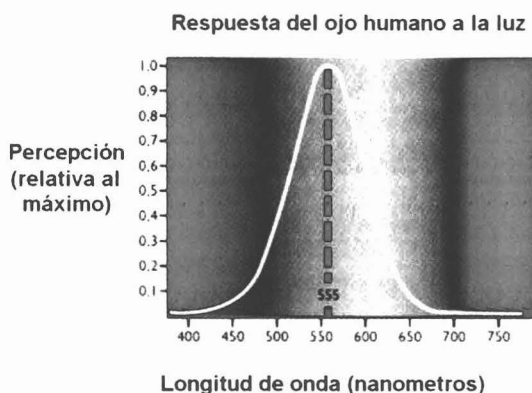


Figura 3.7: El ojo humano es un sistema resonante con un ancho de banda amplio. La mayor receptividad («resonancia») se tiene en la frecuencia con longitud de onda de 555 nanómetros (verde amarillo), pero acepta frecuencias desde los 400 nanómetros (ultra-violeta) y hasta los 700 nanómetros (infra-rojo). El resonador ideal para un reloj perfecto debería tener un ancho de banda tan angosto que, en la práctica, se considere como cero, es decir que sólo acepte la frecuencia de interés.

La calidad de un resonador se mide evaluando una propiedad intrínseca a la que se designa por la letra C . Ésta representa el número de oscilaciones que un resonador completa antes de que su energía disminuya hasta llegar por debajo de un cierto porcentaje de la energía total adquirida con el impulso inicial. Si la fricción es grande, el resonador se detendrá rápidamente, de manera que los resonadores con mucha fricción tienen un factor C muy bajo y viceversa. Los relojes mecánicos típicos tienen factores C de 100, mientras que los relojes científicos poseen factores C en el orden de los millones o aún más.

Un resonador con un factor C grande puede acumular la energía, que recibe de su fuente (puede ser otro oscilador), por más tiempo debido a las mínimas pérdidas por fricción. Por su parte, un resonador con un factor C pequeño no puede acumular por mucho tiempo energía ya que la pierde, casi tan rápido como la recibe, debido a la fricción.

Así, lo deseable es que un resonador sea un sistema oscilante que oponga el mínimo de resistencia a oscilaciones con cierta frecuencia. En este sentido un resonador se comporta como un filtro pasabanda⁷, ya que opone máxima resistencia (aplica máxima atenuación) a toda frecuencia que se encuentran fuera de su banda de resonancia.

Entonces, un valor muy bajo del factor C indica que el filtro acepta frecuencias sobre un intervalo muy amplio de valores, debido a que la respuesta en frecuencia del filtro es poco selectiva y, en consecuencia, entrará en resonancia al excitarlo con cualquier señal cuya frecuencia se encuentre dentro de su banda de operación. En cambio, un valor alto del factor C indica que el intervalo de frecuencias que el filtro deja pasar es muy angosto y, por lo tanto, su respuesta es muy selectiva, es decir, de mejor calidad. El grado de perfección alcanzado con los relojes atómicos es tal que los lleva a tener un factor C por arriba de los cien millones.

Existen cuatro medidas que describen la calidad de un reloj: la precisión de la frecuencia, la estabilidad de la frecuencia, la exactitud del tiempo y la estabilidad del tiempo. Estos parámetros no son independientes. La precisión de la frecuencia mide la calidad con la que el reloj determina la duración de un segundo. Por ejemplo, se

⁷ Un filtro pasabanda es un sistema que sólo permite el paso de ondas con ciertas frecuencias, aquellas que están dentro de un intervalo de frecuencias o ancho de banda. Por ejemplo, un filtro solar es un tipo de filtro pasabanda, ya que sólo deja pasar la luz dentro de cierto intervalo de frecuencias (sólo ciertos colores).

pide que un reloj atómico tenga una precisión de frecuencia que se traduzca un error acumulado de nanosegundos por día. La estabilidad de la frecuencia determina la constancia en la frecuencia de un resonador a lo largo del tiempo. Un reloj puede tener baja precisión de la frecuencia y, no obstante, ser muy estable en su frecuencia, con lo que su avance temporal sería perfectamente predecible.

La exactitud del tiempo mide qué tanto coincide la lectura de un reloj con el TUC. Algunas veces se requiere exactitud de tiempo en varios lugares, como en el caso del GPS. Por último, la estabilidad del tiempo se correlaciona con la estabilidad de frecuencia, ya que el error de tiempo de un reloj es proporcional a la integral de su error en frecuencia. Se le usa como estimador de cambio respecto a un flujo uniforme de tiempo.

La comunidad científica busca tres atributos en un estándar de medición del tiempo:

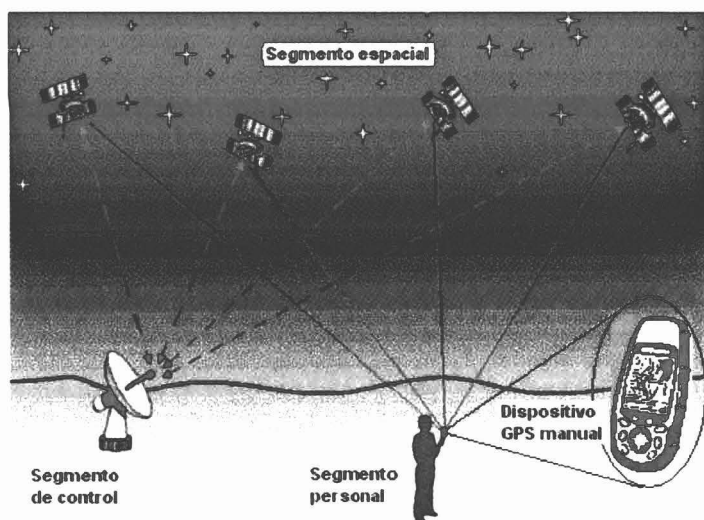


Figura 3.8: El equipo GPS del usuario procesa la información recibida para determinar longitud, latitud, altitud y tiempo con base en las señales de los satélites que se encuentran en línea de vista respecto del usuario.

1. Disponibilidad universal, es decir, que cualquier usuario pueda leerlo y utilizarlo sin importar el lugar donde se encuentre.

2. Confiabilidad, que se refiere a que exista una probabilidad mínima de que el aparato de medición se detenga o pierda la cuenta.
3. Estabilidad, se trata de que dos intervalos de tiempo de la misma duración produzcan la misma medida, es decir, que si se va acumulando un error, esto ocurra con una velocidad constante.

El sistema de posicionamiento global o GPS, es una herramienta que cumple con estos atributos dentro de márgenes de error aceptables para muchas de las necesidades de la vida cotidiana. Cuenta con 24 satélites, ubicados en 6 órbitas circulares a 55° del plano polar, con 4 satélites cada una. El tiempo de rotación de cada satélite es de 12 h pero, debido a la rotación del planeta, cada satélite pasa sobre el mismo punto de la Tierra al cabo de 24 h. Cada satélite transporta un reloj atómico y todos los relojes se encuentran sincronizados. Las señales de radio emitidas por estos satélites indican el tiempo al que son emitidas y la posición orbital donde se originan. En la Tierra, el equipo del usuario procesa esta información para determinar longitud, latitud, altitud y tiempo, como apoyo a la navegación, ubicación o con fines científicos.

Sin embargo, son varias las circunstancias que limitan la precisión del GPS. Por un lado, existen efectos relativistas que tienen consecuencias particulares sobre cada reloj: se sabe que un reloj en órbita sufre un atraso respecto de otro reloj en la Tierra. También, el tiempo fluye más lentamente sobre los puntos del espacio donde existe una fuerte acción gravitatoria. Por otro lado, existe el problema de sincronizar al conjunto de relojes, es decir, garantizar que las lecturas de los aparatos coincidan o difieran mínimamente. La sincronización implica medir el tiempo, transmitir la medición y acordar simultáneamente un valor común.

Entonces, parafraseando un poema de Poe, el tiempo es un fantasma inasible que se escapa como la arena «aprisionada» en un puño. ¿Será acaso imposible guardar hasta el último grano?

Ya vimos como la especie humana se ha obsesionado con el tiempo. También hemos visto como otra de sus obsesiones es la de comunicarse con sus congéneres. Más aún, el humano es un ser que también habla consigo mismo, es un *Homo loquax*. En el siguiente capítulo revisaremos algunos de sus esfuerzos para comunicarse a distancia y cómo, al resolver técnicamente los retos que iban surgiendo, llegó a soluciones que más bien parecen formar parte de un acto magia.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO 3

- [1] D. W. Allan, N. Ashby, and C. C. Hodge. *Fine-tuning time in the space age*. *IEEE Spectrum*, marzo 1998.
- [2] William J. H. Andrewes. A chronicle of timekeeping. *Scientific American*, pages 58–67, septiembre 2002.
- [3] Guillermo Bonfil-Batalla. *México profundo: una civilización negada*. Random House Mandadori, 2005.
- [4] Guillermo Bonfil-Batalla. *Historia ¿Para qué?, capítulo Historias que no son todavía Historia*. Siglo Veintiuno Editores, 2010.
- [5] Daniel Boorstin. *Los descubridores*. Grijalbo Mondadori, 1986.
- [6] W. Wayt Gibbs. Ultimate clocks. *Scientific American*, pages 68–75, septiembre 2002. 74
- [7] Miguel León-Portilla. *La filosofía Náhuatl*. UNAM, 2001.
- [8] Arturo Meza-Gutiérrez. *Mosaico de turquesas*. Ediciones artesanales Malinalli, 2009.
- [9] Arturo Meza-Gutiérrez. *Cauhpohualli: Cómputo del tiempo azteca y su correlación actual*. Ediciones artesanales Malinalli, 2010.
- [10] Antonio Sarmiento. *El fantasma cuyo andar deja huella: la evolución del tiempo*. FCE, 1991. Serie La ciencia desde México - 103.
- [11] Antonio Sarmiento. *Los disfraces del fantasma que nos orada - el concepto de tiempo en las ciencias y la tecnología*. FCE, 1993. Serie La ciencia desde México - 134.
- [12] Dava Sovel. *Longitud*. Anagrama, 2006.

Telefonía Móvil



Escena 4: Lo único que me vinculaba con la chica del sombrero era la feria tecnológica

Sucede con frecuencia que la percepción de un objeto cambia con la perspectiva desde la que se observa. Es como si hubiera diferentes niveles desde los que «leemos» la realidad. Ahí estaba, mirando en mi teléfono de última generación la imagen de la chica del sombrero, preguntándome qué conexión tenía con ella. Entonces, me di cuenta que la clave de la conexión era el teléfono. No me refiero al hecho de que yo recibía sus mensajes a través del aparato, sino a que había entablado una conversación con ella: la única conversación de viva voz que alguna vez tuvimos, porque me la topé como edecán en el stand donde había comprado mi celular. La recuerdo bien porque me llamó la atención su peculiar acento al hablar: parecía extranjera, pero no estaba seguro.

Era la feria de la tecnología digital. Se veía que había memorizado con dificultad todas las características técnicas del aparato que estaba promocionando pero, como me «atrappó», decidí ayudarle confiándole que era mi primer teléfono móvil y que buscaba algo especial. Le conté que, hasta entonces, me habían bastado los teléfonos fijos y que había evitado los móviles por varios años, pero que la influencia de mi red social me estaba empujando a comprar uno. Además, en mi trabajo estaba a punto de entrar en una etapa en la que iba a viajar mucho y quería mantenerme en contacto con mi familia y amigos. Entonces, ella me sugirió comprar el teléfono que estaba anunciando y me pidió mis datos para ofrecirme otras promociones. Acepté, encantado, darle mis coordenadas. Nunca me imaginé que esto tuviera algo que ver con Violeta. La vida da muchas vueltas.



SANTI

El Sputnik 1, el primer satélite artificial lanzado por la Ex-Unión Soviética (URSS), el 4 de octubre de 1957, cristalizó el sueño de ampliar el alcance de las telecomunicaciones mediante «repetidores» orbitando la Tierra. Treinta años después, las sondas de exploración espacial ya habían rebasado las orbitas de los planetas gigantes de nuestro sistema solar (Júpiter y Saturno) y el desarrollo de esta tecnología haría posible la aparición en el mercado del primer «teléfono inteligente», el *Ericsson* GS 88 «Penelope», en el año 1997.

Capítulo 4

La evolución de las comunicaciones electrónicas

«La Internet ha acercado a las personas que están lejos, pero ha alejado a las que están cerca»

Frase de dominio popular

Ahora daremos un breve repaso sobre la evolución de las comunicaciones electrónicas que originalmente tenían como propósito la comunicación humana a distancia, mediante servicios únicos y diferenciados, y que, finalmente, derivó en la prestación de servicios múltiples y aglutinados conocidos como *triple play* o *cuádruple play*. En este capítulo, veremos cómo evolucionaron las comunicaciones electrónicas, pasando de servicios de transporte para la voz a servicios de acceso a la Internet.

4.1. LA COMUNICACIÓN HUMANA A DISTANCIA

La necesidad de comunicación no es exclusiva de los seres humanos, prácticamente cualquier ser vivo sobre la Tierra requiere, en mayor o menor grado, establecer una comunicación con sus semejantes o recuperar información del entorno. En primera instancia, la capacidad de comunicación que los seres vivos han desarrollado, para intercambiar información entre sí, nace de la necesidad de satisfacer sus necesidades más básicas de supervivencia. Lo anterior ocurre con mayor frecuencia entre los animales que viven en sociedad. Por ejemplo, veamos el caso de los elefantes de África, estos mamíferos se comunican entre sí mediante el envío de diversos mensajes, ya sea haciendo uso de vibraciones emitidas a través de sus trompas o mediante sus pisadas (algunos mensajes son acústicos y otros subsónicos, desde la perspectiva del oído humano) o bien dispersando sustancias aromáticas a través de su orina y heces fecales. El conjunto de estos mensajes les

sirven para establecer una comunicación a distancia. Dicha comunicación les permite advertirse de la presencia de posibles predadores, indicarse el sitio donde pueden hallar alimento o agua, avisarse de la disponibilidad que existe para la procreación, etc. Como puede observarse, el hecho de compartir esta información resulta vital para la especie.

De igual manera, desde los orígenes de la especie humana, el Hombre ha requerido hacer uso de sistemas de comunicación para cumplir con los mismos objetivos de supervivencia. Aun cuando los humanos hayan alcanzado un estado de supervivencia, más o menos estable, la necesidad de comunicación sigue presente. Las diferentes formas en que los humanos han podido comunicarse, en especial a distancia, se han mantenido en continua evolución. El habla, como cualquier otra forma de comunicación, tiene sus alcances y limitaciones. Primero, sin la presencia de algún medio que permita que la voz alcance una mayor distancia, esta forma de comunicación está limitada por la potencia de la voz. Segundo, cada idioma hablado por los humanos hace uso de un conjunto de sonidos relativamente simples, que se acomodan en cierta forma para dar origen a las palabras. Tanto el significado como la forma en que se utilizan las palabras en cada idioma deben seguir una serie de acuerdos (protocolos) para lograr la comunicación, los que definen las propias reglas de la semántica (el significado de las palabras), la sintaxis (el orden, la secuencia de las palabras) y sincronía (el tiempo correcto en que deben usarse las palabras) de cada idioma.

Cuando la especie humana fue capaz de poblar regiones cada vez más extensas de la superficie terrestre, la distancia que separaba a las poblaciones hizo prácticamente imposible la comunicación entre los pobladores mediante el uso de la voz. A partir de esta imposibilidad práctica, el humano buscó alternativas para comunicarse a distancia con sus semejantes, ya fuera mediante el uso de señales visuales (humo, antorchas, luces, banderas, etc.) o señales audibles con un mayor alcance (tambores, trompetas, etc.). Como se mencionó anteriormente, este tipo de sistemas de comunicación sólo permitía enviar mensajes muy concretos y concisos.

Al surgir la escritura, la humanidad fue capaz de hacer uso de un conjunto de símbolos (letras o ideogramas) plasmados en algún medio físico (piedra, piel, papiro o papel) que le permitió expresar y difundir sus conocimientos, ideas, emociones, pensamientos y sentimientos con las personas que supieran interpretar los símbolos con que se expresan las palabras en un idioma dado. Lamentablemente, difun-

dir información a través de la palabra escrita implica que el medio en el que se ha escrito (libros, cartas, revistas, periódicos, etc.) deba llevarse de un lugar a otro para que el receptor del mensaje pueda leerlo. Para esto se requiere de algún medio de transporte, caminos o rutas y formas de almacenaje que hagan posible su traslado. Además, este proceso conlleva un cierto tiempo que, en algunos casos, puede hacer poco práctico o inviable este tipo de comunicación, lo que es especialmente grave si el mensaje a transmitir es muy relevante o urgente.

La necesidad humana de transmitir mensajes complejos a mayores distancias, haciendo uso de formas más rápidas y eficientes, dio origen a los actuales sistemas de comunicación, desde el teléfono, pasando por la radio, la televisión y hasta la Internet. Así, gracias a su intelecto y a su capacidad para resolver problemas, la especie humana ha desarrollado a lo largo de su historia, en particular en los últimos dos siglos, una serie de soluciones a los muy diversos problemas de comunicación que se le han ido presentando [7].

4.2. VOZ A DISTANCIA CON SEÑALES ANALÓGICAS

En la primera mitad del siglo XIX, el inventor Samuel Morse desarrolló un aparato que permitía transmitir mensajes a distancia a través de cables conductores. Los mensajes se codificaban usando un código binario, inventado por él mismo¹ para componer palabras y enviar un mensaje de un sitio a otro. A este aparato se le dio el nombre de *telégrafo*, palabra que viene del griego *tele* (τῆλε) 'lejos' o 'distancia' y *grafos* (γραφος) 'escritura'[1].

1 Código que utiliza un conjunto de combinaciones de dos símbolos (· y –) para representar las letras del alfabeto y los números.



Figura 4.1: En esta ilustración, de finales del siglo XIX, el artista Nett Erlinus expone los inventos más representativos del siglo de la «Revolución Industrial». Se observan las lámparas incandescentes y el teléfono, entre otros. En ese siglo, el telégrafo dio paso al teléfono y, con ello, se preparó el camino para el inicio de la «Revolución de la Información», durante el siglo XX, que hoy tiene en el «teléfono inteligente» a su producto más característico.

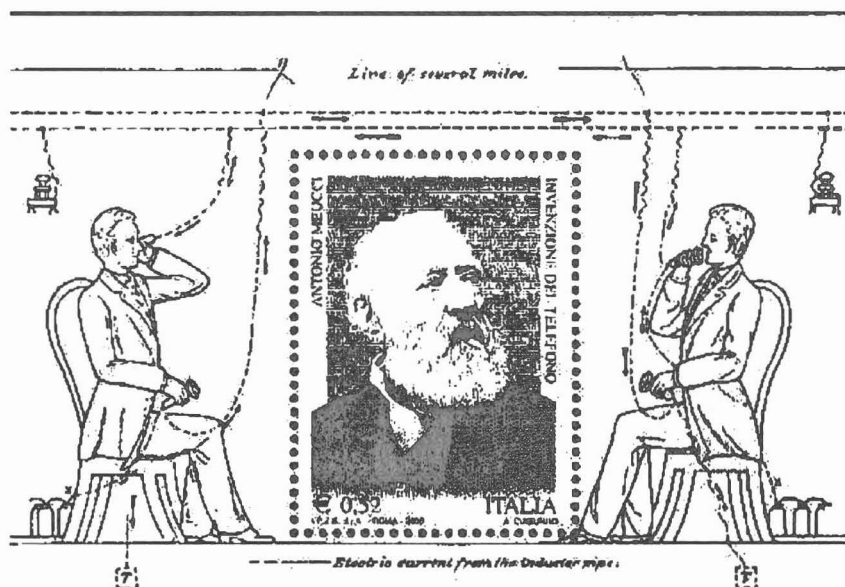


Figura 4.2: Antonio Meucci, inventor italo-estadounidense, actualmente es reconocido oficialmente como el inventor del teléfono. Al parecer, la idea la empezó a desarrollar en la Habana, Cuba, desde 1835, hasta lograr la construcción de un dispositivo funcional, en Nueva York, EE.UU., en 1854. Meucci realizó una demostración pública de su teléfono en 1860, pero fue Graham Bell, bajo polémicas circunstancias, quien registró, en 1876, una patente para un teléfono que, posiblemente, se desarrolló a partir del dispositivo no patentado de Meucci. En la imagen el sistema Meucci, con auricular y micrófono separados, que data de 1857.

En la segunda mitad del siglo XIX, entre los años 1857 y 1876, los inventores Antonio Meucci, Alexander Graham Bell, Elisha Gray y Thomas Alva Edison desarrollaron o perfeccionaron (incluso patentaron) una serie de aparatos que permitirían la transmisión de señales acústicas (particularmente la voz) a través de cables conductores, los que transportan una señal eléctrica generada por un dispositivo denominado *micrófono* que, a su vez, convierte las vibraciones que produce el sonido, al propagarse a través del aire, en corrientes eléctricas. El nombre asignado a estos aparatos es el de teléfono, palabra que viene del griego *tele* (τηλε) 'lejos' y *fonos* (φωνος) 'sonido'.

En un principio, estos aparatos sólo fueron utilizados con propósitos experimentales y, casi de inmediato, con propósitos militares. Conforme se fue popularizando el uso de estos dispositivos, fue surgiendo la necesidad de interconectar un número mayor de éstos, lo que presentó dificultades técnicas y económicas para lograrlo. Gracias a la continua mejora de estos aparatos y al abaratamiento de los mismos, cada vez más gente pudo adquirir uno, permitiéndoles comunicarse con personas que se encontraban a distancia y dando origen a las redes telefónicas públicas.

Originalmente, para establecer un enlace de comunicación a través de estas redes, se requería de la existencia de un cable conductor por cada aparato pero, al crecer la cantidad de aparatos, esta solución se hizo poco práctica. Posteriormente, surgió la solución de interconectar una estación de servicio (conmutador telefónico), que establecía la conexión física entre dos aparatos sólo en el momento en que se requería. Esta labor la realizaba, en forma manual, un operador (que por lo regular era una mujer) quien, a solicitud del usuario que originaba la llamada, realizaba la conexión con el usuario destinatario. Ante el incremento en el número de usuarios, el proceso de establecer las conexiones de llamadas requirió utilizar sistemas de conmutación automáticos. Inicialmente, dichos sistemas eran electromecánicos para, luego, evolucionar a sistemas electrónicos analógicos y, finalmente, a sistemas electrónicos digitales. En los sistemas de conmutación automáticos, el usuario que originaba la llamada debía indicar una secuencia o cadena de números (número telefónico) marcándolo mediante un sistema de disco generador de pulsos, que evolucionó después a un sistema de marcación por tonos de múltiples frecuencias [2, 4].

En términos generales, el proceso para establecer una llamada, entre dos usuarios del sistema telefónico, opera de la siguiente forma:

1. Cuando un usuario desea comunicarse con otro, el primero debe descolgar el auricular de su aparato telefónico.
2. En ese momento, la central telefónica le indica al usuario, mediante la emisión de un tono de marcado, que el sistema está disponible para establecer su llamada.
3. Al escuchar este tono, el usuario debe marcar el número telefónico deseado.
4. Una vez marcado el número telefónico, la central telefónica determina la ubicación y la ruta para establecer la comunicación entre ambos usuarios.

5. La central telefónica genera una señal de timbrado para el teléfono destinatario y una réplica audible en el auricular del usuario que llama.
6. En el momento en que se descuelga el teléfono destinatario, la central telefónica establece un enlace de comunicación, en ambos sentidos, que se reserva para que los usuarios puedan realizar la conversación entre ellos.
7. En caso de que el teléfono destinatario no sea descolgado o no esté disponible, por fallas en la red o por falta de pago, se emite un mensaje de aviso al usuario que llama.
8. Cuando la conversación telefónica termina, los usuarios deben colgar sus aparatos telefónicos y la central debe liberar los recursos asignados al enlace de comunicación que se estableció.

4.3. VOZ A DISTANCIA CON SEÑALES DIGITALES

Con el servicio de telefonía analógico, el costo por llamada estaba en función de su tiempo de duración, de la distancia entre los teléfonos que había que comunicar e, incluso, del horario (día, tarde o noche) y del día (entre semana o fin de semana) en el que se hacían las llamadas. Con el surgimiento de los sistemas de comunicación digital, el costo de las llamadas se ha reducido a tal grado que prácticamente se maneja el mismo costo para cualquier llamada, independientemente de la duración, la distancia y el horario.

Los sistemas telefónicos más recientes no sólo permiten la comunicación de voz entre personas sino que, además, comenzaron a ofrecer un conjunto complementario de servicios digitales de comunicación, todos ellos con sofisticada tecnología y operación simultánea, tales como la transmisión de datos (por ejemplo, en las terminales para banca electrónica), servicios de llamada en espera, conferencias entre múltiples usuarios, identificación de llamadas y el acceso a Internet de banda ancha². Aunque es evidente la importancia del avance, en cuanto a cantidad y calidad, de los servicios que los sistemas telefónicos fijos podían ofrecer, éstos también seguían presentando la gran limitante de que el equipo telefónico no fuera portátil. La incapacidad de movilidad, inherente a los sistemas telefónicos que utilizan medios cableados como parte de su sistema de transmisión, es lo que impi-

2 Siempre que haya cobertura del prestador del servicio, en el hogar, en el trabajo, en áreas de entretenimiento, dentro del transporte, entre otros lugares públicos.

de que sus usuarios puedan moverse libremente y mantenerse en comunicación en todo momento. El advenimiento de los sistemas de comunicación inalámbrica permitió que los equipos telefónicos fueran portátiles, otorgándoles la movilidad necesaria para que los usuarios pudieran mantenerse comunicados con las demás personas, aun cuando tuvieran que trasladarse de un lugar a otro [5, 6].

En la segunda mitad del siglo XX se desarrollaron los sistemas telefónicos móviles con base en redes celulares. Se trata de un sistema de comunicación inalámbrico formado por un conjunto de estaciones base que funcionan como centrales de conmutación telefónicas (denominadas células). Estas estaciones tienen la capacidad de comunicarse entre sí, en forma inalámbrica, y con la red telefónica pública, a través de enlaces de comunicación cableados. Con ello, las estaciones base sirven como puente de conexión para que los dispositivos móviles (teléfonos celulares) puedan comunicarse entre sí o con los equipos fijos (teléfonos convencionales), mediante el uso sus enlaces de comunicación inalámbricos. Más aún, los sistemas de telefonía móvil permiten establecer enlaces de comunicación entre dos usuarios cualesquiera, ya sean ambos del mismo sistema celular, de dos sistemas móviles diferentes (pertenecientes a proveedores del servicio independientes) o, incluso, entre un usuario fijo (telefonía fija convencional) y uno móvil (telefonía celular), de tal forma que todos puedan realizar una conversación telefónica [3, 8].

Al inicio, los sistemas telefónicos móviles eran muy costosos, poco prácticos y no tan portátiles, ya que los aparatos telefónicos móviles eran muy voluminosos, pesados y requerían que el suministro de energía eléctrica se hiciera a través de grandes baterías eléctricas, por lo que sólo era posible instalarlos abordo de automóviles u otros vehículos que contaran con baterías eléctricas grandes. Aun así, este avance tecnológico les otorgó mayor movilidad a los usuarios del servicio ya que, entonces, podían permanecer conectados durante el trayecto de sus hogares a sus centros de trabajo. Pero, debido al costo tan elevado de estos primeros equipos, éstos sólo estaban disponibles para personas con grandes recursos económicos.

4.4. TELEFONÍA «INTELIGENTE»

Recientemente, gracias a los grandes avances en la tecnología de las telecomunicaciones, a la miniaturización de los dispositivos electrónicos, al abatimiento de sus costos, así como al aumento en las capacidades de procesamiento y almacenamiento, entre otros aspectos, es que los sistemas telefónicos móviles con base en las

redes celulares han alcanzado un nivel de popularidad tan grande que el número de usuarios de este tipo de sistemas de comunicación ha rebasado, por mucho, al de los sistemas telefónicos convencionales.

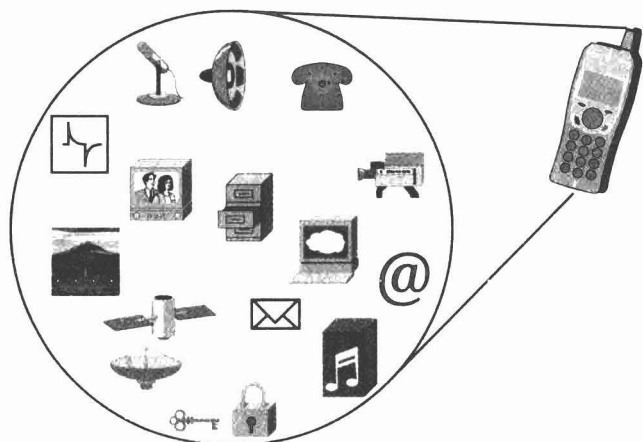


Figura 4.3: El actual teléfono «inteligente», auténtica «Caja de Pandora».

La proliferación de los sistemas de comunicación inalámbrica y la aparición de nuevas generaciones de «teléfonos móviles inteligentes» han permitido que los usuarios estén disponibles, es decir, al alcance de las demás personas, aunque se encuentren en lugares distantes, brindándoles además la posibilidad de realizar otras tareas que antes requerían de equipo especializado y costoso. Por ejemplo, el acceso a la Internet³; la captura de fotografías y video en formato digital, mediante el uso de una cámara fotográfica integrada en el equipo telefónico móvil; la determinación de la posición geográfica, mediante el empleo de un receptor del sistema de localización satelital GPS; entre muchas otras funciones [3, 8].

4.5. TELECOMUNICACIONES Y PROVEEDORES VERSÁTILES

Paralelamente al desarrollo de las comunicaciones interpersonales, también se dio el desarrollo de las redes de datos, donde el objetivo principal no era transportar

³ Para, estando en movimiento, buscar información, comprar en línea, comunicarse con personas a través de las redes sociales virtuales o en foros de plática chat, así como para enviar y consultar mensajes de todo tipo, incluyendo al tradicional correo electrónico.

voz o video *per se* sino archivos con información codificada en binario, que bien podían ser originados por señales de voz o video pero, además, por cualquier otra información (especialmente alfanumérica) que pudiera ser transmitida, almacenada y procesada en formato digital. Cuando los proveedores de los sistemas de comunicación de voz y de video convergieron con los de las redes de datos, al proporcionar servicios equivalentes y complementarios, entonces surgieron los esquemas actuales donde, por una misma conexión, se ofrecen servicios de telefonía, televisión y datos, sin importar si el proveedor originalmente inició como proveedor de servicios de telefonía, televisión por cable, o acceso a la red de datos [3].

Un ejemplo de la convergencia de los sistemas de comunicación, es la evolución extraordinaria de los sistemas de difusión radioeléctrica de audio y video, desde sus comienzos en el siglo XX. Los servicios que ofrecen la radio y la televisión han estado bajo una continua mejora y hoy es cada vez más evidente que el plan de negocio de estos proveedores incluye el ofrecimiento de servicios integrales de telecomunicación, es decir, servicios de telefonía fija y móvil, la distribución de programas de televisión de acceso restringido y el acceso a Internet a través de conexiones de banda ancha. A este conjunto de cuatro servicios de telecomunicaciones se les denomina el *cuádruple play*⁴. En los países con sectores de telecomunicaciones sin monopolio (estatal o privado), gran parte de los proveedores de servicios de telecomunicaciones, que en un principio sólo ofrecían uno de estos servicios a sus usuarios, están haciendo todo lo posible, tecnológica y económicamente, para poder competir ofreciendo más y mejores servicios a costos atractivos. El supuesto, en estos países con mercado libre, es que entre mayor sea la cantidad de proveedores de servicios de telecomunicaciones y mayor la competencia entre éstos, más beneficios obtendrán los usuarios [8].

4 Antes, cuando no se consideraba la telefonía móvil, se llamaba triple play: telefonía, televisión y datos por una misma conexión.

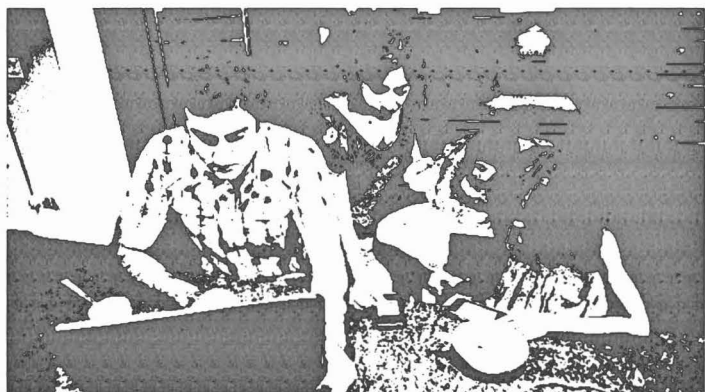


Figura 4.4: El infinito potencial de las actuales TIC para el desarrollo de la humanidad y el mejoramiento de su calidad de vida es innegable. Sin embargo, en algunas sociedades modernas, cada vez son más comunes las manifestaciones de una evidente enajenación y evasión de la realidad: las personas pueden estar físicamente juntas pero incomunicadas en la práctica, debido a sus fuertes preferencias por «contenidos virtuales» adictivos.

4.6. ¿LAS TELECOMUNICACIONES NOS MANTIENEN MÁS COMUNICADOS?

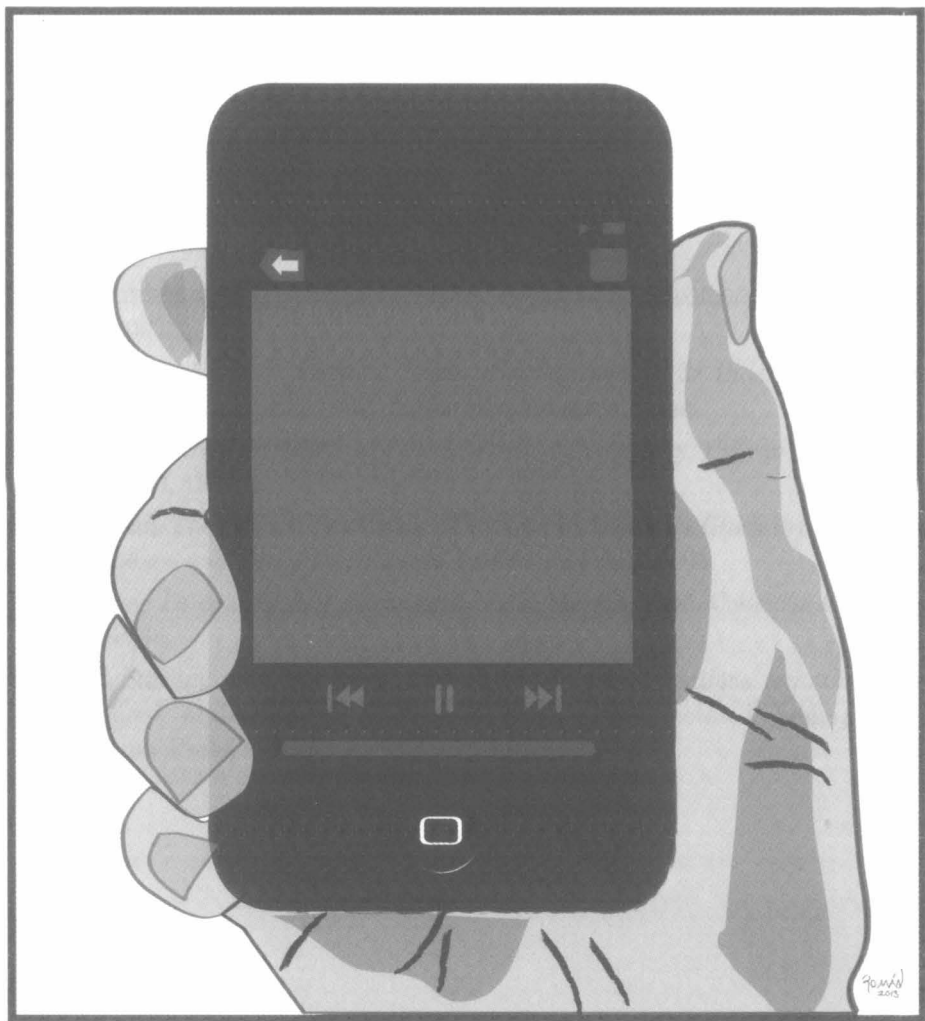
Un aspecto importante, que debería hacernos reflexionar, es que aunque técnicamente se ha alcanzado el objetivo principal de los sistemas de telecomunicación modernos (en teoría, éstos permitirían poner en contacto a los segmentos de la población que se encuentran distanciados), si no se tiene cuidado también pueden alejar a las personas que se encuentran más cerca. ¿Cuántas veces hemos visto a grupos de personas, en una misma habitación, que se encuentran absortos enviando mensajes a otros mediante sus teléfonos celulares, en lugar de estar conversando entre ellos? Este abuso en el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones bien lo expresa la frase que dice «La Internet ha acercado a las personas que están lejos pero ha alejado a las que están cerca», sin embargo, el buen o mal uso de cualquier tecnología es responsabilidad exclusiva de la sociedad que se beneficia de ellas.

Como hemos expuesto en el transcurso de este capítulo, parte de la evolución que han experimentado los sistemas de telecomunicación, sobre todo en los últimos años, se debe a los grandes avances tecnológicos y al consecuente desarrollo de

equipos y dispositivos electrónicos más poderosos (con mayores capacidades de procesamiento y almacenamiento de información) y más eficientes (con menor consumo de energía). Pero, ¿cuáles han sido los motores de este desarrollo? En el siguiente capítulo bosquejaremos parte de la respuesta.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO 4

- [1] H. N. Casson. *The Worldwide History of Telecommunications*. Echo Library, 2007.
- [2] T. K. Derry and T. I. Williams. *Historia de la tecnología*. Siglo XXI de España Editores, 1990.
- [3] A. Huurdeman. *The Worldwide History of Telecommunications*. John Wiley & Sons, 2003.
- [4] C. B. Lavenir and F. Barbier. *Historia de los medios: de Diderot a Internet*. Ediciones Colihue SRL, 1999. Traducción: Eduardo Rinesi.
- [5] C. J. P. Moschovitis. *History of the Internet: a chronology, 1843 to the present*. ABC-CLIO, 1999.
- [6] J. R. Okin. *The Internet Revolution: The Not-For-Dummies Guide to the History, Technology, and Use of the Internet*. Ironbound Press, 2005.
- [7] A. Pacey. *La cultura de la tecnología*. FCE, México, 1990. Colección Ciencia y Tecnología.
- [8] C. H. Sterling and G. Shiers. *History of telecommunications technology: an annotated bibliography*. Scarecrow Press, 2000. nnotated bibliography. Scarecrow Press, 2000.



ROMAN
2013

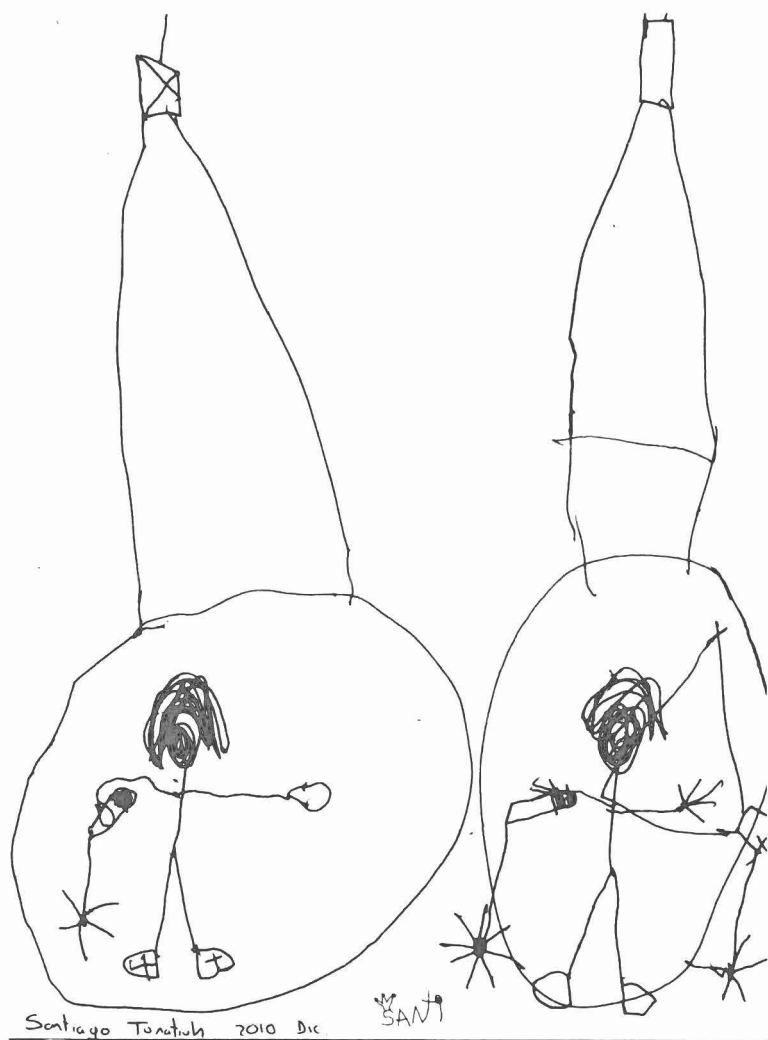
Escena 5: El asesino jamás supo que había sido fotografiado con un teléfono de bolsillo

¿Sabía el asesino que lo habían fotografiado?, aparentemente no, porque pude ver que se alejaba luego de ultimar a su víctima. Repentinamente, dejé de recibir los cuadros que, hasta entonces, habían llegado de forma regular. Ni falta que hacía, tenía una larga sucesión de imágenes que daban testimonio de los últimos segundos de la modelo. Recordé que la chica me había dicho que mi teléfono contaba, entre sus muchos componentes integrados, con una cámara de alta resolución. De hecho, me confesó que ella tenía uno igual: «... es un aparato genial, incluso tiene localizador GPS...» me dijo. ¿Podría haber ocurrido que la modelo estuviera tomándose una secuencia de fotos y que se capturara la imagen de la persona que le disparó? Decidí hacer un experimento rápido: probaría mi teléfono para sacar una secuencia automática de fotos.

Definitivamente era posible. No sólo podía tomar fotos simples, secuencias de ellas o video, además, mi teléfono tenía una aplicación para procesar imágenes, hacer con ellas composiciones y enviarlas como postales a un correo electrónico, tal y como había ocurrido. Tenía la versión electrónica de una navaja suiza. Por un momento recordé el pesado teléfono de baquelita que usaba mi abuela, la aparatosa cámara de fotógrafo de mi padre, el radio de bulbos de mi abuelo y la T.V. de mi infancia. Eso y más cabía en mi teléfono.

Por aquellos días, seguí con mucha atención las noticias del caso. Se sabía que la modelo había sido la última amante de un fotógrafo, un casanova. Se sospechaba que la anterior amante de éste había terminado con la vida de la chica del sombrero. Todo indicaba que era un crimen pasional. El fotó-

grafo pudo demostrar que se encontraba fuera del país por aquellos días en los que sucedió el crimen. Aparentemente, la principal sospechosa se había dado a la fuga y eso automáticamente la inculpaba: caso cerrado. La situación me trajo a la mente a Violeta y sus tribulaciones. ¿Por qué no contestaba mis mensajes y llamadas? Tenía muchas preguntas que me asaltaban y no me dejaban dormir, pero las más recurrentes eran: ¿quién diablos me había mandado esas imágenes?, ¿por qué a mí? y ¿dónde estaba Violeta?



Durante mucho tiempo, la principal aplicación y motivación de la electrónica fue la amplificación de señales analógicas. El fortuito descubrimiento del «Efecto Edison», a partir de una lámpara incandescente, pronto tendría una importante influencia en el insospechado e impresionante desarrollo de la tecnología electrónica.

Capítulo 5

Los cien años de avances en electrónica que hicieron posible la era de la información

«La ciencia es un campo que crece continuamente, con fronteras siempre en expansión»

J. Bardeen

La mayoría de las veces los avances en ciencia y tecnología ocurren en pasos incrementales [4]. Sin embargo, pocos casos son tan fascinantes y muestran tan claramente la diversidad de factores que intervienen en este proceso como la serie de descubrimientos e inventos que dieron origen a la electrónica integrada. Esta tecnología es la base de múltiples productos y servicios que son imprescindibles en la actualidad. En este capítulo se explica cómo fue que tres ideas clave dieron origen a esta revolución tecnológica. Tales ideas son: la rectificación, la amplificación y la integración de circuitos.

5.1. LOS ALBORES DE LA TECNOLOGÍA ELECTRÓNICA

Es realmente difícil establecer un punto concreto de inicio para la historia de la electrónica, ya que cada avance es simplemente un paso más en una larga cadena de descubrimientos que se apoyan unos en otros. Es así que, en el afán de iniciar en algún lado, comenzaremos por hablar acerca del antecesor del transistor: la válvula de emisión termoiónica o bulbo.

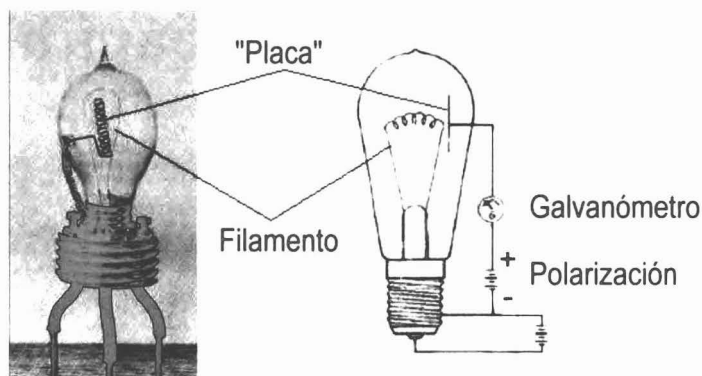


Figura 5.1: El tubo de «Efecto Edison».

Probablemente se le deba a Edison la invención de la primera válvula electrónica. En 1880, Edison ya había logrado el desarrollo de una lámpara de luz incandescente de utilidad práctica. En estas lámparas, la luz se produce al hacer circular una corriente eléctrica a través de un filamento. Así, éste se calienta, por efecto Joule, y emite luz. Anteriormente otros inventores habían usado el mismo principio para lograr la iluminación artificial, pero el éxito de la lámpara de Edison se debió al uso de alto vacío en su interior y a la utilización de un filamento de carbón, el que resultó más efectivo en términos de duración y consumo de energía eléctrica. Sin embargo, el desempeño de una lámpara en operación disminuía gradualmente debido a los depósitos de hollín que ennegrecían su interior. Así que Edison pronto se dedicó a experimentar con formas de evitar este problema. En un intento por atrapar las partículas de carbón, Edison incorporó un electrodo positivo en la cercanía del filamento y observó que se establecía una corriente eléctrica entre estos dos, sin que hubiera un conductor de por medio¹. Pensando que este fenómeno podría tener algún uso futuro, patentó un dispositivo para generarlo (tubo de «Efecto Edison») y abandonó toda experimentación relacionada. En esa época no se vislumbraba alguna aplicación de interés y mucho menos se contaba con alguna explicación de lo que ocurría. Cabe recordar que Thompson descubrió el electrón hasta 1897.

¹ El lector puede encontrar un recuento detallado de estos experimentos de Edison en la referencia [8].

El fenómeno observado por Edison sería posteriormente conocido como emisión termoiónica, la que tiene su fundamento en el hecho de que al calentar un material algunos de sus electrones adquieren la energía suficiente para desprenderse. En el tubo de efecto Edison, los electrones liberados en la terminal caliente negativa (cátodo) son atraídos a la positiva (ánodo) y, de esa forma, puede establecerse una corriente eléctrica.

Años después, el científico británico John Ambrose Fleming realizó algunos experimentos con tubos de efecto Edison. Sin lugar a dudas, su logro más importante fue el identificar una aplicación práctica para el fenómeno que ocurría en estos tubos. La observación fundamental fue que el flujo de electricidad ocurría únicamente cuando el electrodo caliente se conectaba a un voltaje negativo y el otro electrodo a uno positivo. En contraste, al invertir la polaridad del voltaje, el flujo de electricidad se detenía. Con base en esta observación, Fleming debió haber concluido que el tubo podía utilizarse para permitir el paso de corriente eléctrica en un solo sentido. En la actualidad sabemos que este fenómeno sucede porque el desprendimiento de electrones sólo ocurre en el electrodo caliente y éstos son atraídos por el voltaje positivo del ánodo. Al invertir la polaridad cesa el flujo de corriente eléctrica ya que en el ánodo frío no ocurre la emisión termoiónica.

Al proceso para obtener una corriente unidireccional a partir de una bidireccional se le llamó rectificación y, tanto en aquella época como en la actualidad, es un elemento indispensable en varios sistemas electrónicos, incluyendo la detección de señales de radio [12]. Los dispositivos electrónicos que se empezaron a fabricar bajo el principio de la emisión termoiónica, para propósitos de rectificación, se denominaron válvulas osciladoras, válvulas Fleming o válvulas rectificadoras. En las primeras décadas del siglo XX este dispositivo empezó a conocerse también con el término diodo rectificador, el que ha prevalecido hasta nuestros días para designar dispositivos con funcionamiento similar, aunque contruidos de manera diferente.

5.2. DE LA RECTIFICACIÓN A LA AMPLIFICACIÓN

En 1906, Lee de Forest tuvo una idea maravillosa. A la válvula rectificadora le agregó un alambre en forma de zigzag, que colocó entre el cátodo y el ánodo, con el propósito de controlar la intensidad de corriente que circulaba entre estos dos. Observó que, efectivamente, cambios relativamente pequeños de voltaje en el alam-

bre ocasionaban grandes cambios en el flujo de corriente del cátodo al ánodo. Entonces, con este dispositivo se podía generar una copia agrandada de la señal que se aplicaba al alambre en zigzag (al que llamó rejilla). Lee de Forest comercializó este invento con el nombre de «audión», aunque posteriormente a esta válvula de tres elementos se le identificó comúnmente como triodo.

El audión o triodo pronto llamó la atención por su potencial en la amplificación de señales eléctricas en sistemas de comunicaciones. En general, se puede definir la amplificación como el proceso mediante el que se genera una copia de una señal, pero de mayor amplitud. En un sistema electrónico, la señal a amplificar puede ser un voltaje, una corriente o una combinación de ambas. Sin embargo, vale la pena preguntarse por qué era de tanto interés, en ese momento, el desarrollo de amplificadores para señales eléctricas. La amplificación es una función fundamental en muchos sistemas electrónicos y, en aquel momento, un elemento estratégico en los planes de expansión de la *American Telephone and Telegraph* (AT&T), la compañía que dominaba el servicio de telefonía en los EE.UU..

A inicios del siglo XX, la compañía AT&T luchaba por mantener la hegemonía en el lucrativo negocio de la telefonía. Su presidente, Theodore N. Vail, tenía la meta de crear una red a escala mundial con la consigna «*one policy, one system and universal service*» (una política, un sistema y un servicio universal) [14]. Sin embargo, para alcanzar esta meta, la compañía requería del desarrollo de técnicas adecuadas de amplificación para compensar la atenuación que sufren las señales eléctricas que representan a la voz cuando se propagan a través de un medio de transmisión. Sin la amplificación no es posible establecer una conversación telefónica más allá de cierta distancia (aquella en la que la señal que transporta la voz se debilita tanto que la conversación se vuelve ininteligible). Debido a este problema, el triodo pronto encontró aplicación en las instalaciones para circuitos telefónicos de larga distancia de AT&T.

El triodo y dispositivos similares derivados de éste tenían limitaciones que pronto se hicieron evidentes. El dispositivo es relativamente grande y frágil. Además, consume una gran cantidad de energía, ya que el cátodo se tiene que calentar antes de que se pueda establecer una corriente eléctrica. Todo esto tiene la desventaja, para un sistema construido a partir de válvulas de emisión termiónica, de presentar problemas de confiabilidad. A pesar de estas limitantes, y aun

cuando en la actualidad esta válvula no tiene la importancia que tuvo en la primera mitad del siglo XX, puede, sin lugar a dudas, considerarse como un invento decisivo en la historia de la humanidad, ya que permitió el desarrollo de muchas otras tecnologías. No es de extrañar que, después de observar el panorama de posibilidades puesto al descubierto por la invención de este dispositivo, se haya iniciado una carrera por inventar algo que lo sustituyera. Se trataba de diseñar un nuevo dispositivo, con el mismo funcionamiento, pero que fuera de menor costo, menor tamaño, más confiable y de menor consumo energético. Esto pronto se convirtió en una meta para varios investigadores, incluyendo los de AT&T.

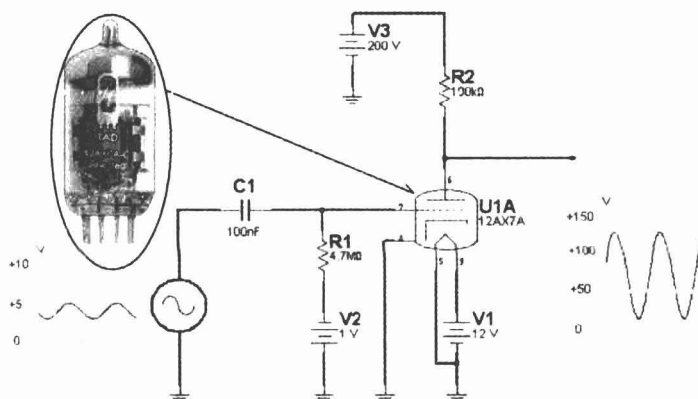


Figura 5.2: El uso de una válvula del tipo triodo dentro de un circuito amplificador. La señal de entrada, a la izquierda, es de un voltaje pequeño pero suficiente para controlar el flujo termoiónico entre el cátodo y ánodo sujetos a una diferencia de potencial mucho mayor (200 V). Así, la señal de voltaje de entrada se replica en la salida, a la derecha, pero con una mayor amplitud (se amplifica).

Tratando de seguir la misma cadena de eventos que dieron origen al triodo, los investigadores empezaron a considerar algunas técnicas diferentes para lograr la rectificación de corriente alterna [5]. Vale la pena mencionar que en 1874, con anterioridad a la invención de la válvula rectificadora, el científico alemán Ferdinand Braun inventó el diodo rectificador de cristal de galena (también llamado diodo de bigote de gato o de punto de contacto) [14] con base en las propiedades de conducción de corriente eléctrica de algunos cristales. Braun, además, desarrolló una serie de técnicas que fueron utilizadas en las incipientes comunicaciones inalámbricas. Por sus

diversas aportaciones, este científico obtuvo el premio Nobel de física junto con Marconi en 1909.

A pesar del éxito comercial de los inventos de Braun, el proceso de rectificación en los cristales no tenía una explicación clara en el momento de su descubrimiento. Alrededor de los años veinte del siglo XX, también se empezaron a fabricar rectificadores hechos de óxido de cobre, para los que tampoco se contaba con una explicación de su funcionamiento. Para ello se requería una mejor comprensión de la estructura de la materia, lo que ocurriría varios años después. Cabe recordar que el modelo del átomo y los conceptos de la mecánica cuántica serían desarrollados principalmente durante las primeras tres décadas del siglo XX.

En 1930, otro científico alemán, Julius Edgar Lilienfeld tuvo la idea de construir un dispositivo amplificador en un cuerpo sólido. La idea básica era utilizar un campo eléctrico a fin de controlar el paso de corriente a través del objeto. No hay evidencia de que Lilienfeld hubiera llegado a construir tal dispositivo y no está claro que en esa época se pudiera construir algo así (ver referencia [1]), sin embargo, le fue otorgada la patente U.S. 1,745,175 por «un método y aparato para controlar la corriente eléctrica».

En esta época era ya evidente que la inversión en investigación científica podía proporcionar grandes ventajas competitivas. Así, en 1925, AT&T decidió fundar los *Bell Telephone Laboratories* (los Laboratorios Bell) en donde se concentrarían las actividades de investigación y desarrollo de la compañía. Sin embargo, la Segunda Guerra Mundial cambió las prioridades de investigación y de manufactura de muchas empresas, incluyendo los Laboratorios Bell [14], y las tareas se reorientaron a fin de cooperar en el desarrollo de artefactos y técnicas que pudieran proporcionar alguna ventaja bélica. Una vez finalizada la guerra, los laboratorios y sus investigadores pudieron regresar a sus prioridades individuales.

Tres excepcionales investigadores de los laboratorios Bell, Walter Brattain, John Bardeen y William Shockley, enfocaron sus esfuerzos en el desarrollo de un dispositivo que pudiera realizar la función de amplificación de forma más eficiente, en comparación a lo logrado por la válvula termoiónica. A diferencia de éstas, la amplificación no se realizaría utilizando el vacío sino dentro de un cuerpo sólido y relativamente frío. El grupo de investigación se encontraba liderado por Shockley, quien anteriormente había intentado construir tal dispositivo sin éxito.

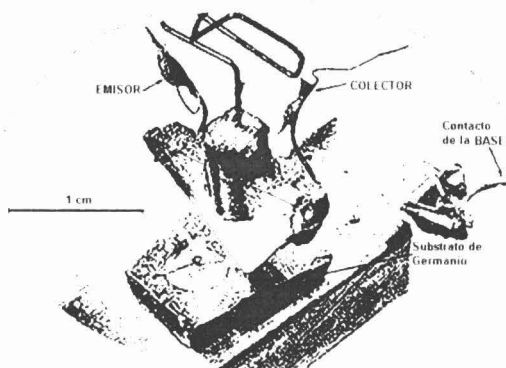


Figura 5.3: El primer transistor de puntos de contacto.

Una de las ideas que Shockley exploró resulta ser interesante. En 1945, meses antes del fin de la guerra, pensó que era posible construir un dispositivo amplificador en un semiconductor. La idea básica era utilizar un campo eléctrico externo (tal como el proporcionado por las terminales de una batería) para atraer electrones hacia una región del material semiconductor y, de esa manera, facilitar el paso de corriente eléctrica en esa zona (es decir, aumentar la conductividad eléctrica). A su vez, el control del nivel de conductividad podría servir para regular la intensidad de la corriente eléctrica que circulara en esa zona. La idea parecía prometedora, pero los dispositivos que se construyeron para probarla no dieron resultado, sin que nadie pudiera explicar el porqué. Desalentado por estos intentos fallidos, Shockley delegó la solución de este problema a Bardeen y otros miembros de su equipo. En la actualidad sabemos que la idea de Shockley en principio es correcta, el problema fue que en ese momento se desconocía la existencia de un fenómeno de acumulación de carga eléctrica en la superficie del material, lo que bloqueaba la penetración del campo eléctrico al interior.

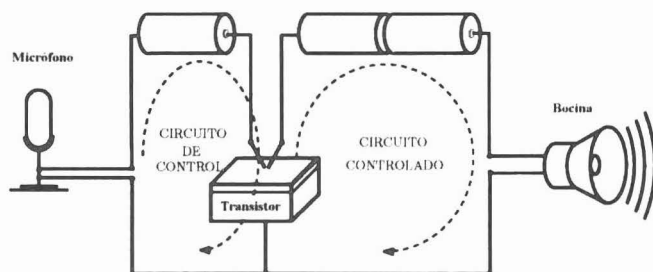


Figura 5.4: Simplificación de un circuito amplificador con un transistor de puntos de contacto. En este caso, la señal de entrada, a la izquierda, es una corriente pequeña pero suficiente para controlar el flujo de corriente mayor entre el emisor y el colector. Así, la señal de corriente de la entrada se replica en la salida, a la derecha, pero ahora amplificada.

Después de sortear muchas dificultades técnicas, el 23 de diciembre de 1947 Brattain y Bardeen mostraron un nuevo dispositivo que lograba la amplificación de una señal conforme ésta pasaba a través de él. A este invento se le llamó *transistor*. El aparato estaba compuesto por un par de conductores que hacían contacto a muy poca distancia uno del otro sobre una barra de germanio. Por esta razón, se le llamó transistor de puntos de contacto.

En general, el funcionamiento de un transistor requiere de dos circuitos en torno a él. El primero es un circuito de control por el que fluye una corriente pequeña. El segundo es un circuito en el que fluye una corriente significativamente más grande. El circuito de control tiene el propósito de convertir las variaciones en la amplitud de una señal, en cambios de las propiedades eléctricas de un material semiconductor. En un semiconductor la oposición al flujo de electricidad (resistencia eléctrica) puede controlarse de esta forma. Así, se crea una resistencia variante que se inserta en la trayectoria de la corriente del segundo circuito. Con ello, cambios pequeños en la amplitud de la señal de control ocasionan variaciones grandes de intensidad de corriente en el otro circuito. Este es el principio bajo el que un transistor logra la amplificación. Como se puede observar, la resistencia eléctrica creada por el circuito de control parece haber sido transferida hacia el circuito con la corriente de interés. Por esta razón, el invento se llamó transistor, una nueva palabra proveniente de *transfer* y *varistor* que significan ‘transferencia’ y ‘resistencia variable’, respectivamente.

La invención del transistor de puntos de contacto desató una etapa de intensa actividad para Shockley. A finales del año de 1947, se recluyó en un cuarto de hotel tratando de diseñar un dispositivo que superara al transistor inventado por Bardeen y Brattain [14]. Allí surgieron las ideas clave que, tiempo después, dieron origen a un transistor mucho más confiable y eficiente, al que se le llamó transistor bipolar de juntura. En forma similar al transistor de puntos de contacto, este dispositivo también se construye en un sustrato de material cristalino y tiene su principio de operación en la transferencia de resistividad, aunque su estructura es diferente.

A fin de explotarlo comercialmente, el transistor de puntos de contacto fue protegido con una patente. Durante la redacción de la solicitud de patente, Shockley propuso utilizar el trabajo que él había realizado anteriormente en este campo, a fin de explicar el principio de funcionamiento del transistor. En su opinión, sin esas investigaciones no hubiera sido posible realizar el invento. Sin embargo, los abogados de Bell se encontraron con la patente registrada por Lilienfeld en 1930 y concluyeron que, dado que este trabajo y el de Shockley tenían ciertas similitudes, el invento no sería patentable. Así, fue necesario desligar el trabajo de Shockley del novedoso invento y la patente se solicitó únicamente a nombre de Brattain y Bardeen. El malestar y las circunstancias que rodearon a esta decisión parecen haber dañado seriamente la relación entre Shockley y sus colaboradores.

El transistor de puntos de contacto empezó a producirse a gran escala y a utilizarse en diversos dispositivos electrónicos, sobre todo en los utilizados por la red telefónica de Bell. Poco a poco, sin embargo, la superioridad del dispositivo inventado por Shockley empezó a hacerse evidente, por lo que el transistor de puntos de contacto empezó a ser sustituido por el de tecnología bipolar.

5.3. PIONEROS DE *SILICON VALLEY*

A fin de explotar al máximo los beneficios de las patentes obtenidas por Bell, la compañía empezó a vender licencias para la fabricación de transistores. Sin embargo, al inicio, los ingenieros y el público en general tenían dificultades para imaginar las aplicaciones del invento. Luego se hizo evidente que una buena aplicación era la fabricación de ayudas auditivas, en donde el bajo consumo energético del transistor y su volumen reducido eran muy convenientes. Pero, más allá de esta aplica-

ción, el transistor parecía ser una mera curiosidad científica más que un dispositivo de aplicaciones comerciales. Esto, sin embargo, estaba a punto de cambiar. Una de las primeras compañías en comprar una licencia para la fabricación de transistores fue la llamada *Texas Instruments*, una incipiente compañía establecida en Dallas. En 1954, con los primeros transistores fabricados por la compañía texana, otra pequeña compañía llamada *Regency* empezó a comercializar un radio de transistores a un precio de USD\$49.95. El radio, llamado *Regency TR-1*, se convirtió en un éxito instantáneo y mostró claramente las posibilidades de aplicación del transistor en la fabricación de artículos de uso cotidiano.

WORLD'S FIRST POCKET RADIO

Regency

\$49.95
less battery

Uses tiny transistors... no bulky tubes, combines amazingly compact size, high performance

• First truly personal radio! Weighs only 12 ounces, measures 3" x 6" x 1 1/2". Slips in pocket or purse, available with leather carrying case, complete tape deck, battery circuit, astonishingly clear tone... through acoustically baffled speaker in this complete. Shock-resistant, virtually service-free... engineered for life-time performance. This standard 200 V battery Smart plastic case in black, ivory, maroon or red, shield grey, mahogany or olive green. See it! Hear it! Get it!

REGENCY DIVISION • U • I • A INC. INDIANAPOLIS, INDIANA

Goos anywhere
place a new pocket!

Listen with
battery

That's most exciting
new gift idea!

ACCESSORIES

Carrying case for the radio
\$3.95

Battery (200 V) 1000 mAh
\$2.50

Figura 5.5: Primer radio-receptor portátil de transistores que resultó un gran éxito comercial.

Para el segundo lustro de la década de los cincuenta era ya evidente la relevancia de la invención del transistor. La Academia de Ciencias de Suecia reconoció su importancia otorgando el premio Nobel de Física a Brattain, Bardeen y Shockley en 1956, aunque para ese entonces el grupo de investigación ya se había desintegrado. Brattain, por ejemplo, logró reubicarse en otra área de los laboratorios Bell. Bardeen abandonó los laboratorios y ocupó una plaza en la Universidad de Illinois.

cambió su área de interés y se dedicó a estudiar el fenómeno de la superconductividad. Por esta investigación, Bardeen ganaría otra vez el premio Nobel en 1972, convirtiéndose así en una de las pocas personas que han ganado el premio en dos ocasiones [6], aunque el único en Física.

Por su parte, Shockley decidió abandonar los laboratorios Bell y fundar su propia compañía, a la que llamó *Shockley Semiconductor Laboratory*. Ninguno de sus colegas en los Laboratorios Bell accedió a acompañarlo en esta empresa, de modo que él se dedicó a buscar talentos en otros lugares. Así, buscando en la industria y en prestigiosas instituciones académicas de todo EE.UU., logró ensamblar un sorprendente equipo de trabajo formado por una veintena de científicos, jóvenes y extremadamente brillantes, entre los que figuraban Gordon E. Moore y Robert Noyce. Confiando en la superioridad de sus ideas, Shockley dirigió los esfuerzos de su compañía principalmente a desarrollar sus propias ideas, aun cuando en el camino tuviera que desechar algunas ideas interesantes de los otros. Por ejemplo, una vez Robert Noyce concibió la idea, en la que Shockley no mostró interés, de crear un diodo inspirado en el fenómeno físico conocido como efecto túnel [2]. Años después, Leo Esaki, con esa misma idea, ganaría el premio Nobel de Física.

Con el paso del tiempo, se hicieron cada vez más evidentes las deficiencias de Shockley en la administración del negocio y en el manejo de su personal. Desencantados por su proceder, ocho de sus más brillantes científicos (incluyendo a Moore y Noyce) abandonaron la compañía y decidieron fundar *Fairchild Semiconductor* [11], una empresa que llegaría a ser mucho más exitosa de lo que jamás llegó a ser la de Shockley. Ambas compañías quedaron instaladas al sur de la bahía de San Francisco, quedando separadas por menos de un par de kilómetros una de la otra [10]. Con el paso del tiempo más industrias del ramo de la electrónica se asentaron en las cercanías, llegando a formar un conglomerado de empresas que se concentraron en la investigación y el desarrollo de tecnología con semiconductores y sus aplicaciones. Por esta razón, a la zona se llamó *Silicon Valley* (Valle del Silicio).

5.4. LA INTEGRACIÓN DE CIRCUITOS

Una tendencia comercial, que provenía de la época de las válvulas termoiónicas, consistía en tratar de crear un módulo que además del elemento amplificador contuviera todos los elementos necesarios para realizar alguna función por completo

como, por ejemplo, el filtrado de la señal amplificada o la generación de una señal oscilante partiendo de un circuito resonante. Así, en la época de mayor éxito de las válvulas termoiónicas, se llegaron a comercializar módulos que consistían de una o más de ellas con algunos componentes adicionales (por ejemplo, la válvula *Loewe 3NF*). Estos módulos estaban orientados a realizar unas cuantas funciones específicas.

Con la llegada del transistor era posible crear módulos electrónicos más compactos. La integración de todo un circuito en un solo módulo transistorizado era una idea que, tarde o temprano, tendría que aparecer en el mercado. Lo que no era evidente fue el camino que siguió Jack Kilby para lograr tal objetivo. En 1958, Kilby había sido contratado por Texas Instruments un mes antes de las vacaciones de verano, por lo que no tenía derecho a tomarlas. En lugar de ello permaneció en las instalaciones semidesiertas de la compañía, trabajando en una idea que se le había ocurrido y que resultó ser revolucionaria [7]. Ésta consistía en crear un módulo que, en lugar de tener transistores y componentes soldados entre sí, aprovecharía las propiedades eléctricas del material semiconductor para fabricar, con éste, todo lo necesario en un circuito (no sólo transistores, sino otros componentes como resistencias y capacitores). De esta manera se podía crear un circuito completo de puro material semiconductor. Poco después de finalizadas las vacaciones, Kilby terminó un prototipo que mostraba la factibilidad de utilizar únicamente material semiconductor para la construcción de todos los componentes del circuito. Su prototipo estaba hecho de germanio y utilizaba delgados alambres de oro para conectar los diferentes componentes del circuito.

Simultáneamente, pero de manera independiente, Robert Noyce desarrolló en Fairchild su propia solución al problema de crear un circuito electrónico hecho completamente de material semiconductor. Para ese entonces, en Fairchild se había desarrollado un método para la fabricación de circuitos semiconductores empleando la difusión de impurezas con fotolitografía y Noyce tuvo la idea de aplicar estos métodos para interconectar todos los componentes de un circuito desde el momento mismo de su fabricación.



Figura 5.6: Jack Kilby y su circuito integrado (Chip) en un timbre postal conmemorativo del estado de Texas, EE.UU..

Es curioso que la idea de un circuito integrado haya surgido en dos lugares diferentes y casi al mismo tiempo [13]. Esto, sin embargo, dio origen a una serie de disputas legales acerca de quién era el propietario de la idea. Texas Instruments inició el proceso de patente antes que Fairchild, pero esta última se revisó con menos contratiempos y se otorgó antes. Por ello, generalmente se reconoce la autoría de la invención del circuito integrado tanto a Jack Kilby como a Robert Noyce. Por la relevancia de esta invención, se le otorgó a Jack Kilby el premio Nobel de Física en el año 2000. Para ese entonces, Robert Noyce tenía diez años de haber fallecido y no se le pudo reconocer con el premio Nobel, ya que éstos no se otorgan de manera póstuma. Así, Noyce perdió, por segunda ocasión, la oportunidad de ser reconocido con un premio Nobel.

5.5. SURGIMIENTO Y CAÍDA DE LA TIRANÍA DE LOS NÚMEROS

Aunque novedoso, el concepto de circuito integrado permaneció por algún tiempo como una simple curiosidad. Para mostrar la utilidad del concepto era necesario desarrollar una aplicación en donde se requiriera un gran volumen de componentes en un espacio reducido. Tal descripción se ajustaba a la de los equipos de cómputo

que, hasta entonces, eran caros y voluminosos. A Kilby le fue dada la tarea de diseñar un artefacto de cálculo «tan poderoso como los modelos grandes de escritorio; pero suficientemente pequeño para caber en un bolsillo» [7], tarea que él llevó a cabo con la invención de la calculadora de mano a la que denominaron *CalcTech*.

Vale la pena aclarar que el tipo de circuitos con los que se construyó esta calculadora era de naturaleza diferente a la de los que se requerían para lograr las comunicaciones telefónicas de larga distancia. Como ya se mencionó anteriormente, los circuitos amplificadores utilizados en la red telefónica de aquella época tenían el propósito de generar a su salida una copia de mayor amplitud y sin distorsión (manteniendo exactamente la misma forma) de la señal que se les proporcionara a su entrada. A estos circuitos se les denomina analógicos porque procesan señales que pueden tomar cualquier valor posible en un intervalo dado.

En cambio, el circuito utilizado en una calculadora debía de ser capaz de representar y procesar datos en forma binaria (sólo dos posibles valores). A estos circuitos se les denomina digitales porque procesan señales que sólo pueden tomar un número finito de valores. Por ejemplo, se puede utilizar un transistor como un interruptor, que permita conducir o bloquear el flujo de corriente eléctrica. De esta forma, con un transistor y una variable eléctrica (voltaje o corriente), se pueden representar los valores lógicos 0 y 1. En una segunda etapa, las operaciones lógicas básicas (por ejemplo, la disyunción *OR*, la conjunción *AND*, la disyunción negada *NOR* y la conjunción negada *NAND*) se pueden obtener mediante la apropiada interconexión de transistores. A su vez, una operación más compleja (por ejemplo, un sumador binario) se construye a partir de las funciones lógicas básicas. Posteriormente, varias operaciones lógicas complejas se integran en bloques funcionales y así sucesivamente. En resumen, un sistema digital puede ser complejo, pero siempre está constituido por elementos más simples interconectados entre sí.

Para la década de los sesenta, ya se había identificado la principal limitante para el desarrollo de los sistemas digitales más complejos: la necesidad de interconectar miles o decenas de miles de transistores. Debido a la naturaleza del montaje y conexión de componentes, que se hacía prácticamente sin automatización, los circuitos resultantes eran poco confiables, de difícil mantenimiento y de complejidad casi inmanejable. A esta situación se le llamó la *tiranía de los números*. La invención del circuito integrado pudo resolver este problema, ya que un gran núme-

ro de componentes podían conectarse entre sí, desde su misma fabricación en un solo sustrato de semiconductor, para todo el circuito.



Figura 5.7: Varios fabricantes, como *Canon*, produjeron las primeras calculadoras de bolsillo con base en la tecnología del equipo *CalcTech* de *Texas Instruments*. En todas ellas, el resultado era impreso en una cinta de papel que salía por un costado.

5.6. LAS TIRANÍAS CAEN PERO LAS LEYES DE LA TERMODINÁMICA PERMANECEN

Otro problema importante, para la construcción de un sistema digital con un gran número de componentes, proviene de las diferencias entre un interruptor ideal y uno real. En general, un interruptor puede estar en uno de dos estados (abierto o cerrado) y, como ya se dijo, se puede utilizar un transistor bipolar para ponerlo en práctica en un circuito electrónico. Sin embargo, un interruptor ideal no consume energía en ninguno de los dos estados ni durante las transiciones. En contraste, el transistor bipolar consume una pequeña cantidad de energía en ambos casos y, aun más, en los instantes en los que ocurre un cambio de estado.

El pequeño consumo energético de un solo transistor bipolar es despreciable, igual que el de los circuitos digitales compuestos de unos pocos transistores. Sin embargo, entre 1971 y el 2005, el número de transistores en un solo circuito integrado pasó de alrededor de 1,000 a más de 100,000,000. Esta tendencia, observada por Gordon Moore y conocida como Ley de Moore, predice que el número de transistores en un circuito integrado se duplicará cada 12 o, a más tardar, cada 18 meses. Una consecuencia de esta tendencia es que, aun cuando un solo transistor tenga un pequeño gasto energético, la potencia eléctrica requerida para alimentar un circuito compuesto por 100 millones de transistores puede ser excesivamente grande. Como consecuencia de ello, no serían factibles las computadoras que vemos hoy en día si se utilizaran transistores bipolares en su construcción. Entonces, ¿cómo se lograron integrar en un solo circuito cantidades tan enormes de transistores, sin que se haya incinerado después del primer segundo de su funcionamiento?

En el segundo lustro de los años cincuenta, el transistor bipolar estaba ya firmemente posicionado en el mercado, pero era evidente que el éxito en la fabricación de sistemas digitales más complejos (tales como las computadoras digitales) dependía del desarrollo de un transistor que fuera más eficiente en términos de consumo de energía. Así, diversas compañías dedicaron sus esfuerzos al desarrollo de transistores de efecto de campo (FET, por las siglas en inglés de *Field-Effect Transistor*), tal y como lo imaginaron Lilienfeld y Shockley algunas décadas atrás. La idea principal de este dispositivo es que variaciones en la intensidad de un campo eléctrico controlen la conductividad en un canal por el que se transporta la carga eléctrica. En 1958, Dawon Kahng y M. M. Atalla, también de los Laboratorios Bell, construyeron un dispositivo FET formado por capas de metal, óxido y semiconductor, de donde el transistor resultante tomó su nombre: MOS-FET (por las siglas del inglés *Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor*). Posteriormente, Wanlas y Sah de Fairchild reportaron, en 1963, experimentos con una configuración simétrica de dos transistores MOSFET, dando lugar a la configuración conocida como *complementary-MOS* o CMOS. En el futuro, esta configuración sería extremadamente importante ya que lograría una gran reducción en el consumo de energía eléctrica. Además, los circuitos CMOS pueden fabricarse en un área reducida, con alta confiabilidad y a un menor costo, en comparación a su contraparte bipolar [1].

5.7. INICIA LA ERA DE LA INFORMACIÓN

En 1968, Gordon Moore y Robert Noyce decidieron dejar Fairchild y fundar una nueva compañía a la que denominaron *Intel* [10]. En 1971, Intel anunció la introducción del circuito 4004, que fue el primer microprocesador de propósito general. Este circuito estaba fabricado a partir de 2,300 transistores de tecnología MOS y operaba con datos de 4 bits (dígitos binarios). Posteriormente, esta compañía lanzó al mercado una serie de microprocesadores que, periódicamente, mejoraban las características de sus antecesores. Estos circuitos rápidamente encontraron aplicaciones en la fabricación de diversos y novedosos sistemas digitales. En el segundo lustro de los años setenta, varias empresas lograron un éxito notable en la comercialización de microcomputadoras y computadoras personales construidas a partir de algún microprocesador. En 1981, IBM lanzó al mercado su propia versión de computadora personal que, rápidamente, se convirtió en un éxito comercial.

Con la popularización de la computadora personal, los avances en la electrónica digital integrada se empezaron a dar a una velocidad impresionante. Los microprocesadores se hicieron cada vez más poderosos y rápidos. Por otro lado, la densidad de integración se hizo cada vez más grande, por lo que cada transistor ocupaba cada vez menos espacio. Esto dio lugar a la posibilidad de tener circuitos compactos pero, al mismo tiempo, con una gran capacidad de procesamiento de datos. Todos estos factores permitieron el desarrollo de nuevos productos y servicios que, aunque eran inimaginables sólo unos cuantos años atrás, en la actualidad son indispensables. Esta tendencia continúa hasta nuestros días.

Los últimos cien años de avances en la electrónica permitieron el desarrollo de los dispositivos electrónicos con las capacidades necesarias para hacer posible la popularización de muchos servicios que dan soporte al intercambio y procesamiento de la información. Así, el surgimiento de la era de la información se debe en gran medida a las nuevas posibilidades (en términos de potencia de cómputo, de almacenamiento de datos y de comunicaciones) [3] que ofrecen los cada vez más pequeños, poderosos y baratos dispositivos electrónicos [9]. Esta historia, sin embargo, no se puede desligar de la evolución de los algoritmos necesarios para explotar los avances de la microelectrónica. Éste es el tema del siguiente capítulo.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO 5

- [1] R. G. Arns. The other transistor, early history of the metal-oxidesemiconductor field effect transistor. *Engineering Science and Education Journal*, octubre 1998.
- [2] L. Berlin and C. Casey Jr. Robert Noyce and the tunnel diode, a 50 year old notebook reveals the seed of a great invention. *IEEE Spectrum*, mayo 2005.
- [3] National Science Board. Science and engineering indicators 2002. Technical Report NSB-02-1, National Science Foundation, Arlington, VA, 2002.
- [4] The Nobel Foundation. John Bardeen / Banquet speech. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1972/bardeen-speech.html. Consultado el 9 de enero de 2012.
- [5] The Nobel Foundation. John Bardeen / Nobel lecture. http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1956/bardeen-lecture.html. Consultado el 9 de enero de 2012.
- [6] L. Hoddeson and V. Daitch. *True genius: the life and science of John Bardeen: the only winner of two Nobel Prizes in physics*. Joseph Henry Press, 2002. 114
- [7] Texas Instruments Incorporated. Materials, the chip that jack built. <http://www.ti.com/corp/docs/kilbyctr/jackbuilt.shtml>. Consultado el 25 de enero del 2012.
- [8] J. B. Johnson. Contribution of Thomas A. Edison to thermionics. *American Journal of Physics*, 28(9), diciembre 1960.
- [9] J. T. Last. Two communications revolutions. *Proceedings of the IEEE*, 86(1), enero 1998.
- [10] G. E. Moore. The role of fairchild in silicon technology in the early days of "Silicon Valley". *Proceedings of the IEEE*, 86(1), enero 1998.
- [11] S. K. Moore. Fairchild turns 50. *IEEE Spectrum*, octubre 2007. [12] J. A. Ratcliffe and W. H. Eccles. 1875-1966, biographical memoirs of fellows of the Royal Society, noviembre 1971. vol. 17, pp. 195-214.
- [13] M. Riordan. The silicon dioxide solution, how physicist Jean Hoerni built the bridge from the transistor to the integrated circuit. *IEEE Spectrum*, 44(12), diciembre 2007.
- [14] M. Riordan and L. Hoddeson. *Crystal fire, the invention of the transistor and the birth of the information age*. W. W. Norton & Company Inc, New York, 1997.



Escena 6: Entonces fui con mi amigo, un policía experto en procesamiento de imágenes

Laguna era mi amigo desde que teníamos 15 años. Estudiamos juntos la vocacional. Luego nuestras vidas tomaron caminos diferentes, yo tuve que trabajar muy pronto. En cambio él, que siempre fue el mejor de la clase, se fue a la UAM a estudiar ingeniería electrónica e hizo un posgrado en cosas de procesamiento de señales. Nunca entendí bien que era eso. Nos hablábamos o nos escribíamos de vez en cuando. Por eso supe que estaba en la policía cibernética. Me pareció que un muchacho como él (siempre había sido el más pequeño y frágil de la clase) no encajaba en ese lugar. Ignoro que extraños y torcidos caminos de su brillante cerebro lo llevaron a tomar esa decisión. Ahora, sin embargo, Laguna era para mí la única posibilidad que tenía para resolver el enigma que me estaba agobiando.

Lo invité a la casa y, en cuanto llegó, rápidamente lo puse al tanto de mi situación. Me preguntó por Violeta y, por inercia, contesté que estaba bien, pero interiormente me empecé a preocupar: no sabía mucho de ella desde hacía un par de meses.

Llevé a Laguna al estudio. La chica del sombrero lucía deslumbrante en el cartel que tenía en la pared y fue suficientemente sugerente para atrapar el interés de Laguna. Era realmente encantadora, fue como amor a primera vista. Mi amigo traía consigo una computadora portátil en la que cargamos todos los archivos que había recibido a lo largo de los últimos días. Luego, nos enfocamos en la imagen del disparo. Con toda la agilidad de sus dedos de nerd, mi amigo fue aplicando distintos algoritmos de filtrado al archivo. Entonces,

comenzó a desplegar la imagen con diferentes colores e intensidades de luz y contraste, para lo que aplicó todo un repertorio de herramientas computacionales. La imagen del agresor, sin embargo, se resistía a ser descubierta.



Super Robot
19/05/1012

SANT

Hoy es posible ver en las revistas tecnológicas elaborados prototipos de robots con forma de hombres (androides). Hasta cierto punto, se está haciendo realidad el sueño prefigurado por Isaac Asimov en su novela Yo robot. Esto es posible gracias al desarrollo de la tecnología: algoritmos (software) cada vez más eficientes y una tecnología electrónica (hardware) que constantemente ha venido miniaturizando sus componentes. La miniaturización está apunto de alcanzar el límite físico de los semiconductores y todo indica que la base de la siguiente saga tecnológica ya no serán los materiales semiconductores sino las moléculas orgánicas. Es posible que la Humanidad, en un futuro no muy lejano, migre de la tecnología electrónica a la nano-orgánica.

Capítulo 6

La Transformada Rápida de Fourier: El salto de lo posible a lo realizable

«Genio significa poco más que la facultad de percibir las cosas
de un modo inusual»

W. James

En este capítulo presentamos una breve reseña sobre la genialidad y perseverancia de matemáticos, físicos e ingenieros que, a lo largo de los últimos 300 años, han contribuido para el desarrollo de uno de los algoritmos de procesamiento de señales más importante de nuestro tiempo: el algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier.

Nos remontaremos a la época de la ilustración para conocer el ambiente y los personajes que rodearon a Leonhard Euler, quien descubrió notables relaciones matemáticas que fueron aplicadas en muchos campos del conocimiento, incluyendo la Transformada de Fourier. También, conoceremos la peculiar obsesión de Joseph Fourier que lo llevó, entre otras cosas, a proponer una teoría de propagación del calor y ciertas relaciones que serían identificadas en la transformada que, debido a ello, lleva ahora su nombre. En el camino, pasando por la revolución industrial, nos toparemos con un par de personajes que, adelantándose a su época, bosquejaron lo que serían las máquinas y los algoritmos de programación de propósito general (las actuales computadoras y los programas) que permitirían automatizar sofisticados cálculos: Charles Babbage y Ada condesa de Lovelace. Finalmente, después de brincar al último tercio del siglo XX, conoceremos las circunstancias que llevaron a James Cooley y John Tukey a desarrollar el famoso algoritmo rápido para la Transformada de Fourier.

6.1. LA FFT COMO MOTOR EN EL DESARROLLO DE LAS TIC

Uno de los algoritmos a los que se debe la realización práctica de muchos de los logros tecnológicos actuales es la Transformada Rápida de Fourier (FFT, por las

siglas en inglés de *Fast Fourier Transform*). Gracias a ella fue posible, por primera vez, aplicar en forma práctica conceptos de procesamiento de señales que antes no pasaban del ámbito estrictamente teórico y académico. Podemos decir, sin exagerar, que fue gracias a la posibilidad de calcular la Transformada de Fourier en un tiempo razonablemente corto, mediante el algoritmo FFT, que propios (físicos, matemáticos e ingenieros) y extraños (ciudadanos en general) pudieron ver materializados muchos de sus sueños en materia tecnológica.

Es gracias a la FFT que hoy podemos contar con tecnologías de la información y comunicaciones de alto desempeño, aún en las condiciones más adversas. Más aún, podemos afirmar que tanto la integración de componentes electrónicos con una muy alta densidad (VLSI, por las siglas en inglés de *Very Large Scale Integration*) en pequeños *chips*, como el desarrollo de algoritmos de procesamiento de señales suficientemente rápidos, como lo es el caso de la FFT, son definitivamente los dos más importantes motores en el desarrollo de las actuales tecnologías de la información y las comunicaciones.

6.2. APORTES DE MATEMÁTICOS, FÍSICOS E INGENIEROS

En el desarrollo de la ciencia y la tecnología siempre es conveniente buscar un equilibrio entre lo posible y lo realizable. Sin embargo, es un hecho que en cada disciplina los protagonistas muestran una tendencia hacia cualquiera de estos polos. Muchos de los recientes avances técnicos de la humanidad fueron inicialmente desarrollados a nivel de conceptos matemáticos y sólo después, hasta contar con la tecnología necesaria, fue que pudieron ser puestos en práctica. Un matemático es seducido, a menudo y aunque sea práctico, por la idea de lo posible más que de lo realizable. En contraparte, el ingeniero se ve acotado por lo realizable independientemente de las infinitas posibilidades. Esto se debe a que las matemáticas se construyen y manipulan en la mente de los humanos y, por lo tanto, sus posibilidades no tienen límite. Por su parte, los artefactos y las máquinas se construyen y manipulan físicamente y, por ello, su realización práctica está acotada por limitaciones físicas y técnicas.

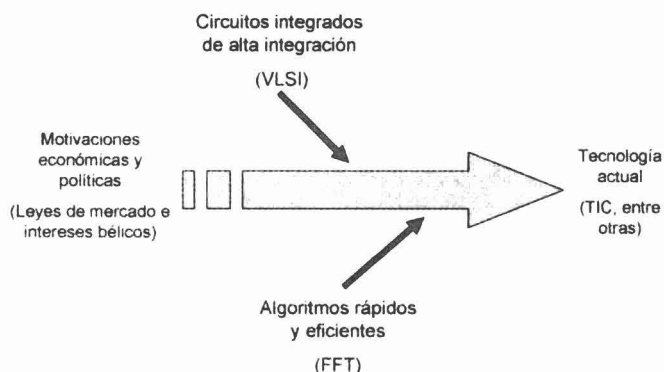


Figura 6.1: Factores para el desarrollo de las nuevas tecnologías.

Estos enfoques han creado un falso juicio de valor respecto de la importancia relativa de algunas disciplinas que, históricamente, se han visto entre sí como competidoras. Por ejemplo, comenta David Wells (*El curioso mundo de las matemáticas* [7]) que en alguna ocasión se hizo patente cierto sentimiento de superioridad de los matemáticos respecto a los físicos y, por supuesto, respecto de los ingenieros. Wells cuenta que un matemático dijo a sus alumnos: «Si entienden un teorema y lo pueden probar, publíquelo en una revista de matemáticas. Si lo entienden pero no lo pueden probar, envíenlo a una revista de física. Si no lo entienden y no lo pueden probar, mándenlo a una revista de ingeniería». Afortunadamente, como contrapeso, Freeman Dyson (1923-), reconocido físico y matemático, no estuvo de acuerdo y escribió con sentido irónico: «Muchos artículos que llegan a la *Physical Review* (Revista de Física) son desechados, no porque no se comprendan, sino justamente por que se entienden. Los que no se entienden terminan por ser publicados».

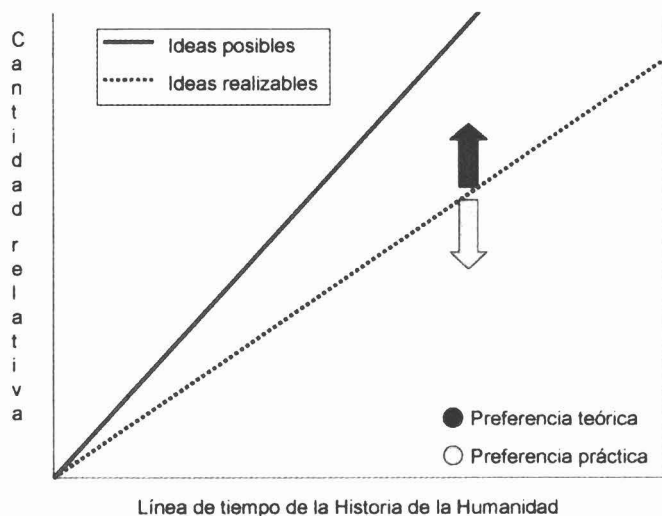


Figura 6.2: Tendencias en el desarrollo de nuevas ideas.

6.3. MECENAS POR CONVENIENCIA

Lo cierto es que si las matemáticas no fueran útiles, y de alguna manera aplicables, no pasarían de ser un mero entretenimiento mental. De ahí, la importancia complementaria de las disciplinas teóricas y las prácticas: un matemático puede llegar a ver la aplicación práctica de un resultado teórico gracias a la perseverancia de los ingenieros para construir cosas útiles. Esta relación, entre lo teórico y lo práctico, les quedó muy clara a los déspotas ilustrados de Europa en el siglo XVIII, el siglo de las luces, quienes, en su afán de arrebatar la hegemonía a Francia, frecuentemente se disputaban a los sabios más brillantes de su tiempo. Especiales casos de estos monarcas ilustrados fueron Catalina II (1729-1796) de Rusia y Federico II (1712-1786) de Prusia, quienes tenían especial interés en los matemáticos brillantes, ya que en ese tiempo las matemáticas aplicadas les permitían resolver problemas prácticos en temas estratégicos de la economía, mecánica, física, náutica, arquitectura y artillería.

Justamente en el siglo de las luces surgieron muchos de los resultados teóricos y prácticos que son los fundamentos de muchas disciplinas de la ciencia y la

tecnología actuales. En particular, las comunicaciones digitales modernas han sido beneficiarias de muchos de los resultados que fueron obtenidos por los matemáticos de esa época y que evolucionaron insospechadamente hasta incorporarse en artefactos e inventos tan útiles como los actuales teléfonos celulares con procesamiento de datos y multimedia.

6.4. LA FÓRMULA MÁS EXTRAORDINARIA DE LAS MATEMÁTICAS

Un caso ejemplar de cómo se ha pasado de lo posible a lo realizable son los aportes de Leonhard Euler (1707-1783), uno de los más importantes y prolíficos matemáticos de todos los tiempos. Precisamente, algunos de sus desarrollos matemáticos tienen una estrecha relación con la cristalización del importante algoritmo de la Transformada Rápida de Fourier y, por ende, con el prodigioso desarrollo de las comunicaciones digitales modernas. Recordemos que las TIC son el resultado directo de dos factores importantes: a) dispositivos de procesamiento de alta integración a un bajo costo y b) algoritmos eficientes, como la FFT, que hacen posible el procesamiento de señales en tiempo real¹. Todo esto, gracias a una formidable suma de esfuerzos, a lo largo de los últimos tres siglos, de matemáticos, físicos e ingenieros.

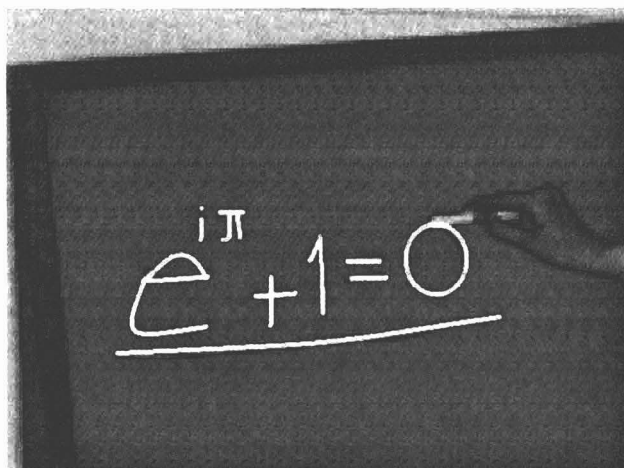


Figura 6.3: La «extraordinaria fórmula» de Euler.

1 El procesamiento en tiempo real es el que tiene una duración tan corta que el humano no lo puede notar.

Entre los resultados de Euler, con insospechadas repercusiones prácticas, se encuentra el que se expresa con una «fabulosa fórmula» [6], cuya elegancia y economía ha causado asombro entre propios y extraños. Por ejemplo, en abril de 1933, poco antes de cumplir 15 años y fascinado por las ciencias, un adolescente de nombre Richard, escribió en su cuaderno de notas lo siguiente «La fórmula más extraordinaria de las matemáticas»

$$e^{i\pi} + 1 = 0$$

En seguida, Richard citó como fuente a *The Science History of the Universe* (La historia científica del universo, en 10 volúmenes) y aclaró que fue obtenida por Leonhard Euler. En las mismas notas, Richard siguió con el desarrollo convencional para obtener una identidad conocida como «identidad de Euler»: $e^{iu} = \cos(u) + i \sin(u)$, de donde la «extraordinaria fórmula» es un caso particular cuando $u = \pi$. Este muchacho, que quedó encantado con el trabajo de Euler, tenía una mente brillante y en el futuro llegaría a ser un reconocido físico y gran matemático: Richard Feynman (1918-1988), premio Nobel de Física (1965).

En efecto, en esta fórmula es sorprendente la relación de las cinco constantes más significativas de las matemáticas:

- 0, el neutro aditivo
- 1, el neutro multiplicativo
- π , la constante circular
- e , la base de los logaritmos naturales
- i , la unidad imaginaria

Esta relación casi mágica es, sin embargo, tan real que Euler, un hombre profundamente creyente, veía en la búsqueda de estas revelaciones matemáticas una labor casi mística. De hecho, Euler hubiera terminado como pastor en su tierra natal Basilea, Suiza, de no ser por la oportuna intervención de su tutor, el gran matemático Johann Bernoulli (1667-1748), quien reconoció el genio matemático de Euler durante su estancia en la universidad de Basilea y recomendó a su padre que le permitiera continuar con sus estudios matemáticos. A pesar de que Euler ingresó a la escuela de teología para convertirse en pastor, el llamado de las matemáticas fue más fuerte y terminó por abandonarla para cumplir su destino como matemático. Euler, después de ingresar a la Universidad de Basilea a los 14 años,

a los 20 había ganado su primer premio internacional en una competencia científica sobre los emplazamientos de mástiles en un buque de guerra, lo que es sorprendente considerando su juventud y el hecho de que en Suiza no hay mar. A partir de ese momento, Euler iniciaría la que es, sin duda, la trayectoria del matemático más prolífico de todos los tiempos, con más de 800 artículos recopilados en una colección de 80 volúmenes conocida como su *Opera Omnia*, que abarca aportaciones a las matemáticas, mecánica, física, astronomía, náutica, arquitectura, artillería, música y filosofía, entre otras. El genio de Euler fue reconocido en vida y su reputación le valió ser invitado de honor en las cortes de Prusia y Rusia, en una época sacudida por las guerras. Su legado es tan importante que Laplace (1749-1827) no dudaba en recordar a sus alumnos: «Lean a Euler, lean a Euler. Él es el maestro de todos nosotros» [4].

6.5. MENOS RUIDO VISUAL

En los tiempos de Euler, los menos entendidos en el arte de las matemáticas, pero no por ello menos amantes de la ciencia y el progreso, no tuvieron más remedio que someterse ante la autoridad del ya, desde entonces, gigante de las matemáticas. Se sabe que el gran enciclopedista francés Diderot (1713-1784), después de pasar varios meses en la corte de San Petesburgo como invitado de la emperatriz ilustrada de Rusia, Catalina la Grande, tuvo que salir repentinamente de San Petesburgo, después de sus constantes alardeos sobre su ateísmo entre los cortesanos. La situación se volvió incómoda para la emperatriz, así que pidió ayuda a su invitado Euler, devoto creyente, para lograr que Diderot hiciera mutis. Euler aprovechó la debilidad de Diderot en las matemáticas y anunció que realizaría una demostración algebraica sobre la existencia de Dios ante la corte. Diderot se vio comprometido a asistir a este evento, que resultó ser una broma. El día anunciado llegó y Euler se inclinó a Diderot con solemnidad: «Señor, $(a + b^n)/n = x$, ergo Dios existe. ¡Respóndame!». Diderot no esperaba ser protagonista de dicha demostración y, ante su desconcierto, fue objeto de la burla cortesana. Diderot pidió permiso a la emperatriz para volver a Francia y ella lo concedió en el acto [7, 5].

La sumisión de Diderot pudo deberse a que tenía gran respeto por los matemáticos y en particular por los matemáticos ciegos como Euler (para ese entonces completamente ciego) o Nicolás Saunderson (1682-1739), lo que queda de manifiesto en su obra *Carta sobre los ciegos para uso de los que ven* [3], donde refiere su versión

sobre los últimos momentos de un Saunderson escéptico y donde sugiere que, en estos casos, menos ruido visual contribuye a una mayor concentración y creatividad. Saunderson quedó ciego cuando tenía un año de edad y, no obstante, llegó a ser sucesor de Newton, como el cuarto profesor de matemáticas, en la silla Lucaciana de Cambridge. Increíblemente, Saunderson realizó también trabajos sobre óptica. Por su parte, Euler había perdido un ojo a los 30 años de edad, estando en la academia de Berlín, y se quedó completamente ciego a los 60 años, poco después de regresar a la academia de San Petesburgo. Sin embargo, esta tragedia no disminuyó su productividad, por el contrario, Euler generó casi la mitad de sus 800 publicaciones en sus últimos 17 años de vida [4].

6.6. MATEMÁTICAS IMAGINARIAS

La genialidad de Euler y su gran visión para solucionar problemas matemáticos, en combinación con una memoria prodigiosa (se dice que era capaz de recitar de memoria la *Eneida* en Latín, de principio a fin) y una fabulosa capacidad de cálculo mental que le permitían realizar intrincadas operaciones aritméticas sin ayuda de papel ni lápiz (podía obtener mentalmente los primeros 100 números primos, sus cuadrados, cubos y hasta potencias sextas), le permitieron encontrar sorprendentes relaciones. Por ejemplo, en 1735, Euler encontró la solución al problema de Basilea, que consiste en una secuencia infinita de la forma

$$1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{9} + \frac{1}{16} + \frac{1}{25} \dots + \frac{1}{k^2}$$

Para sorpresa de todos, Euler encontró que la serie suma $\frac{\pi^2}{6}$ cuando $k \rightarrow \infty$. Es decir, que la suma infinita de los inversos de cuadrados converge a un valor que incluye a la constante circular π o, en palabras de Euler, que «depende de la cuadratura del círculo» [4].

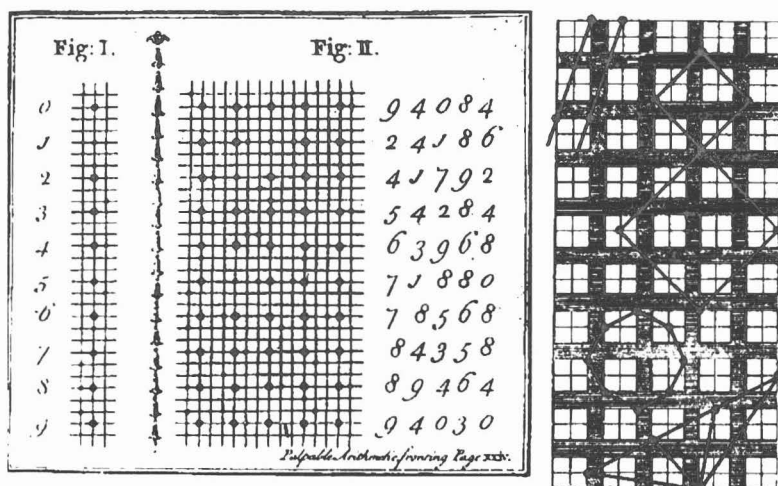


Figura 6.4: Tablero de trabajo del matemático ciego Nicolás Saunderson y su sistema para la representación de los números y algunas figuras geométricas con alfileres para su reconocimiento dactilar.

Éste fue uno de los primeros resultados espectaculares que hicieron famoso a Euler y que abonaron el campo de investigación para que llegara a otros resultados sublimes, como el expresado en la «fórmula más extraordinaria de las matemáticas», donde su imaginación matemática encajó perfectamente con la naturaleza de los números imaginarios involucrados.

6.7. MENTES BRILLANTES Y CONVOLUCIONES CEREBRALES

El notable talento de Euler y sus innumerables aportes matemáticos explican que se le considere dentro de los cuatro gigantes de las matemáticas en los últimos 2,500 años de historia de la humanidad. Los otros tres son Euclides (300 a.C.), Newton (1642-1727) y Gauss (1777-1855). De este último, no se salvó su cerebro de ser diseccionado con el afán de descubrir la causa de su genialidad.

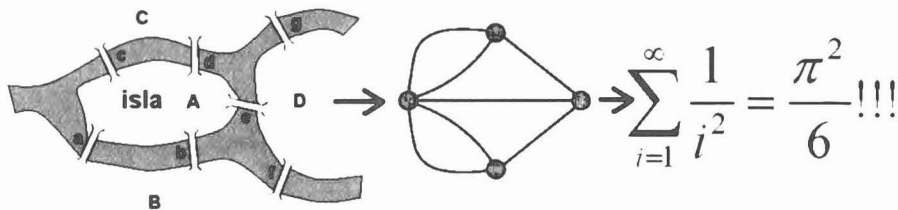


Figura 6.5: La resolución de un problema topológico, conocido como «problema de Basilea», llevó a Euler a la sorprendente relación en donde la suma infinita de los inversos cuadrados de los números naturales converge a un valor que incluye a la constante circular π .

Gauss es famoso por las anécdotas de su infancia como niño prodigio que, en sus propias palabras, «aprendió a calcular antes que a hablar». Es justamente sobre el niño Karl Gauss aquella famosa anécdota de un profesor que, para mantener ocupados a los infantes, los puso a sumar una secuencia del 1 al 100 y donde, inmediatamente, Karl obtuvo el resultado (5050) y lo dejó sobre el escritorio del irritado profesor. Después, el profesor comprobó que el único resultado correcto era el de Gauss, quien lo había obtenido mentalmente, al percatarse de que en la secuencia $1 + 2 + 3 + 4 + \dots + 96 + 97 + 98 + 99 + 100$, se cumple que $1 + 100 = 101$, $2 + 99 = 101$, $3 + 98 = 101$, $4 + 97 = 101$, y así hasta completar 50 parejas, lo que naturalmente arrojaba el total de $50 \times 101 = 5050$. En 1855, no obstante el indudable genio de Gauss, el médico alemán Rudolf Wagner concluyó, después de terminar con la disección de rutina al invaluable cerebro de Gauss en la colección anatómica de Gottingen, que: «Su peso (1,492 kg) no es en absoluto extraordinario, pero en cambio posee más circunvoluciones cerebrales que cualquiera de los que hemos diseccionado hasta ahora. . . » [7].

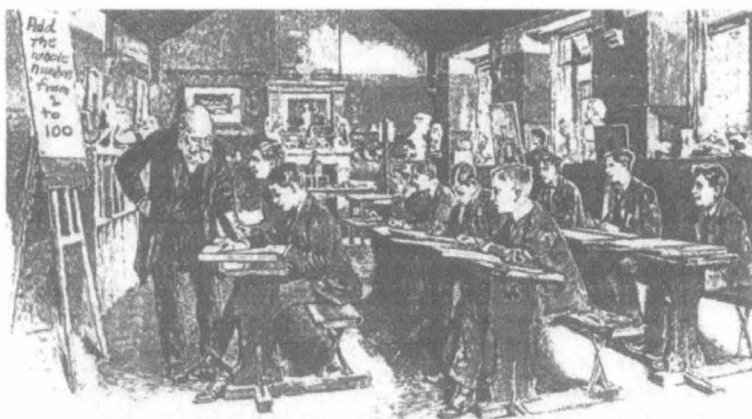


Figura 6.6: El niño Gauss sorprendiendo a su profesor y condiscípulos.

6.8. EFECTOS TÉRMICOS

De Joseph Fourier (1768 - 1830) no se conserva su cerebro pero sí su *Teoría Analítica del Calor* (1822), que es considerada como «un gran poema matemático», donde resuelve la ecuación del calor mediante series trigonométricas convergentes que, gracias a la identidad de Euler $e^{iu} = \cos(u) + i \sin(u)$, se podían expresar en forma compacta y elegante.

Fourier fue un renombrado matemático y físico de la Escuela Politécnica de París que, después de acompañar a Napoleón en su campaña por Egipto (1798-1801), se obsesionó con el estudio de la propagación del calor. Como resultado de sus experiencias en Egipto, fue tal la creencia de Fourier en los efectos saludables del calor que, desde entonces y hasta su muerte, se abrigó de pies a cabeza para mantenerse caliente y vivió en habitaciones con un calor insoportable para comprobar, en carne propia, los beneficios térmicos. Se dice que esto aceleró su muerte por un mal cardíaco y, literalmente, murió cocido a sus 63 años de edad [7]. La Transformada de Fourier, llamada así en su honor, incluye la identidad de Euler de manera implícita:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt$$

En donde se expresa el cálculo de la correlación, en un dominio continuo, entre la función del tiempo $x(t)$ y la función cosenoidal definida por $e^{-j\omega t}$, para una cierta velocidad angular ω (y, por ende, una cierta frecuencia). Esta herramienta de análisis, aunque poderosa, es de uso más teórico que práctico, debido a la imposibilidad de las máquinas computadoras digitales para procesar rangos infinitos y variables continuas ideales. En la práctica, se recurre a la versión discreta de la Transformada de Fourier, que está definida para una secuencia finita de N muestras discretas:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

Sin embargo, la Transformada de Fourier tuvo que esperar a la aparición de las computadoras modernas y al desarrollo de un algoritmo más rápido para que su aplicación pudiera ser considerada en forma práctica.

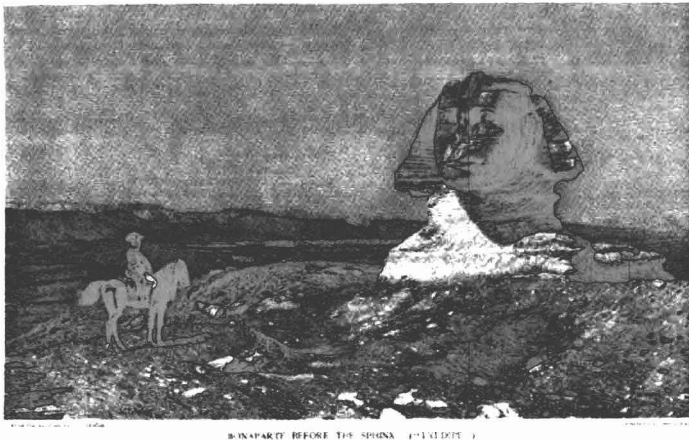


Figura 6.7: Napoleón en su campaña por Egipto. Joseph Fourier, que formó parte de ella, se obsesionó allí con el calor y sus propiedades.

6.9. UN GENIO PRAGMÁTICO Y SU MÁQUINA ANALÍTICA

El inicio de la computación moderna nace en el siglo XIX con los visionarios trabajos de Sir Charles Babbage (1791-1871) que, por ello, ostenta el respetable título de

«Padre de la computación moderna». Babbage, un polémico personaje inglés, como matemático aplicado fue uno de los protagonistas de la revolución industrial que llevaría a Inglaterra a ser la nueva potencia mundial en esa época. Babbage compartía con Fourier su afición por experimentar en persona los efectos del calor: él mismo cuenta, en su autobiografía, como en una ocasión estuvo expuesto a 250 grados Fahrenheit (aproximadamente 130 grados Celsius), durante cinco minutos, sólo para saber lo que se sentía.

De Babbage también se conserva su cerebro que, al igual que el de Gauss, fue sometido a una disección, tras haber sido conservado en alcohol por 37 años. El cerebro de Babbage fue diseccionado por Sir Victor Horsley, de la *Royal Society*, sin que se detectara nada anormal. Finalmente, el cerebro de Babbage pasó a formar parte de la colección del museo Hunterian del Real Colegio de Cirujanos de Inglaterra y se exhibe en el Museo de Ciencias de Londres.

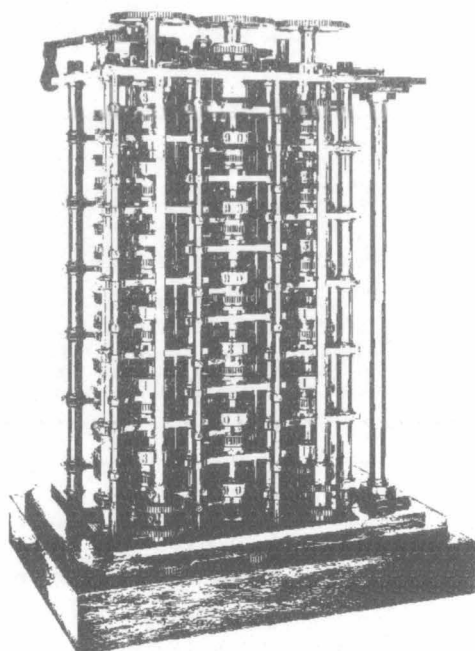


Figura 6.8: La máquina de diferencias de Babbage, antecesora de su «máquina analítica».

No obstante lo antes dicho, no puede haber duda sobre el genio Charles Babbage. después de considerar que sus conceptos sobre la máquina calculadora de propósito general, que él llamó «máquina analítica», se anticiparon por lo menos 70 años a la realización de las primeras computadoras modernas. Visualizó una máquina de cálculo que, además, tomaba decisiones en forma automática con base en los resultados obtenidos. También propuso la «programación» de la misma con tarjetas perforadas, a la manera del telar de Jacquard. La máquina analítica incluiría lo que Babbage denominó:

- Almacén. Con las funciones de almacenamiento de datos que actualmente nominamos *Memoria* de la computadora.
- Molino. Con las funciones de procesamiento de los datos que ahora denominamos *Unidad Aritmético-lógica*.
- Mecanismo para transferir datos entre el almacén y el molino. Que actualmente se conoce como *Unidad de Control*.
- Mecanismo para introducir los datos y recuperar el resultado. Lo que actualmente se conoce como *Unidad de Entrada/Salida*.

Aunque Charles Babbage es conocido por su visionaria máquina analítica, también realizó aportes en otras áreas. Dado su origen acaudalado (su padre fue un exitoso banquero y le dejó como herencia 100,000.00 libras esterlinas), su principal interés se concentró en la aplicación sistemática de la ciencia a la industria y al comercio. De hecho, Charles Babbage es considerado como pionero de la investigación de operaciones: le interesaba de sobremanera optimizar los procesos para maximizar las ganancias. No obstante, también fue un gran inventor. Por mencionar algunos de sus diseños, tenemos una máquina calculadora mecánica conocida como «máquina de diferencias», el velocímetro, el «recoge vacas» de la locomotora, los faros con códigos parpadeantes, un proyecto de submarino, un sistema de aire acondicionado y artefactos para caminar en el agua.

Pero, definitivamente, el invento que lo obsesionó durante la mayor parte de su vida y que, de hecho, consumió una buena parte de su fortuna, fue la máquina analítica, la que por razones misteriosas nunca pudo concluir. La falta de avances concretos le valió que el gobierno inglés le retirara su apoyo económico y que lo abandonara a su suerte con el proyecto, a pesar de que el principal beneficiario iba a ser la Real Armada para el cálculo de tablas de navegación. Su fuerte temperamento

y espíritu perfeccionista, que constantemente le causaban enemistades, probablemente fueron los factores que le impidieron concretar su máquina analítica.

6.10. LADY ADA TEJIENDO ÁLGEBRA

A pesar de que Babbage escribió en su juventud, en conjunto con unos colegas, una traducción al inglés de los tres volúmenes en francés del *Tratado de cálculo diferencial e integral* de Lacroix y su obra autobiográfica *Pasajes de la vida de un filósofo*, en 1864 al final de su vida, nunca publicó nada respecto a su máquina analítica. Lo poco que se sabe de ella es gracias a su ferviente colaboradora Ada Augusta, condesa de Lovelace (1815- 1852), hija del poeta Lord Byron, quien desde muy joven mostró interés por las matemáticas (su madre, Lady Noel, había estudiado álgebra, geometría y astronomía y era llamada por Byron «Princesa de los paralelogramos»). Ada estaba impresionada por las ideas y las máquinas de Babbage (conoció su máquina de diferencias a los 15 años). Aunque murió muy joven (a los 36 años, de cáncer) tuvo vida suficiente para descubrir el potencial y alcances de la máquina analítica de Babbage. Ada escribió un informe con base en un artículo en francés del ingeniero militar italiano L.F. Manebra quien, a su vez, lo había escrito como resultado de algunas pláticas que dio Babbage en Turín en 1840. Ada partió del artículo de Manebra, publicado en Ginebra en 1842, y lo enriqueció con sus propios comentarios a petición del mismo Babbage [1]. Para describir a la máquina analítica, Lady Lovelace recurrió a una original metáfora:

«Podemos decir, muy apropiadamente, que la máquina analítica teje dibujos algebraicos, de igual forma que el telar de Jacquard teje flores y hojas».

En cuanto al alcance de la máquina, escribió algo que aún se cita con frecuencia:

«La máquina analítica no pretende originar nada. Sólo puede hacer lo que nosotros sepamos ordenarle».

En efecto, a Lady Lovelace se le puede atribuir haber escrito el primer programa para una máquina: un «plan» con los pasos para calcular los números de Bernoulli. Así, si la máquina analítica de Babbage se hubiera completado cuando Ada aún vivía, seguramente ella hubiera sido la primera programadora de la computación moderna. Babbage le sobrevivió a Lady Lovelace por cerca de 20 años, pero nunca pudo terminar un prototipo completo de su máquina analítica. Después de la muerte de Babbage (en 1871), fue hasta 1940 cuando una nueva generación

de científicos, como Alan Turing, Vannevar Bush, Howard Aiken y John von Neumann, descubrieron que Babbage se les había adelantado [2].



Figura 6.9: Lady Ada Augusta, condesa de Lovelace, se obsesionó desde muy joven con el estudio de la «máquina analítica» de Babbage y se concibió a si misma como una «analista».

6.11. FFT: COMO TEJER RÁPIDO LA IDENTIDAD DE EULER

Poco antes de 1965, era previsible la intención de aplicar las flamantes computadoras de la época para el cálculo de la Transformada Discreta de Fourier (DFT, por las siglas en inglés de *Discrete Fourier Transform*). Sin embargo, pronto se decepcionaron hasta los más optimistas, tras comprobar que ni las últimas computadoras hacían práctico el cálculo de la DFT, sobre todo cuando las secuencias se

componían de un número grande de datos. Esto se debe a que la DFT necesita realizar un número de operaciones aritméticas que es proporcional al cuadrado del número de datos. Esto también implica que el tiempo de cómputo consumido por la DFT es proporcional al cuadrado del número de datos.

Por definición, se le denomina complejidad computacional al número de pasos que le toma a un algoritmo terminar su trabajo. La complejidad computacional sirve para comparar a los algoritmos en función de los recursos que consumen, particularmente del tiempo. Así, la DFT tiene una complejidad computacional de $N \times N$. Esto quiere decir que si se necesita calcular la DFT para una secuencia de 1,000 datos, se tendrían que realizar 1000×1000 multiplicaciones complejas usando la identidad de Euler. Supongamos que una computadora realiza una multiplicación compleja cada microsegundo (1×10^{-6} s), entonces esa computadora demoraría 1 segundo para una DFT con 1,000 datos, 100 segundos para una DFT con 10,000 datos, casi tres horas para una DFT con 100,000 datos y 11 días y medio para una DFT con 1 millón de datos, que es la cantidad de información en una imagen típica de 1000×1000 *pixeles*.

Afortunadamente, en 1965 apareció el artículo seminal de James Cooley (1926) y John Tukey (1915-2000) donde se presentó un nuevo algoritmo para el cálculo eficiente de la Transformada Discreta de Fourier, al que denominaron Transformada Rápida de Fourier. Con este artículo se inició una nueva era para el procesamiento digital de señales en tiempo real, gracias a que la FFT tiene una complejidad computacional de tan solo $N \times \log_2(N)$. Así, la misma computadora que realiza una multiplicación compleja cada microsegundo, demoraría 0.01 segundo para una FFT con 1,000 datos, 0.1 segundos para una FFT con 10,000 datos, 1.6 segundos para una FFT con 100,000 datos y 19.9 segundos para una FFT con 1 millón de datos.

John Tukey, químico y notable matemático estadounidense, trabajó con von Neumann en los primeros diseños de computadoras modernas. A él se le atribuye la denominación «bit» como contracción de *binary digit* (dígito binario) y la expresión «Software» para referirse a los programas de una computadora. A pesar de que publicó más de 500 artículos, su contribución al algoritmo FFT fue más incidental que premeditada, como se podrá comprobar enseguida.

Alguna vez, en una reunión del comité de asesores científicos del presidente de los EE.UU., el físico estadounidense Richard L. Garwin (1928-), desesperado por

no contar con medios para calcular rápidamente las Transformadas de Fourier necesarias en su investigación con helio, notó que Tukey resolvía, con lápiz y papel, algunas Transformadas de Fourier. En ese momento, Garwin le pidió a Tukey que le explicara su técnica. Garwin tomó nota y fue, tan pronto como pudo, al centro de investigación de cómputo de IBM para obtener una versión programada. La tarea le fue asignada a Cooley, un novato del equipo que era matemático aplicado y programador (trabajó de 1953 a 1956 como programador de una máquina de von Neumann, en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton). Según sus propias palabras, «no tenía nada importante que hacer» y terminó el programa que le encargaron, tan rápido como pudo, para regresar al «verdadero trabajo». Cooley creyó que no volvería a saber del asunto, sin embargo no fue así, pronto tendría noticias. Garwin, quien comprobó el tremendo potencial del algoritmo de Cooley y Tukey, de inmediato le hizo gran publicidad. Cooley y Tukey prepararon un artículo sobre el algoritmo (*An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*), lo sometieron a la revista *Mathematics of Computation* (Matemáticas de la computación) de la Sociedad Matemática Americana y fue publicado en abril de 1965. A partir de ese momento, nada volvería a ser igual en el procesamiento digital de señales.

Cooley, como programador, tuvo que transcribir el método de Tukey a instrucciones para una máquina computadora y su solución es una muestra impecable de ingeniería: elegante, compacta y estética. En el algoritmo de Cooley y Tukey, al seguir el flujo de los datos y representarlo gráficamente, obtenemos a un diagrama con trazos que se entrecruzan y forman mariposas. Entonces, si usáramos una metáfora equivalente a la de Lady Ada, podríamos decir, apropiadamente, que el algoritmo de Cooley y Tukey «teje mariposas algebraicas con la identidad de Euler».

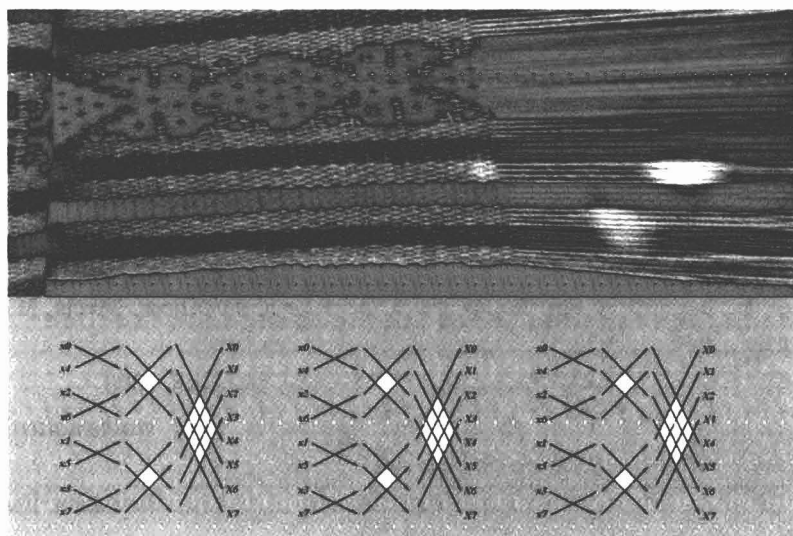
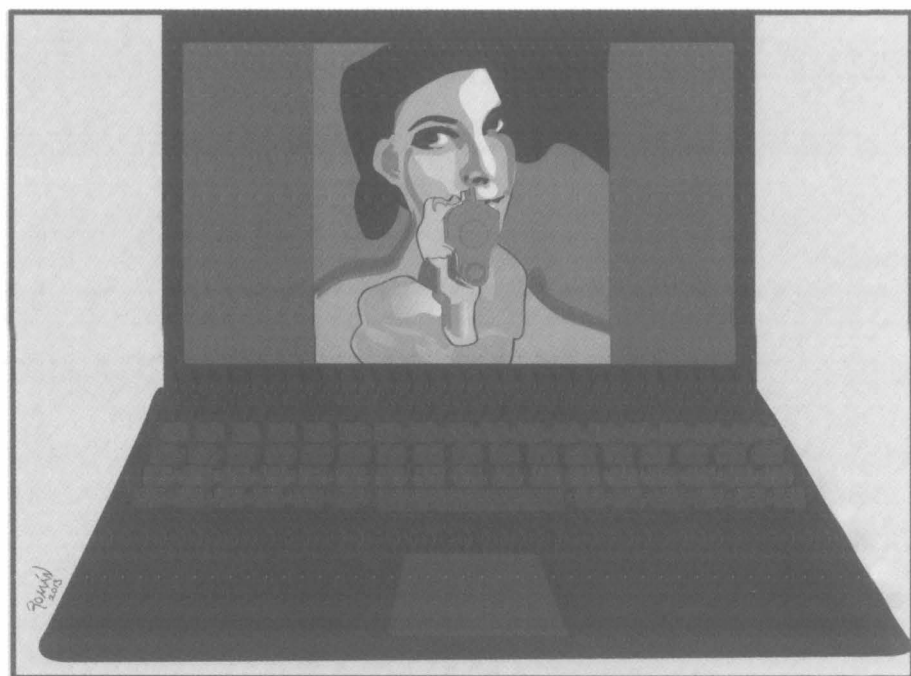


Figura 6.10: Tejiendo mariposas algebraicas con la FFT y la identidad de Euler.

Así, se comprueba que los anhelos del matemático, del físico y del ingeniero están presentes para dar el salto de lo posible a lo realizable, de lo imaginario a lo concreto, tal y como lo demuestra el salto que se dio para pasar de los conceptos de Euler a la realización práctica del algoritmo FFT de Cooley y Tukey. En el siguiente capítulo veremos como matemáticos, físicos e ingenieros, de nueva cuenta, unieron sus esfuerzos para enfrentar a uno de los grandes problemas que surgen durante el proceso de la comunicación y el intercambio de información: el ruido.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO 6

- [1] Jeremy Bernstein. *La máquina analítica: Pasado, presente y futuro de los computadores*. Labor, Barcelona, España, 1984. 137
- [2] Carlos Coello-Coello. *Breve historia de la computación y sus pioneros*. FCE, México, 2003.
- [3] Denis Diderot. *Carta sobre los ciegos, seguido de carta sobre los sordomudos*. PRE-TEXTOS, España, 2002.
- [4] William Dunham. Euler: *El maestro de todos los matemáticos*. Nivola, Madrid, España, 2006.
- [5] Bruno Estañol. *La conjetura de Euler*. Cal y Arena, México, 2006.
- [6] Paul Nahin. Dr. Euler's *fabulous formula: Cures many mathematical ills*. Princeton University Press, USA, 2006.
- [7] David Wells. *El curioso mundo de las matemáticas*. Gedisa, Barcelona, España, 2000.



Escena 7:

La imagen del asesino tenía mucho ruido

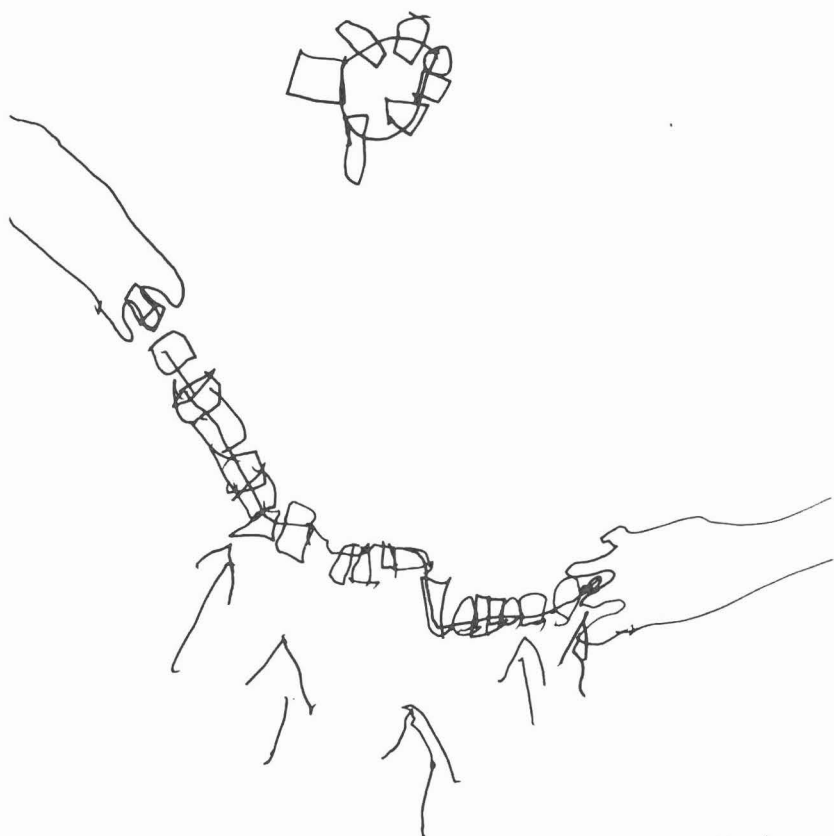
Laguna me explicaba, con la misma vocación de maestro con la que me ayudó en la escuela, cómo la imagen contenía información redundante. La redundancia —decía— es un exceso de información que, en condiciones normales, tú no necesitas. Imagina —continuaba— que has participado en un accidente y estás llamando a tu aseguradora, entonces te piden los datos de tu póliza, pero la comunicación es muy ruidosa y no se entiende lo que estás dictando. Supongamos, por ejemplo, que tus datos son ABC127. Como no logran escucharte bien, entonces indicas cada letra como en las películas: «Alfa, Bravo, Carlos, Uno, Dos, Siete».

Eso es redundancia, pero no es la única forma. Una secuencia de imágenes de la misma escena también transporta mucha información redundante porque entre dos cuadros sucesivos hay muy pocos cambios en la composición de las imágenes. Entonces, podemos usar los cuadros que están antes y después de la escena del disparo para ayudarnos a reconstruir lo que buscamos. Por otro lado, —concluyó— el mismo cuadro que nos interesa tiene información redundante porque el asesino no se percató que estaba junto a una ventana en la que se reflejaban, de manera más iluminada y clara, algunos rasgos de su rostro.

Laguna me dijo que necesitaba correr algunos algoritmos que requerían mucho poder de cómputo y que su máquina no tenía la capacidad para ejecutarlos. Entonces, se conectó a un servidor especial que tenía en su oficina y, de manera remota, empezó a procesar los archivos con las imágenes. Me dijo que no me preocupara por la confidencialidad de la información que

íbamos a transportar sobre la red porque iba a usar un canal «encriptado» (?). A los pocos minutos, el servidor comenzó a devolvernos, línea por línea, el rostro «píxeleado» que buscábamos. Yo conocía bien ese juego. El asesino parecía ser una mujer y su cabello, acomodado atrás de la nuca a la manera de un moño sostenido con un palito, me recordaba a Violeta pero eso era imposible.

Luego de que tuvimos la imagen completa, Laguna entró a otra base de datos y ejecutó un software de identificación de rostros. Con cierto grado de tolerancia, coincidía con la descripción hablada de la penúltima amante del fotógrafo, la que estaba desaparecida y de la que, increíblemente, el fotógrafo no tenía ni una sola fotografía. Muy extraño —comentó Laguna para sí—. Había algo en todo esto que no terminaba de convencer al «ciberpoli». Me dijo que iba a reconstruir nuevamente el rostro, pero usando esta vez los rasgos que se reflejaban en la ventana. Esperamos otra vez un par de minutos en silencio, entonces el servidor nos devolvió una nueva imagen que nos dejó desconcertados. Desde esa otra perspectiva, el rostro de la asesina se parecía más bien al de la supuesta víctima (!). Se me crispó el cuerpo y pensé en Violeta, me propuse buscarla en persona de inmediato.



SANTI

Dentro de la Teoría de la Información, la medida relevante es el flujo promedio de bits por segundo. A primera vista, es desconcertante que en este contexto se haya propuesto el concepto de entropía como analogía para la información, sobre todo considerando que en la física la entropía denota una propensión al desorden. No obstante, esta analogía toma sentido cuando dicha «propensión al desorden» promueve el cambio y, por ende, la novedad.

Capítulo 7

La Teoría de la Información y la lucha contra el ruido y los errores

«La información es entropía»

Norbert Wiener

Dentro de la gran cantidad de personajes, que han contribuido con su trabajo de manera fundamental al desarrollo de las comunicaciones digitales, se encuentran tres de gran relevancia: Norbert Wiener (1894-1964), Claude Shannon (1916-2001) y Richard Hamming (1915-1998). Estos personajes sentaron, con sus importantes trabajos, las bases de la actual Teoría de la Información. Todos ellos enfrentaron, desde ópticas complementarias, el reto de minimizar los efectos del ruido en todo proceso de comunicación. Los aportes de estos hombres han posibilitado la realización de las actuales tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), lo que en su época no pasó de ser únicamente un sueño o conjeturas futuristas.

7.1. LA NATURALEZA DEL RUIDO

El ruido está presente en todo proceso de nuestra vida cotidiana y hemos aprendido a lidiar con éste, de una u otra forma. Cuando hablamos de comunicaciones, ya sea de viva voz o mediante equipos electrónicos, sabemos que si el nivel del ruido es alto en el ambiente o medio de comunicación, es decir, que la potencia del ruido tiene un valor alto comparado con la potencia de la señal de interés, simplemente la comunicación se ve afectada y probablemente no se cumpla con el objetivo de comunicar exitosamente un cierto mensaje.

Así, se considera ruido a cualquier señal no deseada, es decir sin interés, que se introduce en el canal de comunicación y afecta, en alguna medida, la calidad de la comunicación total. Esto hace necesario medir los niveles de potencia de la señal

útil y del ruido. En ocasiones, es suficiente un simple incremento en la potencia de la señal útil para superar con holgura a la potencia del ruido y lograr una comunicación exitosa. Sin embargo, no siempre es posible aumentar la potencia de la señal útil, debido a las restricciones del sistema.

En las comunicaciones digitales también se emplea la relación de la energía que tiene cada símbolo que comunicamos (que puede representar uno o más dígitos binarios) entre la densidad de energía del ruido¹, para saber cuánto ruido se encuentra presente en la señal útil. Si hubiera mucho ruido, lo más fácil sería aumentar la energía de cada símbolo del mensaje a transmitir pero, como ya comentamos, esto no es siempre posible.

En general, la relación de la potencia (energía por unidad de tiempo) promedio de la señal deseada entre la potencia promedio de ruido es una medida que nos ayuda a pronosticar el desempeño de un sistema de comunicación, es decir, nos indica qué tan efectiva puede ser una comunicación. En una comunicación digital, la potencia promedio de la señal útil se puede repartir en cierta energía para cada dígito binario, así que una medida más apropiada, para pronosticar la calidad que se tendrá en una comunicación digital, es la energía por dígito binario entre la densidad de energía del ruido.

Para poder determinar la energía que le corresponde a cada dígito binario transmitido, partimos de la potencia promedio de la señal (que representa a todos los símbolos y, por lo mismo, a todos los dígitos de la secuencia binaria) y la velocidad a la que viajan los dígitos binarios en el medio de comunicación. Por ejemplo, todos los que han utilizado alguna vez la red Internet, probablemente se han preguntado o han escuchado sobre qué tan rápida es la conexión. Generalmente, es el proveedor del servicio, es decir la compañía que proporciona el «punto de acceso» o «radio base», quien proporciona la velocidad de conexión. Esta velocidad es un valor que representa a los «bits» por segundo (dígitos binarios por segundo) que viajan por el enlace de datos. Así, es común escuchar que se tiene una conexión de, digamos, dos mega bits por segundo, que se escribe 2Mbps o más correctamente 2Mb/s, donde el prefijo «mega» se abrevia con la letra M y significa 'un millón', es decir que pueden transitar hasta 2 millones de bits por segundo, mientras permanecemos

1 Esta densidad se obtiene dividiendo la potencia promedio del ruido entre el ancho de banda disponible, así que sus unidades son Watt/Hertzio.

conectados intercambiando mensajes en formato digital (secuencias binarias). Bien, ¿qué tiene que ver todo esto con el ruido?

Cuando aumentamos la velocidad, el número de bits en un intervalo de tiempo aumenta, pero si la potencia promedio de la señal transmitida se mantiene constante, esto se traduce en una menor porción de energía para cada dígito de la secuencia binaria. Como la potencia promedio del ruido, en principio, también se mantiene constante, resulta que a cada dígito binario le corresponde la misma densidad energética de ruido. Al aumentar la velocidad, la señal útil tiene que enfrentar al ruido con un menor nivel de energía. Por lo antes mencionado, cuando la velocidad de los símbolos transmitidos aumenta, entonces también se incrementa la probabilidad de que las señales de los símbolos sean distorsionadas por el ruido promedio, lo que complica su identificación.

Una señal en mal estado puede propiciar que su identificación sea incorrecta en el receptor. Por ejemplo, se puede transmitir un «uno» y, debido al ruido, recibir algo que parece un «cero». Cuando se identifica incorrectamente una señal, se dice que ocurre un error de comunicación. En resumen, cuando la velocidad de los bits transmitidos aumenta, entonces también aumenta la probabilidad de que ocurran errores de comunicación.

El efecto, de mantener constante la potencia promedio del ruido (y, por lo tanto, la densidad de energía del ruido) y aumentar la velocidad de los símbolos, lo podemos visualizar mejor con una analogía (ver figura 7.1). Imaginemos al medio de comunicación como un canal de agua. Podemos pensar en los símbolos como barquitos de papel que transitan por el canal y al ruido como las gotas del agua vertida por un mecanismo de irrigación montado a todo lo largo del canal. El agua de irrigación va deformando a los barquitos, e incluso los puede hundir, en la medida que los va mojando en el trayecto. La potencia promedio del ruido obtenida a lo largo del tiempo equivaldría, en nuestra analogía, a la cantidad de agua de riego recolectada por metro lineal de canal. La cantidad de agua recolectada por metro se mantiene constante e independiente del tamaño de los barquitos.

En esta analogía, la longitud del canal representa al tiempo. Entonces, la longitud de cada barquito determina la cantidad de ellos que se pueden alinear, uno tras otro, por metro lineal de canal (símbolos por segundo). Si queremos aumentar la cantidad de barquitos que podemos alinear por cada metro del canal,

debemos disminuir la longitud de cada uno de ellos, pero también disminuye la cantidad de papel con la que están contruidos (disminuye la energía de cada símbolo) y se vuelven más vulnerables a las gotas de agua (ruido).

Sin embargo, además de su largo, el canal también tiene un ancho (ver figura 7.2). Esto permite intuir que el agua recolectada por metro lineal a lo largo del canal, en realidad cae repartida a todo su ancho. Esto puede representar una ventaja para reducir el efecto de las gotas de agua sobre los barquitos: si la densidad de agua de riego (la densidad de energía del ruido) se mantiene constante, el agua afectará menos a los barcos en un canal ancho que en uno angosto. En los canales de comunicación electrónica, el medio de comunicación tiene su longitud, que es el eje del tiempo, pero también tiene su ancho en el eje de la frecuencia².

Con una intuición similar a la que proporciona nuestra analogía de los barquitos de papel, Claude Shannon determinó que, al tomar en cuenta los efectos del ruido, todo canal de comunicación tiene una capacidad de transmisión máxima, tolerando cierto nivel mínimo los errores (la máxima cantidad de barcos que logran llegar a su destino en un estado aceptable) que está en función de la velocidad de transmisión (la longitud de los barquitos), del ancho de banda (el ancho del canal) y de la densidad energética del ruido (la densidad con la que se riega el agua).

7.2. LA PROBABILIDAD DE ERROR COMO MEDIDA DE DESEMPEÑO

Ciertos modelos probabilísticos, en conjunto con la relación que existe entre el nivel de la señal útil y el del ruido, permiten predecir la cantidad de símbolos erróneos que se espera recibir en una comunicación de datos. Los errores ocurren porque cada símbolo se transmite con una señal que tiene una forma o un nivel de voltaje específico (por ejemplo, un voltaje para «uno» y otro voltaje para «cero»), pero se reciben formas o niveles de voltaje alterados debido al ruido recibido.

2 Técnicamente se conoce como ancho de banda, que no es más que el espacio de frecuencias en donde se transmite la señal.

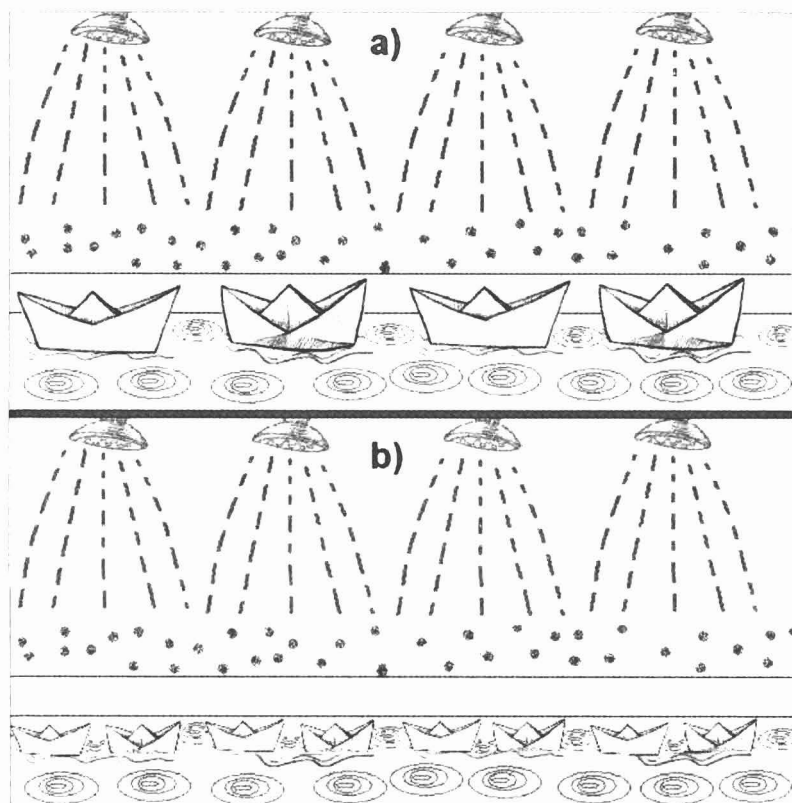


Figura 7.1: Analogía para un canal de comunicación digital. Los barquitos de papel representan a los bits, su tamaño es su energía y las gotas del agua de riego son el ruido. Supondremos que se mantiene constante la densidad de riego, es decir que se mantiene la potencia del ruido constante. a) Dada una cantidad de bits por segundo, le corresponde cierta energía a cada bit. b) Si aumentamos la cantidad de bits por segundo, manteniendo constante la energía de la señal útil, a los bits resultantes les corresponde menos energía aunque enfrentan el mismo nivel de ruido, lo que los vuelve más vulnerables.

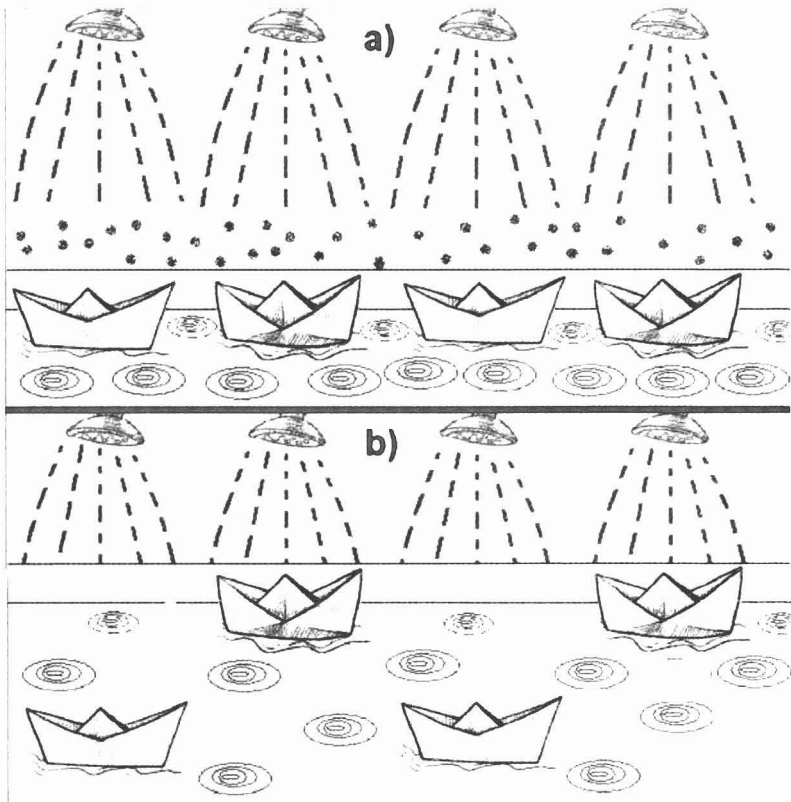


Figura 7.2: De nuevo, suponemos que se mantiene constante la densidad de riego, es decir que se mantiene la potencia del ruido constante, pero ahora consideramos dos canales de diferente caudal representando a dos anchos de banda: uno angosto y otro amplio. Dada una cantidad de bits por segundo: a) En un canal angosto se concentra más el ruido y afecta más a los bits. b) En un canal amplio se dispersa el efecto del ruido y se afecta menos a los bits.

Para ejemplificar, tomemos el caso donde se requiere mandar en forma electrónica un archivo que contiene la información de una imagen digitalizada. La imagen está representada por cierta cantidad de dígitos binarios, los que a su vez serán transmitidos como señales por el medio de comunicación (ya sea cableado o inalámbrico). Ahora, supongamos que hay ruido en el canal de comunicación. Entonces, como lo hemos comentado, ese ruido puede disminuir el número de símbolos que llegan correctamente y, por lo tanto, la imagen podría llegar alterada o, peor aún, puede suceder que ni siquiera se pueda abrir el archivo que la contiene. Entonces, el conocimiento del nivel de la señal útil respecto del ruido, así como del número probable de símbolos erróneos recibidos en esas condiciones, es lo que le permite a un ingeniero hacer los cálculos y los ajustes necesarios al sistema para minimizar los efectos del ruido y lograr una transmisión más efectiva.

En ocasiones, el ruido que afecta a la señal que transporta la secuencia binaria es tan intenso (ya sea por la interferencia de otras señales, de igual o mayor potencia, o porque la potencia de la señal útil es baja respecto de la potencia del ruido), que no basta, o no es posible, aumentar la potencia de la señal útil. En este caso se requiere de algunas técnicas de procesamiento que agregan símbolos extras a la secuencia binaria original para ayudar en su recuperación. Generalmente, a esto se le conoce como redundancia.

7.3. LA SOLUCIÓN A LOS ERRORES ESTÁ EN LA REDUNDANCIA

En los sistemas tolerantes a fallas, ya sean aquellos desarrollados por el hombre o bien los que podemos encontrar en la naturaleza, se recurre a la redundancia para garantizar la continuidad de las operaciones que son críticas. La redundancia tiene diferentes expresiones. Primero, tenemos la redundancia de componentes físicos, que no es otra cosa que el uso de partes o componentes de respaldo, los que entran en operación para sustituir o complementar a los componentes que fallan. Por ejemplo, en los satélites de comunicaciones todos los subsistemas críticos están duplicados. En el cuerpo humano, los riñones, los pulmones, las manos, etc. vienen por duplicado.

Por otro lado, tenemos la redundancia de tiempo, en la que un subsistema repite la misma operación tantas veces como se considere necesario hasta garantizar que la concluye correctamente. Por ejemplo, cuando repetimos una operación aritmética, con lápiz y papel, hasta convencernos que el resultado es el correcto. Es

también el caso de la retransmisión de datos, cuando la secuencia binaria se envía repetidamente hasta confirmar su recepción.

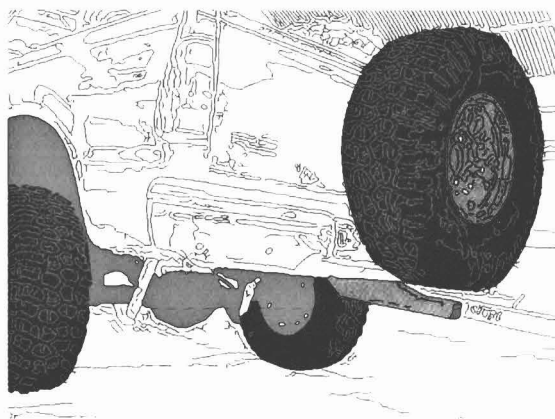


Figura 7.3: La llanta de refacción de un vehículo es un aditamento estorboso, que disminuye el espacio disponible para transportar carga útil, pero que es necesario si se quiere superar exitosamente un posible, aunque no seguro, evento de pinchadura. Y, sin embargo, este mecanismo de redundancia no es útil si se pincha más de una llanta.

Por último, tenemos la redundancia de información, que se da cuando se transmite un exceso de símbolos para aumentar la probabilidad de recuperación de la secuencia original, luego de viajar por un medio que le agrega ruido y otros efectos indeseables. En suma, podemos decir que, en cualquiera de sus formas, la redundancia es como un seguro para automóvil que, en el mejor de los casos, no se requiere pero que, dada la circunstancia, nos «saca del problema» y agradecemos haber pagado el precio de tal previsión.

La redundancia de información puede verse como una metáfora informática de la figura gramatical conocida como *pleonismo*. Solo que en nuestro caso el exceso y la redundancia no es mal vista. Entonces, se trata de presentar la información en forma reiterativa con el objeto de que una secuencia binaria transmitida sea recibida e identificada con éxito en el lado receptor, incluso en circunstancias adversas. En particular, en las comunicaciones digitales, la redundancia de información consiste en la transmisión de dígitos extras que acompañan a la secuencia binaria original para aumentar la probabilidad de su correcta recuperación.

7.4. CLAUDE SHANNON Y SU TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN

El trabajo de Claude Shannon es uno de los que mayor impacto han tenido en la configuración de las tecnologías de la información y las comunicaciones actuales. Sus conceptos sobre «capacidad» del canal o medio de comunicación y de «agitación» o entropía del sistema de comunicación tienen hoy, como nunca, una gran vigencia en el desarrollo de las nuevas TIC. Esta vigencia se debe a que el sector de la sociedad que investiga y desarrolla las TIC se encuentra sometido a fuertes presiones, tanto económicas (las fuerzas del mercado) como de la propia dinámica científica y tecnológica (los incentivos a científicos y tecnólogos), para maximizar el uso de los canales de comunicación disponibles.

Los conceptos de Shannon sobre la capacidad del canal (expresado en bits por segundo) y de entropía (como medida promedio de la información que transporta una secuencia binaria, expresada en bits) han sido motivo de estudio, análisis y discusión científica, ya que dichos conceptos se expresan de manera elegante y compacta en su trabajo *Una teoría matemática de la comunicación*, publicado en 1948 [6]. La economía y, no obstante, la profundidad de las expresiones matemáticas para estos conceptos han dejado perplejos a propios y extraños por más de 50 años.

Por demás interesante, es el fenómeno de influencia de la Teoría de la Comunicación de Shannon en los más diversos campos del conocimiento. La Teoría de la Comunicación de Shannon ha tenido un alcance sólo comparable con la Teoría de Evolución de Darwin. La aceptación y fortalecimiento de la teoría evolutiva de Darwin, a lo largo del tiempo, ha propiciado el uso y abuso de la misma para explicar todo proceso de cambio en términos evolucionistas y de selección natural. De manera similar, la Teoría de la Comunicación de Shannon hoy es motivo de inspiración y aplicación en los más diversos campos del conocimiento donde aparecen procesos con las características de un proceso de comunicación. Así, la Teoría de la Comunicación de Shannon ha sido referida para explicar desde procesos de transmisión de información genética de una generación a la siguiente, en el ámbito de la biología, hasta la administración de portafolios de inversión, en el campo de la ingeniería financiera, pasando por toda una gama de interpretaciones y aplicaciones que de ella hacen matemáticos, físicos, ingenieros e, incluso, filósofos.

Claude Shannon (1916-2001), fue pariente lejano del legendario Thomas Alva Edison pero, al parecer, también heredó el espíritu de inventor de uno de sus abue-

los más cercanos, además de poseer una facilidad innata para las matemáticas. Se graduó de la Universidad de Michigan, como matemático e ingeniero eléctrico, en 1936. En seguida, ingresó al Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) donde, tras una estancia en los Laboratorios Bell (*Bell Telephone Laboratories*) en 1938, escribió una de las más reconocidas tesis de maestría con el título *Un análisis simbólico de los circuitos relevadores y de conmutación*, donde Shannon incorporó el álgebra de Boole (álgebra de variables binarias) al análisis de los circuitos con interruptores. Así, Shannon creó una rama de la ingeniería que en la actualidad se conoce como diseño lógico.

Luego, en 1940, Shannon obtuvo el grado de doctor en el MIT con la tesis *Un álgebra para la genética teórica*. Este trabajo pasó desapercibido y fue ignorado por la comunidad de genetistas de aquella época. Paradójicamente, fue hasta 40 años después que la misma comunidad de genetistas volvió la atención, por iniciativa propia, al trabajo de Shannon y su posible aplicación a los problemas del área. Por ejemplo, se considera que la reproducción de las especies es, de alguna manera, un proceso donde se transmiten ciertos ‘mensajes’ que contienen las instrucciones para la producción de las proteínas. Algunas veces, estos mensajes pueden tener errores. Si el receptor puede detectarlos, entonces puede tomarse una acción correctiva, en otros casos sobrevienen inevitables mutaciones.

Durante la Segunda Guerra Mundial, y hasta 1956, Shannon trabajó en los Laboratorios Bell en proyectos militares y de criptografía. Algunos de los trabajos realizados por Shannon en la época de guerra fueron clasificados como secretos, pero después fueron desclasificados y liberados para su publicación. Estos trabajos son ahora clásicos de la criptografía e incluyen títulos como *Teoría de la comunicación de sistemas secretos* y *Una teoría matemática de la criptografía*, ambos publicados en 1949.

Sin embargo, los trabajos por los que más se le reconoce a Shannon son *Una teoría matemática de la comunicación*, publicado en 1948, y los aportes al área que hoy se conoce como Teoría de la Información. Shannon reconoció que su trabajo había sido inspirado por los trabajos previos de algunos colegas de los Laboratorios Bell, en particular de Harry Nyquist (autor del «Teorema del muestreo») y Ralph Hartley (que propuso una medida logarítmica de la información). A partir de su artículo de 1948, también se derivan importantes implicaciones para la «corrección

de errores», como consecuencia de la demostración de la máxima velocidad teórica a la que se puede transmitir una secuencia binaria manteniendo una probabilidad de error a un nivel arbitrariamente bajo.

En 1958, Shannon dejó los Laboratorios Bell, para desempeñarse en la academia dentro del MIT, hasta su retiro en 1978. Pese a su gran legado a las ciencias y tecnologías de la información, Shannon nunca obtuvo ningún premio Nobel, debido a que su trabajo no se podía clasificar en ninguna de las áreas candidatas a dicho premio. No obstante, Shannon recibió importantes premios, en reconocimiento a sus aportes. En 1993, la prestigiada organización de ingenieros IEEE³ publicó una recopilación con los trabajos de Shannon [7], que incluye 127 publicaciones cuyas que datan de 1938 a 1982. Por su parte, la Sociedad de Teoría de la Información de la IEEE instauró, como el máximo reconocimiento a los aportes sobresalientes dentro del área, el premio Shannon (*Shannon Award*).

Shannon fue un personaje reservado aunque algo extrovertido. Sus colegas de los Laboratorios Bell recordaban haberlo visto transitar por los pasillos montado en un monociclo, haciendo malabares con tres balones: era un hábil moniciclista. Pero sus intereses también incluían cuestiones más prácticas, también fue un gran inventor. Diseñó máquinas para buscar la salida de laberintos (con ratones mecánicos), autómatas malabaristas, una máquina para jugar ajedrez (años antes de que apareciera el primer programa de ajedrez para computadoras personales) y un dispositivo para resolver el rompecabezas tridimensional conocido como Cubo de Rubik [8].

³ Por las siglas en inglés de Institute of Electrical and Electronics Engineers, en español Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.

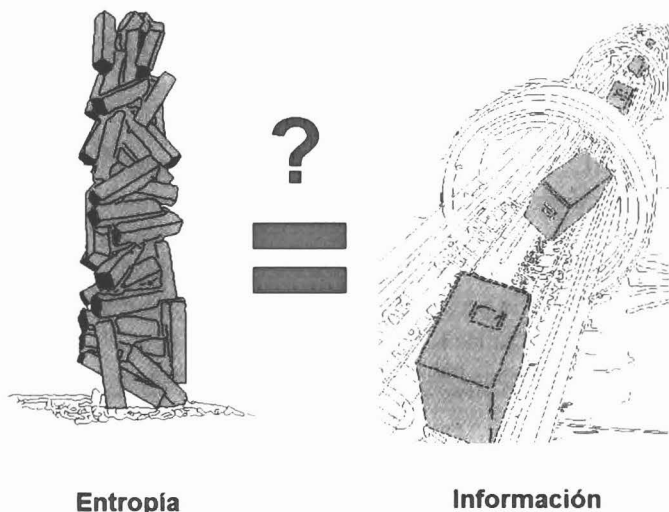


Figura 7.4: El aspecto positivo de la entropía o incertidumbre es la aportación de novedad al sistema. Ello explica la sorprendente afirmación de Wiener «La información es entropía».

Shannon también fue un personaje controversial. Incorporó en su trabajo el concepto de entropía, como medida de la información de una secuencia binaria, tomando prestado el concepto de la Teoría Termodinámica y enfocándose en el aspecto positivo de la incertidumbre: la aportación de novedad al sistema con el surgimiento de eventos inesperados. Sin embargo, cuando en alguna ocasión se le preguntó a Shannon por qué había decidido llamar a su media de información como «entropía», sólo atinó a responder: «No estoy seguro de donde tomé la idea. Creo que alguien debió decírmela». Shannon únicamente usó la palabra «entropía» en su artículo de 1945, pero usó indistintamente las palabras «incertidumbre» y «entropía» en artículos posteriores.

En 1948, Norbert Wiener, el padre de la cibernética, publicó su importante libro *Cibernética: o el control y la comunicación en el animal y la máquina*, en donde empleaba prácticamente la misma fórmula de Shannon como medida de la información y el vínculo con el concepto de entropía de la termodinámica. Se sabe que a Norbert Wiener le gustaba sorprender a sus colegas con los nuevos conceptos que venía desarrollando y que en una ocasión, poco después de terminada la gue-

rra, entró a la oficina de su colega Robert Fano para declarar, sin más preámbulo: «La información es entropía» [3].

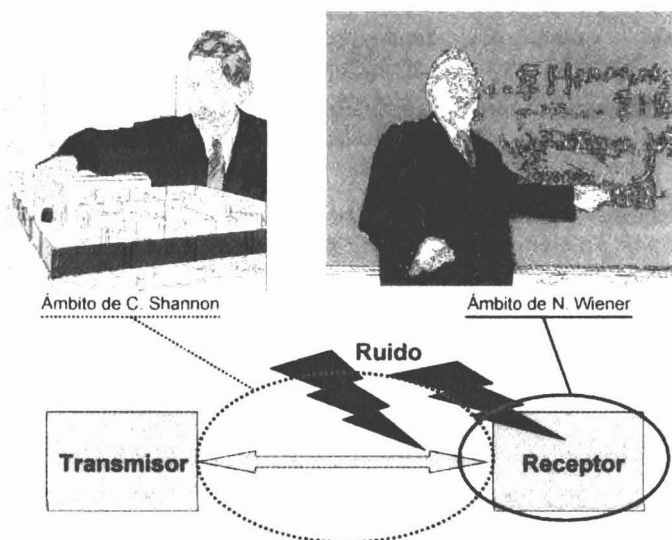


Figura 7.5: C. Shannon y N. Wiener realizaron investigaciones paralelas en su lucha contra el ruido pero, aunque compartieron conceptos comunes, sus enfoques para atacar el problema fueron diferentes.

Aunque Shannon tomó un curso con Wiener en el MIT, nunca tuvieron una colaboración o relación personal cercana. No obstante, Shannon había leído el trabajo de Wiener y, dadas las grandes similitudes entre sus investigaciones paralelas, le escribió solicitándole sus críticas y recomendaciones para su artículo de 1948 (*Una teoría matemática de la comunicación*). La respuesta de Wiener manifestaba agradecimiento por el interés y un reconocimiento al trabajo de su alumno en el área, pero sobre el artículo hizo mutis: ni una palabra.

Aún se suscitan grandes debates para delimitar cuál es el aporte de Wiener y cuál el de Shannon, en vista de las similitudes de sus trabajos, en especial en lo referente a información y entropía. No obstante, nunca colaboraron en trabajo alguno. Lo cierto es que Wiener se enfocó en enfrentar al ruido en las señales después de ser recibidas, mientras que Shannon se concentró en enfrentar al ruido durante la transmisión de las mismas.

7.5. ALGUNOS CONCEPTOS DE LA TEORÍA DE LA COMUNICACIÓN DE SHANNON

Ya comentamos que Claude Shannon presentó en 1948 su trabajo *Una Teoría Matemática de la Comunicación* donde formalizó conceptos como la capacidad de un canal de comunicación y sentó las bases para la corrección de errores mediante esquemas redundantes. Ahora trataremos de explicar, de la manera más simple posible, algunos de los conceptos más importantes de la Teoría de la Comunicación de Shannon que forman parte de la actual Teoría de la Información: la entropía y la capacidad del canal. Antes de proseguir, es importante comentar que, en su artículo original de 1948, Shannon afirmó que en el proceso de comunicación, visto como un problema de ingeniería, «no es relevante el contenido semántico sino únicamente la identificación de los mensajes realmente transmitidos, considerando que sólo existe un conjunto finito de ellos». Shannon, tal vez por el alcance técnico de su teoría, consideró apropiado usar la palabra ‘mensaje’ (*message*), que puede tener un sentido muy amplio, en vez de una palabra más específica para referirse al ‘símbolo’, verdadero elemento constructivo de los mensajes o secuencias de símbolos.

Para comprender mejor lo que Shannon entendía por ‘mensaje’, imaginemos un puerto marítimo, donde existe una persona encargada de advertir a los barcos sobre las condiciones locales para la navegación. Se trata de dar un aviso en forma visual para que pueda reconocerse a distancia, digamos desde un par de kilómetros a la redonda. El encargado decide usar dos banderas de colores (señales) para representar hasta cuatro combinaciones distintas: verde-verde quiere decir ‘buenas condiciones’, verde-rojo será ‘se acerca un temporal’, rojo-verde será ‘no se recomienda la navegación’ y finalmente, rojo-rojo significa ‘puerto cerrado’. Para Shannon, las cuatro combinaciones de banderas serían referidas como mensajes, aunque actualmente se les denominaría como símbolos.

Nosotros aquí hemos decidido emplear el concepto de ‘símbolo’ en lugar del de ‘mensaje’, en vista de que es más adecuado y no genera confusión en el contexto actual. En nuestros días, el concepto de ‘mensaje’ se usa más para referirse los contenidos con significado, mientras que el concepto de ‘símbolo’ se emplea para referirse a los elementos constructivos de un mensaje. Así, podemos poner al día el planteamiento original de Shannon y reescribirlo como «no es relevante el contenido semántico sino únicamente la identificación de los símbolos realmente transmitidos, considerando que sólo existe un conjunto finito de ellos».

Símbolo	Señal	Aviso
1		Buenas condiciones
2		Se acerca un temporal
3		No se recomienda la navegación
4		Puerto cerrado

Figura 7.6: En su artículo de 1948, cuando Shannon habla de ‘mensajes’ en realidad se está refiriendo a los ‘símbolos’ lo que, a su vez, están asociados a ‘señales’ físicas, independientemente de que tengan, o no, un significado. En este ejemplo de comunicación visual, cada aviso se asocia con una combinación específica de banderas (símbolo). Si Shannon comentara esta figura, al mencionar la palabra ‘mensajes’ se estaría refiriendo a las cuatro posibles combinaciones de banderas y no a sus significados (los avisos).

Hecha esta pertinente aclaración, podemos continuar. Supongamos, propone Shannon, que existen dos entidades, denominadas transmisor y receptor, que intercambian un conjunto finito y discreto⁴ de símbolos que ambas partes conocen. No es un sinsentido intercambiar símbolos que las partes involucradas conocen por anticipado, porque lo que importa no son los símbolos en sí, sino las combinaciones que con ellos podemos obtener. El transmisor puede enviar, repetidas veces, cualquiera de los símbolos conocidos y, no obstante, en el receptor no se conoce ni el orden, ni la frecuencia con la que aparecerán el medio de conexión, es decir, en el canal.

4 Los sistemas discretos emplean secuencias de muestras para representar a las señales.

Símbolo	Señal
A	
H	
L	
O	

Figura 7.7: Ejemplo de un conjunto finito de símbolos (constelación) y de las señales empleadas para transmitirlos físicamente por el medio. Shannon llamaría ‘mensaje’ al elemento que aquí denominamos como ‘símbolo’.

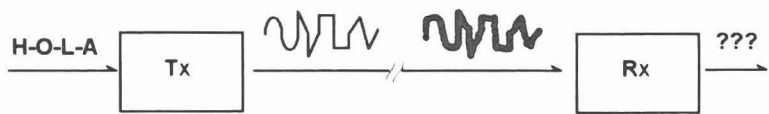


Figura 7.8: En la imagen, un sistema de comunicación con base en el conjunto finito de símbolos de la figura 7.7. En este ejemplo, el problema de comunicación, según Shannon, no es que el receptor (Rx) determine que el transmisor (Tx) envió un ‘saludo’ (hola), sino identificar la secuencia de símbolos transmitidos (H-O-L-A), con base en la observación de las señales ruidosas recibidas. De hecho, en las comunicaciones digitales, no se trata de restaurar la señal recibida hasta obtener fielmente la que se transmitió, basta con identificar los símbolos representados.

Shannon observó que pueden usarse algunas métricas probabilísticas del intercambio de símbolos, principalmente la probabilidad con que cada símbolo aparece en el canal, para caracterizar a un sistema de comunicaciones. Así, Shannon definió el estado de «agitación» en el punto de recepción y la contribución de cada símbolo a ello, de acuerdo con su probabilidad de aparición en el canal. A partir de este planteamiento, propuso al «bit» como una medida para cuantificar el proceso de intercambio de «información». Shannon determinó que se maximiza la cantidad

promedio de información intercambiada cuando todos los símbolos aparecen con la misma frecuencia.

Se cree que Shannon denominó al estado de agitación como «entropía», por analogía con el concepto termodinámico, refiriéndose a la cantidad promedio de información transportada por un conjunto de símbolos intercambiados en un orden incierto. Para visualizar mejor estos conceptos, consideremos como símbolos de comunicación a las letras que forman el alfabeto escrito de un idioma. Se sabe que cada letra tiene una probabilidad distinta de aparecer en un lenguaje. En inglés, por ejemplo, la letra «e» es la letra más frecuente, la cadena o secuencia «he» es la combinación de dos letras más frecuente y la secuencia «the» es la combinación de tres caracteres más encontrada. Supongamos que queremos ocultar («cifrar») un mensaje escrito en inglés usando una sencilla permutación de letras: ordenamos en una lista cíclica a todas las letras del alfabeto (es decir, luego de la «z» sigue la «a») y sustituimos a cada letra del alfabeto por otra que está, digamos, dos lugares adelante. En este caso, la «a» se reemplaza por la «c», la «e» por la «g», etc. Entonces, en un mensaje cifrado, a partir de un texto original en inglés, la letra que más se repetiría ahora sería la «g» en vez de la «e». Así, con base en las probabilidades de aparición de las letras que caracterizan a cada lenguaje, es decir a partir del análisis de la entropía definida por Shannon, un espía entrenado (un criptoanalista, como el mismo Shannon) podría reconocer el idioma de origen del mensaje cifrado.

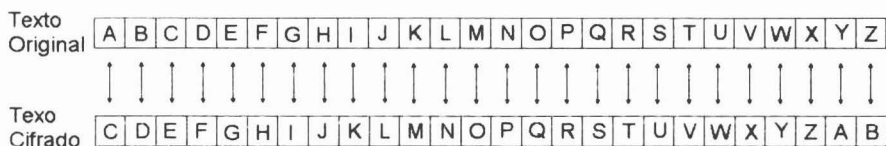


Figura 7.9: Regla de cifrado simple para el alfabeto en inglés. Si la letra más frecuente en un texto original en inglés es la letra «e», entonces en el texto cifrado, usando esta regla, la letra más frecuente ahora será la «g».

Hagamos una interesante reflexión sobre las implicaciones de todo esto en el español que hablamos. Pensemos que cada palabra, por sí misma, es un símbolo. Evidentemente, existen palabras muy frecuentes, las que todos usamos como, por ejemplo, las palabras «casa», «agua», «familia». Por otro lado, están aquellas palabras que son poco utilizadas, porque están cayendo en desuso o porque son propias de un vocabulario especializado. Así, el vocabulario de una persona y la frecuencia

en el uso de cada palabra permitirían determinar, aplicando el concepto de entropía de Shannon, la cantidad de «información» promedio que representan las conversaciones de una persona. Por ejemplo, estimado lector, ¿qué le dicen palabras como «bizarro», «bedel», «nigromante»? Las personas, en principio, van enriqueciendo su cultura conforme adquieren nuevas experiencias o van progresando académica, profesionalmente o culturalmente ¿Podríamos estimar la cantidad de información promedio (entropía) a partir de las conversaciones de una persona en diferentes momentos de su vida? y ¿qué revelaría esta medida?

7.6. IMPLICACIONES DEL TRABAJO DE SHANNON PARA LA CODIFICACIÓN Y LA CORRECCIÓN DE ERRORES

El siguiente aspecto abordado por Shannon tiene que ver con lo que en general se conoce como «codificación». Nos referimos a la forma en que los símbolos son representados por un conjunto de señales que pueden viajar o pueden adaptarse para viajar sobre un canal. Shannon estableció que el conjunto más sencillo de señales con las que se puede codificar (representar) cualquier símbolo es el alfabeto binario, o sea, el conjunto formado por los valores 0 y 1. Entonces, la decodificación es la operación inversa a la codificación: nos permite recuperar los símbolos originales. El talento y la visión de Shannon le permitieron reconocer que la aparición, en esa época, de los transistores iba a gestar un cambio tecnológico de gran trascendencia. Precisamente, los transistores son capaces de trabajar como interruptores, con los estados encendido y apagado, para representar los valores uno y cero, respectivamente.

Supongamos que se tiene un conjunto de cuatro símbolos: S_1 , S_2 , S_3 y S_4 . Debido a que con dos dígitos binarios podemos lograr hasta cuatro combinaciones (a saber 00, 01, 10, y 11), estas secuencias o combinaciones pueden usarse como cadenas binarias para codificar los cuatro símbolos propuestos. En general, un conjunto formado por M símbolos diferentes requerirá $k = \log_2(M)$ dígitos binarios para su codificación, lo que implica que con k bits podemos obtener hasta 2^k combinaciones.

En los ejemplos de comunicación humana presentados en este capítulo hemos manejado las palabras de un idioma como símbolos y hemos considerado la posibilidad de codificarlos usando las letras del alfabeto como señales. Sin embargo, en las comunicaciones digitales reales, las letras del alfabeto se representan como

secuencias o cadenas de dígitos binarios que generalmente usan la convención denominada código ASCII⁵. Cada dígito binario o grupo de dígitos binarios, a su vez, se puede transmitir asociándolo a una señal específica. Ésta situación nos sugiere la existencia de diferentes niveles de complejidad, cada uno incluido en otro de mayor complejidad. Esto también puede ser visto como si un sistema de comunicación digital transportara información con diferentes niveles de interpretación. Si se ve de arriba hacia abajo, los mensajes originales se construyen con símbolos que, a su vez, se codifican usando dígitos binarios que, a su vez, se transmiten como señales⁶. Si se ve de abajo hacia arriba, tenemos señales recibidas que representan dígitos binarios que, a su vez, sirven para codificar símbolos los que, a su vez, conforman a los mensajes originales.

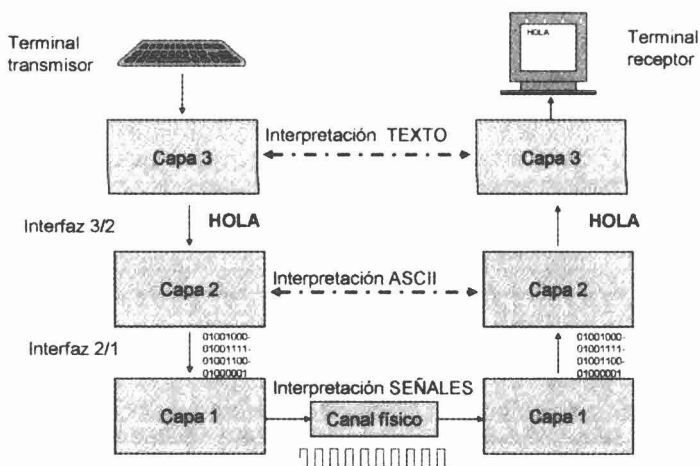


Figura 7.10: Los mensajes originales se construyen con símbolos que, a su vez, se codifican usando dígitos binarios que, a su vez, se transmiten como señales.

Una analogía ilustrativa la proporciona la biología molecular. Se utilizan los nucleótidos como símbolos para codificar a los genes que, a su vez, se emplean para

⁵ Siglas del inglés American Standard Code for Information Interchange, en español Código Estándar Estadounidense para el Intercambio de Información.

⁶ A la asignación de señales específicas para la transmisión física, o propagación, de los símbolos también se le conoce como señalización.

la construcción de una proteína. Otra analogía es la secuencia de bits que codifican a los píxeles que, a su vez, se utilizan para construir una imagen que, a su vez, forma parte de una secuencia de video. Siempre hay forma de codificar (representar) un mensaje complejo con un conjunto de elementos más simples (símbolos).

En forma teórica, Shannon estableció que existe un límite superior para la velocidad o tasa con la que se puede transmitir información en un canal. Este límite superior depende de las propiedades del canal y de la relación entre la potencia promedio de la señal transmitida y la potencia promedio del ruido presente en el canal. A este límite se le conoce como la «máxima capacidad del canal». Para llevar un sistema de comunicación digital hasta la máxima capacidad del canal se hace necesario transmitir la secuencia original acompañada de un exceso de dígitos binarios que permitan detectar y corregir los errores inducidos por el canal. No olvidemos que al transmitir más rápido, los símbolos se vuelven más vulnerables al ruido.

Ahora, consideremos la transmisión de las secuencias para nuestros símbolos S_1 , S_2 , S_3 y S_4 en un canal binario (es decir, un canal por el que viajan únicamente dos señales para representar a los dígitos 0 y 1) y que se ven afectados por ruido, de tal manera que se pueden introducir distorsiones en las señales que representan a los dígitos de cada símbolo. Entonces, debido al ruido, una señal puede interpretarse como un cero cuando originalmente era un uno y viceversa. A esta situación se le considera como «error de detección». Para cuantificar la probabilidad de tal error, diremos que cada uno de los dígitos binarios transmisibles por el canal tiene la misma probabilidad p de ser detectado en forma errónea. Por conveniencia, para nuestro ejemplo, asumiremos que esta probabilidad es pequeña. Dicho de otra forma, asumiremos que la variación generada por el ruido de las señales que representan a los dígitos binarios es tal que si enviamos un cero lo más probable es que en el receptor se reconozca un cero. Lo mismo ocurre con el uno.

Ahora, imaginemos que debemos transmitir alguna de las secuencias binarias que codifican a nuestros cuatro símbolos. Por ejemplo, si se transmitiera la secuencia 00 y ocurriera un error en la segunda posición, la cadena recibida se reconocería como 01, que también es una combinación válida. Esto es un problema, ya que un símbolo erróneo puede pasar por correcto simplemente porque tiene la configuración (la forma, la estructura) de un símbolo válido.

Como alternativa, podemos agregar algunos dígitos a las cadenas originales, aumentando con ello las combinaciones posibles pero manteniendo la cantidad original de símbolos por codificar. Primero, se reservan y asignan tantas combinaciones (cadenas) como símbolos tengamos (codificamos los símbolos). Entonces las cadenas asignadas se vuelven «combinaciones válidas» mientras que las remanentes (las que no se les asignó ningún símbolo) se convierten en «combinaciones inválidas». Segundo, se procura que las cadenas válidas se encuentren distribuidas de tal suerte que entre una y otra exista, al menos, una cadena inválida como separador. Así, cuando se reciba alguna cadena con errores, introducidos por el ruido, es menos probable que adquiera la forma de alguna cadena válida. Mientras más cadenas inválidas se encuentren entre las cadenas válidas, la detección de errores y su posible corrección se hará más manejable. Dado que con k bits podemos obtener hasta 2^k combinaciones, resulta claro que al aumentar el valor de k con cierta cantidad de dígitos extras (redundantes), es perfectamente posible aumentar la distancia entre combinaciones válidas si se mantiene constante la cantidad de símbolos a codificar.

Ilustraremos estos conceptos para nuestro ejemplo. Supongamos que en cada cadena binaria introducimos un tercer dígito con la siguiente regla: si el tercer dígito tiene un valor cero, significa que la cantidad de unos que forman el símbolo original es par, en otro caso el tercer dígito tendrá el valor uno. Así, nuestros cuatro símbolos se codifican con las siguientes cadenas:

00; 0

01; 1

10; 1

11; 0

En esta notación la coma («,») no se transmite y sólo sirve aquí para separar a los dígitos originales del nuevo dígito, al que llamaremos de «paridad». Ahora, en el lado receptor se puede verificar si la cantidad de unos que aparecen en las dos primeras posiciones de la cadena corresponden o no con el dígito de paridad⁷.

⁷ En las aplicaciones reales, la cadena mínima de bits tiene una longitud de ocho bits (byte). Esto tiene su origen en las primeras computadoras personales, que tenían palabras de memoria de 8 dígitos binarios, lo que popularizó el formato de codificación de siete dígitos de datos y un dígito de paridad.

Luego, en el receptor se vuelve a calcular la paridad de las dos primeras posiciones de la cadena recibida y el resultado se compara con el tercer dígito recibido. Si coinciden podemos asumir que el símbolo se ha recibido correctamente, en otro caso lo descartamos.

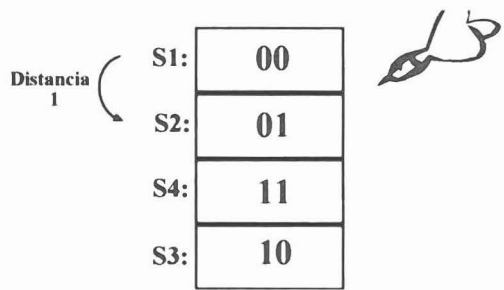


Figura 7.11: Experimento de tiro al blanco con una cinta y cadenas de código con distancia uno.

Una analogía, con una construcción espacial, nos puede ayudar a comprender mejor las implicaciones del mecanismo de redundancia propuesto para nuestro ejemplo. Vamos a ordenar a los símbolos S1, S2, S3 y S4 de manera que entre dos cadenas consecutivas sólo haya un dígito de diferencia⁸. A este ordenamiento se le conoce como numeración Gray:

- S1: 00
- S2: 01
- S4: 11
- S3: 10

Ahora, imaginemos que escribimos en una cinta de papel las cuatro cadenas correspondientes, una debajo de otra. Peguemos la cinta en la pared y podemos experimentar con una variante del «tiro al blanco» (ver figura 7.11). Tomemos un dardo y apuntemos hacia un símbolo de nuestra elección. Supondremos que la probabilidad de no atinar al objetivo es pequeña, es decir que tenemos un tirador muy bueno con una probabilidad muy baja de errar en su objetivo. Todo ello corresponde a una insignificante probabilidad de error por bit transmitido.

8 Como veremos adelante, esta diferencia se conoce técnicamente como «distancia Hamming»

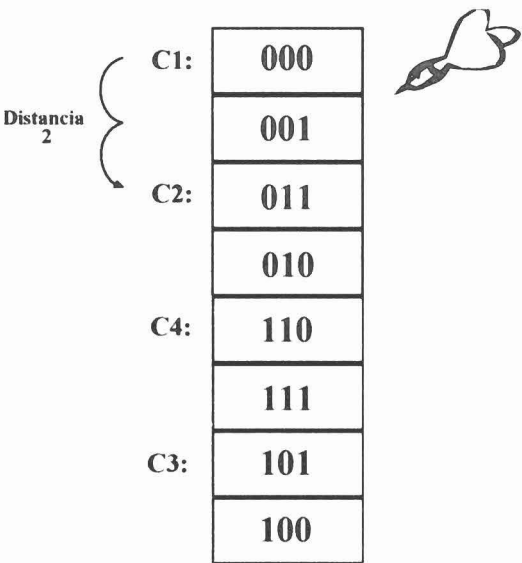


Figura 7.12: Experimento de tiro al blanco con una cinta y palabras de código con distancia dos.

Ahora, pensemos que apuntamos y tiramos hacia el símbolo S2, codificado como 01. Debido a los supuestos de nuestro modelo de tiro, lo más probable es que acertemos a la cadena correcta (01). Sin embargo, es posible, aunque poco probable, que el dardo pegue en las cadenas adyacentes 00 ó 11. Por las mismas leyes de nuestro modelo de tiro, un evento aún menos probable sería que pegáramos en la cadena 10 que se encuentra a dos posiciones de nuestro objetivo.

¿Qué pasará en nuestro experimento si ahora adicionamos un dígito de paridad? Ahora tendríamos cadenas de tres dígitos y podríamos construir hasta 8 combinaciones diferentes, sin embargo solamente 4 de ellas (a las que denominaremos C1, C2, C3 y C4) corresponderían a nuestros símbolos originales (S1, S2, S3 y S4). Las nuevas secuencias deben cumplir cabalmente con la regla de paridad que produce al tercer dígito. Las posibles nuevas cadenas las podemos ordenar usando numeración Gray y las llamaremos palabras de código, a saber (ver figura 7.12):

000 - C1
001

011 - C2

010

110 - C4

111

101 - C3

100

Gobernados por las mismas leyes de nuestro modelo de tiro, otra vez apuntamos al símbolo S2, ahora codificado con la palabra de código 011 (C2).

Ya sabemos que lo más probable es que demos en el blanco, sin embargo, es posible, aunque menos probable, pegar en las cadenas adyacentes 001 ó 010, que evidentemente no son palabras de código válidas ya que no cumplen con la regla de paridad y, por lo tanto, no son generadas a partir de ninguno de los símbolos originales. Si esto llegara a ocurrir, podemos identificar claramente que se trata de un error. Entonces, ¡hemos detectado un error!

Supongamos que desconocemos el objetivo del tirador y observamos que el dardo se incrusta en la cadena 010. Siendo una palabra de código no válido, reconocemos que esta situación se debe a un error (detectamos el error). Sin embargo, y sin menoscabo de la ventaja que representa haber detectado un error, no podemos afirmar con certeza cuál es el objetivo original (no podemos corregir el error) porque, lamentablemente, en esta construcción hay dos posibles caminos para llegar a la cadena 010:

- a) Que apuntemos la cadena que corresponde a S2 (se transmite la palabra de código 011 - C2) y el dardo caiga una celda abajo (ocurre un error en la tercera posición⁹ de la palabra de código 011 y se recibe la palabra de código 010).
- b) Que apuntemos a la cadena que corresponde a S4 (se transmite la palabra de código 110 - C4) y el dardo caiga en la celda de arriba (ocurre un error en la primera posición de la palabra de código 110 y se recibe la palabra de código 010).

9 Aquí, por consistencia, el orden ascendente de las posiciones de los dígitos es de izquierda a derecha.

Esto ocurre debido a que las palabras de código válidas están separadas entre ellas con un espacio de dos. Es decir, porque entre cada una de ellas hay una palabra no válida que las separa. En nuestra analogía de tiro al blanco, esto equivale a que el dardo tendría que desviarse dos celdas, para terminar en una celda con un código válido pero no deseado. Como la secuencia presenta un orden cíclico (la cinta bien podría estar unida en sus extremos, a la manera de una rueda, para asegurar la adyacencia de las celdas extremo), C_3 y C_1 también muestran una distancia de dos entre ellas.

Hemos visto cómo la redundancia introducida por el dígito de paridad también aumenta la distancia entre las palabras válidas de un código. Podemos extender la idea agregando más dígitos de paridad. Por ejemplo, tomemos el caso de un grupo de símbolos que se codifican con cuatro dígitos, denotados como b_0 , b_1 , b_2 y b_3 , respectivamente. Pensemos que ahora, en vez de agregar un solo dígito de paridad, agregamos tres dígitos de paridad, denotados como b_4 , b_5 y b_6 , siguiendo alguna regla preestablecida. Por ejemplo, que b_4 resulte del cálculo de paridad entre b_1 , b_2 y b_3 ; que b_5 resulte del cálculo de paridad entre b_0 , b_2 y b_3 ; finalmente, que b_6 resulte de la paridad entre b_0 , b_1 y b_3 . En este caso, con un total de 7 dígitos binarios, las posibles combinaciones son 128 ($2^7 = 128$), pero sólo 16 de ellas serían palabras de código válidas (según las reglas indicadas), que corresponderían a los 16 símbolos ($2^4 = 16$) que podemos tener con los 4 dígitos originales b_0 , b_1 , b_2 y b_3 . Si ordenáramos la lista de las 128 cadenas, podríamos comprobar, por inspección, que la distancia entre palabras de código válidas es ahora de, al menos, tres.

En resumen, al aumentar la distancia entre palabras de código válidas C_i , también aumentamos la probabilidad de detectar exitosamente el símbolo que realmente se transmitió, a pesar de que la secuencia binaria recibida se encuentre contaminada por el ruido del medio. En nuestro experimento con dardos, esto implica que si tiramos a una celda con un código válida, digamos C_i , el evento más probable es que atinemos a la celda elegida. Sin embargo, es posible, aunque menos probable, que el dardo caiga en una celda adyacente, esto es, a una distancia uno de la celda objetivo. También es posible, pero aún menos probable, que el dardo caiga en una celda a una distancia mayor a uno de la celda objetivo. Entonces, la idea principal para minimizar el reconocimiento de secuencias erróneas como correctas es maximizar la separación entre las palabras de código válidas C_i . En la

medida que la disposición «espacial» de las palabras de código válidas presente una mayor distancia entre ellas, como resultado de la cantidad de redundancia que les asociamos, ello permite no solamente detectar errores sino, incluso, corregirlos.

Así, conforme se introduzca más redundancia, se tendrá mayor capacidad para detectar y corregir errores. Sin embargo, debemos procurar un equilibrio entre el costo y el beneficio de esta solución, pues más redundancia también implica transmitir más bits de «refacción» que disminuyen el espacio disponible para los bits de datos «útiles» o de interés.

A la codificación que ya no sólo le interesa la representación de los símbolos en si, sino además introduce redundancia, para la detección y corrección de errores, se le conoce técnicamente como «codificación de canal» y forma parte de todo un campo de desarrollo como veremos a continuación.

7.7. APARECE RICHARD HAMMING EN ESCENA

A Richard Hamming (1915-1998) se le recuerda por sus aportes al campo de la detección y corrección de errores. Su trabajo seminal en esta área apareció alrededor de 1950 [4] y, con ello, inauguró una nueva área de investigación dentro de la Teoría de la Información: la Teoría de la Codificación, que incluye tanto la codificación de canal como la codificación en lo general. Los códigos desarrollados por Hamming tuvieron una importancia fundamental en el desarrollo de este campo y aún hoy se les encuentra en innumerables aplicaciones. Aunque actualmente existen códigos más potentes y eficientes que los que Hamming propuso originalmente, definitivamente los suyos sentaron un precedente importante ya que con ellos planteó, por primera vez, soluciones específicas a los problemas de detección y corrección de errores. A pesar de que su trabajo con los códigos correctores de errores está muy relacionado con elaboradas teorías matemáticas (la teoría de los «campos finitos»), sus aplicaciones prácticas han superado por mucho a las expectativas originales.

Hamming ingresó a la Universidad de Chicago y recibió su grado de matemático en el año de 1937. En la Universidad de Nebraska obtuvo el grado de maestro, en 1939, y en la Universidad de Illinois el grado de Doctor en matemáticas, en 1942. En 1945, Hamming se unió al famoso «Proyecto Manhattan», que tenía como propósito principal la producción de una bomba atómica para el gobierno de los

EE.UU.. En 1946, después de finalizar la Segunda Guerra Mundial, se unió a los Laboratorios Bell donde trabajó junto a grandes investigadores como Claude Shannon y John Tukey. De hecho, como lo hemos venido reiterando, el trabajo conjunto de este grupo de investigadores sentó las bases de la Teoría de la Información. Hamming siguió trabajando para los Laboratorios Bell hasta 1976, cuando aceptó una cátedra de ciencias de la computación en la Escuela Naval de Postgrado en Monterey, California.

Richard Hamming fue un personaje que, gracias a su gran intelecto, realizó importantes aportaciones a la ciencia e ingeniería. Era un hombre perseverante e ingenioso, que inspiró a muchos de sus contemporáneos y, aún hoy, lo sigue haciendo con las nuevas generaciones de investigadores. Es notable que en una de sus más importantes contribuciones, publicada en 1950, incluyera sólo una referencia a otro trabajo relacionado (un artículo de M. Golay, de 1949 [2]), lo que nos muestra lo novedoso de sus ideas y la frescura de pensamiento que lo caracterizaba. Así, Hamming había desarrollado un tema que, prácticamente, no contaba con un ningún precedente y que, no obstante, ha tenido gran influencia en trabajos posteriores.

Hamming desarrolló otras aportaciones interesantes cuando trabajó en el equipo que desarrolló la computadora IBM 650, en 1956. Su trabajo allí marcó la pauta para el desarrollo de un nuevo lenguaje de programación que hoy puede ser considerado como el fundamento de los actuales lenguajes de programación de alto nivel¹⁰. También trabajó en problemas de análisis numérico, integración de ecuaciones diferenciales y de ventaneo espectral¹¹. Recibió numerosos premios por su trabajo pero destaca que fuera nombrado *fellow* (miembro distinguido) de la IEEE, en 1968, y galardonado con el Premio Turing de la ACM (*Association for Computing Machinery*) de Nueva York, de la que fue uno de los fundadores. La IEEE le otorgó el premio Emanuel R. Piore, en 1979, y una medalla por sus contribuciones excepcionales en las ciencias de la información y los sistemas, en 1988. La IEEE renombró esta medalla, en su honor, y ahora se le conoce como la «Medalla de Hamming» (*Hamming Medal*) [5].

10 Los que actualmente se utilizan para programar a las computadoras de forma rápida y eficiente, empleando sentencias muy cercanas al lenguaje natural humano.

11 Actualmente, la «ventana de Hamming» es ampliamente utilizada en el procesamiento de señales, sobretodo, para suavizar los bordes de las secuencias de datos antes de realizar un análisis de Fourier.

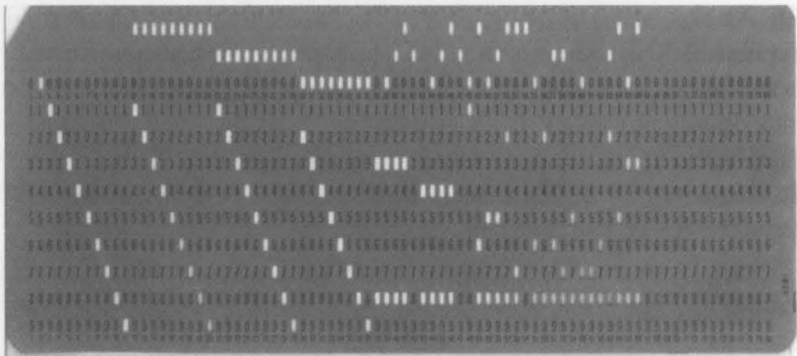


Figura 7.13: Típica tarjeta perforada usada para programar a las primeras computadoras electrónicas.

A la muerte de Hamming, el profesor Richard Franke escribió sobre él: «Hamming será siempre recordado por su visión aguda en muchas facetas de la ciencia y la computación. También lo recordaré por su chaqueta roja deportiva, tipo escocesa a cuadros, y por sus malos chistes» [5]. Por su parte, el profesor James F. Kaiser, en un breve obituario sobre Hamming, escribió: «Todos extrañaremos su mente interesante y su penetrante comprensión de las cuestiones científicas, de ingeniería y de la vida cotidiana» [4].

7.8. LOS CÓDIGOS DE RICHARD HAMMING

Hamming desarrolló los códigos que llevan su nombre para la detección de errores empleando el principio de redundancia antes expuesto. También, definió una medida para la distancia entre las palabras de código. Esta distancia es la que se conoce como «Distancia de Hamming» y es simplemente el número de dígitos diferentes entre dos cadenas de dígitos binarios. En su momento, los códigos Hamming permitieron la realización práctica de sistemas de comunicación digital confiable, gracias a la relativa simplicidad para incorporarlos en el hardware. Así, los códigos Hamming se hicieron muy atractivos para la recuperación de datos en dispositivos de memoria de «sólo lectura» (*Read Only Memory* o ROM) de las computadoras [1].



Figura 7.14: Computadora de año 1957 controlada por tarjetas perforadas. La «capturista» de la imagen se encuentra «alimentando» a la computadora con un «lote» de estas tarjetas.

Lo que motivó a Hamming a desarrollar estos códigos fue la necesidad de resolver algunos problemas surgidos en los Laboratorios Bell, alrededor de 1940, durante el diseño de ciertas computadoras electromecánicas. En aquella época, los ciclos de reloj eran del orden de segundos¹² y los datos se alimentaban a la computadora mediante tarjetas con orificios, conocidas como «tarjetas perforadas». Debido a las limitaciones tecnológicas de la época, la lectura óptica de estas tarjetas invariablemente introducía errores en los datos. Este problema llevó a Hamming al desarrollo de un sistema que ayudara a los operadores de estas máquinas a detectar los errores. Para ello, propuso el empleo de sus códigos y una señal luminosa de alerta que, en caso de detectar algún error, permitiría la corrección requerida. Incluso, su solución llegó más lejos: en ausencia del operador la máquina se saltaba la tarea donde existía un error y pasaba a la siguiente sin demora.

Hamming siguió trabajando para encontrar la forma de manejar los errores de las tarjetas perforadas y evitar que las máquinas tuvieran que retomar el trabajo desde el comienzo del programa. Esto lo motivó a proponer la corrección de los errores además de su detección. Esta idea, a su vez, lo llevó al desarrollo

¹² Actualmente los ciclos de reloj de una computadora son del orden de milésimas de microsegundo, es decir de un segundo dividido en 1,000 millones.

de algoritmos más complejos y, finalmente en 1950, publicó su propuesta sobre lo que hoy se conoce como los códigos de Hamming. Estos códigos permanecen vigentes hasta nuestros días, con aplicaciones que van desde los sistemas de cómputo hasta los de telecomunicaciones, pasando por toda clase de productos electrónicos de consumo. La idea de Hamming consistía en agregar bits de paridad, como «redundancia», a la secuencia binaria original mediante ciertas reglas de paridad que él llamó de identidad o simetría. Los códigos de Hamming insertan un bit de paridad calculado con los bits cuyas posiciones son múltiplos enteros de una misma potencia de dos.

7.9. CÓDIGOS CORRECTORES EN TODAS PARTES

Resumiendo, la Teoría de la Codificación es el campo que estudia las diferentes técnicas para agregar redundancia a las secuencias binarias, antes de transmitir las por un canal de comunicación, con la finalidad de detectar y corregir los errores introducidos, por el ruido y las imperfecciones del medio de propagación, en las señales de comunicación digital. En este contexto, los códigos de Hamming son sólo una de las infinitas posibilidades de codificación de canal. Como ya se dijo antes, se procura que una técnica de codificación produzca suficiente separación entre las palabras de código válidas para que, con ello, se garantice cierta capacidad mínima para detectar y corregir errores. Si la separación entre las palabras de código válidas la medimos con la distancia de Hamming, entonces ésta también determina la capacidad del código para detectar y corregir errores [9].

Actualmente, los sistemas como los reproductores de CD y lectores de discos duros, utilizan códigos especializados en la detección y corrección de errores. Esta es la razón por la que se puede rayar ligeramente un disco compacto y, aún así, obtener música nítida. Los esquemas de codificación incluidos en este tipo de equipos emplean códigos correctores cuya estructura es más complicada que la de los códigos Hamming. Actualmente, en la mayoría de los casos, la adición de redundancia tiene como objetivo principal, no sólo la detección de los errores, sino más bien la corrección de los mismos [3].

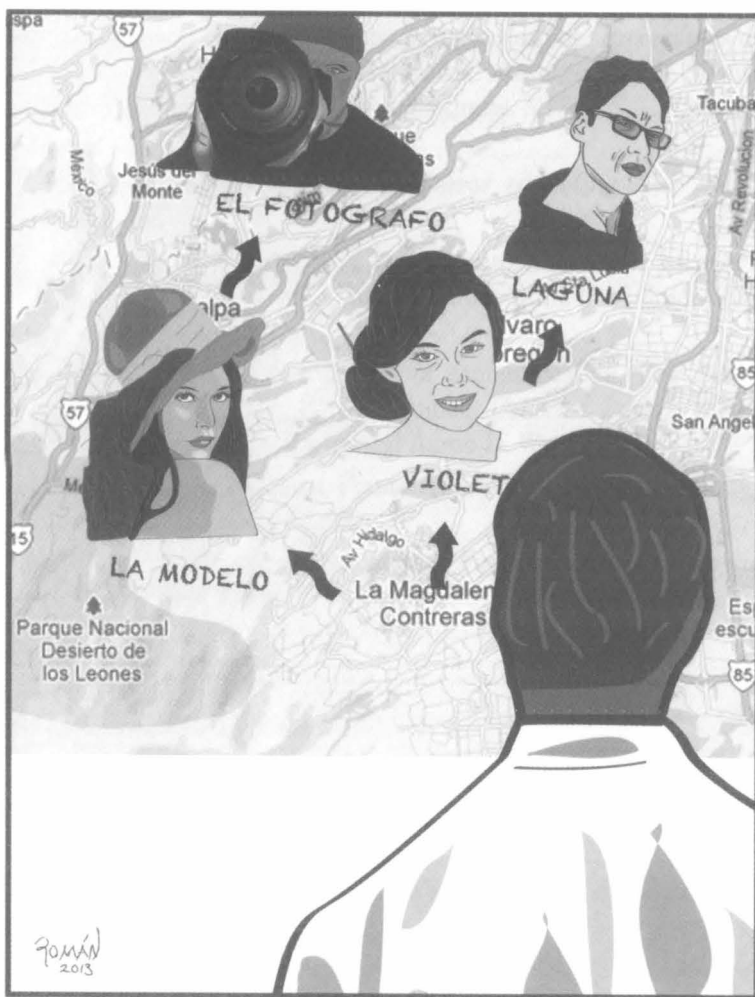
Podemos concluir afirmando que, en la actualidad, existen diversos tipos de códigos para la detección y corrección de errores pero, en todos los casos, siempre se agrega redundancia a la secuencia binaria original, ya sea para transmitirla por un medio de comunicación o para almacenarla en una memoria. Todo esto con el

propósito de facilitar al receptor, o lector de datos, la recuperación de la secuencia binaria original con un mínimo de errores.

Cuando hablamos del medio de comunicación, normalmente pensamos en un cable conductor o en ondas electromagnéticas que establecen un enlace punto a punto. Sin embargo, la realidad es que la configuración del medio de comunicación que usan las actuales TIC es el resultado de una mezcla, tanto de enlaces cableados como de inalámbricos, por lo que tiene la forma (topología) de una red (enlace multipunto). En el siguiente capítulo veremos cómo es que se llegó a este grado de conectividad.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO 7

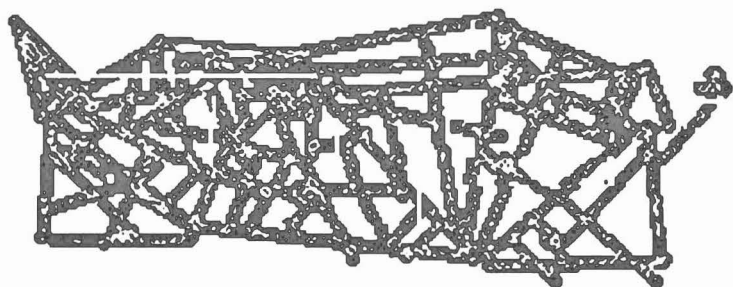
- [1] E. Britannica. Hamming code. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/253664/Hamming-code>>. Consultado el 3 julio de 2012.
- [2] M. J. E. Golay. Correspondence, notes on digital coding. *Proceedings of I.R.E.*, 37, junio 1949. [3] E. M. Guizzo. The essential message: Claude Shannon and the making of information theory. Master's thesis, MIT, U.S.A., 1998. (Tesis de maestría).
- [4] R. W. Hamming. Error detecting and error correcting. *The Bell System Technical Journal*, 29, 1950.
- [5] J. J. O'Connor and E. F. Robertson. R. Hamming biography. <http://www-history.mcs.st-andrews.ac.uk/Biographies/Hamming.html>. Consultado el 3 julio de 2012.
- [6] C. Shannon. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27, 1948. [7] C. Shannon. *Collected Papers*. IEEE Press, USA, 1993. Edited by N.J.A Sloane and Aaron D. Wyner.
- [8] K. Shivaprasad. Claude Shannon: Founding father of electronic communication age. *Dream*, (2047), diciembre 2006.
- [9] Bernard Sklar. *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Pearson/Prentice Hall, 2001.



Escena 8: ¿A cuántos grados de separación me encontraba de quien me había enviado las imágenes?

Dicen que la red social de una persona puede reconstruirse de muchas formas, por ejemplo, a partir de las llamadas telefónicas que hace y recibe. Me preguntaba cómo encajaba yo en la red de la persona que me había mandado las imágenes de la chica del sombrero a través de mi teléfono, ¿a cuántos grados de separación me encontraba del asesino y de la víctima, o de la supuesta víctima? Laguna y yo estábamos muy desconcertados, comenzamos a revisar uno por uno los hechos que hasta entonces se me presentaron.

Primero, conjeturamos que me habían tendido una trampa: la carnada fue la misma modelo del cartel que, como parte de un plan inicial, había tomado un trabajo temporal como edecán y vendedora del stand donde compré mi teléfono. Entonces mi amigo tuvo una de sus grandes ideas: podría conseguir una autorización para acceder a los registros de la compañía telefónica y averiguar 1) desde qué aparato me habían contactado, 2) desde dónde, 3) quién era el titular del aparato y 4) con qué otros aparatos y personas había tenido comunicación el remitente.



SANTI

La necesidad de compartir recursos y contenidos entre diferentes terminales dio origen a las redes de datos. Para compartir recursos y contenidos, primero se interconectaron las terminales de una misma oficina, para formar una red local, luego la red se expandió para conectar a las terminales de un mismo edificio, después la red alcanzó a conectar las terminales de una comunidad, formando redes amplias. El siguiente paso fue interconectar redes amplias para formar redes de redes y, así sucesivamente, hasta abarcar las terminales de todo el orbe.

Capítulo 8

La necesidad de las redes de comunicación y sus retos

«El problema más grande con la comunicación es la ilusión de creer que ha ocurrido»

George Bernard Shaw

Aquí, daremos un rápido recorrido histórico por la vertiente de las comunicaciones electrónicas que tenía como propósito original la comunicación punto a punto (es decir, con un enlace entre dos equipos terminales¹) y que derivó en una red de comunicaciones multipunto (es decir, con múltiples enlaces simultáneos entre muchos equipos terminales). En este capítulo veremos cómo se evolucionó de un sistema de comunicación simple a una red de comunicaciones.

8.1. LA RED COMO UN PRODUCTO DE LA MEJORA CONTINUA

Desde que un sistema de comunicaciones se diseña, para luego desarrollarse y ponerse en servicio, éste se encuentra inmerso en un ciclo continuo de evolución. Por lo regular, pasa de un estado inicial incierto, en donde sus capacidades, alcances y limitaciones no se conocen completamente, hasta pasar por un proceso de evaluación que va redefiniendo los factores de diseño para iniciar un proceso de mejora y perfeccionamiento. Generalmente, el costo (y también el precio de venta) de introducción de un sistema de comunicaciones resulta ser excesivamente alto. No obstante, si el sistema resulta ser viable comercialmente y permite resolver los problemas para los que se planteó su diseño, entonces el costo se va reduciendo conforme se va haciendo más popular y la cantidad de usuarios que lo utilizan va aumentando. Sin embargo, ante el aumento en el número de usuarios (por ejemplo,

¹ Un equipo terminal es un equipo o estación, fuente o destino, en donde se encuentra el usuario final de un sistema de comunicación electrónica.

estaciones base, nodos² y equipos terminales) la eficiencia del sistema puede verse degradada. Esta nueva problemática presenta grandes retos a los diseñadores, quienes deben realizar mejoras y modificaciones para poder seguir otorgando el servicio de comunicación a una mayor cantidad de usuarios [3, 1].

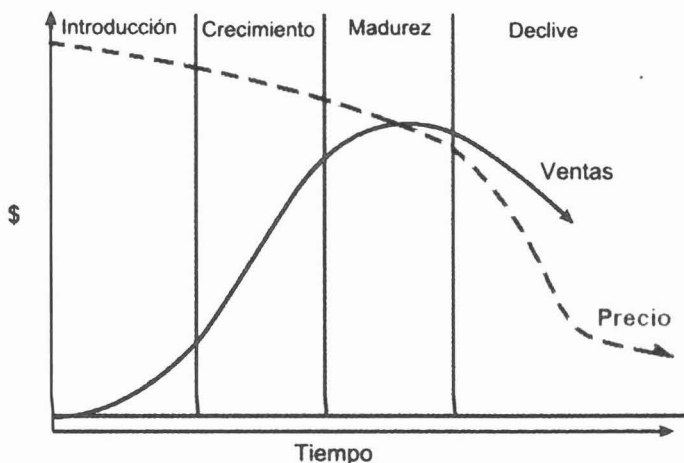


Figura 8.1: Ciclo de vida de cualquier producto. En el caso de las TIC, este fenómeno se ve magnificado por «el efecto de la red».

Como ejemplo de lo descrito anteriormente, consideremos un sistema telefónico móvil de red celular o un sistema de transmisión de televisión vía satélite. En un principio, estos sistemas de comunicaciones sólo incluían un número limitado de usuarios. Conforme se fueron popularizando, la cantidad de personas interesadas en adquirir un equipo telefónico móvil o un receptor de televisión vía satélite se fue incrementando y los precios de mercado de dichos equipos fueron disminuyendo. Ante la mayor cantidad de usuarios, estos sistemas fueron evolucionando para dar atención a la creciente demanda del servicio ofrecido. Este ciclo de perfeccionamiento, crecimiento de demanda, disminución de los costos y de los precios de mercado y, finalmente, la mejora en la calidad y cantidad de los servicios ofrecidos por los sistemas de comunicación, es un proceso que comúnmente se observa en el

- 2 Si un equipo terminal está donde se encuentra el usuario final de un sistema de comunicación electrónica, entonces los equipos «nodos» son los que conforman la red por la que pasa la información para llegar de una terminal remitente a una destinataria.

desarrollo y evolución de estos sistemas. A este proceso lo podemos llamar como «el efecto de la red».

8.2. NACE LA RED DE COMUNICACIONES Y SURGEN NUEVOS RETOS

Cuando un sistema de comunicaciones evoluciona, pasando de ofrecer un servicio de comunicaciones para sólo dos equipos a ofrecer el mismo servicio para múltiples equipos, se observa otra consecuencia. Conforme el número de equipos transmisores y receptores aumenta, se vuelve cada vez más complejo establecer un enlace de comunicación dedicado para cada par de equipos. A partir de esta dificultad técnica, la solución a la que más frecuentemente se recurre es la de establecer una red de comunicaciones.

Con el fin de hacer más eficiente el sistema, en una red de comunicaciones, el conjunto de equipos transmisores y receptores pueden compartir entre sí el medio de transmisión, los recursos de transmisión, los recursos de información o ciertos equipos especializados. El medio de transmisión es el elemento físico por el que se comunican dichas estaciones. Como ejemplos de medios de transmisión, tenemos los cables (coaxiales o de par trenzado), la fibra óptica y el canal inalámbrico (el aire o el espacio vacío). Los recursos de transmisión son ciertas propiedades o parámetros que definen las características del sistema de comunicaciones, por ejemplo, las frecuencias de operación, los tiempos y potencias de transmisión. Los recursos de información pueden ser bases de datos, fuentes de información y equipos para capturar los datos. Por último, entre los equipos especializados que se pueden compartir en una red de comunicaciones están las estaciones base, los dispositivos de encaminamiento («ruteadores»), dispositivos de almacenamiento, de procesamiento y servidores [3, 1].

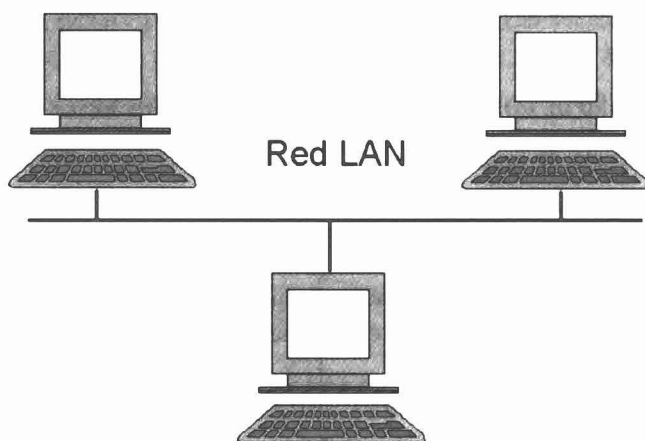


Figura 8.2: Las redes de área local (LAN) interconectan equipos del mismo edificio o campus.

Como ejemplo de lo anterior, veamos la situación que se presentó a mediados del siglo XX. En esa época, las oficinas de gobierno, las instituciones educativas y, posteriormente, las empresas de algunos países comenzaron a hacer un uso más frecuente del equipo de cómputo. En esos momentos, el equipo de cómputo era excesivamente costoso y voluminoso, ya que uno solo de estos equipos podía ocupar una habitación completa, requerir de sistemas de energía de alta potencia y grandes equipos de ventilación para disipar la gran cantidad de calor que generaban [7].

Conforme estas organizaciones tuvieron la necesidad de resolver problemas cada vez más complejos (tanto en el ámbito técnico como en los aspectos administrativos, logísticos e institucionales), éstas fueron requiriendo de más equipo de cómputo. La solución que estaba disponible en ese entonces era la de actualizar (sustituir) al equipo centralizado de procesamiento, ya que las computadoras personales aún estaban en proceso de desarrollo. Cuando mucho, se podían instalar más terminales, todas con muy pocas o casi nulas capacidades de procesamiento, las que se conectaban al equipo central para compartir sus recursos con todos los usuarios. Ante el mayor número de terminales, y a fin de controlar el acceso a los recursos que el sistema centralizado administraba, se debieron diseñar una serie de protocolos de comunicación para garantizar el correcto funcionamiento del sistema en su conjunto.

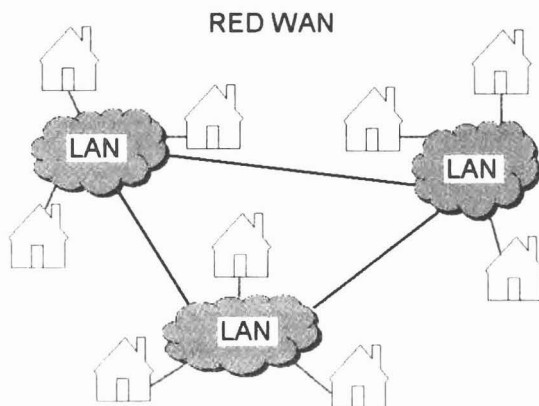


Figura 8.3: Las redes de área amplia (WAN) pueden formarse al interconectar varias redes locales que se encuentran distanciadas por algunos kilómetros.

Cada vez más fabricantes de equipo de cómputo fueron desarrollando sus propias versiones, al mismo tiempo que se iban abaratando los costos de sus productos. En un principio, cada fabricante diseñaba su equipo de forma independiente de los demás. Conforme las instituciones fueron utilizando cada vez más equipo de cómputo, también tuvieron la necesidad de conectar dispositivos de diferentes fabricantes, con el propósito de compartir recursos e información. Lamentablemente, al haber sido diseñados en forma independiente, los equipos presentaron grandes dificultades para conectarse entre sí. A partir de este momento, se sugirió la creación de organizaciones u organismos nacionales e internacionales de estandarización, normalización y homologación que generaban una serie de normas, protocolos y reglas que debían seguir los fabricantes, para que la comunicación entre equipos de diferentes marcas comerciales pudiera realizarse sin mayor problema. Entre estos organismos están la IEEE³, la ANSI⁴ y la ISO⁵ [2, 8].

8.3. LA INTERNET: RED DE REDES DE COMUNICACIÓN ELECTRÓNICA

Una vez que fue posible interconectar equipos de diferentes fabricantes, las redes de comunicaciones comenzaron a crecer. La Internet es el resultado de este crecimiento

3 *Institute of Electrical and Electronics Engineers.*

4 *American National Standards Institute.*

5 *International Organization for Standardization.*

en la interconexión de equipos y redes que se fueron incorporando en el transcurso de la segunda mitad del siglo XX. Para finales del siglo XX y principios del XXI, se observó un desarrollo explosivo, tanto en la cantidad de equipos conectados como en la extensión geográfica que abarcaba la Internet, la que ofreció cada vez más servicios y recursos a nivel mundial [4, 5].

Los protocolos de comunicación que se utilizan en la Internet se pueden comparar con las reglas de tránsito que deben seguir los conductores de una ciudad para poder circular, sin mayor percance, en las calles, avenidas y carreteras que comunican a los diferentes puntos de dicha población. Al igual que los conductores de los automóviles (que deben transitar por los caminos respetando el sentido y la velocidad máxima de las calles, detenerse o avanzar al cambio de las luces de los semáforos y al llegar a la intersección de dos caminos), la información que fluye a través de la Internet debe seguir un conjunto de reglas estrictas para que el funcionamiento de ésta sea adecuado.

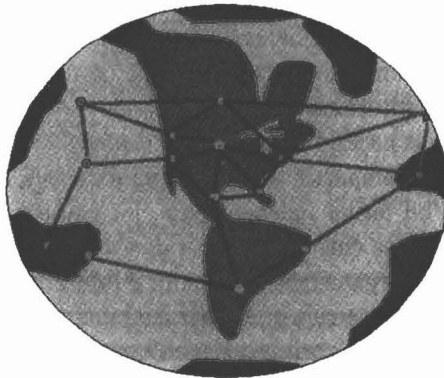


Figura 8.4: Las Internet es una red de redes y su alcance es global.

La información que viaja por la Internet se divide en bloques de datos de cierto tamaño, denominados paquetes. En estos paquetes se incluye cierta información de control que permite que los paquetes atraviesen la red, desde la estación origen hasta la estación destino, recorriendo un conjunto de enlaces y dispositivos de interconexión. Son parte de esta información de control los números de identificación de las estaciones terminales que se denominan como direcciones IP, algo equivalente a los datos personales de un individuo (por ejemplo, nombre, apellidos,

dirección y teléfono). Estos paquetes, así «etiquetados», van propagándose a través de la Internet, pasando por diversos enlaces, con diferentes características (velocidades de transmisión, ancho de banda, retardos de transmisión, tiempos de propagación, medio físico, etc.), como si fueran las veredas, callejones, calles, calzadas, avenidas y autopistas que podemos encontrar en una ciudad [6].

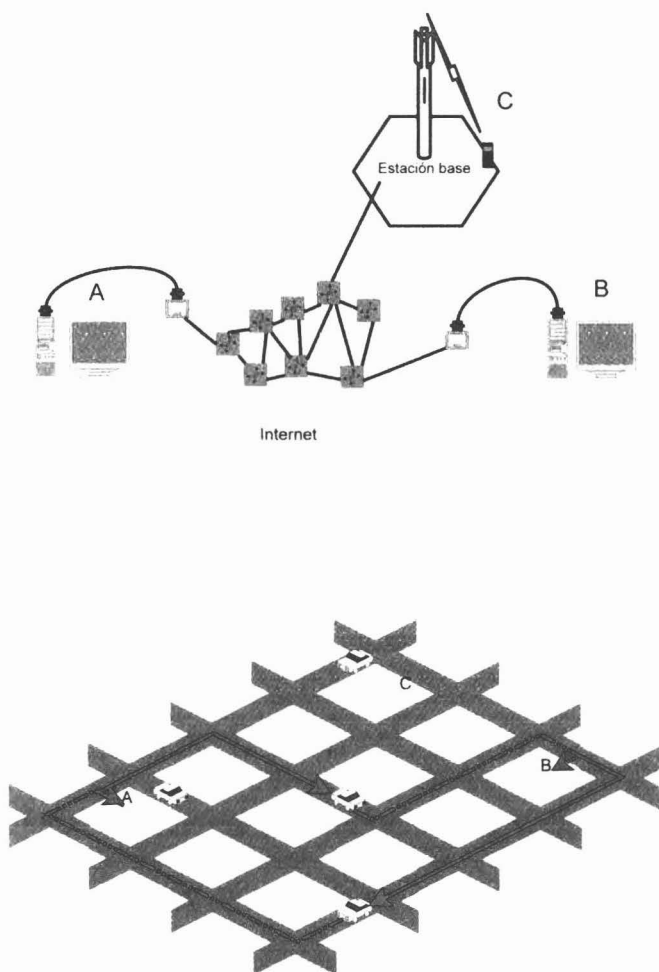


Figura 8.5: Flujo de datos a través de la Internet y analogía vehicular.

En la unión de cada uno de estos enlaces existe un dispositivo de interconexión especial (nodo intermedio), denominado también dispositivo de encaminamiento o ruteador, que es capaz de identificar las direcciones fuente y destino con que están etiquetados los paquetes y determinar cuál es el enlace por el que deben ser reenviados para que puedan arribar al destino final. Una analogía sería la de colocar semáforos inteligentes en las intersecciones de las calles, los que serían capaces de investigar a dónde quiere llegar cada conductor e indicarle qué calle debe tomar para llegar a ese lugar en particular.

Cada uno de los proveedores del servicio de Internet (ISP - *Internet Service Provider*) posee un conjunto de nodos intermedios que siguen una serie de protocolos y políticas de operación. Estos dispositivos, a su vez, reportan a los dispositivos de otros proveedores las direcciones IP que ellos conocen o tienen a su alcance. De esta forma, la Internet genera mensajes de actualización que permiten que la red funcione. Durante el recorrido de los paquetes, a través de la Internet, se va generando un registro de los nodos intermedios visitados. Esta información puede ser propagada entre los proveedores de servicio de Internet con el propósito de hacer un rastreo y monitorización de la información transmitida a través de ésta.

8.4. RIESGOS VIRTUALES

Lamentablemente, y a pesar de las grandes ventajas que ofrece la Internet, también existen aspectos negativos en ésta, en lo particular, y en las comunicaciones electrónicas modernas, en lo general. Uno de ellos tiene que ver con los riesgos de seguridad y privacidad de la información. Entre más comunicados estemos y más información compartamos con los demás, también es cierto que podemos ser más vulnerables al robo de claves de identidad o de información personal. En esta época, tanto nuestras computadoras personales (de escritorio y portátiles) como nuestros teléfonos móviles y asistentes digitales personales (PDA, por las siglas del inglés *Personal Digital Assistant*) pueden estar expuestos al ataque de personas que, gracias a su gran conocimiento sobre la forma como opera la Internet, son capaces de vulnerar la integridad de los datos personales almacenados en nuestros equipos y hacer uso de esta información con propósitos fraudulentos⁶. Ante este peligro inminente, muchas empresas y organizaciones han desarrollado mecanis-

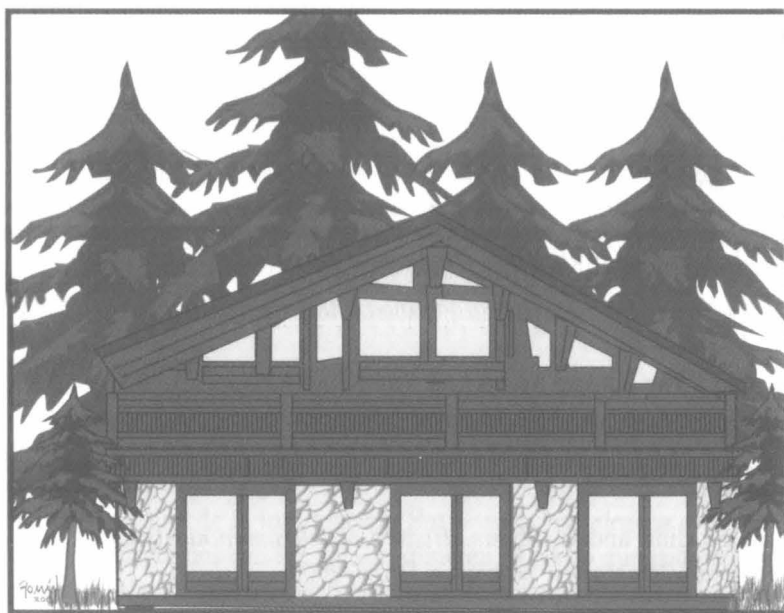
6 Siempre que dichos equipos posean conexión a la Internet.

mos de seguridad y protección de datos para limitar, en lo posible, el alcance de los daños que se pudieran ocasionar al vulnerar la seguridad de los mismos.

Así, el vertiginoso desarrollo de las telecomunicaciones y las redes plantea nuevas oportunidades y retos. Lo cierto es que lo logrado hasta hoy parece ser solo el comienzo, como veremos en el siguiente capítulo.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO 8

- [1] H. N. Casson. *The Worldwide History of Telecommunications*. Echo Library, 2007.
- [2] T. K. Derry and T. I. Williams. *Historia de la tecnología*. Siglo XXI de España Editores, 1990.
- [3] A. Huurdeman. *The Worldwide History of Telecommunications*. John Wiley & Sons, 2003.
- [4] C. B. Lavenir and F. Barbier. *Historia de los medios: de Diderot a Internet*. Ediciones Colihue SRL, 1999. Traducción: Eduardo Rinesi.
- [5] C. J. P. Moschovitis. *History of the Internet: a chronology, 1843 to the present*. ABC-CLIO, 1999.
- [6] J. R. Okin. *The Internet Revolution: The Not-For-Dummies Guide to the History, Technology, and Use of the Internet*. Ironbound Press, 2005.
- [7] A. Pacey. *La cultura de la tecnología*. FCE, México, 1990. Colección Ciencia y Tecnología.
- [8] C. H. Sterling and G. Shiers. *History of telecommunications technology: an annotated bibliography*. Scarecrow Press, 2000.



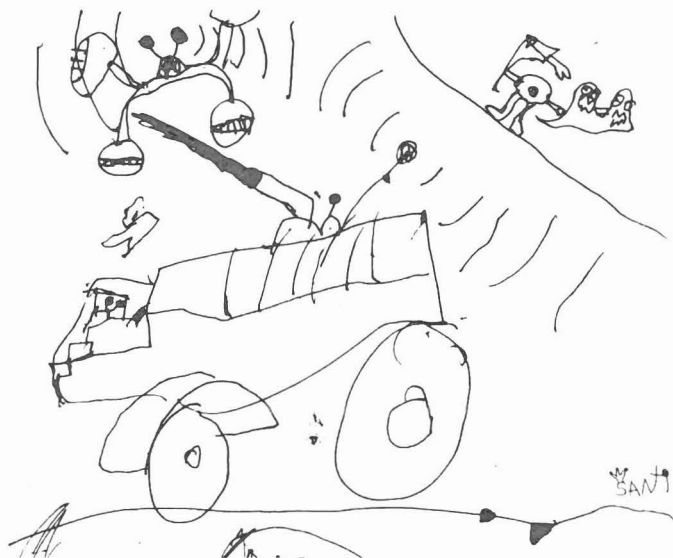
Escena 9: La respuesta está en la red

Laguna tenía una vena moralista que en ocasiones me daba sueño. Comenzó a decirme que odiaba usar las bases de datos con información sobre las personas y su vida privada pero que, en casos como este, ofrecían una salida para reconocer situaciones ilegales. Me habló del derecho a la privacidad y el respeto a los datos personales. En mi desesperación, estuve a punto de gritarle que me importaba un bledo sus consideraciones éticas, cuando recordé que no había presentado con todo cuidado mi declaración fiscal (súbitamente cambié de opinión: «Bendita privacidad, definitivamente debía garantizarse...» pensé), entonces le dije que estaba de acuerdo y que comprendía el dilema en el que se encontraba. Me desahugué y le confesé que el asunto de la chica del sombrero y el silencio de Violeta me tenían con los nervios de punta. Le externé a mi especial inquietud sobre Violeta y él se ofreció a acompañarme a buscarla a su casa esa misma tarde, después de nuestras pesquisas.

No fue necesario que nos presentáramos en la compañía telefónica, bastó con conseguir un password temporal, con una vigencia que se revocaría en un par de días. Entonces ingresamos desde su oficina a las bases de datos. Primero buscamos mi teléfono, luego identificamos al aparato que me había contactado regularmente en las pasadas semanas. La titular era Lenna S., extranjera, de profesión modelo y con domicilio en la colonia Roma. También encontramos que ese mismo aparato se había comunicado varias veces, luego del supuesto asesinato de la joven, con el teléfono perteneciente al fotógrafo, el que había regresado del extranjero, sólo para «reconocer» a la «víctima». Encontramos que las últimas llamadas fueron a mi teléfono, varios días antes de que se descubriera el cuerpo de la mujer asesinada en el flamante chalet-estudio de Cuajimalpa. Por último, pero no por ello menos sorprendente,

supimos que el teléfono nunca salió del domicilio de la tal Lenna, un departamento en la colonia Roma que rentaba completamente amueblado.

Luego, fuimos a buscar a Violeta. No la encontramos, pero sí tuvimos la noticia de que se había mudado, hace un par de meses, con su pareja a una cabaña que habían comprado cerca del «Desierto de los Leones».



Al principio, las redes de datos empleaban conexiones cableadas y las terminales eran, por definición, equipos fijos. Luego, se incorporaron enlaces inalámbricos, lo que posibilitó que las terminales adquirieran movilidad. Hoy se prevé que, muy pronto, no sólo las terminales podrán ser móviles sino también las mismas redes.

Capítulo 9

Redes de comunicación inalámbrica más allá de lo evidente

«Cualquier tecnología suficientemente avanzada es indistinguible de la magia»

Arthur C. Clarke

Dentro de los mayores retos que enfrentan los nuevos sistemas de comunicación inalámbrica destaca el problema de tener que compartir el mismo espacio físico entre cada vez más usuarios. En este capítulo se detalla esta situación y se describen algunas acciones que se han llevado a cabo para mitigar el problema. Primero, se plantea la posibilidad de usar el poder computacional de los modernos dispositivos de comunicación a fin de dotarlos con la capacidad para revisar el entorno y aprovechar, de la mejor forma posible, los recursos con los que se cuenta. Por último, se describe el novedoso paradigma de conexión en red *ad hoc* y la serie de vertientes a través de las que se está desarrollando. Revisemos pues estas novedosas tecnologías y los retos que enfrentan en la actualidad.

9.1. CONVERGENCIA TECNOLÓGICA

En las últimas décadas hemos sido testigos del enorme impacto que diversas tecnologías de la información y las comunicaciones han tenido en nuestra vida diaria. La sinergia lograda entre estas dos áreas (software computacional y hardware de comunicación electrónica) ha posibilitado la aparición de una gran cantidad de dispositivos y aplicaciones que ofrecen, tanto como demandan, poder de cómputo y ubicuidad de conexión a la red de datos y multimedios. Lo anterior, con gran impacto en aspectos tan variados de nuestra vida como la manera en la que interactuamos con nuestros semejantes, la forma en la que trabajamos e, incluso, cómo ocupamos nuestro tiempo libre.

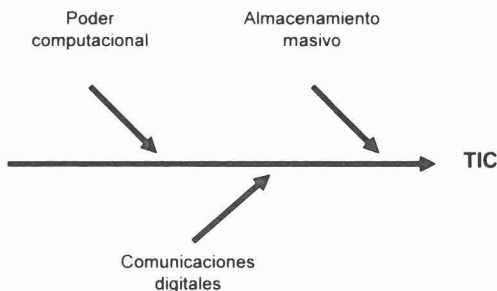


Figura 9.1: Tecnologías electrónicas clave, de bajo costo y reducidas dimensiones, que han favorecido el desarrollo de las actuales TIC.

Desde hace algunos años, la Ley de Moore nos permitió prever el estado actual, en cuanto al nivel de desempeño, de las computadoras y de las redes de comunicación que las conectan. Sin embargo, fue menos previsible el hecho de que los actuales usuarios de las computadoras preferirían dispositivos de cómputo, a la vez portátiles y poderosos, que les permitieran estar en contacto en cualquier momento y en todo lugar.

Dentro de los desarrollos que han permitido contar con los versátiles dispositivos mencionados anteriormente, además de un costo suficientemente bajo para ponerlos al alcance del público en general, se pueden identificar, al menos, las siguientes tres tecnologías clave. Primero, los avances en sistemas electrónicos digitales han permitido concentrar, en un espacio reducido, una gran capacidad de cómputo. Sin este poder computacional no sería posible ejecutar las aplicaciones informáticas que normalmente utilizamos en la vida diaria. Segundo, el desarrollo de las tecnologías de almacenamiento masivo ha permitido la producción, a bajo costo, de memorias de estado sólido y de discos duros con gran capacidad de almacenamiento. Esto ha permitido, por ejemplo, incorporar atractivas funciones de multimedia en dispositivos portátiles¹. Tercero, la tecnología que satisface la necesidad del usuario de mantenerse en contacto con sus familiares, amigos y compañeros en cualquier momento y en cualquier lugar. Esto ha motivado el desarrollo y la incorporación de varias opciones de comunicación, en un mismo dispositivo, a fin de que el usuario pueda permanecer comunicado.

1 Cabe recordar que las funciones de multimedia son muy demandantes, en cuanto a la cantidad de datos que deben manejar.

9.2. LA TELEFONÍA CELULAR MÁS LAS REDES DE DATOS:

UN ESTUCHE DE MONERÍAS

La evolución de la telefonía celular es un claro ejemplo del vertiginoso avance tecnológico y del gran éxito en la aceptación de nuevas tecnologías de comunicación. Por un lado, la infraestructura de los proveedores de servicios ha experimentado varios cambios a fin de mejorar la fidelidad de la voz, dar mayor seguridad a las comunicaciones y optimizar el uso de las bandas de frecuencias en las que operan. Esto último, para poder ofrecer nuevos servicios. Por otro lado, hemos visto una muy rápida evolución de los teléfonos celulares. Día con día vemos aparecer dispositivos con prestaciones cada vez mayores, en donde la función telefónica se encuentra mezclada junto con un cúmulo de muchas otras funciones.

Como resultado de esta tendencia, en un mismo aparato usualmente convergen las funciones de un teléfono celular, un asistente digital personal PDA², una cámara digital, un reproductor de música en formato digital (por ejemplo, el formato MP3³) y un receptor de radio comercial. Además, es común encontrar teléfonos con capacidad de conexión a redes inalámbricas, tanto de área local (digamos, tecnología WiFi) como de área personal (por ejemplo, tecnología Bluetooth). Los teléfonos de mayores prestaciones cuentan, además, con receptor de señales para geolocalización (por ejemplo, la tecnología GPS⁴) y diversos transductores o «sensores» (por ejemplo, acelerómetro y brújula [3]) lo que permite el desarrollo de diversas aplicaciones. Se puede concluir que la aparición y desarrollo de la telefonía celular hace algunas décadas desató, de manera indirecta, una serie de vertientes de desarrollo e innovación que continúan hasta nuestros días. Sin duda, uno de los mayores efectos del éxito de la telefonía celular es que permitió vislumbrar las posibilidades de las comunicaciones inalámbricas.

El posicionamiento de la Internet, como medio predilecto para el intercambio de información, y la preferencia de los usuarios por las comunicaciones inalámbricas motivaron el desarrollo de los sistemas que permitieran combinar ambas características. Sin embargo, el empleo de la infraestructura de telefonía celular para

2 Por las siglas del inglés *Personal Digital Assistant*.

3 El formato digital MP3 es una codificación con compresión específicamente diseñada para archivos de audio por el grupo *Moving Picture Experts Group* (MPEG) dentro de los estándares denominados como MPEG-1 y MPEG-2.

4 Por las siglas del inglés *Global Position Sytem*.

este propósito no era una solución viable ya que, a pesar de su extensa cobertura, el servicio se considera relativamente caro y lento. Esta situación explica el gran éxito de las redes locales de acceso inalámbrico (WLAN, por las siglas del inglés *Wireless Local Access Network*) en los últimos años. En comparación con la red celular, la red local inalámbrica permite altas velocidades de transmisión, su administración se realiza localmente y sus costos de conexión son relativamente bajos. Estos beneficios ya se habían obtenido con las redes locales cableadas, pero el uso de la modalidad inalámbrica ha permitido extender la cobertura de manera sencilla y económica ya que, al evitar la instalación de cables, los costos de la puesta en servicio son muy bajos. Más aún, en algunos sitios de valor histórico ni siquiera es permitido colocar cables. No es de extrañar, entonces, que por todas estas razones la red local inalámbrica sea actualmente la forma de acceso predilecta para conectarse a la Internet.

Existen otras tecnologías de comunicación de datos que han tenido un enorme éxito en los últimos años. Una de ellas es la arquitectura de comunicaciones en un entorno personal (WPAN, por las siglas del inglés *Wireless Personal Access Network*) a través del estándar Bluetooth. Esta tecnología se propuso originalmente para la conexión de periféricos a una computadora pero, en general, tiene gran potencial para su aplicación en la comunicación entre dispositivos separados por distancias cortas.

El firme posicionamiento de las tecnologías de comunicación mencionadas (es decir, telefonía celular, redes WLAN y WPAN) podría hacer pensar que todas nuestras necesidades de comunicaciones ya están cubiertas y que no hay alguna otra tecnología, visible en el horizonte a corto y mediano plazo, que pudiera lograr una aceptación tan amplia. Nada más alejado de la realidad. Como se expone más adelante en este capítulo, las redes de comunicación, y en particular las de comunicación inalámbrica, cuentan ya con diversas vertientes en desarrollo que, por ahora, van venciendo diversos obstáculos tecnológicos, normativos y de aceptación de los usuarios pero que, poco a poco, irán permeando en nuestras actividades habituales.

9.3. EL PROBLEMA DE LA ESCASEZ DEL ESPECTRO

Un modelo usualmente empleado para representar un sistema de comunicación consiste de un transmisor, un receptor y un medio de transmisión. En el caso de un sistema de comunicación inalámbrica, el medio de transmisión es el espacio

radioeléctrico. En este medio deben coexistir todos los servicios que se prestan en la actualidad pero también sería deseable que a través de éste se pudieran ofrecer los nuevos servicios que surgieran en el futuro. Afortunadamente, el espacio radioeléctrico se puede compartir entre múltiples usuarios si éstos transmiten en frecuencias diferentes. Entonces, el espacio radioeléctrico puede verse como un recurso compartido que consiste de todas las frecuencias en las que se pueden llevar a cabo comunicaciones inalámbricas. A este conjunto de frecuencias se le denomina el «espectro radioeléctrico».

Resulta ilustrativo revisar la serie de consideraciones que se deben tomar en cuenta para ofrecer un nuevo servicio de comunicaciones inalámbricas. Primeramente, una autoridad normativa debe establecer en qué banda de frecuencias debe operar éste. Con esta información, los ingenieros en electrónica deben diseñar los transmisores y receptores adecuados. El transmisor usualmente contiene un bloque que genera una señal sinusoidal dentro de la banda de frecuencias que ha sido asignada. Para lograr la transmisión de datos, las características de esta señal sinusoidal deben modificarse en función del valor que en específico se quiera enviar. Por ejemplo, la señal sinusoidal se puede escalar por un factor que dependa del valor del dato que se quiera transmitir. Así, las variaciones en la amplitud de la señal pueden codificar los datos a transmitir. Este es un ejemplo de un proceso que en términos generales se denomina «modulación». La señal resultante se envía a la antena para su propagación por el espacio libre. Por su parte, el receptor deberá ser capaz de captar la señal y extraer, a partir de ésta, los datos que se enviaron. El dispositivo receptor electrónico que realiza todos estos procesos se denomina simplemente como «radio».

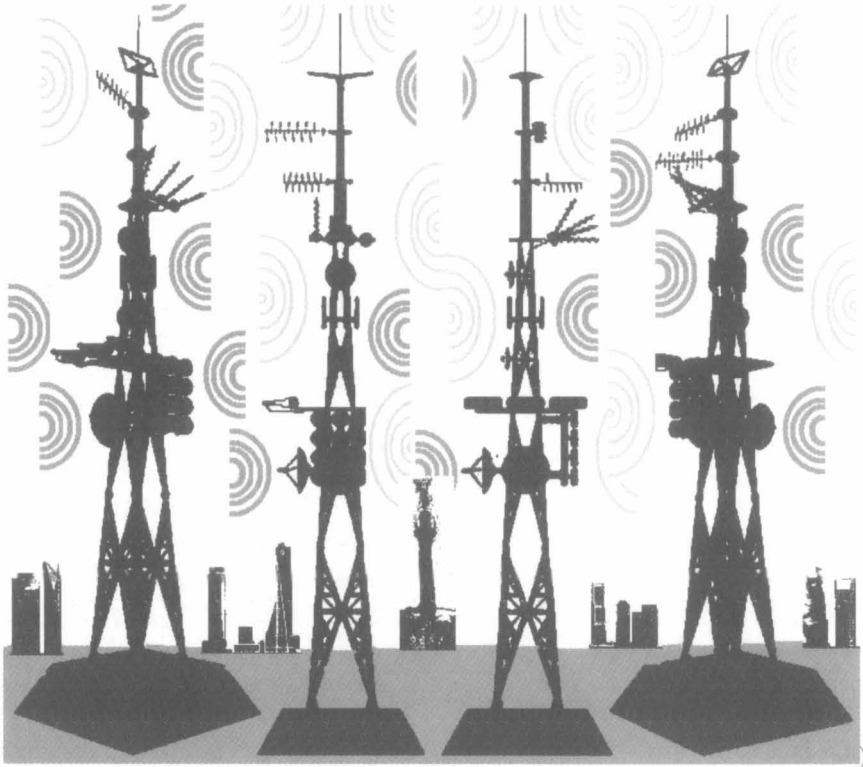


Figura 9.2: La escasez del espectro radioeléctrico.

Vale la pena revisar, con más detalle, otro factor que ha intervenido en el desarrollo histórico de los sistemas de comunicación inalámbrica: el papel que han desempeñado las autoridades normativas en la distribución del espectro. En los Estados Unidos, por ejemplo, para los años veinte del siglo pasado se habían generado ya las primeras tablas de asignación del espectro, las que llegaban hasta los 60 MHz [10]. En los inicios de la comunicación inalámbrica, la tecnología disponible no permitía la construcción de radios que hicieran un uso eficiente del espectro, por lo que las primeras asignaciones de bandas, a los diferentes servicios, fueron bastante generosas además de emplear amplias bandas de guarda para evitar interferencia entre canales adyacentes.

Adicionalmente, la autoridad normativa en aquel país, la FCC (del inglés *Federal Communications Commission*), asignó bloques de canales a diversas industrias, dejando aún menos espectro disponible. El problema con tales decisiones fue que se asignó el derecho de uso exclusivo del espectro, en ciertas bandas, a usuarios que en realidad no lo utilizaban o que, cuando mucho, lo hacían de manera esporádica. Algunos estudios muestran que, en un momento dado, el espectro puede llegar a ser utilizado en menos del 14% por los usuarios licenciados [9], mientras que algunos servicios se encarecen o simplemente no se pueden ofrecer debido a la falta de bandas libres (no licenciadas). Adicionalmente, las bandas que son más apropiadas para la comunicación móvil de banda ancha se encuentran en el intervalo entre 300 MHz y 3500 MHz [4]. Esta parte del espectro es muy valorada y frecuentemente da lugar a encarnizadas disputas entre licitadores cuando existe la posibilidad de obtener una licencia de uso en esta región. Esto se debe a que a frecuencias mayores no se observan características adecuadas de propagación. Por otro lado, a frecuencias menores se requieren antenas extremadamente grandes.

La escasez del espectro es un problema que no sólo afecta a los EE.UU., sino a muchos otros países en donde los servicios de banda ancha gozan de una creciente popularidad⁵. Por ello se han propuesto y puesto en práctica nuevas tecnologías y reformas normativas que tienen por objetivo hacer un uso más eficiente del espectro. Por ejemplo, en los años sesenta del siglo pasado, la FCC otorgaba canales de 25 kHz a 30 kHz para enlaces unidireccionales de voz [4]. En 1992 la misma FCC lanzó una iniciativa para reducir estos canales a 12.5 kHz y el plan es reducirlos en un futuro hasta 6.25 kHz. Otro ejemplo es el cambio de la televisión analógica a formato digital. La televisión digital es más eficiente, en cuanto al uso del espectro, por lo que este proceso de conversión logró liberar 108 MHz, casi un cuarto del ancho de banda total asignado a transmisiones de TV en los EE.UU. [4].

A pesar de los esfuerzos de las autoridades por liberar porciones del espectro, para posibilitar la prestación de nuevos servicios, parece que aún estamos muy lejos de resolver el problema de la escasez del espectro. El derecho de uso exclusivo en bandas del espectro sigue siendo un factor limitante, por lo que han surgido alternativas como la solución que se describe en la siguiente sección.

5 Se le sugiere al lector que revise el artículo [5] para conocer la forma en la que operan los procedimientos de regulación en México.

9.4. RADIOS PROGRAMABLES Y RADIOS COGNITIVOS

Parte del problema con el uso ineficiente del espectro es la gran cantidad de radios que se encuentran en operación y que no pueden modificar sus parámetros de operación. Esto impide, entre otras cosas, que sus usuarios puedan comunicarse utilizando otras regiones del espectro que eventualmente se encuentren desocupadas. Entonces, sería deseable tener un radio que fuera lo suficientemente flexible para adaptarse a un entorno en particular mediante el cambio, entre otros parámetros, de la frecuencia de operación, la potencia de transmisión y los métodos de modulación o codificación empleados.

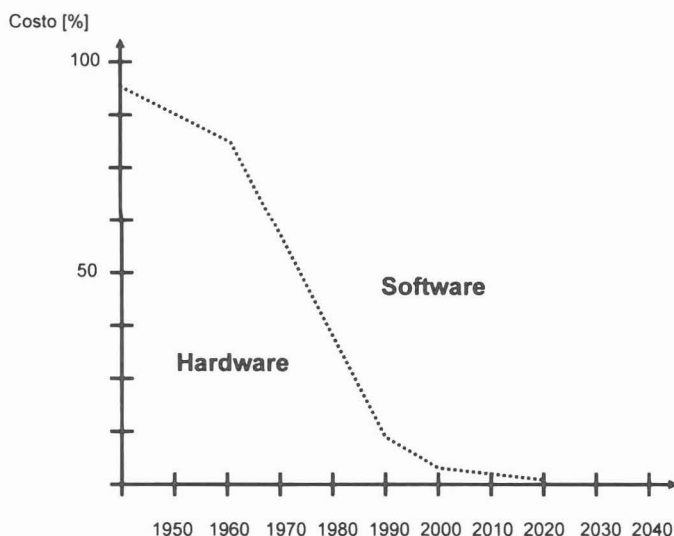


Figura 9.3: La evolución en la proporción de los componentes de *hardware* y *software* dentro de las TIC ha propiciado una disminución real del costo y una tendencia a que la mayor parte del trabajo sea realizada por programas.

Este es el caso de los radios de arquitectura configurable por *software* (SDR).

Gráfica obtenida por extrapolación de la curva original reportada en [6].

El radio de arquitectura configurable por software (SDR, del inglés *Software Defined Radio*) es un concepto que permite llevar a la práctica estas ideas [9]. Un radio programable puede transmitir en un amplio espectro de frecuencias ya que

procesa las señales por software y se puede adaptar para ello. Es decir, con una simple actualización del programa que lo controla, el radio puede sintonizarse a otras frecuencias, operar con otros protocolos o utilizar esquemas diferentes de modulación o decodificación. Así, en estos radios el usuario puede programar, a voluntad, los parámetros para la operación adecuada del radio.

El siguiente paso, en la evolución del radio, es el radio cognitivo. Un radio cognitivo es «consciente» del entorno que lo rodea y puede, de manera autónoma, tomar decisiones para seleccionar el conjunto de parámetros de operación que sean más adecuados, según el caso. Un radio cognitivo podría, por ejemplo, detectar qué bandas del espectro están desocupadas y utilizarlas hasta detectar la presencia de un usuario con licencia. Más aún, un radio cognitivo podría complementar esta función con algunas otras características, tales como efectuar acciones dependientes de su localización. Por ejemplo, si un usuario tuviera un teléfono celular con un radio cognitivo, el dispositivo podría conmutar automáticamente a modo vibratorio si detectara, a través de un servicio de geolocalización (por ejemplo, GPS), que se encuentra en el interior de una iglesia o un teatro [9]. La gama de posibilidades es muy amplia y no es de extrañar que esta tecnología sea actualmente objeto de enorme interés para investigadores y desarrolladores.

Algunos autores piensan que el radio cognitivo, combinado con otras tecnologías y ajustes en la legislación, podrán efectivamente resolver el problema de la escasez del espectro. Al liberarse el ancho de banda requerido para la prestación de nuevos servicios (por ejemplo, ver [8]), las posibilidades son muy extensas. Será interesante ver cómo se materializan en un futuro estas ideas. Enseguida, mencionaremos algunas otras tecnologías que podríamos ver en el futuro próximo.

9.5. REDES SIN INFRAESTRUCTURA FIJA O *AD HOC*

Las redes que se han mencionado hasta el momento comparten la característica en común de requerir la instalación de cierta infraestructura para poder operar. Por ejemplo, en el caso de la red de telefonía celular se requiere de una radio base con la cual se comuniquen los usuarios a fin de obtener el servicio. Por su parte, la red de área local WiFi requiere de la instalación de un punto de acceso para asociar y articular las estaciones inalámbricas que forman parte de la red. El punto de acceso se encarga de gestionar todas las comunicaciones y, además, puede servir como un punto de conexión con la Internet o con segmentos cableados de una red.

Finalmente, la red Bluetooth trabaja empleando una arquitectura maestro-esclavo, en donde se requiere de un dispositivo maestro para coordinar hasta siete dispositivos esclavos.

Las redes de tipo *ad hoc* rompen con el paradigma⁶ y la idea de que para tener servicios de comunicaciones se debe contar con hardware dedicado para gestionar el servicio. En este tipo de red no se requiere tener tal infraestructura de comunicaciones, ya que las mismas estaciones que la conforman se encargan de realizar todas las funciones correspondientes. Para esto, las estaciones deben coordinarse sin la intervención de una autoridad central. Además, los nodos deben tener igualdad de roles, lo que implica que cada uno de éstos puede ser el extremo de una conexión o, también, ser nodo de encaminamiento de paquetes de datos. Así, dos nodos que requieran comunicarse entre sí podrían hacerlo directamente o, igualmente, hacer uso de otros nodos de la red para la creación de una ruta que permita el envío de sus paquetes de datos, si es que están geográficamente muy separados.

Una red *ad hoc* puede ser de gran utilidad en una operación militar o en una zona de desastre en donde se requiera crear rápidamente una red de comunicación. Una aplicación menos crítica podría ser la creación de una red para el intercambio de archivos entre los asistentes a una reunión. En general, se puede afirmar que el campo de aplicación de este tipo de redes es aquel en el que se requiere tener una red de comunicaciones para una situación específica y sin dependencia de la infraestructura instalada en el lugar. Aunque en la actualidad el modo de operación *ad hoc* se tiene disponible en cualquier interfaz inalámbrica WiFi, resulta interesante observar que son pocos los usuarios que lo utilizan, a pesar de la gran diversidad de posibles aplicaciones. Esta situación parece deberse a que no hay aún alguna aplicación informática que explote exitosamente el enorme potencial que ofrece este tipo de redes.

En el ámbito de la investigación, este nuevo paradigma de las redes *ad hoc* se ha desarrollado y probado a través de diversas vertientes, algunas de las cuales se comentan a continuación.

6 Un paradigma es un modelo explicativo ampliamente aceptado, al igual que sus supuestos.

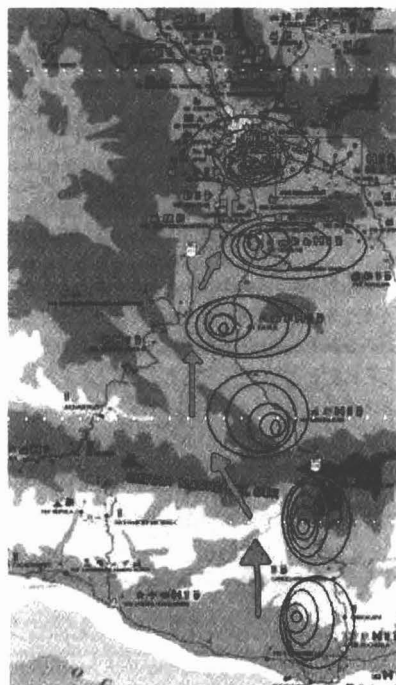


Figura 9.4: El nuevo paradigma: la red que adquiere movilidad. En la imagen se representa la cobertura de una posible red inalámbrica *ad hoc* que se va moviendo, siguiendo la ruta de una carretera, para mantener comunicados a los a los miembros de una operación de rescate que traslada, por tierra hacia zonas más seguras, a grupos de sobrevivientes de un hipotético desastre natural de dimensiones colosales (terremoto, maremoto, etc.).

9.5.1. Redes de sensores

La reciente aparición de transductores o «sensores» con radio transmisor integrado, de bajo consumo energético y costo reducido, permite aplicar el concepto de la instrumentación electrónica a diversas actividades de la vida diaria. Estos sensores tienen integrada la capacidad de auto-organizarse en una red *ad hoc*, por lo que se

pueden desplegar en un área de interés a fin de monitorizar algún parámetro y concentrar en un solo punto los datos recolectados. Más aún, existen nuevas técnicas para captar y almacenar energía, tomándola directamente del entorno, por lo que es factible que en un futuro los sensores no requieran cambios de batería para operar [1]. Es evidente que tal tecnología impactará virtualmente todos los aspectos de la vida contemporánea, desde tareas mundanas, tales como controlar la temperatura de un edificio, hasta propósitos ambiciosos, como proporcionar el soporte requerido para la implantación de métodos de agricultura de precisión.

En la actualidad existen algunas aplicaciones experimentales de estas redes formadas por unos cuantos nodos. Sin embargo, se piensa que en un futuro una red de sensores inalámbricos podría estar formada por cientos de miles de nodos. Algunos investigadores [8] piensan que es factible coleccionar datos de manera cooperativa a través de sensores incorporados en los teléfonos celulares. Esta información podría transmitirse a alguna institución o, bien, se podría compartir entre los miembros de alguna comunidad interesada. Por ejemplo, si las mediciones de polen tomadas por diferentes usuarios se compartieran, una persona alérgica podría saber en qué parte de la ciudad hay altas concentraciones. En los EE.UU. hay más de 260 millones de teléfonos celulares en operación, por lo que la cantidad de datos que se generaría por tal cantidad de sensores sería igualmente vasta, lo que también plantea nuevos retos para el procesamiento y transmisión de la información.

9.5.2. Redes MANET

La combinación de las redes *ad hoc* junto con estaciones que pueden desplazarse da lugar a las redes *ad hoc* móviles, también llamadas MANET (del inglés *mobile ad hoc networks*). Basta recordar la proliferación de los dispositivos de comunicaciones personales, de los que se habló anteriormente, para imaginar el enorme potencial de este tipo de redes.

Se podría imaginar que, al integrar una red MANET con miles de usuarios, se podrían prestar atractivos servicios sin recurrir a los proveedores de servicios de comunicación. Sin embargo, estudios recientes [11] no son tan optimistas y muestran que, al menos con la tecnología actual, en realidad esta idea sólo podría funcionar en redes de tamaño pequeño (10-20 nodos) y con rutas de dos o tres nodos intermedios. Un problema en estas redes es que, al estar todos los nodos en movi-

miento, las rutas que permitirían comunicar un par de nodos tendrían un tiempo de vida muy breve. Más aún, en un entorno de alta movilidad, ni siquiera sería posible encontrar rutas que duren un tiempo suficiente para tener un mínimo intercambio de datos [7]. Una posible solución para este problema es permitir la incorporación de algunos nodos fijos a la red, para formar el soporte de la misma a través de enlaces inalámbricos, lo que da lugar a las redes en malla (*mesh*, en inglés). Las redes en malla parecen una opción viable para extender de manera inalámbrica la cobertura de la Internet y proporcionar una gran cantidad de servicios (ver [2] y las referencias ahí contenidas). A pesar de las limitaciones actuales de la tecnología MANET, es muy probable que en un futuro próximo empecemos a ver este tipo de redes en aplicaciones específicas. Una variante de gran interés es la descrita en la siguiente sección.

9.5.3. Redes vehiculares o VANET

En años recientes se ha invertido un enorme esfuerzo para la creación de sistemas de transporte inteligentes o ITS (del inglés *intelligent transportation systems*). El desarrollo de este tipo de tecnología está motivado por la preocupación, a nivel mundial, acerca del enorme número de accidentes fatales que ocurren en las carreteras. Las redes *ad hoc* pueden constituir una parte fundamental de un ITS a través del concepto de una red vehicular o VANET (del inglés *vehicular ad hoc networks*). Una red VANET estaría formada por vehículos en movimiento y permitiría establecer comunicaciones entre los mismos vehículos, pero también entre éstos y algunos dispositivos auxiliares colocados a los lados del camino. Así, las redes VANET podrían servir para asistir a un conductor durante un viaje. La información que podría circular incluye la notificación de emergencias, advertencias de congestión, reportes de las condiciones del camino o cualquier otro evento relevante que se encontrara fuera del alcance visual del conductor. Las redes VANET tienen la ventaja de no tener restricciones en cuanto al peso, tamaño y duración de la batería de los radios con los que podrían operar. Sin embargo, no es difícil imaginar que el desarrollo de esta tecnología presenta enormes retos de investigación y desarrollo derivados principalmente de la gran velocidad con que usualmente se mueven de los vehículos. Aún así, actualmente existen algunos proyectos de desarrollo con este tipo de sistemas, principalmente en EE.UU. y Europa.

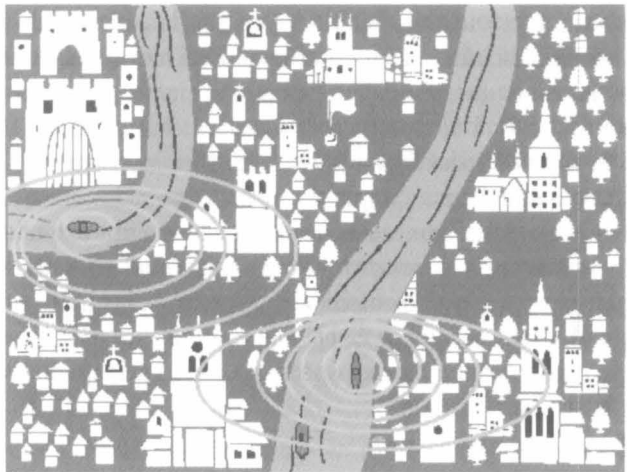


Figura 9.5: Una red VANET permitiría a los participantes de una competencia de canotaje de largo alcance intercambiar información referente a sus signos vitales, posición, velocidad, audio e imágenes sobre asuntos de interés común, tanto entre ellos como con la unidad móvil de apoyo que los sigue.

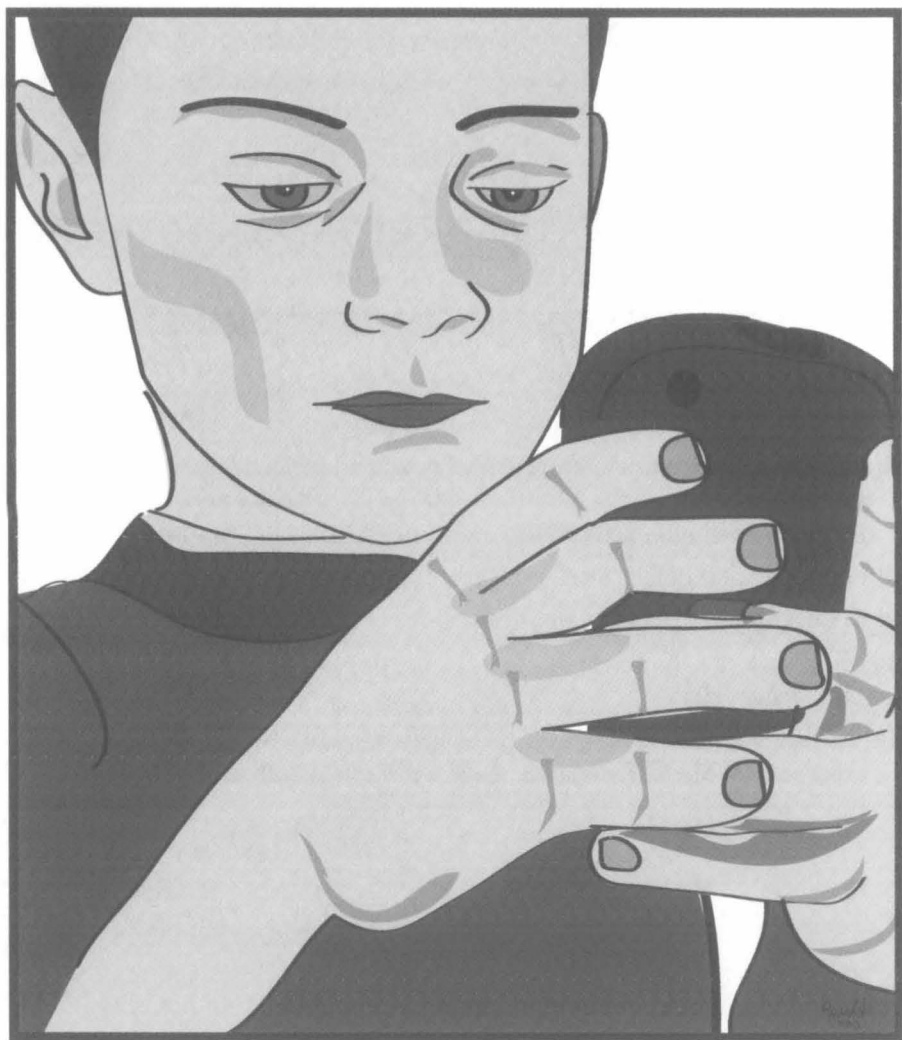
9.6. LA MAGIA DE LAS TIC

Una lista exhaustiva de las tecnologías que en el futuro podrían lograr amplia aceptación entre los usuarios sería extremadamente larga, sin embargo, los casos que aquí se han expuesto ilustran, suficientemente bien, el hecho de que la investigación en redes de comunicaciones inalámbricas es un área de intensa actividad en la actualidad. En efecto, las soluciones tecnológicas que vemos aparecer día a día, por ser novedosas y sorprendentes, también son indistinguibles de un buen truco de magia.

Más aún, las tecnologías de la información y de las comunicaciones, que al inicio eran exclusivamente utilizadas en actividades de ciencia e ingeniería, han permeado a prácticamente todos sectores de la sociedad moderna y su efecto se puede observar en la modificación de los hábitos tradicionales de comunicación, de trabajo y de entretenimiento, como veremos en el siguiente capítulo.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO 9

- [1] Sally Adee. Wireless sensors that live forever. *IEEE Spectrum*, 47(2), febrero 2010.
- [2] M. Conti and G. Silva. Multihop ad hoc networking: The reality. *IEEE Communications Magazine*, 45(4), abril 2007.
- [3] W. D. Jones. A compass in every smartphone. *IEEE Spectrum*, 47(2), febrero 2010.
- [4] M. Lazarus. The great spectrum famine. *IEEE Spectrum*, 47(10), octubre 2010. 210
- [5] J. J. Montero-Pascual. Una aproximación a la regulación del sector de las telecomunicaciones en México. *Revista de Derecho Privado*, (27), septiembrediciembre 1998.
- [6] W. Russell Newman. *El futuro de la audiencia masiva*. FCE, México, 2002.
- [7] M. Pascoe, J. Gomez, V. Rangel, M. Lopez, and F. Mendoza. A mobilitybased upper bound on route length in MANETs. *Telecommunication Systems*. Aceptado para publicación, 2012. doi:10.1007/s11235-011-9501-9.
- [8] P. Patel-Predd. Cellphones for science. *IEEE Spectrum*, 46(2), febrero 2009.
- [9] R. Rubenstein. Radios get smart. *IEEE Spectrum*, 44(2), febrero 2007.
- [10] G. Staple and K. Werbach. *The end of spectrum scarcity*. *IEEE Spectrum*, 41(3), marzo 2004.
- [11] C. Tschudin, P. Gunningberg, H. Lundgren, and E. Nordström. Lessons from experimental MANET research. *Ad Hoc Networks*, 3(2), marzo 2005.



Escena 10: Habían querido usarme como testigo de un montaje

Las pesquisas siguientes y los registros disponibles permitieron a Laguna confirmar nuestras peores sospechas: Violeta era la pareja sentimental del fotógrafo, el amante de Lenna. Violeta había sido utilizada y engañada por el fotógrafo, para quitarle sus ahorros, mediante la compra del chalet que quedaría alevosamente a su nombre y no al de ella. De hecho, en los registros bancarios apareció que había realizado una cuantiosa transferencia electrónica, desde su celular, a la cuenta del fotógrafo. Violeta vivió con el fotógrafo en el chalet hasta que Lenna terminó con su vida: eliminar a Violeta era el último pendiente en su plan.

Laguna concluyó que las imágenes de Lenna con el sombrero formaban parte de un montaje para despistar a la justicia. A mí, me había atrapado el jueguito del cartel en mi pared, había dejado correr mi imaginación y fui presa de mis propias fantasías, ¡que ingenuo fui! En calidad de cómplices, Lenna y su infame amante, aprovechando su conocimiento de fotógrafo experto, truquearon las imágenes para desvirtuar los hechos e invertir los lugares de la víctima y la victimaria.

El fotógrafo superpuso en el espejo la imagen de Lenna en penumbra, peinada como Violeta, fingiendo que le disparaba a la Lenna iluminada del sombrero. El fotógrafo negaría su infidelidad y la doble vida amorosa que llevaba. Mentiría declarando que vivía con Lenna en el chalet y sólo se referiría a Violeta como una supuesta «expareja». No proporcionaría el nombre verdadero de Violeta, para ganar tiempo, y daría su descripción hablada sabiendo que nunca podrían encontrarla. Se trataba de hacer pasar a Lenna por muerta, al fin y al cabo extranjera, y de culpar de su muerte a la referida expareja, al fin y al cabo con un nombre falso.

El plan inicial era montar una escena que sugiriera que Lenna había programado su teléfono para tomarse una atrevida secuencia de fotografías y enviarlas automáticamente, como composición de postales digitales, a un conveniente «testigo», un improvisado e ingenuo admirador: yo. Según su plan, el asesinato podría explicarse de la siguiente manera. Móvil: Enloquecida por los celos, la expareja cazaría a Lenna en el chalet durante la ausencia del fotógrafo. Oportunidad: La expareja descubriría a Lenna distraída frente al espejo. Medio: El fotógrafo declararía que no había encontrado su pistola y que su expareja era la única que sabía donde estaba.

Sin embargo, y a pesar de que ya me habían mandado las primeras imágenes, súbitamente cambiaron de plan para simplemente dejar el teléfono en la escena del crimen, a la vista de la policía. Parecería que el teléfono había capturado incidentalmente la silueta de la asesina y el testigo «virtual» (yo) ya no sería necesario. Con ello también se causaría confusión y se despistaría a la policía. Pensaron que era un plan perfecto. Con tal coartada, el fotógrafo vendería el chalet, tan pronto como pudiera, y se fugaría para alcanzar a Lenna en el extranjero.

Días antes del asesinato, Lenna había guardado el teléfono con las imágenes del montaje, el sombrero y la chalina de plumas que usó para la secuencia de fotos, todo dentro de una bolsa, en su departamento. En su momento, llevaría todo a la escena del crimen. Sin embargo, no contaba con el hijo de tres años de la mujer que le hacía la limpieza. El inquieto niño había encontrado el teléfono, apenas lo había guardado Lenna, tomándolo para jugar sin devolverlo.

El día fatal llegó y fue Lenna la que realmente irrumpió en el chalet para ultimar a Violeta. Llevó su cuerpo al estudio y, tras despojarla de su ropa y colocar a un lado el sombrero y la chalina, descubrió que el teléfono no estaba. Presa del pánico,

co y urgida por salir cuanto antes para no perder su vuelo a Europa, optó por abandonar la escena del crimen sin dejar el teléfono que contenía la falsa evidencia. Al fin y al cabo que, para desembarazarse del problema, lo único que requería era su boleto de avión y su pasaporte falso, y esos sí estaban en su lugar.

El niño había optado por esconder su nuevo «juguete» en el mismo departamento de Lenna, pero en otro lugar. La mujer de la limpieza sorprendió a su hijo jugando con el teléfono sólo hasta tiempo después, cuando limpiaba el departamento para el siguiente inquilino, ya que Lenna lo había desocupado. Así fue como seguí recibiendo las escenas del supuesto crimen. «No hay que subestimar el poder que hoy tiene un chico con la tecnología en sus manos», sentenció Laguna.



SANTI

Por el bien de las generaciones futuras, hoy debemos sensibilizarnos sobre las bondades del uso racional de toda tecnología con la que contemos. Particularmente, debemos procurar que las actuales TIC sean un medio para lograr una sociedad mejor comunicada y mejor informada, con un especial énfasis en la dignidad de las personas y en el respeto a toda forma de vida.

Capítulo 10

Implicaciones socioculturales y ambientales de las TIC

«El hombre no tiene naturaleza, tiene historia»

J. Ortega y Gasset (Historia como sistema)

Actualmente, en las regiones más tecnificadas del mundo, donde sus habitantes tienen el privilegio de atestiguar y participar en la denominada «Revolución de la Información», las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) cumplen un papel preponderante. Recordemos que las TIC incluyen a los denominados «nuevos» medios, en particular a la red de multimedios representada por la Internet. Pero, como en su momento los medios masivos tradicionales (TV y radio), hoy la red de multimedios se encuentra en el centro de una discusión que versa sobre su papel en nuestra sociedad, ya sea como agente liberador o como agente enajenante, en función de los contenidos y propósitos para los que es empleada por la inmensa mayoría de los usuarios. En este capítulo, trataremos estos y otros efectos socioculturales de las tecnologías de la información y las comunicaciones, además de algunas consideraciones ambientales, todo ello digno de tomarse en cuenta en las sociedades que han ido reduciendo la brecha tecnológica, en cuanto a las TIC se refiere. En lo sucesivo, el aglomerado de los «nuevos medios» y la «red de multimedios» será referido simplemente como la «red».

10.1. LAS PREFERENCIAS INDIVIDUALES Y EL USO DE LOS «NUEVOS» MEDIOS DE COMUNICACIÓN

En la historia de la humanidad, tres han sido los momentos que nos distanciaron de nuestros primos los simios: cuando nuestro ancestro homínido usó sus manos para fabricar herramientas, cuando el hombre primitivo inventó el lenguaje y cuando el ser humano creó lenguajes simbólicos y conceptos abstractos. El ser humano se caracteriza por su curiosidad, capacidad para resolver problemas y

creatividad en la fabricación de cosas útiles y valiosas (lo que define su inteligencia). También se caracteriza por el conjunto de usos y costumbres (folclore, visto como cultura popular) y el conjunto de lo más excelso de la obra humana (arte, filosofía y ciencia, vistos como cultura intelectual) y, en general, todo lo que alimenta a su espíritu.

A lo largo de la historia de la humanidad, los hombres han empleado su tiempo, primero, para resolver los aspectos que garantizan su supervivencia (alimentación y vivienda) y luego, si les restaba tiempo, la mayoría de ellos lo han usado para el descanso, el entretenimiento y el juego. Sin embargo, también es cierto que una minoría, más allá de la pura recreación, también ha dedicado su tiempo libre para observar, crear, filosofar y atesorar conocimiento. En nuestro mundo actual se sigue observando este patrón de preferencias individuales: está comprobado que la mayoría de las personas dedican su tiempo libre a la pasividad, al entretenimiento y al juego, mientras que solamente una minoría (estereotipados como «mentes brillantes», «eruditos» y «genios») dedican su tiempo libre (además de su jornada laboral) a labores educativas, formativas, creativas y de ingenio que, al final, son benéficas para toda la sociedad en su conjunto.

Desde su origen, además de su potencial para el entretenimiento, los medios masivos tradicionales, como la radio y la televisión, han sido valorados por sus efectos positivos y negativos: ya sea como un medio liberador, mediante la transmisión de contenidos educativos, o como un medio opresor, mediante la transmisión de mensajes enajenantes y de adoctrinamiento ideológico. Por ello, las relaciones entre los medios masivos y las preferencias individuales han sido objeto de gran interés, sobre todo para los estudiosos de las ciencias sociales [8].

Similarmente a lo que ocurre con los medios masivos tradicionales, todo indica que son las preferencias, hábitos y vicios de los usuarios (audiencias) los factores que definirán los contenidos y su proporción relativa respecto del total de la «información» disponible en la red. Empero, ¿para qué se usa hoy la red? Podemos identificar cuatro aplicaciones:

- Como medio de comunicación. Para comunicaciones persona-persona, entre grupos o en forma masiva, mediante texto, audio e imagen. Incluso, puede ser portadora de los servicios de comunicación tradicionales como correo, telefonía, radio y televisión.

- Como gestor de servicios. Para brindar y solicitar servicios, realizar compras y pagos, automatizando y haciendo más eficientes las actividades productivas.
- Como fuente de información. Para buscar, obtener y actualizar información especializada, así como para adquirir conocimientos y entrenamiento de forma individualizada e interactiva.
- Como fuente de entretenimiento. Al permitir la búsqueda de tópicos de interés personal que abarcan desde pasatiempos hasta vicios, incluyendo video-juegos, videos, audios, música, imágenes e incluso literatura especializada, entre otros.

Algunas preguntas interesantes son ¿qué proporción del tiempo total de uso de la red se emplea para cada uno de los propósitos anteriores?, en promedio ¿qué proporción de la jornada se dedica a trabajar, estudiar y al esparcimiento? y, aunque parezca contradictorio, en cada una de estas facetas de la jornada ¿qué proporción del tiempo de uso de la red se dedica a comunicación, servicios, información y entretenimiento? Más importante, ¿el tiempo dedicado a «comunicación» o «información» es útil o es un mero «matar el tiempo»?

Para entender los hábitos observados en el uso de la red y bosquejar sus efectos socioculturales y ambientales, conviene conocer cuáles son los hábitos y preferencias observados en los usuarios de los medios tradicionales. Hoy observamos que las nuevas generaciones son verdaderas encarnaciones de lo que Giovanni Sartori [10] denomina como los «digigeneracionales», los hombres de la era digital. Y lo son por partida doble: por una parte son usuarios intensivos de las TIC para el procesamiento de la información con representación numérica (procesamiento digital) y, por la otra, son adictos a «jugar», «comunicarse» e «informarse», a toda hora y en todo lugar, mediante sus terminales móviles con pantalla sensible al tacto (*touch screens*). Así, en todo el mundo se observa que los jóvenes, con posibilidades de tener uno de estos dispositivos, pasan una gran cantidad de su tiempo (libre, de trabajo, de escuela y de transporte) literalmente «conectados» a la red, ensimismados y «digitando» mandos y mensajes en la pantalla de su terminal. Determinar si esto es bueno o es malo, no es el propósito de este trabajo, pero sí tratar de entender, aunque no de justificar, el fenómeno en términos de las preferencias de los usuarios de estas tecnologías.



Figura 10.1: El hombre «digigeneracional».

10.2. LA SEDUCCIÓN DE LOS MEDIOS

En el cuento *El efecto Smellville*, de Fabrizio Mejía Madrid [7], un genio de nombre Canalizo inventa un televisor con olor para volverlo más real, inaugurando con ello la era del «*Smell Broadcast System*» que, por supuesto, era de tecnología digital: «Los bits son lo de hoy...» afirma el protagonista, amigo de Canalizo. Al final, el protagonista prueba el invento y descubre de manera dramática los efectos adictivos de este nuevo medio electrónico. Los detractores de los medios de comunicación masivos afirman, con base en la evidencia estudiada, que éstos son exitosos seductores, adictivamente apaciguadores y esencialmente hostiles al pluralismo social. ¿Aplica este juicio a la red y sus usuarios?

Respecto de la red, la evidencia indica que predominan los fines de entretenimiento más que los de educación o productivos, con el correspondiente uso irracional de la energía empleada, el desperdicio de los recursos naturales y la contaminación que ello implica. En este punto es conveniente aclarar lo que se entiende por educación, ya que éste es uno de los principales supuestos de un sistema democrático, donde la educación debe ser acrecentada para ofrecer mejores oportunidades a todos, siempre que la educación forme una opinión autónoma,

estructurada, plural y capaz de ejercer control sobre las instituciones [9], y todo ello a fin de lograr un gobierno verdaderamente democrático (al que «se mande» y, al mismo tiempo, «se obedezca»). No se considera aquí como educación la que, siendo educación de masas (la impartida uniformemente por organismos hegemónicos, públicos o privados, en la que no interesa la atención individual), simplifica verdades complejas, transmite verdades a medias, mitos comunes y mensajes persuasivos para dar la certeza de que todo está bien [8]. De igual manera, se considera información «positiva» a aquellos contenidos verdaderos y convenientes, respetuosos de la justicia, los valores, derechos y dignidad del Hombre, así como los comprometidos con el uso racional y responsable de los recursos de la naturaleza.

Rusell Newman [8] postula que los efectos socioculturales de los nuevos medios son parecidos a los de los antiguos, ya que los usuarios de ambos (antiguas y nuevas audiencias) no han modificado sus preferencias y hábitos a lo largo del tiempo. Newman reporta que la psicología de las audiencias siempre se ha caracterizado por hábitos como la pasividad y la baja atención, y preferencias en temas como el sexo, la violencia y el sensacionalismo. De hecho, los productores de contenidos conocen bien estos hábitos y preferencias y los han sabido explotar comercialmente. Así, Newman afirma que no se trata de ninguna conspiración de los magnates de la comunicación para promover pésimos contenidos, sino únicamente el resultado de un problema estructural donde, debido a las leyes del mercado, las preferencias y hábitos de la audiencia llevan a que predominen contenidos de baja calidad: sensacionalistas, trillados, sentimentales, violentos y simplistas.

De acuerdo con Newman, los «nuevos» medios de comunicación, que engloban a las denominadas tecnologías de la información y las telecomunicaciones, se caracterizan por:

- Mayor velocidad. Los datos pueden viajar en «tiempo real».
- Interconectividad. Los usuarios pueden conectarse entre ellos.
- Bidireccionalidad. Los usuarios reciben y transmiten datos.
- Interactividad. Los usuarios pueden controlar el proceso.
- Multimodalidad. Los datos que viajan pueden representar audio, imagen o texto.

Son justamente estas características de la red las que la posibilitan como una poderosa herramienta de comunicación, de trabajo, de educación y de formación cívica. No obstante, con base en la psicología y en las preferencias de los usuarios, es muy probable que este potencial constructivo sea aprovechado únicamente por una minoría, esa que es tan importante para la sociedad pero tan poco relevante para los mercados, como lo fueron en su momento aquellos espíritus inquietos que buscaron libros en las bibliotecas, consiguieron telescopios, máquinas de escribir y aprendieron a usar tablas matemáticas o calculadoras electrónicas [8].

Por otro lado, mientras los medios tradicionales, como la televisión y la radio, producen contenidos homogéneos y son transmitidos unidireccionalmente para una gran audiencia (y que, por lo mismo, se conocen como medios masivos), los nuevos medios pueden cubrir las necesidades de comunicación insatisfechas, en lo que Tesuro Tomita denominó como el «vacío medial» (ver figura 10.2). El vacío medial de Tomita se encuentra localizado en un espacio bidimensional delimitado por dos ejes: el número de personas comunicadas y la latencia de la comunicación. Así, el vacío medial que puede cubrir la red incluye los requerimientos de usuarios insatisfechos, ya sea por la carencia de temas de interés, por la carencia de grupos de discusión o por la latencia en el tiempo de respuesta. En otras palabras, el vacío medial de Tomita surge debido a la existencia de necesidades que no satisfacen ni la comunicación personal con cartas, ni la comunicación personal con el teléfono, ni el formato y distribución de revistas y libros, ni mucho menos la información unidireccional y homogénea de los periódicos, la radio y la televisión.

Actualmente, los contenidos alojados en la Internet y su eventual recuperación mediante «navegadores» en computadoras y dispositivos móviles (incluso teléfonos celulares) permiten satisfacer las necesidades del vacío medial de Tomita. Aún más, también observamos que la red funge como un distribuidor complementario de los servicios de comunicación tradicionales como el correo, el teléfono, así como de contenidos de radio, televisión y de revistas especializadas. Así, surge la pregunta ¿son estos potenciales de la red plenamente aprovechados por la mayoría de los usuarios con fines constructivos, útiles y productivos?

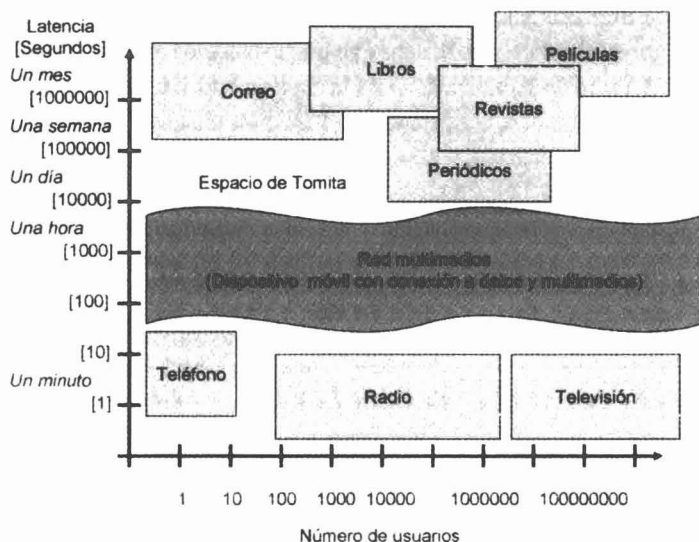


Figura 10.2: La red en el vacío medial de Tomita. Adaptado y actualizado partir del original reportado por Newman en [8]

Sartori, en su ensayo [10], analiza la naturaleza del hombre racional y menciona algunos aspectos cualitativos que pueden ser polos de atracción para derivar en individuos del tipo *Homo ludens*, el hombre que juega; el *Homo loquax*, el hombre que continuamente habla consigo mismo; y el *Homo videns*, el hombre que es más visual que conceptual. Sartori alerta sobre los riesgos socioculturales de la marcada preferencia, observada en las personas comunes, en favor del juego y lo visual, debido a una percepción generalizada que contrapone la facilidad de ver imágenes contra la complejidad de conceptualizar el lenguaje escrito. Por su parte, Newman [8] reporta que la evidencia confirma que las audiencias son pasivas y de poca atención y que no están muy dispuestas a buscar información, aunque sea de su interés, si el costo de hacerlo representa un esfuerzo adicional, comparado con el hecho de tomar, de manera pasiva y sin comprometer la atención, la información seleccionada y distribuida unilateralmente por los productores de los medios.

De hecho y de manera dramática, parece que se concreta el mundo imaginado por MacLuhan, en 1964, y expresado en su famosa frase sobre la «aldea global»

donde, según la interpretación de Balle y Eymery [2], anunciaba «el fin del infierno [sic] del pensamiento escrito y abstracto», ya que los medios de comunicación electrónicos permitirían una «retribalización» de la humanidad y una mejor comunicación de unos con otros. Bien por ello si, como dice Newman [8], esto implica una progresiva comprensión y comunicación, pero no tan bueno si esto presagia una proliferación de dinámicas comerciales homogeneizantes que van en contra de un proceso político sano, de la conservación de la identidad y del fortalecimiento de los deberes cívicos. Mal también si, como dice Sartori [10], ello implica un retroceso del hombre simbólico a un hombre puramente visual o, peor aún, si los contenidos comunicados son de desinformación o subinformación que, no obstante, permite a todo mundo opinar sobre todo aunque no sepan bien de nada. Todos estos efectos perniciosos son especialmente difíciles de controlar, sobre todo en los países «democráticos» y liberales, donde el concepto de censura o el papel rector del estado es mal visto.

Newman también expone los resultados de encuestas donde las audiencias, después de contrastar sus percepciones ante contenidos audio-visuales y de texto escrito, califican como más placentero y memorable a lo audio-visual, a la vez que perciben como más demandantes de concentración y pensamiento a los textos escritos [8]. Estas percepciones y preferencias, presentes en la mayoría de los usuarios (audiencia) de los medios, pero sobre todo los hábitos de pasividad y falta de atención, es lo que los hace susceptibles a:

1. Sobreexposición en tiempo
2. Sobrecarga de información
3. Persuasión sutil
4. Adicción

Estos riesgos han sido ampliamente estudiados, documentados y discutidos en lo referente a los medios masivos de comunicación, dadas sus características de comunicación de contenidos unidireccionales y homogeneizantes [8, 2]. Especial preocupación han expresado los estudiosos del tema sobre los efectos adoctrinantes, más que educativos y cívicos, de los medios masivos en perjuicio de un proceso político plural y democrático. Paradójicamente, es en algunos de los países más liberales donde se observan efectos homogeneizantes contrarios a los ideales de pluralidad e individualidad que tanto enarbolan. El fenómeno se presenta justo debido a la libertad de los medios que se rigen por las leyes del mercado. Esta situación hizo

afirmar a Karl Popper, un reconocido filósofo liberal, que «Una democracia no puede existir si no se somete a control la televisión» [9].

En el caso de la red, para los más optimistas (convencidos de los beneficios liberadores planteados por Vannevar Bush y su utópico MEMEX ¹ [8]) sus posibilidades de libertad de expresión la convierten en el catalizador de un sistema democrático y plural, siempre que se garantice que los contenidos del medio sean esencialmente administrados por los individuos de una sociedad diversa. Con ello se logra la satisfacción de necesidades de información individualizada, sobre intereses específicos, y se fomenta la conservación de la identidad y de los deberes cívicos. En contraparte, los más pesimistas (en alerta por los riesgos de adoctrinamiento totalitario planteados por George Orwell y su novela *1984*) alertan sobre los riesgos de que estos medios sean controlados totalmente por el estado o por el poder económico, en cuyo caso los contenidos tienden a ser homogeneizantes, ya sea por razones de adoctrinamiento ideológico o por intereses mercantiles.

En 1945, Vannevar Bush planteó la posibilidad de una biblioteca universal, que denominó MEMEX, con base en la tecnología de las computadoras y el procesamiento de la información. Vannevar Bush imaginó una terminal a la que se podía proporcionar preguntas escritas sobre cualquier tema y obtener respuestas correctas.

Por su parte, en 1949, George Orwell planteó en su novela *1984* un escenario futurista y apocalíptico donde la tecnología es aprovechada por un estado totalitario para transmitir propaganda que, por una parte, adoctrina a su población y legitima sus acciones militares y, por la otra, le permite espiar a cada uno de sus habitantes para detectar y suprimir a los detractores del sistema.

Técnicamente hablando, ambas posibilidades, tanto la de Bush como la de Orwell, son hoy una realidad. Entonces, la pregunta es ¿los efectos de la red tendrán un efecto neto positivo promovido por usuarios activos mejor informados y educados? o ¿los efectos positivos se diluirán en un efecto neto neutro, o incluso negativo, debido a los hábitos de usuarios pasivos sin atención y con adicción por lo lúdico? De nuevo, la respuesta está en las preferencias de la mayoría de los individuos de una sociedad.

Lo cierto es que, a diferencia de los medios masivos, la red está soportada en gran parte por contribuciones de individuos, y por ello sí puede responder a la

¹ Ver sección 1.6 y nota aclaratoria, en el capítulo 1 de este libro.

demanda y los intereses de las minorías que se interesan en información veraz y plural, sobre asuntos de interés público, personales, así como en contenidos de calidad, donde el componente de violencia, sexo y sensacionalismo sean prescindibles. El precio que deberán pagar estas minorías, con intereses más nobles, es el esfuerzo requerido para la búsqueda en un mar de datos con información, desinformación e incluso mentiras. Ciertamente, un mar informático inundado, sobre todo, con los contenidos preferidos por las inmensas mayorías.

10.3. LAS NO TAN VERDES TIC

Para finalizar, nos enfocaremos en el *Homo loquax* que observamos por todos lados, paradójicamente solitario y ensimismado en su terminal: jugando, «comunicándose» y navegando en la red, digitando mensajes, muchos de ellos con alta probabilidad de ser triviales e intrascendentes. La reflexión sería si, amen sus preferencias, este *Homo loquax* está consciente de que hablar por celular, navegar en la Internet y en las redes sociales, así como enviar correos y mensajes electrónicos tiene una repercusión de consumo energético, con las correspondientes emisiones de gases contaminantes y consumo de recursos preciosos como el agua, y si, por este motivo, este proceder es ecológicamente correcto.

Hoy, más que nunca, en la sociedad existe una influyente actividad de organizaciones, tanto civiles como gubernamentales, que tratan de concientizar a los usuarios de los beneficios, para el medio ambiente, de hacer un uso racional y justificado de los medios de comunicación electrónica. Así, surge el concepto de la «huella del carbono», que es la totalidad de gases de efecto invernadero (GEI) emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, organización, evento o producto [11]. Entonces, resulta interesante hacer aquí una rápida revisión de los efectos sobre el medio ambiente de las tecnologías de la información más populares actualmente. Esperamos que ello contribuya para que hagamos un uso más racional de las mismas.

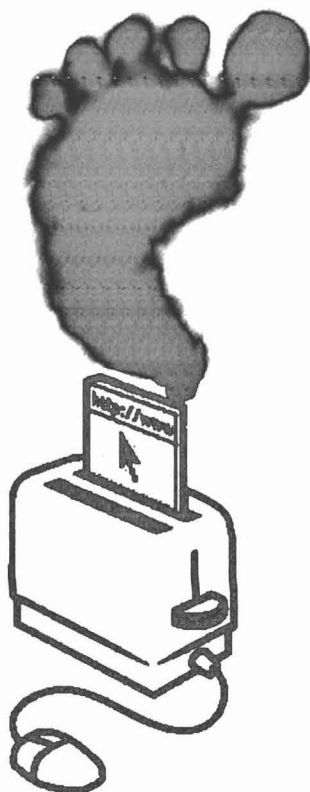


Figura 10.3: La «huella del carbono» de las TIC.

Concediendo que las cifras publicadas en la red son aproximadamente correctas [4], con base en los datos proporcionados por el reporte de McAfee [6] y el libro de Mike Berners-Lee [3], tenemos los siguientes efectos contaminantes de las, no tan limpias, tecnologías de la información. Para la Internet tenemos:

- A un mensaje spam le corresponde una emisión de 0.3 g de CO_2 , que equivale a recorrer un metro en automóvil.
- A un mensaje personal de correo electrónico le corresponde una emisión de 4g de CO_2 , que equivale a recorrer 13 metros en automóvil.

- A un mensaje personal de correo electrónico, con un archivo grande adjunto, le corresponde una emisión de 50g de CO_2 , que equivale a recorrer 166 metros en automóvil.
- A toda la Internet en un año le corresponde una emisión de 300 millones de toneladas de CO_2 , que equivale a recorrer 25 millones de veces la vuelta al mundo en automóvil, o el equivalente a todo el petróleo, carbón y gas quemado en Turquía y Polonia en un año.

Exclusivamente para la telefonía celular, tenemos:

- A un mensaje de texto le corresponde una emisión de 0.014g de CO_2 , que equivale a recorrer 5 centímetros en automóvil.
- A una llamada telefónica le corresponde una emisión de 190g de CO_2 , que equivale a recorrer 633 metros en automóvil.

Es de especial interés el caso de las redes sociales virtuales. Específicamente en la red social denominada como Facebook, al finalizar marzo de 2013, contaba con más de 1,100 millones de usuarios registrados en el mundo, de los que más de 750 millones ingresan mediante sus teléfonos móviles [5]. Si suponemos que se suben en promedio 300 millones de fotos al día, únicamente desde computadoras personales y que cada envío corresponde a un correo electrónico personal, podemos estimar, de manera aproximada y conservadora, que las fotos subidas diariamente a Facebook equivalen a una emisión de 1,200 toneladas de CO_2 , que equivale a recorrer 88,800 vueltas al mundo en automóvil.

Como referencia, tenemos la huella de carbono que resulta de enviar una carta por correo tradicional, a la que le corresponde una emisión de 200g de CO_2 y que equivale a recorrer 666 metros en automóvil. En apariencia, las TIC son más limpias que usar el correo tradicional, pero esto es sólo cierto siempre que la intensidad en el uso de las TIC no supere un umbral en la cantidad de información enviada. Por ejemplo, si un usuario envía 50 correos electrónicos, esto equivale justamente al efecto de enviar una sola carta por correo. El punto es que en el pasado, antes del abaratamiento y el uso masivo de las TIC, la gente escribía cartas con moderación, pero en la actualidad es muy común que una sola persona en una semana envíe más de 50 correos electrónicos, y otros tantos mensajes de texto, muchos de ellos con posibles contenidos innecesarios o triviales.

Las emisiones totales de CO_2 debidas al uso mundial de la Internet corresponden a cerca del 2% de las emisiones totales producidas por la quema de combustibles fósiles a nivel global y se espera que aumente a 6% en el 2030. Todos estos porcentajes son significativos si consideramos que se trata de tecnologías que tradicionalmente se habían considerado como «limpias».

Más aún, existe un gran costo oculto, relacionado con la generación de energía, que pocas veces se considera: el creciente consumo de agua dulce. En casi cualquier planta generadora de energía (ya sea térmica, hidroeléctrica, geotérmica, etc.), se emplea agua durante el proceso, de alguna u otra manera, de tal manera que sería imposible operar sin ella. Debido a esto, el agua se desvía de sus causas originales y deja de llegar a sus antiguas cuencas (zonas agrícolas, incluso poblaciones) convirtiéndolas prácticamente en zonas áridas. Por ejemplo, una simple búsqueda mediante el portal de *Google* implica el consumo de cerca de 0.5 ml de agua. Así, los más de 300 millones de búsquedas promedio al día consumirán más de 150,000 litros de agua. Esto es una enorme cantidad de agua. La demanda de agua dulce para la generación de energía está llegando a su límite. Únicamente en los EE.UU., todos los días se ocupan más de 500,000 millones de litros de agua dulce en sus plantas generadoras: más de dos veces el caudal del río Nilo [1].

Toda esta situación debería disuadirnos de abusar de las TIC, sobre todo si no existe un propósito de real utilidad, independientemente de nuestras preferencias, inclinaciones y adicciones tecnológicas. Así, el *Homo loquax* moderno debería considerar, antes de enviar un mensaje trivial a la red, la filosofía del silencio expresada en forma simple por la siguiente historia de dominio público. Un joven discípulo dijo a un sabio filósofo:

- Maestro, ¿sabes lo que dicen de ti?
- Un momento, dice el maestro. ¿Ya has pasado por las tres puertas lo que vas a decirme?
- ¿Por las tres puertas? Responde el joven.
- El maestro continúa.
- ¿Estás seguro de lo que vas a decirme es verdad?
- Yo he oído...
- Pues esta es la primera puerta.

- ¿Lo que vas a decirme es bueno?
- No, no es agradable.
- Esta es la segunda puerta.
- ¿Lo que vas a decirme es necesario?
- No, de hecho...
- Esta es la tercera puerta.
- Y dime, si lo que tienes en mente no sabes si es verdad, no es bueno y no es necesario ¿por qué quieres decírmelo?, ¿no sería mejor olvidarlo para siempre?

10.4. NO TODO ES ROSA, NI TODO ES NEGRO

El aprovechamiento personal del potencial de las actuales TIC depende únicamente de las preferencias individuales. Está demostrado que la mayoría de las personas presentan baja atención y una gran pasividad. No obstante, las personas que tengan intereses intelectuales o de entretenimiento insatisfechos, con un mínimo de proactividad podrán encontrar en la red una fuente enorme, aunque agobiante, de datos: muchos de ellos conformando información, desinformación e incluso mentiras, que deberán ser analizados y filtrados antes de ser considerados como plenamente satisfactorios. Pero, la forma en que se debe filtrar tal cantidad de información es hoy un gran reto, tanto para la herramienta computacional de búsqueda de información, en cuanto a su propia construcción, como para los métodos y técnicas que se usan para catalogar a la misma.

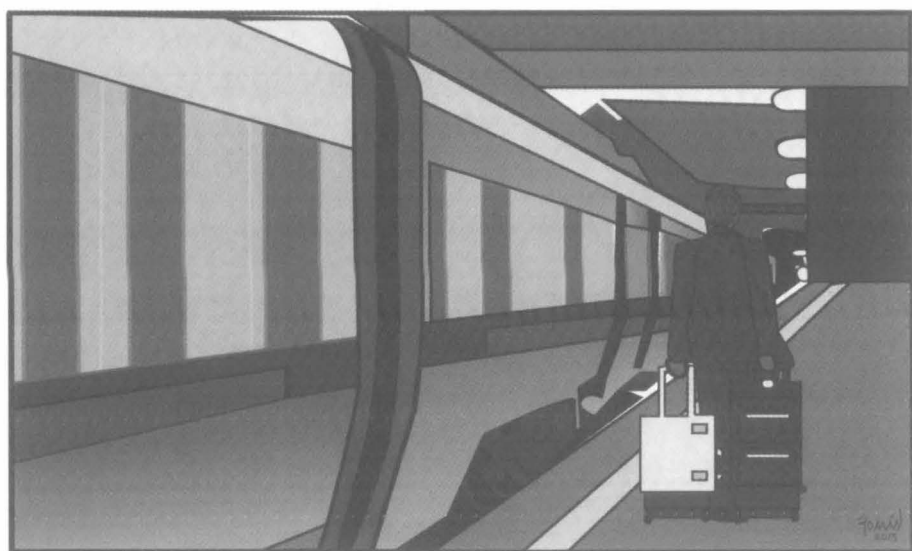
Por otro lado, hoy tenemos tecnologías de comunicación e información relativamente limpias, si se comparan con las antiguas, pero también tenemos un abuso de ellas y, por el volumen implicado, resultan ser considerablemente más contaminantes cuando se toma en cuenta el efecto global. Así, es importante formar ciudadanos responsables, que consideren las repercusiones ambientales de sus preferencias y hábitos en el uso de las TIC. Si bien es cierto que no es fácil influir en la forma en la que se aprovechan las TIC, por lo menos podemos tratar de concientizar a la población, en su calidad de usuarios de estas tecnologías, para que hagan un uso racional de las mismas.



Figura 10.4: La filosofía del silencio, un tema de reflexión muy apropiado para un sabio sufi y sus discípulos, pero también para nosotros.

BIBLIOGRAFÍA DEL CAPÍTULO 10

- [1] The coming clash between water and energy. *IEEE Spectrum Magazine*, junio 2010.
- [2] Francis Balle and Gérard Eymery. *Los nuevos medios de comunicación masiva*. FCE, México, 1993.
- [3] Mike Berners-Lee. How Bad Are Bananas?: *The carbon footprint of everything*. Profile Books, 2010.
- [4] Eden-project. What's your carbon footprint? Eden project web page: <http://www.edenproject.com/whats-it-all-about/climate-and-environment/show-me-the-carbon.php>, 2012. Consultado el 3 julio de 2012.
- [5] Facebook. Facebook statistics. Facebook web page: <http://newsroom.fb.com/Key-Facts>, 2013. Consultado el 23 mayo de 2013.
- [6] McAfee and ICF. Informe sobre la huella de carbono del spam por correo electrónico. McAfee/ICF report: <http://eu.vocuspr.com/ViewAttachment.aspx?EID=SVKCadtpAhOCUuahAzzOIhDjAmAaPIy2JF5OfEY8sAs\%3d>, 2009. Consultado el 3 julio de 2012.
- [7] Fabrizio Mejía-Madrid and et al. *Para leer de boleto en el metro 9*, capítulo El efecto Smellville. Gobierno del Distrito Federal, México, 2007. Antología disponible en <http://www.cultura.df.gob.mx/index.php/component/content/article/305-antologias-de-boleto>. Consultado el 3 julio de 2012
- [8] W. Russell Newman. *El futuro de la audiencia masiva*. FCE, México, 2002.
- [9] K. Popper, J. Condry, C. Clark, and K. Wojtyla. La televisión es mala maestra, capítulo Introducción: Popper, el Papa y la televisión. FCE, México, 2002. Introd. de Giancarlo Boseti.
- [10] Giovanni Sartori. *Homo videns: La sociedad teledirigida*. Punto de lectura, México, 2010.
- [11] T. Wiedmann and J. Minx. A definition of 'carbon footprint'. ISA UK Research Report 07-01: http://www.censa.org.uk/docs/ISA-UK_Report_07-01_carbon-footprint.pdf, 2007. Consultado el 3 julio de 2012.



Escena 11: Tiempo después

El tren de Estocolmo a Umeå, en el norte de Suecia, es una de las experiencias más sorprendentes que he vivido, sobre todo si se toma cerca de la noche de San Juan, el 21 de junio, durante el solsticio de verano. El día dura 24 horas y la gente se resiste a ir a la cama. Es una fiesta nacional. Todo mundo se apresura para volver a su pueblo de origen para encontrarse con los amigos y la familia. Entonces el tren no duerme y los pasajeros se amontonan en los vagones (que sirven como restaurante, salón, o bar) para disfrutar de la compañía de otros, incluso extranjeros, mientras observan los bosques y lagos por donde cruzan la fauna silvestre que también se resiste a dormir. Son las 2 de la mañana y parecería que son las 5 de la tarde de un día en México.

Por suerte, ella no me reconoce y él me invita a acompañarlos en su pequeña mesa, gustosos de encontrar a un mexicano. Efectivamente, él mexicano y ella sueca pero habla español con un bonito acento gutural. Luego, fingiendo reciprocidad, me ofrecí a ir por unos tragos al bar. Hablamos de muchos temas, entonces sonó mi celular y lo tomé del interior de mi saco. Tuve una breve videoconferencia con Laguna y le confirmé mi posición. Debí cortarlo rápidamente porque estaba a punto de brindar con mis anfitriones. Ella, con un dejo de nostalgia, me dice que mi celular es un modelo muy viejo, seguramente discontinuado, que tuvo uno así cuando vivía en mi país. Yo le respondo que lo conservo con las fotos de mi hermana. Entonces los dos se quedan sorprendidos con las imágenes que les muestro. Ya han bebido de lo que les traje y es demasiado tarde para que se salven. Violeta, Violeta Culhuac, si tan solo hubiera sabido tu secreto. Ya nada puedo hacer por ti, excepto vengarte. Me acerco a mi destino, cortésmente me disculpo y me despido satisfecho. Mi interior ahora está sereno, puedo volver a México.



En efecto, los Hombres, «los constructores de herramientas», han sido rehechos por sus propias herramientas. Pero, ¿qué sigue?

Capítulo 11

Epílogo

A MANERA DE CONCLUSIÓN

A lo largo de este libro hemos comprobado cómo el Hombre, desde su origen, ha venido construyendo herramientas y cómo estas lo han transformado, al menos, a nivel de sus estructuras mentales e intelectuales, a la manera del andamiaje que, una vez montado, permite llegar cada vez más lejos. Las tecnologías de la información y las comunicaciones son parte de estas herramientas que pueden identificarse, a una vez, como efecto y causa de la denominada Revolución de la Información.

Hoy, la red de redes es una realidad con una megaestructura en constante crecimiento, es adaptable, puede adquirir movilidad y es virtualmente omnipresente en las naciones más desarrolladas. Debido a la Revolución de la Información, a tal punto se ha transformado el quehacer humano en las sociedades más tecnificadas que en ellas la divisa «información» ha desplazado a los metales preciosos como la «garantía» que da respaldo y solidez al valor de su moneda frente a otras. El «Tesoro» de una nación ya no se mide en el número de lingotes de oro de la reserva, sino en el valor presente de las proyecciones financieras y económicas del país con base a su capital más importante: la propiedad intelectual del conocimiento sobre las ciencias básicas y las aplicadas. Todo este conocimiento es debidamente respaldado por sistemas informáticos y computacionales que permiten su alojamiento, su seguridad y su recuperación, según lo requieran sus estrategias de desarrollo nacional, generalmente motivadas por la aspiración a mantener cierta hegemonía mediante una conveniente presencia global.

Cada vez más transacciones financieras y comerciales se realizan en forma electrónica. Sospechamos, y no sin razón, que todos nuestros ahorros se encuentran almacenados como un simple número en alguna base de datos: el dinero en efectivo tiende a desaparecer.

Actualmente, los contenidos de entretenimiento, culturales y educativos son distribuidos y almacenados en forma alternativa mediante la red de redes. Voz, video y datos se encuentran disponibles a través de una única conexión digital que, además, en muchos casos es móvil. El flujo de información entre productores y consumidores de contenidos es bidireccional, lo que permite cierto grado de retroalimentación por medio de la red.

La Revolución de la Información también ha modificado nuestra forma de relacionarnos socialmente. Hoy, una persona con acceso a la red puede conversar y ver a su interlocutor que se encuentra al otro lado del planeta, por la misma conexión que manda un correo electrónico al compañero de trabajo que se encuentra justo en el escritorio de enfrente. Con ello también han aparecido nuevos foros de expresión y redes sociales virtuales, pero también insospechadas formas de hostigamiento (*bullying*), vicios y obsesiones enfermizas que han orillado a algunos hasta el borde de la desesperación e, incluso, al suicidio.

En fin, las posibilidades de desarrollo y realización plena de las personas mediante la red son infinitas pero, también, son innegables los riesgos y, al parecer, es inevitable que ronde la sombra de la enajenación y de las motivaciones menos virtuosas.

En este libro hemos realizado un bosquejo de lo logrado hasta ahora, en lo referente a las tecnologías de la información y las telecomunicaciones, y hemos planteado algunas posibilidades a futuro. Pero, ¿qué sigue?, ¿en qué deberíamos enfocarnos como especie para aprovechar al máximo la tecnología disponible? Todo indica que lo más urgente es resolver de manera satisfactoria nuestro impacto negativo en el medio ambiente. La Tierra es nuestro único y verdadero Hogar. Si acabamos con éste no tendremos más futuro como especie ni posibilidad alguna de seguir desarrollando la obra humana.

En este libro hemos ilustrado cómo el estado actual de las tecnologías de la información y las comunicaciones es una clara muestra del desarrollo que ha alcanzado la especie humana en cuanto a la ciencia y la tecnología. Podemos decir que este desarrollo continuará mientras nuestro planeta sea un lugar habitable y mientras existan las condiciones que favorezcan la creatividad, la innovación y, sobre todo, mientras el Ser Humano no pierda su capacidad de asombro y su curiosidad para buscar las respuestas a las preguntas que constantemente lo aquejan.

Condición para que ocurra todo lo anterior es que el Hombre no eluda su sentido de responsabilidad con el medio ambiente y con todas las especies vivas del orbe, todo lo cual constituye una sutil red de interdependencias vitales, de la cual forma parte y no puede disociarse.

No debemos olvidar que podemos ser científicos, tecnólogos u hombres comunes pero, antes que nada, somos seres humanos, tan frágiles y delicados como cualquiera de los demás seres vivos de este planeta. Como sociedad, somos responsables de procurar que los desarrollos científicos y tecnológicos contribuyan a lograr que el bien común prevalezca, en un contexto de respeto y equilibrio con el medio ambiente y con los demás seres vivos. En este sentido, las TIC deberían ayudar al Hombre a lograr una sociedad más justa y un medio ambiente sano para los suyos y sus descendientes. Entonces, quizá el más importante efecto positivo de las actuales TIC sea la facilitación de las condiciones para lograr una sociedad mejor comunicada y mejor informada, con un especial énfasis en la dignidad de las personas y en el respeto a toda forma de vida. Todo indica que este es el único propósito que vale la pena, nuestra supervivencia como especie depende de ello.

SOBRE LENNA SÖDERBERG, LA ENCANTADORA CHICA DEL SOMBRERO

Lenna Söderberg (Sjööblom es su apellido de soltera), nacida en marzo de 1951 en Suecia, fue la *playmate* del mes de noviembre de 1972 de la revista *Playboy*. En aquella época, un grupo de investigadores de la Universidad del Sur de California buscaban una imagen sobre la que pudieran verificar los algoritmos de procesamiento de imágenes que estaban desarrollando. A éstos les pareció que la foto de la modelo reunía las características que buscaban: zonas con fuertes contrastes, zonas de cambios suaves, manejo de colores, etc. Así fue como la imagen digital de la señorita noviembre «debutó» en un congreso sobre procesamiento de imágenes, patrocinado por la IEEE. Rápidamente, el archivo digital de su rostro se convirtió en un estándar de prueba, no sólo para la comunidad de procesamiento de imágenes, sino para otros grupos de investigación en ingeniería eléctrica relacionados con el procesamiento digital de la información.



Figura 11.1: Lenna Söderberg, la real y encantadora chica del sombrero.

Cuando la revista se enteró de la libre circulación de la copia digital de su fotografía, decidió demandar a la IEEE, pues habían utilizado una imagen sin consultar al propietario de sus derechos. Sin embargo, pronto se desistieron y liberaron el uso de la imagen para fines de investigación. En el quincuagésimo aniversario de la Sociedad para la Ciencia y la Tecnología de la Imagen, celebrada en mayo de 1997, Lenna asistió como invitada de honor.

A lo largo de los años, la imagen con la chica del sombrero ha servido como «conejita» (de indias) durante el desarrollo de los algoritmos de procesamiento de imágenes que hoy utilizamos en las aplicaciones computacionales e informáticas de nuestra vida diaria. Éste es el caso del estándar JPEG¹, para imágenes digitales, con el que intercambiamos fotos a través del teléfono celular o la web.

Antes de poner el punto final a este libro, quisiéramos hacer notar que el concepto de red, en su acepción más simple, es una metáfora apropiada para las historias aquí vertidas, igual que lo es para la Historia del Hombre. A lo largo de

1 Por las siglas del inglés Joint Photographic Experts Group que denota a un formato de compresión digital.

estas páginas se presentaron circunstancias con paralelismos y cruces, distanciamientos y coincidencias, algunas elegidas a conciencia por los autores y otras surgidas en forma completamente espontánea. Para coincidencias, la Lenna de nuestro cuento es un caso ejemplar, resulta que es sueca, igual que la trasnacional Ericcson, la introductora del primer teléfono inteligente: el GS 88 Penelope. En la red de la Historia, ¿a cuántos grados de separación se encuentra Lenna de los diseñadores del GS 88 Penelope? y, a su vez, ¿a cuántos grados de separación se encuentra cada uno de nosotros de ella y de aquellos? Sea cual fuere la respuesta, una cosa es segura, todos tenemos la posibilidad de entretejer nuestro hilo en la red de la Historia.

***Para entender las tecnologías
de la información y las comunicaciones
o el extraño caso de la chica del sombrero***

Se terminó de imprimir en el mes de noviembre de 2013,
en los talleres de Línea Continua, Cerrada Revolución No. 40,
San Pedro de los Pinos, México, D.F.

La edición consta de 500 ejemplares, más sobrantes para reposición.



"LA FIGURA EMERGÍA DE LA IMPRESORA LÍNEA TRAS LÍNEA, QUIZÁ SERÍA MÁS CORRECTO DECIR PUNTO POR PUNTO... AQUELLA IMAGEN TERMINADA ME PLANTEABA UN ACERTIJO. VISTA DE ARRIBA HACIA ABAJO PARECÍA QUE SE IBA TRANSFORMANDO EN FORMAS O SÍMBOLOS CADA VEZ MÁS SENCILLOS. VISTA DE ABAJO HACIA ARRIBA PARECÍA QUE LA IMAGEN SURGÍA COMO AQUEL CUADRO DE LA VENUS, A PARTIR UN MAR DE SÍMBOLOS BINARIOS... ¿QUIÉN DIABLOS ME HABÍA MANDADO ESAS IMÁGENES?, ¿POR QUÉ A MÍ?"

ESTA ES LA HISTORIA A VUELO DE PÁJARO DE LOS GRANDES saltos TECNOLÓGICOS QUE NOS CONDUJERON HASTA EL PUNTO DONDE NOS ENCONTRAMOS, UNA SITUACIÓN EN LA QUE CONTAMOS CON UNA RED MUNDIAL DE TELECOMUNICACIONES CUYA COBERTURA Y CAPACIDADES SIGUE CRECIENDO Y QUE, AL DÍA DE HOY, NOS OFRECE LA POSIBILIDAD DE SOPORTAR TANTOS, O MÁS, EQUIPOS DE COMUNICACIÓN COMO HABITANTES HAY EN EL PLANETA.



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Av. San Rafael Atlixco No. 186, Col. Vicentina
Del. Iztapalapa, C.P. 09340, México, D.F.
Tel. (01) 58 04 46 00