JAMES GLEICK

A informação

Uma história, uma teoria, uma enxurrada

Tradução
Augusto Calil

COMPANHIA DAS LETRAS

6. Novos fios, nova lógica

(*Não há nada que esteja mais envolto pelo desconhecido*)

A simetria perfeita do aparato completo — o fio no meio, os dois telefones nas extremidades do fio, e as duas conversas nos extremos dos telefones — pode ser fascinante demais para um mero matemático.

James Clerk Maxwell, 1878[1]

Uma criança curiosa numa cidade do interior dos Estados Unidos nos anos 1920 poderia naturalmente desenvolver o interesse pelo envio de mensagens por meio de fios, como ocorreu com Claude Shannon em Gaylord, no estado de Michigan. Ele via fios e arames o dia inteiro, delimitando os pastos — fios duplos de aço, retorcidos e farpados, estendidos de poste em poste. Reuniu os pedaços que pôde encontrar e improvisou seu próprio telégrafo feito de arame farpado, enviando mensagens a outro menino a oitocentos metros dali. Ele usou o código criado por Samuel F. B. Morse. Foi o que lhe pareceu mais adequado. Shannon gostava da ideia dos códigos — não apenas dos códigos secretos, mas dos códigos num sentido mais geral, palavras ou símbolos substituindo outras palavras ou símbolos. Tinha um espírito brincalhão e criativo, uma característica que manteve mesmo depois de adulto. Durante toda a vida, ele se divertiu jogando e inventando jogos. Era um aficionado por dispositivos.

O Shannon adulto criava teorias a respeito do malabarismo e então fazia um malabarismo com elas. Quando pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology ou dos Laboratórios Bell tinham de saltar para o lado para abrir espaço para um monociclo, era Shannon quem vinha passando. Apesar de brincalhão, teve uma infância um tanto solitária, algo que, somado à sua engenhosidade de inventor, ajudou a motivar a criação do seu telégrafo de arame farpado.

Gaylord não passava de algumas ruas e lojas em meio aos campos férteis e cultivados da península de Michigan.[2] Dali para a frente, cruzando as planícies e os prados até as Montanhas Rochosas, o arame farpado tinha se espalhado como capim, dando origem a grandes fortunas industriais, por mais que não se tratasse de uma tecnologia especialmente glamourosa em meio à excitação daquela que já era chamada de Era da Eletricidade. A partir de 1874, quando um agricultor de Illinois recebeu a Patente Americana nº 157.124, correspondente a "uma nova e valiosa melhoria nas cercas de arame", batalhas por propriedades eclodiram por toda parte, chegando finalmente à Suprema Corte, e o arame era o que definia os territórios e delimitava o campo aberto. No auge desse processo, rancheiros e agricultores americanos — bem como as empresas responsáveis pelas estradas de ferro — instalaram mais de 1 milhão de quilômetros de arame farpado ao ano. Tomadas em seu conjunto, as cercas de arame do país não formavam uma teia nem uma rede, mas sim uma espécie de barreira fragmentada. Seu objetivo era separar, e não conectar. O material se revelara um péssimo condutor da eletricidade, mesmo no tempo seco. Mas o arame não deixava de ser um fio, e Claude Shannon não foi o primeiro a enxergar essa cerca de alcance tão amplo como uma rede de comunicação em potencial. Milhares de agricultores de locais remotos tiveram a mesma ideia. Em vez de esperar que as empresas telefônicas se aventurassem fora das cidades, os habitantes rurais formaram cooperativas telefônicas de arame farpado. Eles substituíam os grampos de metal por presilhas isolantes. Anexavam baterias secas e tubos de fala e acrescentavam fios extras para preencher as lacunas. No verão de 1895, o *New York Times* informou:

> Não se pode duvidar que muitas adaptações primitivas do mecanismo do telefone andam sendo feitas. Alguns agricultores da Dakota do Sul, por exemplo, criaram para si mesmos um sistema telefônico compreendendo doze quilômetros de fios

> ao distribuir transmissores entre si e fazer conexões com o arame farpado que constitui as cercas naquela região do país.[3]

O repórter observou: "Tem ganhado força a ideia de que o dia dos telefones baratos para milhões de cidadãos está cada vez mais próximo. Ainda não sabemos se isso é apenas uma impressão ou se a ideia tem bases sólidas". Estava claro que as pessoas desejavam essas conexões. Pecuaristas que desprezavam as cercas por criarem pequenos lotes no pasto aberto agora ligavam seus tubos de fala uns aos outros para ouvir as cotações do mercado e a previsão do tempo, ou simplesmente para escutar o simulacro atenuado de uma voz humana, o grande barato do telefone.

Três grandes ondas de comunicação elétrica formaram suas cristas em sequência: a telegrafia, a telefonia e o rádio. As pessoas começaram a ter a sensação de que era natural possuir máquinas dedicadas ao envio e ao recebimento de mensagens. Esses dispositivos alteraram a topologia — rasgaram o tecido social e o reconectaram, acrescentando portões de entrada e junções onde antes havia apenas um distanciamento vazio. Já na virada do século XX, havia a preocupação com os efeitos inesperados dessa novidade sobre o comportamento social. O superintendente da linha em Wisconsin se queixou do "constante uso do arame" feito pelos jovens de ambos os sexos entre Eau Claire e Chippewa Falls. "Esse uso gratuito da linha para o propósito dos flertes cresceu até chegar a um estágio alarmante", escreveu ele, "e, se esse uso prosseguir, alguém deverá pagar por isso." As empresas telefônicas tentaram desencorajar as ligações frívolas, particularmente entre as mulheres e sua criadagem. Um espírito mais livre prevalecia nas cooperativas de agricultores, que conseguiram evitar o pagamento às empresas telefônicas até meados da década de 1920. A Associação Telefônica da Linha Leste de Montana — composta de oito membros — enviava boletins de notícias "atualizadíssimos" por sua rede, porque os homens também possuíam um rádio.[4] E as crianças também queriam participar desse jogo.

Claude Elwood Shannon, nascido em 1916, recebeu o nome completo do pai, um empreendedor autônomo — no ramo de mobília, funerais e imóveis — e juiz de sucessões, que já estava na meia-idade quando o menino veio ao mundo. O avô de Claude, um agricultor, tinha inventado uma máquina que lavava roupas: uma banheira à prova de vazamentos com um braço de madeira e um desentupidor. A mãe de Claude, Mabel Catherine Wolf, filha de imigrantes alemães, trabalhava como professora de idiomas e foi diretora de escola durante algum tempo. A irmã mais velha, Catherine Wolf Shannon (seus pais eram bem conservadores na hora de dar nome aos filhos), estudava matemática e às vezes divertia Claude com charadas. Eles moravam na rua central, alguns quarteirões ao norte da rua principal. A cidade de Gaylord contava com pouco mais de 3 mil almas, mas isso era suficiente para sustentar uma fanfarra com uniformes teutônicos e instrumentos reluzentes e, no primário, Claude tocava uma saxotrompa alto mais larga do que o próprio peito. Ele tinha jogos de engenharia e livros. Fazia miniaturas de aviões e ganhava dinheiro entregando telegramas para o escritório local da Western Union. Solucionava criptogramas. Quando deixado sozinho, lia e relia livros; uma das histórias que amava era "O escaravelho de ouro", de Edgar Allan Poe, que se passava numa remota ilha do sul, protagonizada por um peculiar William Legrand, homem de "cérebro excitável" e "uma capacidade mental incomum", mas "sujeito a temperamentos perversos alternando entusiasmo e melancolia"[5] — em outras palavras, uma versão de seu criador. Protagonistas engenhosos eram uma exigência da época, e foram devidamente conjurados por Poe e outros escritores visionários, como Arthur Conan Doyle e H. G. Wells. O herói de "O escaravelho de ouro" encontra um tesouro enterrado ao decifrar um código secreto escrito no pergaminho. Poe enumera a série de numerais e símbolos ("traçados de maneira rudimentar, em tinta vermelha, entre a caveira e o bode") — 53‡‡†305))6* ;4826)4‡.)4‡) ;806* ;48†8¶60))85;1‡(;:‡*8†83(88) 5*‡ ;46(;88*96*?;8) *‡(;485) ;5*†2:*‡(;4956*2(5*–4) 8§8* ;4069285) ;)6†8)4‡‡;1 (‡9;48081 ;8:8‡1 ;48†85;4)485†528806*81 (‡9:48;(88;4 (‡?34;48)4‡;161;:188; ‡?; — e ajuda o leitor a acompanhar cada reviravolta de sua construção e desconstrução. "As circunstâncias, e certas tendências mentais, me levaram a desenvolver o interesse por charadas desse tipo",[6] proclama seu sombrio herói, cativando um leitor que pode apresentar as mesmas tendências mentais. A solução leva ao ouro, mas ninguém se importa com o ouro, na verdade. A emoção está no código: mistério e transmutação.

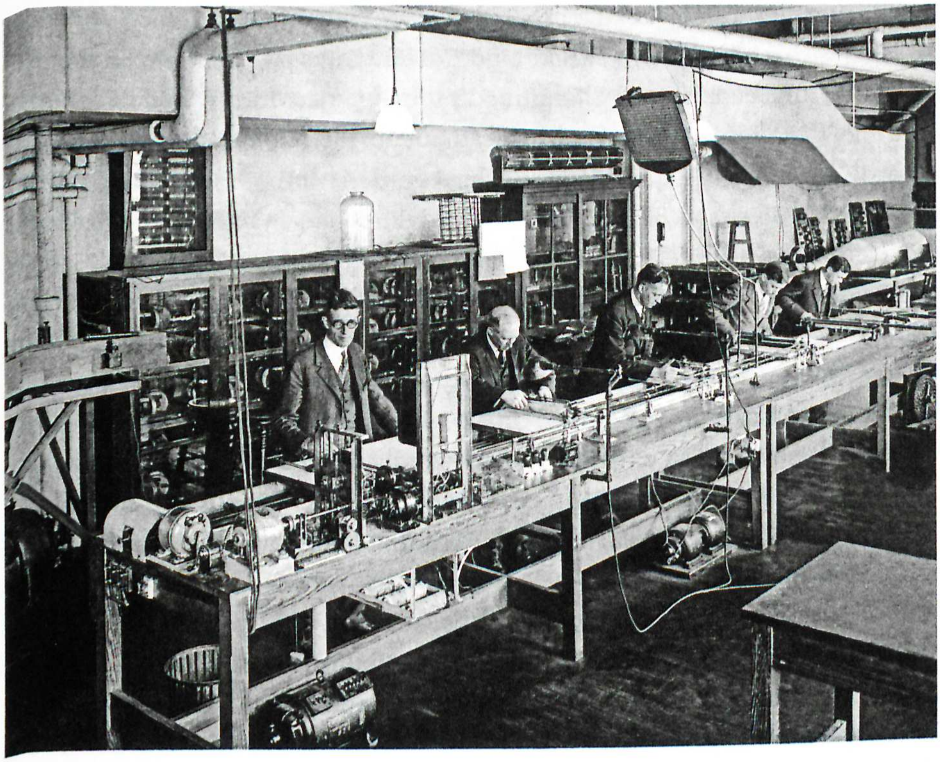
Claude concluiu o ensino médio na escola de Gaylord em três anos em vez de quatro e, em 1932, foi para a Universidade de Michigan, onde estudou engenharia elétrica e matemática. Pouco antes de se formar, em 1936, viu um cartão-postal num quadro de avisos anunciando um emprego para alunos de pós-graduação no Massachusetts Institute of Technology. Vannevar Bush, então diretor do departamento de engenharia, estava procurando um assistente de pesquisas para usar uma máquina de nome peculiar: o Analisador Diferencial. Tratava-se de uma plataforma metálica de cem toneladas cheia de eixos e engrenagens em movimento. Nos jornais, o aparelho era chamado de "cérebro mecânico" ou "máquina pensante". Na época eram comuns manchetes deste tipo:

> "Máquina Pensante" resolve problemas da matemática avançada;
> soluciona equações que os humanos levariam meses para resolver[7]

A Máquina Diferencial e a Máquina Analítica de Charles Babbage pairavam como fantasmas ancestrais, mas, apesar dos ecos de nomenclatura e da similaridade de seu propósito, o Analisador Diferencial não devia quase nada a Babbage. Bush mal tinha ouvido falar dele. Como Babbage, Bush odiava o caráter trabalhoso e entorpecente do mero cálculo. "Um matemático não é um homem capaz de manipular os números com rapidez; muitas vezes ele não consegue fazê-lo", escreveu Bush. "Ele é acima de tudo um indivíduo habilidoso no uso da lógica simbólica num nível elevado e, especialmente, é um homem de discernimento intuitivo."[8]

Nos anos seguintes à Primeira Guerra Mundial, o MIT era um dos três principais pontos do país para a crescente ciência prática da engenharia elétrica, ao lado dos Laboratórios Telefônicos Bell e da General Electric. Era também um lugar onde havia uma voraz necessidade de solucionar equações — em particular as equações diferenciais, e em especial as equações diferenciais de segunda ordem. As equações diferenciais expressam proporções de mudança, como no caso dos projéteis balísticos e das correntes elétricas oscilantes. As equações diferenciais de segunda ordem tratam de proporções de mudança dentro de proporções de mudança: da posição à velocidade, passando pela aceleração. São difíceis de solucionar analiticamente, e surgem por toda parte. Bush projetou sua máquina para lidar com toda essa classe de problemas e, portanto, com toda a gama de sistemas físicos que os geravam. Como as máquinas de Babbage, era essencialmente mecânica, embora usasse motores elétricos para fazer funcionar o pesado aparato e, no decorrer de sua evolução, tenha sido incorporado a ela um número cada vez maior de interruptores eletromecânicos com função de controle.

Ao contrário da máquina de Babbage, esta não manipulava os números. Funcionava com base nas quantidades — gerando curvas, como Bush gostava



O Analisador Diferencial de Vannevar Bush no MIT.

de dizer, para representar o futuro de um sistema dinâmico. Diríamos hoje que o aparato era analógico em vez de digital. Suas rodas dentadas e seus discos eram dispostos de modo a produzir uma analogia física das equações diferenciais. De certa forma, tratava-se de um descendente monstruoso do planímetro, um pequeno dispositivo de medição que traduzia a integração das curvas nos movimentos de uma roda. Professores e alunos procuravam o Analisador Diferencial em momentos de desespero e, quando era possível solucionar suas equações com uma margem de erro de 2%, o operador da máquina, Claude Shannon, ficava feliz. Fosse como fosse, ele estava totalmente cativado por aquele "computador", não apenas pela parte analógica, cujos elementos interagiam ruidosamente entre si no espaço de todo um cômodo, mas também pelos controles elétricos, quase silenciosos (exceção feita ao ocasional clique).[9]

Os controles eram de dois tipos: interruptores comuns e interruptores especiais chamados de relés — descendente direto do telégrafo. O relé era um interruptor elétrico controlado pela eletricidade (um esquema cíclico). No caso do telégrafo, o objetivo era chegar a pontos distantes por meio do estabelecimento de uma cadeia. Para Shannon, o problema não era a distância, e sim o controle. Uma centena de relés, intrincadamente interconectados, ligando-se e desligando-se numa sequência particular, coordenavam o Analisador Diferencial. Os melhores especialistas em complexos circuitos de relés eram engenheiros telefônicos — os relés controlavam o direcionamento das chamadas, bem como o maquinário das linhas de montagem das fábricas. Os circuitos dos relés eram projetados para cada caso específico. Ninguém tinha pensado em estudar a ideia sistematicamente, mas Shannon estava à procura de um tema para sua tese de mestrado, e enxergou nisso uma possibilidade. No último ano de faculdade ele tinha feito um curso de lógica simbólica e, quando tentou criar uma lista organizada das possíveis disposições dos circuitos ativados por interruptores, teve uma súbita sensação de *déjà vu*. De uma maneira profundamente abstrata, esses problemas se alinhavam. A peculiar notação artificial da lógica simbólica, a "álgebra" de Boole, podia ser usada para descrever circuitos.

Era uma conexão estranha de se fazer. Os mundos da eletricidade e da lógica pareciam distantes demais um do outro. Ainda assim, como Shannon percebeu, aquilo que um relé passa adiante de um circuito para o outro na verdade não é a eletricidade, e sim um fato: o fato de o circuito estar aberto ou fechado. Se um circuito está aberto, então o relé pode fazer com que o circuito seguinte se abra. Mas o arranjo inverso também é possível, o arranjo negativo: quando um circuito está aberto, o relé pode fazer o circuito seguinte se fechar. Descrever com palavras essas possibilidades era algo meio sem sentido — seria mais fácil reduzir a descrição a símbolos e, para um matemático, era natural manipular os símbolos por meio de equações. (Charles Babbage tinha dado alguns passos nesse sentido com sua notação mecânica, embora Shannon nada soubesse a respeito.)

"Um cálculo é desenvolvido para a manipulação dessas equações por meio de simples processos matemáticos" — com esse chamado à ação, Shannon começou sua tese em 1937. Até aquele momento, as equações representavam apenas combinações de circuitos. Então, "demonstra-se que o cálculo é uma analogia exata do cálculo de proposições usadas no estudo simbólico da lógica". Como Boole, Shannon mostrou que só precisava de dois números para suas equações: 0 e 1. O 0 representava um circuito fechado; o 1 representava um circuito aberto. Ligado ou desligado. Sim ou não. Verdadeiro ou falso. Shannon investigou as consequências. Começou com casos simples: circuitos de dois interruptores, em série ou em paralelo. Shannon destacou que os circuitos em série correspondiam ao conectivo lógico *e*, ao passo que os circuitos em paralelo tinham o efeito de *ou*. Uma operação lógica que podia ser equiparada eletricamente era a negação, convertendo um valor em seu oposto. Como na lógica, ele percebeu que os circuitos eram capazes de fazer escolhas do tipo "se…, então…". Antes que tivesse terminado, já havia analisado redes nos formatos "estrela" e "entrelaçado" de crescente complexidade, por meio da definição de postulados e teoremas para lidar com sistemas de equações simultâneas. Ele deu sequência a essa torre de abstração com exemplos práticos — invenções criadas no papel, algumas delas práticas e outras apenas curiosidades. Shannon criou um diagrama para o projeto de uma tranca elétrica de combinação, que seria composta de cinco interruptores em forma de botões. Bolou um circuito capaz de "somar automaticamente dois números, usando apenas relés e interruptores".[10] A título de conveniência, sugeriu uma aritmética que usava a base dois. "É possível realizar complexas operações matemáticas com o uso de circuitos de relés", escreveu ele. "Na verdade, toda operação que possa ser completamente descrita num número finito de passos usando as palavras *se*, *ou*, *e* etc. pode ser feita automaticamente com relés." Como tema de pesquisa para um estudante de engenharia elétrica, isso era algo totalmente desconhecido: uma tese típica envolvia aprimoramentos para motores elétricos ou linhas de transmissão. Não existia a necessidade prática de uma máquina capaz de solucionar enigmas lógicos, mas aquilo apontava para o futuro. Circuitos lógicos. Aritmética binária. Bem ali, na tese de mestrado de um assistente de pesquisas, estava a essência da futura revolução dos computadores.

Shannon passou um verão trabalhando nos Laboratórios Telefônicos Bell, em Nova York, e depois, por sugestão de Vannevar Bush, trocou a engenharia elétrica pela matemática no MIT. Bush sugeriu também que ele considerasse a possibilidade de aplicar uma álgebra de símbolos — sua "álgebra incomum"[11] — à nascente ciência da genética, cujos elementos básicos, os genes e cromossomos, eram ainda pouco compreendidos. Desse modo, Shannon começou a trabalhar numa ambiciosa dissertação de doutorado que receberia o nome de "Uma álgebra da genética teórica".[12] Os genes, como ele destacou, eram uma construção teórica. Acreditava-se que fossem transportados nos corpos afilados conhecidos como cromossomos, que podiam ser vistos ao microscópio, mas ninguém sabia ao certo como os genes se estruturavam ou mesmo se de fato eram reais. "Ainda assim", como destacou Shannon,

> é possível, para nossos fins, agir como se eles assim fossem. [...] Portanto, falaremos como se os genes de fato existissem e como se nossa simples representação dos fenômenos hereditários fosse realmente verdadeira, já que, até onde podemos discernir, pode bem ser que as coisas sigam este modelo.

Ele projetou um arranjo de letras e números de modo a representar "fórmulas genéticas" de um indivíduo — dois pares de cromossomos e quatro posições de genes, por exemplo, podiam ser representados assim:

$$\begin{array}{ll} A_1\, B_2\, C_3\, D_5 & E_4\, F_1\, G_6\, H_1 \\ A_3\, B_1\, C_4\, D_3 & E_4\, F_2\, G_6\, H_2 \end{array}$$

Assim, os processos da combinação genética e da mestiçagem puderam ser previstos por um cálculo envolvendo adições e multiplicações. Tratava-se de uma espécie de mapa do caminho, uma distante abstração da viscosa realidade biológica. Ele explicou: "Para os não matemáticos destacamos que é comum para a álgebra moderna que os símbolos representem conceitos diferentes dos números". O resultado foi complexo, original e bastante distinto em relação ao que outros no mesmo ramo vinham fazendo.* Ele nunca pensou em publicar esse material.

Enquanto isso, no início de 1939, ele escreveu a Bush uma longa carta a respeito de uma ideia mais próxima de seu feitio:

> Tenho trabalhado intermitentemente na análise de algumas das propriedades fundamentais de sistemas gerais para a transmissão de informações, incluindo a telefonia, o rádio, a televisão, a telegrafia etc. Praticamente todos os sistemas de comunicação podem ser representados pela seguinte fórmula geral:[13]

* Quarenta anos mais tarde, numa avaliação, o geneticista James F. Crow escreveu: "Parece ter sido escrito num completo isolamento em relação aos membros da comunidade da genética. [...]. [Shannon] descobriu princípios que foram redescobertos mais tarde. [...]. Lamento que [isto] não tenha chegado ao conhecimento de muitos em 1940. Acredito que teria mudado substancialmente a história deste tema". Claude Shannon, *Collected Papers*, 921.

$$f_1(t) \rightarrow \boxed{T} \rightarrow F(t) \rightarrow \boxed{R} \rightarrow f_2(t)$$

T e *R* representavam um transmissor e um receptor. Eles mediavam três "funções de tempo", $f(t)$: a "informação a ser transmitida", o sinal, e o resultado — que, é claro, deveria ser idêntico ao estímulo inicial tanto quanto possível. ("Num sistema ideal, estes seriam idênticos.") Para Shannon, o problema estava no fato de os sistemas reais sempre sofrerem alguma *distorção* — um termo para o qual ele se propôs a oferecer uma rigorosa definição em forma matemática. Havia também *ruído* ("ou seja, a estática"). Shannon disse a Bush que estava tentando demonstrar alguns teoremas. Além disso, e não por mera coincidência, estava trabalhando numa máquina capaz de realizar operações matemáticas simbólicas, que faria o trabalho do Analisador Diferencial inteiramente por meio dos circuitos elétricos. Havia um longo caminho a percorrer. "Ainda que tenha conseguido progredir em vários pontos da periferia do problema, ainda estou bastante distante de resultados concretos", disse ele.

> Projetei um conjunto de circuitos que vão de fato realizar a diferenciação simbólica e a integração da maioria das funções, mas o método não chega a ser abrangente nem natural o bastante para possibilitar um aperfeiçoamento satisfatório. Parte da filosofia geral subjacente à máquina parece me iludir completamente.

Ele era magérrimo, quase esquálido. As orelhas se pronunciavam um pouco em meio ao cabelo ondulado cortado curto. No segundo semestre de 1939, numa festa no apartamento na Garden Street que ele dividia com dois colegas, Shannon, tímido, estava perto da porta, ouvindo um disco de jazz no fonógrafo, quando uma jovem começou a arremessar pipoca contra ele. Era Norma Levor, uma aventureira moça nova-iorquina de dezenove anos que estudava em Radcliffe. Ela havia abandonado a escola para morar em Paris naquele verão, mas voltou quando a Alemanha nazista invadiu a Polônia — mesmo do outro lado do oceano, o espectro da guerra começava a inquietar a vida das pessoas. Claude pareceu a ela um homem de temperamento sombrio e intelecto estimulante. Eles começaram a se encontrar todos os dias. Claude escreveu sonetos para ela, sem maiúsculas, ao estilo de e. e. cummings. Ela apreciava o amor que ele demonstrava pelas palavras, sua maneira de falar na álgebra *booooooooleana*. Em janeiro do ano seguinte, os dois já estavam casados (união civil em Boston, sem nenhuma cerimônia), e ela se mudou com Shannon para Princeton, onde ele tinha recebido uma bolsa de pós-doutorado.

A invenção da escrita catalisou a lógica, tornando possível raciocinar a respeito do raciocínio — trazer diante dos olhos um encadeamento de ideias para um exame atento —, e então, tantos séculos mais tarde, a lógica era reanimada com a invenção de máquinas capazes de trabalhar a partir de símbolos. Na lógica e na matemática, as formas mais elevadas de raciocínio, todas as peças pareciam estar se encaixando.

Ao fundir lógica e matemática num sistema de axiomas, sinais, fórmulas e provas, os filósofos pareciam estar muito próximos de um tipo de perfeição — uma certeza rigorosa e formal. Essa era a meta de Bertrand Russell e Alfred North Whitehead, os gigantes do racionalismo inglês, que publicaram sua grande obra em três volumes de 1910 a 1913. O título escolhido por eles, *Principia Mathematica*, ecoava Isaac Newton de maneira grandiloquente. A ambição dos dois era nada menos do que a perfeição de todas as formas de matemática. Isso tinha finalmente se tornado possível, afirmavam eles, por meio do instrumento da lógica simbólica, com seus sinais inconfundíveis e suas regras implacáveis. A missão deles era provar cada um dos fatos matemáticos. O processo de comprovação, quando realizado da maneira correta, deveria ser mecânico. Em contraste com as palavras, o *simbolismo* (declararam eles) possibilita uma "expressão perfeitamente precisa". Esse fugidio objetivo foi buscado por Boole e, antes dele, por Babbage, e muito antes de ambos por Leibniz, e todos acreditavam que a perfeição do raciocínio poderia advir da codificação perfeita do pensamento. Leibniz pôde apenas imaginar isto: "uma determinada maneira de escrever a linguagem", registrou ele em 1678, "que represente perfeitamente as relações entre nossos pensamentos".[14] Com uma codificação desse tipo, as falsidades lógicas seriam denunciadas de forma instantânea.

> Os caracteres seriam bastante diferentes daqueles que foram imaginados até agora. [...] Os caracteres dessa forma de escrita devem servir à invenção e à avaliação assim como ocorre na álgebra e na aritmética. [...] Será impossível escrever com tais caracteres as noções quiméricas [*chimères*].

Russell e Whitehead explicaram que o simbolismo é adequado aos "processos e ideias extremamente abstratos"[15] usados na lógica, com seus encadeamentos de raciocínio. A linguagem comum funciona melhor para as situações confusas e indefinidas do mundo comum. Uma afirmação do tipo *uma baleia é grande* usa palavras simples para expressar "um fato complicado", observaram eles, ao passo que *um é um número* "nos leva, na linguagem, a uma verborragia intolerável". A compreensão das baleias, e da grandeza, exige o conhecimento e a vivência das coisas reais, mas a compreensão de *1* e de *número*, e de todas as operações aritméticas associadas a esses conceitos, deve ser automática quando isso for expresso em símbolos dissecados.

No entanto, eles perceberam que havia alguns percalços pelo caminho — algumas das *chimères* que deveriam ser impossíveis. "Uma parte imensa do trabalho", disseram os autores no prefácio da obra, "foi gasta com as contradições e os paradoxos que infectaram a lógica." "Infectaram" era uma palavra forte, mas adequada para expressar a agonia dos paradoxos. Eles eram um câncer.

Alguns eram conhecidos desde a Antiguidade:

> Epimênides, de Creta, disse que todos os cretenses eram mentirosos, e que todas as demais afirmações feitas pelos cretenses seriam sem dúvida mentiras. Seria isso uma mentira?[16]

Uma formulação mais clara do paradoxo de Epimênides — mais clara porque dispensa a preocupação com os cretenses e suas qualidades — é o paradoxo do mentiroso: *Esta afirmação é falsa.* A afirmação não pode ser verdadeira, pois então será falsa. Não pode ser falsa, pois então se tornará verdadeira. Não é verdadeira nem falsa, ou então é ambas as coisas ao mesmo tempo. Mas a descoberta dessa circularidade tortuosa, falha e complexa não interrompe o funcionamento da vida nem da linguagem — compreende-se a ideia e as coisas continuam —, porque a vida e a linguagem não dependem de perfeição, de elementos absolutos que lhes confiram força. Na vida real, é impossível que todos os cretenses sejam mentirosos. Até os mentirosos muitas vezes dizem a verdade. O sofrimento só começa com a tentativa de construir uma embalagem hermeticamente fechada. Russell e Whitehead almejavam a perfeição — a comprovação —, caso contrário, o empreendimento não teria muito sentido.

Quanto maior o rigor de sua construção, maior o número de paradoxos encontrados. "Estava no ar", escreveu Douglas Hofstadter, "que coisas de fato peculiares poderiam ocorrer quando primos modernos de vários paradoxos antigos brotassem dentro do mundo rigorosamente lógico dos números [...] um paraíso puro dentro do qual ninguém imaginou que um paradoxo pudesse surgir."[17]

Um deles era o paradoxo de Berry, sugerido a Russell pela primeira vez por G. G. Berry, um bibliotecário que trabalhava na Bodleian. Tinha a ver com a contagem das sílabas necessárias para especificar cada número inteiro. É claro que, em geral, quanto maior o número, maior o número de sílabas necessárias para escrevê-lo por extenso. Em inglês, o menor número inteiro escrito com duas sílabas é o sete ("*seven*"). O menor número escrito com três sílabas é o onze ("*eleven*"). O número 121 parece exigir seis sílabas ("*one hundred twenty one*"), mas, com um pouco de astúcia, quatro sílabas bastarão: onze ao quadrado ("*eleven squared*"). Mas, mesmo recorrendo à astúcia, ainda é finito o número de sílabas possíveis e, por isso, é finito o número de nomes, e, como enunciou Russell: "Portanto os nomes de certos números inteiros devem consistir em pelo menos dezenove sílabas e, dentre esses números, deve haver um menor. Assim, *o menor número inteiro impossível de ser nomeado em menos de dezenove sílabas* deve indicar um número inteiro definido".[18*] É então que chegamos ao paradoxo. A frase "*the least integer not nameable in fewer than nineteen syllables*" [*o menor número inteiro impossível de ser nomeado em menos de dezenove sílabas*] contém apenas dezoito sílabas. Assim, o menor número inteiro impossível de ser nomeado em menos de dezenove sílabas acaba de ser nomeado em menos de dezenove sílabas.

Outro dos paradoxos de Russell é o paradoxo do Barbeiro. O barbeiro é (digamos) aquele que barbeia todos os homens que não se barbeiam — e somente eles. Por acaso o barbeiro faz a própria barba? Se ele o faz, não o faz, e se não o faz, então ele o faz. Poucas pessoas se preocupam com charadas dessa natureza — afinal, no mundo real o barbeiro faz como bem entende e a vida continua. Tendemos a sentir como se, nas palavras de Russell, "toda a forma das palavras fosse apenas um ruído sem significado".[19] Mas o paradoxo não pode ser dispensado com tamanha facilidade quando um matemático examina um

* No inglês comum, como indicou Russell, o número é 111 777: cento e onze mil, setecentos e setenta e sete ("*one hundred and eleven thousand seven hundred and seventy seven*").

tema conhecido como a teoria dos conjuntos, ou teoria das classes. Conjuntos são grupos de coisas — números inteiros, por exemplo. O conjunto 0, 2, 4 tem como membros números inteiros. Um conjunto pode também ser membro de outros conjuntos. O conjunto 0, 2, 4, por exemplo, pertence ao conjunto dos *conjuntos dos números inteiros* e também ao conjunto dos *conjuntos com três membros*, mas não pertence ao conjunto dos *conjuntos de números primos*. Assim, Russell definiu um determinado conjunto da seguinte maneira:

> *S* é o conjunto de todos os conjuntos que não são membros de si mesmos.

Essa versão é conhecida como paradoxo de Russell. Isso não pode ser dispensado como mero ruído.

Para eliminar o paradoxo de Russell, ele adotou medidas drásticas. O fator problemático parecia ser a recorrência peculiar contida na afirmação polêmica: a ideia de conjuntos que pertenciam a conjuntos. A recorrência era o oxigênio que alimentava a chama. Da mesma maneira, o paradoxo do mentiroso depende de afirmações a respeito de afirmações. "Esta afirmação é falsa" é um exemplo de metalinguagem: linguagem que trata da linguagem. O paradoxal conjunto de Russell depende de um metaconjunto: um conjunto de conjuntos. Assim, o problema estava no cruzamento entre os níveis, ou, nos termos escolhidos por Russell, na mistura entre tipos. A solução dele: declarar isso uma ilegalidade, um tabu, algo proibido. Não se pode misturar diferentes níveis de abstração. Nada de autorreferência, nada de autocontenção. As regras do simbolismo em *Principia Mathematica* não permitiam o retorno cíclico semelhante à cobra que devora o próprio rabo, que parecia ativar a possibilidade da autocontradição. Essa era a barreira de segurança imposta por ele.

Eis que entra em cena Kurt Gödel.

Gödel nasceu em 1906 na cidade de Brno, no centro da província checa da Morávia. Estudou física na Universidade de Viena, 120 quilômetros ao sul, e aos 21 anos tornou-se integrante do Círculo de Viena, um grupo de filósofos e matemáticos que se reunia com regularidade em enfumaçados cafés como o Café Josephinum e o Café Reichsrat para propor a lógica e o realismo como defesas contra a metafísica — termo usado por eles para se referir ao espiritualismo, à fenomenologia e à irracionalidade. Gödel lhes falou a respeito da Nova Lógica (essa expressão estava no ar) e, pouco depois, sobre a metamatemática

— *der Metamathematik*. A metamatemática não estava para a matemática assim como a metafísica estava para a física. Tratava-se de uma matemática de segundo grau — matemática da matemática —, um sistema formal "observado a partir de fora" ("äusserlich betrachtet").[20] Ele estava prestes a fazer a mais importante das afirmações, a demonstrar o mais importante teorema do século XX sobre o conhecimento. Ele ia assassinar o sonho de Russell de um sistema lógico perfeito. Ia mostrar que os paradoxos não eram excrescências — eram fundamentais.

Gödel elogiou o projeto de Russell e Whitehead antes de sepultá-lo: a lógica matemática era "uma ciência anterior a todas as demais", escreveu ele, "contendo as ideias e os princípios subjacentes a todas as ciências".[21] *Principia Mathematica*, a grande obra, era a encarnação de um sistema formal que tinha se tornado, em sua breve existência, tão abrangente e dominante que Gödel se referia a ele na forma abreviada: os PM. Ao falar nos PM, ele fazia menção ao sistema, e não ao livro. Nos PM, a matemática fora contida — um navio dentro de uma garrafa, não mais arremessado e agitado pelos vastos mares turbulentos. Em 1930, quando os matemáticos comprovavam alguma coisa, eles o faziam de acordo com os PM. Nos PM, como disse Gödel, "pode-se comprovar qualquer teorema usando apenas um punhado de regras mecânicas".[22]

Qualquer teorema: pois o sistema era completo, ou afirmava sê-lo. Regras *mecânicas*: pois a lógica operava inexoravelmente, sem espaço para as variações da interpretação humana. Seus símbolos tinham sido exauridos de significado. Qualquer pessoa poderia verificar uma comprovação passo a passo simplesmente seguindo as regras, sem compreender o processo. Descrever essa qualidade como mecânica era algo que evocava os sonhos de Charles Babbage e Ada Lovelace, máquinas trabalhando com números, e números representando absolutamente tudo.

Em meio à malfadada cultura de Viena da década de 1930, ouvindo os amigos debatendo a Nova Lógica, seu comportamento reticente, os olhos ampliados pelos óculos de armação preta, o jovem Gödel, aos 24 anos, acreditava na perfeição da garrafa que eram os PM, mas tinha dúvidas quanto à possibilidade de realmente conter a matemática num recipiente. Esse jovem magricela transformou sua dúvida numa grande e horripilante descoberta. Descobriu que, à espreita dentro dos PM — bem como de todo sistema consistente de lógica —, deve haver monstros de um tipo até então jamais concebido: afirmações que não podem ser comprovadas, mas também não podem ser desmentidas. Deve forçosamente haver *verdades*, portanto, que não podem ser comprovadas — e Gödel era capaz de prová-lo.

Ele o fez com um rigor férreo disfarçado de truque de mágica. Gödel empregou as regras formais dos PM e, ao empregá-las, também as abordou metamatematicamente — ou seja, observou-as a partir de fora. Como ele explicou, todos os símbolos dos PM — números, operações aritméticas, conectores lógicos e pontuação — constituíam um alfabeto limitado. Toda afirmação ou fórmula dos PM era escrita nesse alfabeto. Da mesma maneira, toda comprovação correspondia a uma sequência finita de fórmulas — nada além de um trecho mais longo escrito no mesmo alfabeto. Era nesse ponto que a metamatemática entrava em cena. Gödel destacou que, metamatematicamente, um símbolo vale tanto quanto outro qualquer — a escolha de um alfabeto específico é arbitrária. Poderíamos usar o conjunto tradicional de numerais e símbolos (da aritmética: $+, -, =, \times$; da lógica: $\neg, \vee, \supset, \exists$), ou então as letras, ou os pontos e traços. Tratava-se apenas de uma questão de codificação, passando de um conjunto de símbolos ao seguinte.

Gödel propôs usar os números como seus símbolos. Os números eram seu alfabeto. E, como os números podem ser combinados por meio da aritmética, toda sequência de números pode ser resumida num único número (possivelmente muito alto). Assim, cada afirmação, cada fórmula dos PM pode ser expressa como um único número, e o mesmo vale para cada demonstração. Gödel esboçou um esquema rigoroso para o processo de codificação — um algoritmo, algo mecânico, nada além de regras a serem seguidas, sem exigir nenhuma inteligência. Funcionava em ambos os sentidos: dada uma fórmula, a aplicação das regras resultaria num número e, dado um número, a aplicação das regras produziria a fórmula correspondente.

Mas nem todos os números podem ser traduzidos em fórmulas corretas. Ao serem decodificados, alguns números produzem absurdos, ou fórmulas que são falsas dentro das regras do sistema. A sequência de símbolos "0 0 0 = = =" não representa nenhum tipo de fórmula, embora possa ser traduzida num número. A afirmação "$0 = 1$" é uma fórmula identificável, mas falsa. A fórmula "$0 + x = x + 0$" é verdadeira e pode ser demonstrada.

Essa última qualidade — a propriedade de *ser passível de demonstração de acordo com os PM* — não poderia ser expressa na linguagem dos PM. Parece ser uma afirmação feita a partir de fora do sistema, uma afirmação metamatemática. Mas a codificação de Gödel conseguiu dominá-la. Na estrutura construída por ele, os números naturais levavam uma vida dupla, sendo números e também afirmações. Uma afirmação poderia dizer que um número era ímpar, ou *primo*, ou um *quadrado perfeito*, e uma afirmação poderia dizer que um determinado número era uma *fórmula passível de ser demonstrada*. Dado o número 1 044 045 317 700, por exemplo, poderíamos fazer muitas afirmações e testar se são verdadeiras ou falsas: esse número é ímpar, não é um número primo, não é um quadrado perfeito, é maior do que 5, é divisível por 121, e representa uma fórmula demonstrável (quando decodificado de acordo com as regras oficiais).

Gödel explicou tudo isso num pequeno estudo datado de 1931. Para tornar impermeável sua demonstração, foi necessária uma lógica complexa, mas a argumentação básica era simples e elegante. Gödel mostrou como construir uma fórmula que dizia *Um determinado número, x, não pode ser demonstrado.* Isso era fácil: havia uma quantidade infinita de fórmulas desse tipo. Ele então indicou que, ao menos em alguns casos, o número *x* representaria a própria fórmula em questão. Era justamente o tipo de autorreferência cíclica que Russell tentara proibir nas regras dos PM —

Esta afirmação não pode ser demonstrada

— e agora Gödel mostrava que afirmações desse tipo devem necessariamente existir. O Mentiroso retornara, e era impossível mantê-lo afastado por meio de uma mudança nas regras. Como explicou Gödel (numa das notas de rodapé mais prenhes da história):

> Contrariando as aparências, uma proposição desse tipo não envolve uma falsa circularidade, pois afirma apenas que uma determinada fórmula bem definida [...] não pode ser demonstrada. É apenas subsequentemente (e por acaso, digamos) que a fórmula revela ser precisamente aquela por meio da qual a proposição em si foi expressa.[23]

Dentro dos PM, e em todo sistema lógico consistente capaz de realizar operações elementares de aritmética, deve haver necessariamente tais elementos amaldiçoados, verdadeiros e ao mesmo tempo impossíveis de serem comprovados.

Assim, Gödel mostrou que um sistema formal consistente é necessariamente incompleto — não pode haver sistema completo e consistente.

Os paradoxos estavam de volta, e não eram meras particularidades. Agora eles atingiam o núcleo do empreendimento. Como disse Gödel posteriormente, era "um fato incrível" — "que nossas intuições lógicas (ou seja, intuições envolvendo noções como: verdade, conceito, ser, classe etc.) são contraditórias em si mesmas".[24] Como diz Douglas Hofstadter, era "o súbito lampejo de um raio partindo o mais azul dos céus",[25] cujo poder emanava não do edifício derrubado, e sim da lição contida nele a respeito dos números, a respeito do simbolismo e da codificação:

> A conclusão de Gödel não surgiu de uma fraqueza dos PM, e sim de uma força. Essa força é o fato de os números serem tão flexíveis ou "camaleônicos" que seus padrões podem imitar padrões de raciocínio. [...] É do *poder expressivo* dos PM que emana sua incompletude.

A tão buscada linguagem universal, as *characteristica universalis* que Leibniz quisera inventar, estivera bem ali o tempo todo, nos números. Os números eram capazes de codificar todo o raciocínio. Podiam representar todas as formas de conhecimento.

A primeira vez em que Gödel mencionou publicamente sua descoberta, no terceiro e último dia de uma conferência filosófica em Königsberg em 1930, não suscitou respostas. Uma única pessoa pareceu tê-lo ouvido de fato, um húngaro chamado Neumann János. Esse jovem matemático estava em vias de mudar-se para os Estados Unidos, onde logo passaria a ser conhecido como John von Neumann, e pelo resto da vida. Ele compreendeu imediatamente a importância de Gödel. Ficou perplexo diante daquilo, mas estudou suas proposições e foi convencido. Tão logo o estudo de Gödel começou a circular, Von Neumann começou a apresentá-lo nas discussões sobre matemática em Princeton. A incompletude era real. Ela significava que nunca seria possível provar que a matemática era livre de contradições. E "a questão mais importante", disse Von Neumann, "é que não se trata de um princípio filosófico nem de uma atitude intelectual plausível, e sim do resultado de uma rigorosa demonstração matemática de um tipo extremamente sofisticado".[26] Das duas, uma: acreditava-se na matemática ou duvidava-se dela.

Bertrand Russell (que *acreditava* nela, é claro) tinha avançado para um tipo menos estrito de filosofia. Muito mais tarde, já velho, ele admitiu que Gödel o tinha inquietado: "Fiquei feliz por não estar mais trabalhando com a lógica matemática. Se um dado conjunto de axiomas leva a uma contradição, é claro que ao menos um dos axiomas tem de ser falso".[27] Por outro lado, o mais famoso dos filósofos de Viena, Ludwig Wittgenstein (que fundamentalmente *não acreditava* nela), desmereceu o teorema da incompletude como mero truque ("*Kunststücken*") e gabou-se dizendo que, em vez de refutá-lo, ele simplesmente o ignoraria:

> A matemática não pode ser incompleta; assim como um *sentido* não pode ser incompleto. Seja o que for aquilo que compreendo, tenho de compreendê-lo por inteiro.[28]

A resposta de Gödel deu cabo de ambos. "É evidente que Russell interpreta equivocadamente meu resultado; entretanto, ele o faz de maneira muito interessante", escreveu ele. "Por sua vez, Wittgenstein [...] expõe uma interpretação equivocada completamente trivial e desinteressante."[29]

Em 1933, o recém-criado Instituto de Estudos Avançados, que tinha entre seus membros John von Neumann e Albert Einstein, convidou Gödel a passar o ano em Princeton. Ele atravessaria o Atlântico várias outras vezes naquela década, à medida que o fascismo ganhava espaço na Europa e a breve glória de Viena começava a se dissipar. Gödel, ignorante em política e ingênuo em relação à história, sofreu ataques de depressão e episódios de hipocondria que o levaram a sanatórios. Princeton o chamava, mas Gödel hesitou. Permaneceu em Viena em 1938, testemunhando o *Anchluss*, enquanto o Círculo de Viena deixava de existir e seus membros eram assassinados ou mandados para o exílio, e também em 1939, quando o exército de Hitler ocupou a Checoslováquia, seu país natal. Ele não era judeu, mas a matemática era considerada *verjudet*. Ele enfim conseguiu partir em janeiro de 1940, viajando pela Ferrovia Transiberiana, chegando ao Japão e lá embarcando num navio para San Francisco. Seu nome foi registrado pela companhia telefônica como "K. Goedel" quando chegou a Princeton, dessa vez para ficar.[30]

Claude Shannon também tinha chegado ao Instituto de Estudos Avançados para um ano de pós-doutorado. Ele achava o lugar solitário, morava num novo edifício de tijolos vermelhos com uma torre com relógio e uma cúpula envolta em olmeiros numa antiga fazenda a um quilômetro e meio da Universidade Princeton. O primeiro de seus cerca de quinze professores foi Einstein, cujo escritório ficava nos fundos do primeiro andar. Shannon raramente o via. Gödel, que chegara em março, falava quase apenas com Einstein. Nominalmente, o orientador de Shannon era Hermann Weyl, outro exilado alemão, o maior dos teóricos matemáticos da nova mecânica quântica. Weyl até estava interessado na tese de Shannon envolvendo a genética — "seus problemas biomatemáticos"[31] —, mas imaginou que Shannon poderia encontrar pontos em comum com Von Neumann, o outro grande jovem matemático do instituto. Em geral, Shannon permanecia em seu quarto em Palmer Square. A esposa, que tinha vinte anos e deixara Radcliffe para ficar a seu lado, considerava o ambiente cada vez mais melancólico, ficando em casa enquanto Claude tocava clarinete acompanhando o disco de Bix Beiderbecke no gramofone. Norma pensou que ele estivesse deprimido e quis que consultasse um psiquiatra. Conhecer Einstein fora ótimo, mas a emoção já tinha se dissipado. O casamento chegara ao fim. Ela foi embora antes do fim do ano.

Shannon não podia mais ficar em Princeton. Ele queria ir atrás da transmissão das informações e da inteligência, uma noção mal definida, mas, ainda assim, mais pragmática do que a abstrata física teórica que dominava a pauta do instituto. Além disso, a guerra se aproximava. As pautas de pesquisa estavam mudando em toda parte. Vannevar Bush tinha se tornado o líder da Comissão Nacional de Pesquisas em Defesa, que designou a Shannon o "Projeto 7"[32]: os aspectos matemáticos dos mecanismos de controle balístico dos canhões antiaéreos — "a tarefa", na descrição seca da CNPD, "de aplicar correções ao controle do canhão de modo a fazer com que o projétil e o alvo cheguem simultaneamente à mesma posição".[33] Os aviões tinham subitamente tornado obsoleta quase toda a matemática empregada na balística: pela primeira vez, os alvos se moviam a velocidades pouco inferiores à dos próprios mísseis. O problema era complexo e de extrema relevância, tanto em terra como no mar. Londres estava organizando baterias de canhões pesados que disparavam obuses de 3,7 polegadas. Acertar projéteis em aviões velozes exigia intuição e sorte ou uma vasta quantidade de computações implícitas feitas por engrenagens, alavancas e motores. Shannon analisava tanto problemas físicos como computacionais: o maquinário tinha de rastrear trajetórias rápidas em três dimensões, com alavancas e engrenagens controladas por calculadores de proporção e integradores. Um canhão antiaéreo em si se comportava como um sistema dinâmico, sujeito a "coices" e oscilações que poderiam ser previstos ou não. (Quando as equações diferenciais eram não lineares, Shannon avançava pouco, e tinha consciência disso.)

Ele tinha passado dois de seus verões trabalhando para os Laboratórios Telefônicos Bell em Nova York. Seu departamento de matemática também estava envolvido no projeto do controle balístico e pediu a Shannon que participasse. Tratava-se de um trabalho para o qual o analisador diferencial havia qualificado Shannon. Um canhão antiaéreo automatizado era um computador analógico: tinha de converter em movimentos mecânicos aquilo que consistia, na prática, em equações diferenciais de segunda ordem; tinha de aceitar informações obtidas com telêmetros ou com o novo radar, ainda experimental; e era preciso filtrar e homogeneizar esses dados para compensar os erros.

Nos Laboratórios Bell, a última parte desse problema parecia familiar. Aquilo se assemelhava a uma questão que tinha afetado a comunicação telefônica. Os dados cheios de ruído lembravam a estática verificada na linha. "Há uma analogia óbvia", relataram Shannon e seus colegas, "entre o problema da homogeneização dos dados para eliminar ou reduzir o efeito dos erros de rastreamento e o problema da separação entre o sinal e a interferência do ruído nos sistemas de comunicação."[34] Os dados consistiam num sinal. O problema todo não passava de "um caso especial da transmissão, manipulação e utilização da informação e da inteligência". A especialidade do pessoal dos Laboratórios Bell.

Por mais que o telégrafo tivesse sido transformador, por mais milagroso que o rádio sem fio pudesse agora parecer, a comunicação elétrica tinha se tornado sinônimo de telefone. O "telefone falante elétrico" surgiu pela primeira vez nos Estados Unidos com a criação de alguns circuitos experimentais nos anos 1870. Na virada do século, a indústria telefônica já havia ultrapassado a do telégrafo sob todos os critérios — número de mensagens transmitidas, metros de fiação instalados, capital investido —, e o volume de usuários do telefone dobrava em intervalos de poucos anos. O motivo por trás disso não era nenhum mistério: qualquer um era capaz de usar um telefone. As únicas habilidades exigidas eram a capacidade de falar e a de ouvir: nada de escrita, nada de códigos, nada de teclados. Todos reagiam ao som da voz humana — mais do que palavras, ela transmitia também as emoções.

As vantagens eram óbvias — mas não para todos. Elisha Gray, telegrafista que chegou perto de superar Alexander Graham Bell e se tornar o inventor do telefone, disse ao seu próprio advogado de patentes em 1875 que o trabalho dificilmente valeria a pena: "Bell parece estar gastando toda sua energia no telégrafo falante. Por maior que seja o interesse científico nesse aparelho, ele não tem atualmente nenhum valor comercial, pois é possível cuidar de um número bem maior de assuntos aplicando às linhas os métodos já em uso".[35] Três anos mais tarde, quando Theodore N. Vail deixou o Departamento dos Correios para se tornar o primeiro diretor-geral (e único administrador assalariado) da nova Companhia Telefônica Bell, o secretário assistente dos correios escreveu, nervoso:

> Mal posso acreditar que um homem dotado de tamanha capacidade de julgamento [...] seria capaz de largar tudo por essa estupidez ianque (um pedaço de arame com dois chifres de gado texano presos às extremidades, de modo a fazer com que a traquitana soasse como o mugido de um novilho) chamada telefone![36]

No ano seguinte, na Inglaterra, o engenheiro chefe do Escritório Geral dos Correios, William Preece, relatou ao Parlamento:

> Diria que as descrições que chegam até nós de seu uso na América são um pouco exageradas, embora haja na América condições que tornam o uso de tal instrumento mais necessário do que aqui. Temos aqui uma superabundância de mensageiros, meninos de recados e gente do tipo. [...] Há um deles em meu escritório, mas sua função é principalmente decorativa. Se quiser enviar uma mensagem — uso uma campainha ou emprego um rapaz para levá-la.[37]

Um dos motivos desses erros de avaliação era a habitual falta de imaginação diante de uma tecnologia radicalmente nova. O telégrafo estava aos olhos de todos, mas as lições trazidas por ele não tinham uma relação muito clara com esse novo aparelho. O telégrafo exigia a alfabetização — o telefone abraçava a oralidade. Para ser enviada via telégrafo, uma mensagem tinha antes de ser escrita, codificada e transmitida por um intermediário treinado. Para usar o telefone, bastava falar. Justamente por esse motivo, parecia um brinquedo. Na verdade, lembrava um brinquedo conhecido, feito a partir de cilindros de lata e linha. O telefone não deixava registros permanentes. *O Telefone* não tinha futuro como nome de um veículo de imprensa. Os empresários e comerciantes o consideravam pouco sério. Se o telégrafo trabalhava com fatos e números, o telefone apelava às emoções.

A recém-fundada empresa Bell não encontrou dificuldade para transformar isso num atrativo de seu produto. Seus defensores gostavam de citar Plínio, "É a voz viva que seduz a alma", e Thomas Middleton, "Como é doce o som da voz de uma mulher de virtude". Por outro lado, havia certa ansiedade envolvendo a ideia da captura e da coisificação das vozes — o gramofone também tinha acabado de chegar. Como disse um comentarista: "Por mais que fechemos nossas portas e janelas, selando hermeticamente os buracos das fechaduras e as frestas do sistema de aquecimento com toalhas e cobertores, tudo aquilo que dissermos, seja para nós mesmos ou para uma companhia, será ouvido por terceiros".[38] Até então, as vozes eram algo que pertencia à esfera privada.

A nova geringonça tinha de ser explicada e, em geral, isso era feito por meio de uma comparação com a telegrafia. Havia um transmissor e um receptor, e fios ligavam um ao outro, e *alguma coisa* era transportada pelo fio sob a forma de eletricidade. No caso do telefone, essa coisa era o som, simplesmente convertido de ondas de pressão no ar para ondas de corrente elétrica. Uma vantagem era aparente: o telefone seria sem dúvida útil aos músicos. O próprio Bell, viajando pelo país para promover a nova tecnologia, encorajava essa forma de pensar, fazendo demonstrações em salões de concerto onde orquestras completas e coros tocavam *America* e *Auld Lang Syne* para seu aparelho. Bell encorajava as pessoas a pensar no telefone como um aparelho de emissão e transmissão, capaz de enviar músicas e sermões por longas distâncias, trazendo a sala de concertos e a igreja para a sala de estar. Os jornais e os comentaristas em geral seguiam o mesmo rumo. É isso o que ocorre quando analisamos uma tecnologia em termos abstratos. Assim que as pessoas puseram as mãos nos telefones, elas souberam o que fazer. Bastava falar.

Numa palestra feita em Cambridge, o físico James Clerk Maxwell ofereceu uma descrição científica da conversa telefônica:

O falante se dirige ao transmissor num extremo da linha e, no outro extremo, o ouvinte aproxima a orelha do receptor, escutando o que o falante disse. Em seus dois extremos, o processo é tão semelhante ao antigo método de falar e ouvir que nenhuma prática preparatória se faz necessária por parte dos operadores.[39]

Também ele tinha notado a facilidade do uso.

Assim, em 1880, quatro anos depois de Bell ter transmitido as palavras "Sr. Watson, venha cá, quero vê-lo", e três anos depois de o primeiro par de telefones ter sido alugado por vinte dólares, mais de 60 mil aparelhos estavam em uso nos Estados Unidos. Os primeiros fregueses compravam pares de telefones para estabelecer a comunicação entre dois pontos: entre a fábrica e seu escritório administrativo, por exemplo. A rainha Vitória instalou um telefone no Castelo de Windsor e outro no Palácio de Buckingham (fabricados em marfim — um presente do empolgado Bell). A topologia mudou quando o número de aparelhos passíveis de serem chamados por outros ultrapassou um limiar crítico, algo que ocorreu com uma rapidez surpreendente. Então surgiram as redes comunitárias, cujas múltiplas conexões eram administradas por um novo aparato, chamado de central telefônica.

A fase inicial de ignorância e ceticismo acabou num piscar de olhos. A segunda fase, de diversão e entretenimento, não durou muito mais. As empresas logo esqueceram suas dúvidas quanto à seriedade do aparelho. Agora todos podiam ser profetas do telefone — repetindo algumas das previsões que já tinham sido feitas em relação ao telégrafo —, mas os comentários mais visionários vieram daqueles que se concentraram no poder exponencial da interconexão. A *Scientific American* abordou "O futuro do telefone" já em 1880, enfatizando a formação de "pequenos conjuntos de comunicantes telefônicos". Quanto maior fosse uma rede e quanto mais diversificados fossem seus interesses, maior seria esse potencial.

Aquilo que o telégrafo conquistou em anos o telefone conseguiu em meses. Num ano o aparelho não passava de brinquedo científico, com infinitas possibilidades de uso prático; no ano seguinte, tinha se convertido no elemento básico do sistema de comunicação mais conveniente e complexo já visto no mundo, e também o de expansão mais rápida. [...] Logo o telefone será a regra e não a exceção nas empresas, presente até na moradia dos mais ricos, ligando a todos por meio das

> trocas telefônicas, não apenas em nossas cidades como também nas regiões mais remotas. O resultado não pode ser menos do que uma nova organização da sociedade — um estado das coisas no qual cada indivíduo, por mais isolado que esteja, poderá se comunicar de forma imediata com todos os demais membros da comunidade, poupando incalculáveis complicações sociais e empresariais, idas e vindas desnecessárias, frustrações, atrasos e tantos outros males e pequenas irritações.
>
> Está se aproximando o momento em que os membros esparsos das comunidades civilizadas serão tão unidos em termos de comunicação telefônica instantânea quanto o são os vários membros do corpo por meio do sistema nervoso.[40]

Os membros esparsos que usavam telefones chegavam a meio milhão de pessoas já em 1890; em 1914, eram 10 milhões. Já se pensava, corretamente, que o telefone era o responsável pelo rápido progresso industrial. Era difícil exagerar ao comentar o assunto. Os setores que dependiam da "comunicação instantânea entre pontos separados"[41] foram relacionados pelo Departamento do Comércio dos Estados Unidos em 1907: "agricultura, mineração, comércio, manufatura, transportes e, com efeito, todos os vários segmentos da produção e distribuição de recursos naturais e artificiais". Para não falar nos "sapateiros, limpadores e até lavadeiras". Em outras palavras, cada engrenagem no motor da economia. "A existência do tráfego telefônico é essencialmente um indicador de tempo sendo poupado", comentou o departamento. Eram observadas mudanças na estrutura da vida e da sociedade que ainda pareceriam novas um século mais tarde: "Os últimos anos trouxeram tal extensão de linhas telefônicas pelos vários distritos de veraneio que permitiram aos empresários se afastar de seus escritórios durante dias e, ainda assim, manter contato com o trabalho e as funções de seus cargos". Em 1908, John J. Carty, que se tornou o primeiro diretor dos Laboratórios Bell, apresentou uma análise informacional para mostrar como o telefone tinha redesenhado o panorama urbano de Nova York — defendendo que o aparelho, tanto quanto o elevador, havia tornado possível o arranha-céu.

> Pode parecer ridículo dizer que Bell e seus sucessores foram os pais da arquitetura comercial moderna — do arranha-céu. Mas espere um minuto. Pense no Edifício Singer, no Edifício Flatiron, no Broad Exchange, no Trinity, ou em qualquer outro dos grandes prédios de escritórios. Imagine quantas mensagens entram e saem

desses edifícios todos os dias. Imagine que não houvesse telefone e cada mensagem tivesse de ser transmitida por um mensageiro. Quanto espaço será que os elevadores deixariam para os escritórios? Estruturas desse tipo seriam uma impossibilidade econômica.[42]

Para possibilitar a rápida expansão dessa extraordinária rede, o telefone exigiu novas tecnologias e novas ciências. Em geral, eram de dois tipos. O primeiro estava associado à eletricidade em si: medir quantidades elétricas, controlar a onda eletromagnética, como esta era agora entendida — sua modulação em amplitude e frequência. Maxwell estabelecera nos anos 1860 que os pulsos elétricos, o magnetismo e a própria luz eram todos manifestações de uma mesma força: "afetações da mesma substância", sendo a luz mais parecida com um caso de "perturbação eletromagnética propagada pelo campo de acordo com as leis eletromagnéticas".[43] Essas eram as leis que os engenheiros elétricos tinham agora que aplicar, unindo o telefone e o rádio, entre outras tecnologias. Até o telégrafo empregava um tipo simples de modulação de amplitude, na qual apenas dois valores importavam, o máximo, equivalente a "ligado", e o mínimo, representando "desligado". A transmissão do som exigia uma corrente bem mais forte, controlada com mais precisão. Os engenheiros tinham de compreender o retorno: somar a saída de um amplificador de força, como o bocal de um telefone, à sua entrada. Tinham de projetar repetidores feitos de válvulas termiônicas para transmitir a corrente por longas distâncias, tornando possível a primeira linha transcontinental, em 1914, ligando Nova York a San Francisco com 5400 quilômetros de fios suspensos por 130 mil postes. Os engenheiros descobriram também como modular correntes individuais de modo a combiná-las num mesmo canal — multiplexação — sem que estes perdessem a identidade. Já em 1918, conseguiam transmitir quatro conversas diferentes por meio de um mesmo par de fios. Mas não eram as *correntes* que preservavam sua identidade. Antes que os engenheiros tivessem percebido, estavam pensando em termos da transmissão de um *sinal*, uma entidade abstrata, bastante distinta das ondas elétricas que o encarnavam.

Um segundo tipo de ciência, menos definido, estava relacionado à organização das conexões — alternação, numeração e lógica. Esse ramo nasceu da conclusão original de Bell, em 1877, segundo a qual os telefones não teriam de ser vendidos aos pares — cada telefone individual podia ser conectado a muitos outros, mas não diretamente por meio de fios, e sim através de uma "central". George W. Coy, telegrafista de New Haven, em Connecticut, construiu ali a primeira "central telefônica", com "plugues" e "entradas" feitos com os parafusos de carruagem e pedaços de arame de cercas velhas. Ele patenteou sua invenção e trabalhou como o primeiro "telefonista" do mundo. Com o constante fazer e desfazer das conexões, os plugues se desgastavam rapidamente. Um dos primeiros aprimoramentos foi uma alavanca formada por duas placas unidas por uma dobradiça, semelhante a um canivete: a "chave de alavanca", ou, como logo passou a ser chamada, a "chave". Em janeiro de 1878, a central de Coy era capaz de receber duas conversas simultâneas entre quaisquer dos 21 telefones ligados a ela. Em fevereiro, Coy publicou uma lista dos assinantes: ele próprio e alguns amigos; vários médicos e dentistas; os correios, a delegacia de polícia e um clube mercantil; e alguns mercados de peixe e carne. Foi chamada de primeira lista telefônica do mundo, mas estava longe de sê-lo: uma página, sem organização alfabética, e nenhum número associado aos nomes. O número de telefone ainda não tinha sido inventado.

Tal inovação ocorreu no ano seguinte em Lowell, no estado de Massachusetts. Ali, no fim de 1879, quatro telefonistas administravam as conexões entre duzentos assinantes, gritando uns para os outros na sala da central telefônica. Uma epidemia de sarampo eclodiu, e o dr. Moses Greeley Parker temeu que, se os telefonistas fossem infectados, seria difícil substituí-los. Ele sugeriu que cada telefone fosse identificado por um número. Sugeriu também que os números fossem relacionados numa lista alfabética dos assinantes. Essas ideias não puderam ser patenteadas, e foram surgindo de novo e de novo nas centrais telefônicas de todo o país, onde as redes cada vez maiores estavam criando agrupamentos que precisavam ser organizados. As listas telefônicas logo passaram a representar a mais abrangente relação de membros de populações humanas — indicando até mesmo como encontrá-los — de todos os tempos. (Elas se tornaram os maiores e mais densos livros do mundo — quatro volumes para Londres; um tomo de 2600 páginas para Chicago — e pareciam ser uma parte permanente e indispensável da ecologia informacional do mundo até que, de repente, deixaram de sê-lo. Tornaram-se praticamente obsoletas na virada do século XXI. As empresas telefônicas americanas começaram a tirá-las de circulação em 2010; em Nova York, o fim da distribuição das listas telefônicas deve poupar 5 mil toneladas de papel.)

No início, os usuários não gostaram da impessoalidade dos números telefônicos, e os engenheiros duvidavam que as pessoas fossem capazes de lembrar números compostos por mais de quatro ou cinco dígitos. A Companhia Bell, no fim, foi obrigada a bater o pé. Os primeiros telefonistas eram rapazes na adolescência, contratados a um baixo custo entre os mensageiros telegráficos, mas com a disseminação das centrais telefônicas descobriu-se que os rapazes eram agitados demais, dados a brincadeiras e palhaçadas — era mais provável encontrá-los brigando no chão uns com os outros do que sentados em seus bancos para desempenhar as tarefas de precisão e repetição de um telefonista.[44] Havia uma nova fonte de mão de obra barata disponível e, já em 1881, quase todos os telefonistas eram mulheres. Em Cincinnati, por exemplo, W. H. Eckert relatou ter contratado 66 "mocinhas" que eram "muito superiores" aos rapazes: "São mais calmas, não bebem cerveja e estão sempre à disposição".[45] Ele nem precisava acrescentar que a empresa podia pagar a uma mulher tão pouco quanto a um adolescente, ou ainda menos. Tratava-se de um trabalho desafiador, que logo passou a exigir treinamento. Os operadores telefônicos tinham de ser ágeis na compreensão de muitas vozes e sotaques diferentes, deviam manter a compostura diante da impaciência e da falta de educação e ainda se submetar a longas horas exercitando sem parar os membros superiores, usando fones de ouvido que mais pareciam arreios. Alguns homens achavam que aquilo fazia bem a elas. "A movimentação dos braços acima da cabeça, seguida de sua extensão à esquerda e à direita, ajuda no desenvolvimento dos braços e do peitoral", dizia a *Every Woman's Encyclopedia*, "transformando jovens magras e franzinas em moças fortes. Não há garotas de pouca saúde nem aparência anêmica nas centrais telefônicas."[46] Somada a outra nova tecnologia, a máquina de escrever, a central telefônica catalisou a introdução das mulheres na força de trabalho mais qualificada, mas nem mesmo batalhões de telefonistas humanas seriam capazes de gerenciar uma rede na escala que agora se desenhava. A distribuição das chamadas teria de ser automatizada.

Isso significava um elo mecânico para memorizar não apenas o som da voz de quem fazia a chamada, mas também um número — identificando uma pessoa, ou ao menos outro telefone. O desafio de converter um número para a forma elétrica ainda exigia engenhosidade: primeiro tentou-se usar botões, depois um disco dentado de aparência estranha, com dez posições para os dedos indicando os dígitos decimais, enviando pulsos pela linha. Então os pulsos codificados passaram a servir como um agente de controle na central telefônica, onde outro mecanismo escolhia entre um conjunto de circuitos e estabelecia a conexão. Tudo isso tomado em conjunto representava um nível de complexidade sem precedentes nas interações entre humanos e máquinas, números e circuitos. A ideia não foi ignorada pela empresa, que gostava de promover seus interruptores automáticos como "cérebros elétricos". Depois de tomar emprestado da telegrafia o relé eletromecânico — o emprego de um circuito para controlar outro —, as empresas telefônicas tinham reduzido as dimensões e o peso do aparato a pouco mais de cem gramas, e agora fabricavam vários milhões dessas peças anualmente.

"O telefone continua sendo a maior das maravilhas elétricas", escreveu um historiador em 1910 — já nessa época os historiadores começavam a tratar do telefone. "Não há mais nada capaz de fazer tanto com tão pouca energia. Não há nada que esteja mais envolto no desconhecido."[47] A cidade de Nova York tinha várias centenas de milhares de usuários telefônicos listados, e a *Scribner's Magazine* sublinhou esse impressionante fato: "Quaisquer dois membros deste grande conjunto podem, em questão de cinco segundos, ser postos em comunicação um com o outro, tamanha a capacidade de acompanhar o ritmo das necessidades públicas apresentada pela ciência da engenharia".[48] Para estabelecer a conexão, a central telefônica tinha crescido e se tornado um monstro composto de 2 milhões de partes soldadas, 6400 quilômetros de fios e 15 mil lâmpadas sinalizadoras.[49] Já em 1925, quando um conjunto de grupos de pesquisa telefônica foi formalmente organizado sob a forma dos Laboratórios Telefônicos Bell, um "localizador de linha" mecânico com capacidade para 400 linhas estava substituindo os discos dentados eletromecânicos de 22 posições. A American Telephone & Telegraph Company estava consolidando seu monopólio. Os engenheiros se esforçavam para reduzir o tempo de espera. Inicialmente, as chamadas de longa distância exigiam a conexão com uma segunda telefonista e a espera por uma chamada de resposta, mas logo a interconexão de centrais locais teria de permitir a discagem automática. As complexidades se multiplicavam. Os Laboratórios Bell precisavam de matemáticos.

Aquilo que teve início como o Departamento de Consultoria em Matemática cresceu e se tornou um centro de matemática prática como nenhum outro já visto. Não era como as prestigiosas torres de marfim de Harvard e Princeton. Para o mundo acadêmico, esse centro era quase invisível. Seu primeiro diretor, Thornton C. Fry, gostava da tensão entre teoria e prática — as culturas em conflito. "Para um matemático, o argumento deve ser perfeito em cada detalhe, caso contrário, estará errado", escreveu Fry em 1941. "Ele chama isso de 'raciocínio rigoroso'. O engenheiro comum chama de 'procurar pelo em ovo'."[50]

> O matemático tende também a idealizar todas as situações com as quais se depara. Seus gases são "ideais"; seu condutores, "perfeitos"; suas superfícies, "homogêneas". Ele chama isso de "reduzir ao essencial". O engenheiro provavelmente rotularia isso de "ignorar os fatos".

Em outras palavras, matemáticos e engenheiros não podiam trabalhar uns sem os outros. Todo engenheiro elétrico agora precisava saber lidar com a análise elementar das ondas tratadas como sinais sinusoidais. Mas novas dificuldades surgiam para compreender o funcionamento das redes, e teoremas de redes foram criados para abordar esse funcionamento matematicamente. Os matemáticos aplicaram a teoria das filas aos conflitos de uso; desenvolveram gráficos e árvores para lidar com questões das linhas principais e secundárias entre diferentes cidades; e usaram a análise combinatória para esmiuçar os problemas de probabilidade relacionados à telefonia.

E havia também a questão do ruído. De início, isso não pareceu ser um problema para os teóricos (pelo menos não para Alexander Graham Bell, por exemplo). Mas tratava-se de algo que estava sempre presente, sempre interferindo na linha — estalos, chiados, estática que causava interferência ou distorção na voz que entrava pelo bocal. O ruído também afetava o rádio. Na melhor das hipóteses, a interferência permanecia no fundo, quase imperceptível para as pessoas. Na pior, a profusão de elementos sujos estimulava a imaginação dos usuários:

> Havia engasgos e gargarejos, oscilações e atritos, assovios e gritos. Tínhamos o farfalhar de folhas, o coaxar de sapos, o sibilar do vapor e o bater das asas de um pássaro. Havia os cliques dos fios telegráficos, trechos de conversas vindas de outros telefones, curiosos gritinhos diferentes de qualquer som conhecido. [...] A noite era mais ruidosa do que o dia e, na fantasmagórica hora da meia-noite, por estranhas razões que ninguém conhece, a babel atingia seu auge.[51]

No entanto, os engenheiros podiam agora *ver* o ruído em seus osciloscópios, interferindo com o formato de suas ondas e degradando-as. Naturalmente, eles desejavam medi-lo, por mais que houvesse algo de quixotesco em medir algo tão aleatório e sobrenatural. Na verdade, havia uma maneira de fazê-lo, e Albert Einstein tinha mostrado qual seria.

Em 1905, seu melhor ano, Einstein publicou um estudo a respeito do movimento browniano, o movimento aleatório e inconstante de pequenas partículas suspensas num líquido. Antony van Leeuwenhoek o tinha descoberto com seu protótipo de microscópio, e o fenômeno foi batizado em homenagem a Robert Brown, botânico escocês que o estudou de perto em 1827: primeiro o pólen na água, depois a fuligem e a rocha em pó. Brown convenceu-se de que essas partículas não estavam vivas — não eram animálculos —, mas simplesmente não permaneciam paradas. Numa verdadeira tour de force matemática, Einstein explicou o fato como consequência da energia do calor das moléculas, cuja existência ele comprovou dessa maneira. Partículas visíveis ao microscópio, como o pólen, são bombardeadas por colisões moleculares e leves o bastante para serem jogadas de lá para cá. As flutuações das partículas, individualmente imprevisíveis, expressam de modo coletivo as leis da mecânica estatística. Por mais que o fluido possa estar em repouso e o sistema esteja em equilíbrio termodinâmico, o movimento irregular prossegue enquanto a temperatura estiver acima do zero absoluto. Da mesma maneira, ele mostrou que a agitação térmica aleatória também afetaria elétrons livres em qualquer condutor elétrico — produzindo o ruído.

Os físicos prestaram pouca atenção aos desdobramentos elétricos da obra de Einstein, e foi somente em 1927 que o ruído térmico nos circuitos foi colocado sobre uma base matemática rigorosa, por dois suecos que trabalhavam nos Laboratórios Bell. John B. Johnson foi o primeiro a medir aquilo que percebeu ser o ruído intrínseco de um circuito, e que não tinha relação com falhas de projeto. Então Harry Nyquist apresentou uma explicação, derivando fórmulas para as flutuações na corrente e na voltagem numa rede idealizada. Nyquist era o filho de um agricultor e sapateiro cujo nome na verdade era Lars Jonsson, mas teve de mudar de nome porque sua correspondência estava se misturando à de outro Lars Jonsson. Os Nyquist imigraram para os Estados Unidos quando Harry era adolescente. Ele saiu da Dakota do Norte para os Laboratórios Bell graças à sua passagem por Yale, onde obteve um doutorado em física. Harry sempre pareceu ter o olhar voltado para questões mais amplas — que não se restringiam à telefonia em si. Já em 1918, começou a trabalhar num método para a transmissão de imagens por fios: "telefotografia". Sua ideia consistia em montar uma fotografia sobre um cilindro em rotação, submetê-la a um leitor e gerar correntes proporcionais à claridade ou escuridão da imagem. Em 1924, a empresa tinha um protótipo que conseguia enviar uma imagem de doze por dezoito centímetros em sete minutos. Mas Nyquist, entretanto, estava olhando para o passado e, naquele mesmo ano, numa convenção de engenheiros elétricos na Filadélfia, fez uma palestra com o modesto título de "Certos fatores que afetam a velocidade telegráfica".

Era sabido desde os primórdios da telegrafia que as unidades fundamentais do envio de mensagens eram distintas: pontos e traços. Tornou-se igualmente óbvio na era telefônica que, por sua vez, a informação útil era contínua: sons e cores, fundindo-se uns com os outros, misturando-se completamente ao longo de um espectro de frequências. Qual seria o modelo correto? Físicos como Nyquist tratavam as correntes elétricas como ondas, mesmo quando transmitiam sinais telegráficos distintos. Na época, a maior parte da corrente elétrica numa linha telegráfica era desperdiçada. De acordo com o ponto de vista de Nyquist, se esses sinais contínuos eram capazes de representar algo tão complexo quanto vozes, então os elementos da telegrafia, mais simples, não passariam de um caso específico. Em termos mais exatos, tratava-se de um caso específico de modulação de amplitude, no qual as únicas amplitudes interessantes eram *ligado* e *desligado*. Ao tratar os sinais telegráficos como pulsos no formato de ondas, os engenheiros puderam acelerar sua transmissão e combiná-los num único circuito — associando-os também com canais de voz. Nyquist queria saber o *quanto* — quantos dados telegráficos, e com que velocidade. Para responder a essa pergunta, ele descobriu uma abordagem engenhosa para a conversão de ondas contínuas em dados distintos, ou "digitais". O método de Nyquist consistia em obter uma amostragem das ondas a intervalos constantes, convertendo-as na prática a pedaços contáveis.

Um circuito transportava ondas de muitas frequências diferentes: uma "banda" de ondas, diziam os engenheiros. O intervalo das frequências — a amplitude dessa banda, ou "largura de banda" — servia como medida da capacidade do circuito. Uma linha telefônica podia suportar frequências de aproximadamente quatrocentos a 3400 hertz, ou ondas por segundo, para uma largura de banda de 3 mil hertz. (Isso cobriria a maioria dos timbres de uma orquestra, mas as notas mais agudas do flautim ficariam de fora.) Nyquist queria formular isso nos termos mais gerais possíveis. Ele calculou uma fórmula para a "velocidade da transmissão de informações".[52] E demonstrou que, para transmitir informações a uma certa velocidade, um canal precisaria de uma determinada largura de banda mensurável. Se fosse estreita demais, seria necessário diminuir a velocidade de transmissão. (Mas, com o tempo e a engenhosidade, percebeu-se mais tarde que até mensagens complexas podiam ser enviadas através de um canal de largura de banda baixíssima: um tambor, por exemplo, tocado a mão, produzindo notas de dois tons diferentes.)

O colega de Nyquist, Ralph Hartley, que começou a carreira como especialista em receptores de rádio, ampliou esses resultados numa apresentação feita em meados de 1927, num congresso internacional realizado às margens do lago Como, na Itália. Hartley usou uma palavra diferente: "informação". Tratava-se de uma boa ocasião para ideias grandiosas. Os cientistas tinham vindo de todo o mundo para se reunir na celebração do centenário da morte de Alessandro Volta. Niels Bohr falou a respeito da nova teoria quântica e apresentou pela primeira vez seu conceito de complementaridade. Hartley ofereceu aos ouvintes tanto uma teoria fundamental como um novo conjunto de definições.

O teorema era uma extensão da fórmula de Nyquist, e podia ser expresso em palavras: a maior quantidade de informação que pode ser transmitida num dado intervalo de tempo é proporcional à amplitude de frequência disponível (ele ainda não empregou o termo *largura de banda*). Hartley estava trazendo a público um conjunto de ideias e pressupostos que vinham se tornando parte da cultura inconsciente da engenharia elétrica, e da cultura dos Laboratórios Bell em especial. Primeiro havia a ideia da informação em si. Era preciso delimitar seu escopo. "Em seu uso comum", disse ele, "a informação é um termo muito elástico."[53] Trata-se do objeto da comunicação — que pode, por sua vez, ser diretamente falada, escrita ou o que seja. A comunicação se dá por meio de símbolos — Hartley citou como exemplos as "palavras" e os "pontos e traços". Por convenção, os símbolos transmitem um "significado". Até esse ponto, o que se tinha era uma sequência de conceitos escorregadios. Se a meta era "eliminar os fatores psicológicos envolvidos" e estabelecer uma medida "em termos de quantidades puramente físicas", Hartley precisava de algo definido e contável.

Ele começou pela contagem de símbolos — independentemente de seu significado. Toda transmissão continha um número contável de símbolos. Cada símbolo representava uma escolha; cada um era selecionado a partir de um determinado conjunto de símbolos possíveis — um alfabeto, por exemplo —, e o número de possibilidades também era passível de ser contado. O número de palavras possíveis não é tão fácil de contar, mas, mesmo na linguagem comum, cada palavra representa uma escolha em meio a um conjunto de possibilidades:

> Na frase "As maçãs são vermelhas", por exemplo, a segunda palavra eliminou outros tipos de fruta e todos os demais objetos em geral. A terceira dirige a atenção para alguma propriedade ou condição das maçãs, e a quarta elimina todas as outras cores possíveis. [...]
>
> Obviamente, o número de símbolos disponíveis numa dada seleção varia muito de acordo com o tipo de símbolo empregado, com os comunicadores particulares e com o grau de entendimento prévio existente entre eles.[54]

Hartley teve de admitir que alguns símbolos poderiam transmitir mais informação, no sentido mais *comum* da palavra, do que outros. "As simples palavras 'sim' e 'não', por exemplo, quando usadas ao fim de uma discussão prolongada, podem ter um significado extraordinário." Os ouvintes eram capazes de pensar em seus próprios exemplos. Mas a ideia era subtrair o conhecimento humano da equação. Afinal, telégrafos e telefones são estúpidos.

Intuitivamente, parece claro que a quantidade de informação deve ser proporcional ao número de símbolos: o dobro de símbolos, o dobro de informação. Mas um ponto ou um traço — um símbolo de um conjunto que possui apenas dois integrantes — transmite menos informação do que uma letra do alfabeto e muito menos informação do que uma palavra escolhida a partir de um dicionário de mil palavras. Quanto maior o número de símbolos possíveis, mais informação é transmitida por uma determinada seleção. Qual a relação entre essas grandezas? A equação escrita por Hartley era:

$$H = n \log s$$

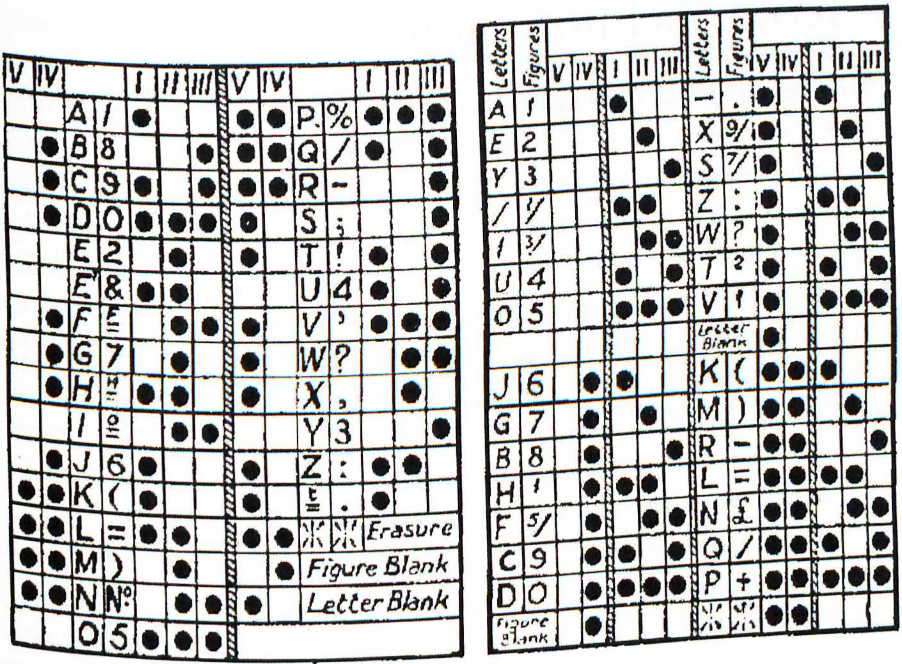
sendo H a quantidade de informação, n o número de símbolos transmitidos, e s o tamanho do alfabeto. Num sistema de pontos e traços, s é apenas 2. Um único caractere chinês tem muito mais peso do que um ponto ou traço do código Morse — seu valor é muito maior. Num sistema que tivesse um símbolo para cada palavra de um dicionário de mil palavras, *s* seria igual a 1000.

Entretanto, a quantidade de informação não é proporcional ao tamanho do alfabeto. Essa relação é logarítmica: para dobrar a quantidade de informação, é preciso elevar ao quadrado o tamanho do alfabeto. Hartley ilustrou isso nos termos de um telégrafo impressor — um dentre os diversos dispositivos, tanto obsoletos como recém-criados, que passavam a ser ligados a circuitos elétricos. Telégrafos desse tipo usavam teclados dispostos de acordo com um sistema desenvolvido na França por Émile Baudot. Na verdade, eram os operadores humanos que usavam teclados — o aparelho traduzia as teclas pressionadas em aberturas e fechamentos dos contatos telegráficos, como de costume. O código Baudot usava cinco unidades para transmitir cada caractere, de modo que o número de caracteres possíveis era 2^5, ou 32. Em termos de conteúdo informacional, cada um desses caracteres era cinco vezes — e não 32 vezes — mais valioso do que suas unidades binárias básicas.

Enquanto isso, os telefones enviavam suas vozes humanas pela rede em alegres e curvilíneas ondas analógicas. Onde estavam os símbolos nesse caso? Como poderiam ser contados?

Hartley seguiu Nyquist ao argumentar que a curva contínua devia ser encarada como o limite ao qual se chegava por meio de uma sucessão de passos distintos, e que esses passos poderiam ser recuperados, na prática, por meio de amostras da onda colhidas em intervalos regulares. Assim, a telefonia poderia ser sujeitada ao mesmo tratamento matemático aplicado à telegrafia. Por meio de uma análise simples e convincente, ele mostrou que em ambos os casos a quantidade total de informação dependeria de dois fatores: o tempo disponível para a transmissão e a largura de banda do canal. Os discos fonográficos e os filmes em película poderiam ser analisados da mesma maneira.

Esses estranhos estudos de Nyquist e Hartley atraíram pouca atenção a princípio. Estavam longe de ser adequados para a publicação em revistas prestigiadas de matemática ou física, mas os Laboratórios Bell tinham sua própria publicação, a *Revista Técnica dos Laboratórios Bell*, e Claude Shannon os leu em suas páginas. Ele absorveu aquelas conclusões matemáticas, por mais que ainda estivessem inacabadas. Também reparou na dificuldade que os dois cientistas enfrentavam para definir seus termos. "Por velocidade de transmissão



O código Baudot.

da informação devemos entender o número de caracteres, representando diferentes letras, algarismos etc., que podem ser transmitidos num determinado intervalo de tempo."[55] Caracteres, letras, algarismos: coisas difíceis de contar. Havia também conceitos para os quais os termos ideais ainda não tinham sido definidos: "a capacidade de um sistema de transmitir uma sequência particular de símbolos...".[56]

Shannon pressentiu a promessa da unificação. Os engenheiros da comunicação estavam falando não apenas sobre fios, mas também sobre o ar, o "éter", e até fitas perfuradas. Estavam contemplando não apenas as palavras, mas também sons e imagens. Estavam representando o mundo todo sob a forma de símbolos, usando a eletricidade.