

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA DE SÃO CARLOS**

Aurélio Bianco Pena

**Da comunicação à informação: quando a prática ofusca
a teoria**

São Carlos

2020

Aurélio Bianco Pena

**Da comunicação à informação: quando a prática ofusca
a teoria**

Monografia apresentada ao Instituto de Física
de São Carlos da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para conclusão do
curso de Bacharelado em Física.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Cibelle Celestino Silva

**São Carlos
2020**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Pena, Aurélio Bianco

Da comunicação à informação: quando a prática ofusca a teoria / Aurélio Bianco Pena ; orientadora Cibelle Celestino Silva. – São Carlos, 2020.

26 p.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Física) – Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2020.

1. História da Física. 2. Teoria de comunicação. 3. Bit I. Título. Da comunicação à informação: quando a prática ofusca a teoria. II. Silva, Cibelle Celestino, orient.

RESUMO

PENA, A. **Da comunicação à informação:** quando a prática ofusca a teoria. 2020. 26p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Física) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

Normalmente é atribuído a Claude Elwood Shannon e a seu artigo "A Mathematical Theory of Communication" o papel de fundadores do campo conhecido hoje como teoria de informação. Este estudo traça um panorama geral dos desenvolvimentos científicos de 1922 até 1956 no campo da teoria de comunicação, mostrando que esta é resultado de anos de pesquisa e o esforço conjunto de diversos pesquisadores. Discutimos também os desenvolvimentos imediatamente posteriores à publicação de Shannon com enfoque particular no desentendimento a respeito da melhor forma de quantificar informação entre ele e Norbert Wiener, bem como na desvalorização da compreensão acerca do que é informação frente a suas aplicações tecnológicas.

Palavras-chave: História da física. Teoria da informação. Bit .

1 INTRODUÇÃO

Em uma caverna, um homem faz desenhos na pedra, desenhos de outros homens, animais e plantas. Alguns séculos depois, um círculo em volta de uma fogueira, uma matriarca conta histórias aos outros membros da tribo. A capacidade de transmitir e receber informação é tão antiga quanto a própria humanidade, a eficiência da transmissão e o desenvolvimento da sociedade estão intimamente relacionados. Um salto no tempo e notamos a invenção de logogramas, hieróglifos e alfabetos; a tradição oral lentamente dá lugar à escrita. Nascem impérios, os mensageiros romanos e os tambores da África correm e ecoam pelos continentes, carregando consigo notícias e informações. Finalmente, nos aproximamos da era moderna, as cartas cedem lugar para as novas maravilhas tecnológicas da revolução, o telégrafo dos Chappe sinaliza pelos céus de Paris, mensagens passam a se deslocar a velocidades maiores que qualquer homem ou cavalo. O domínio da eletricidade apenas impulsionou o progresso, e em meio a muitos aspirantes a inventores do telégrafo elétrico, surge Samuel Morse e Alfred Vail nos Estados Unidos, juntamente a William Cooke e Charles Wheatstone na Grã-bretanha, palavras agora viajavam em fios, e não demorou muito até cruzarem a barreira do Atlântico.

O desenvolvimento de um tratamento matemático para a informação, e consequentemente a fundação do que hoje conhecemos como teoria da informação, ocorreu na primeira metade do século XX e muitas vezes é atribuída ao matemático e engenheiro estadunidense Claude Elwood Shannon (1916-2001), que recebe a alcunha de "*pai da teoria de informação*". (1-3)

Este trabalho mostrará um panorama geral do caminho que foi traçado por diversos pesquisadores até a publicação célebre de Shannon em 1948, com enfoque na construção gradual dos conceitos e ideias. Além disso, buscamos estudar os motivos que levaram aos desenvolvimentos imediatamente posteriores ao trabalho de Shannon a se distanciarem das questões ontológicas da nova teoria, como o desentendimento a respeito da melhor definição de entropia no contexto informational, e valorizarem fortemente a aplicação tecnológica, como a construção de "máquinas pensantes".

Para tal, estudamos os desenvolvimentos a partir da década de 1920, em particular os trabalhos desenvolvidos nos laboratórios Bell pelos engenheiros Harry Nyquist (1889-1976) e Ralph Hartley (1888-1970) e na Europa pelo engenheiro eletrônico Karl Küpfmüller (1897-1977). Trabalhos que buscavam responder algumas perguntas importantes para o desenvolvimento da tecnologia da comunicação tais como: qual a velocidade máxima de transmissão de informação¹? Quanta informação uma fonte produz? Como "medir" a "quantidade de informação" produzida? Há um limite na quantidade de informação que pode ser enviada por um canal? Como transmitir de forma confiável mesmo lidando com ruído?

¹ No jargão da época o termo adequado seria inteligência, discutiremos a escolha na seção 2.

Em seguida, na seção 4, analisamos a publicação do trabalho "A Mathematical Theory of communication"(4) por Claude Shannon em 1948, considerado o artigo precursor do novo campo de estudos ao procurar matematizar a transmissão de informação.

Na seção seguinte 5, desafiamos a ideia de um trabalho fundador único, analisando trabalhos de contemporâneos de Shannon que chegaram a conclusões semelhantes, com destaque para o desentendimento acerca da melhor definição de entropia no contexto informacional entre Shannon e o renomado matemático estadunidense Norbert Wiener (1894-1964), um dos pensadores mais influentes do período.

Na seção 6, observamos os desenvolvimentos posteriores a 1948, limitando nossa análise à valorização da aplicação tecnológica da teoria em detrimento das investigações sobre a ontologia da informação.

Optamos pelo recorte acima, pois explorar todos os desenvolvimentos dos trabalhos de 1948 seria esboçar toda a história da teoria da informação incluindo suas diversas inclusões na psicologia, biologia, termodinâmica entre outros campos, o que não é o objetivo deste estudo.

2 METODOLOGIA

À disposição de um historiador da ciência existem diversas abordagens metodológicas possíveis para se estudar o passado. Neste trabalho utilizaremos a diacrônica (5), na qual procuramos observar o passado a luz de seus próprios problemas, métodos e soluções, sem impor a visão moderna como correta ou melhor que as demais concorrentes. Em contraste a essa forma de abordar o passado temos a abordagem anacrônica (5), a qual discrimina entre as teorias concorrentes baseado em fatos desconhecidos para a época e utiliza termos e jargões modernos e sem sentido para o contexto do estudo. Embora essa abordagem esteja superada e não seja mais utilizada por historiadores da ciência profissionais, ela ainda é comum em trabalhos de cunho histórico escritos por cientistas divulgadores e jornalistas. Para escapar do anacronismo, buscamos estudar e entender as fontes primárias – textos dos próprios cientistas da época – em seu contexto científico, construindo uma narrativa que considere também outros contextos, tais como filosófico, cultural, político, etc a depender das questões históricas investigadas. Todavia, é importante apontar que uma historiografia puramente diacrônica e contida no passado é impossível e indesejável do ponto de vista pedagógico, afinal os interlocutores deste trabalho estão no presente.

Isso posto, nos capítulos seguintes nos dedicamos a estudar a gênese da teoria de informação, em particular os trabalhos mais importantes publicados de 1924 a 1949. Ao longo do percurso, encontraremos termos e conceitos com significados diferentes para a época em relação à seus significados atuais. Por exemplo, a palavra informação não era utilizada e os cabos telegráficos de 1924 transmitiam o que os engenheiros denominavam por inteligência. Apenas anos depois a palavra informação começou a ser utilizada, passando a designar a commoditie que preenchia o interior dos cabos telegráficos.

3 PRECEDENTES

Ao longo da década de 1920, as sequelas da Primeira Guerra Mundial assolavam a Europa e os últimos soldados americanos retornavam para os Estados Unidos (6) para encarar uma década de profundas transformações sociais, políticas e econômicas. O êxodo rural se intensificou conforme mais e mais agricultores trocaram suas propriedades por trabalhos fabris; o fordismo, recém introduzido na indústria automobilística passou a dominar grande parte das cadeias produtivas. Isso gerou uma explosão na capacidade produtiva e consequentemente, conforme a população se tornava assalariada, na capacidade do mercado consumidor de absorver os novos produtos. Carros, máquinas de lavar roupa, torradeiras, rádios, telefones, entre outros produtos, passaram a integrar o dia-a-dia dos estadunidenses.

A popularização do rádio e do telefone na década de 1920, impulsionado pelas primeiras redes comerciais de rádio e expansão de centrais e linhas telefônicas criou uma forte demanda tecnológica na área da comunicação, culminando com a união de diversos grupos de pesquisa sob uma única instituição: os Laboratórios Bell (7).

3.1 Os Laboratórios Bell

Formados como um braço de pesquisa da *American Telephone and Telegraph Company* (AT&T), os Laboratórios Bell promoveram um encontro único para a área da comunicação: engenheiros e matemáticos (prática e teoria) trabalhando juntos; tal encontro, normalmente tenso²(7); elevou a instituição a um centro de matemática aplicada sem precedentes. No entanto, o instituto se mantinha praticamente invisível para o mundo acadêmico e os seus membros normalmente se limitavam a publicar no periódico de circulação interna, o *Bell Labs Technical Journal*, reduzindo o alcance das descobertas.

Nesse cenário, os trabalhos de Harry Nyquist e Ralph Hartley foram de grande importância para a formação posterior de uma teoria da comunicação, por isso, discutiremos de seus alguns aspectos em mais detalhe.

3.1.1 Os trabalhos de Harry Nyquist

Nyquist nasceu na Suécia e imigrou ainda jovem para os Estados Unidos (7), obteve seu doutoramento em física por Yale em 1917 passando a integrar os Laboratórios Bell no mesmo ano. Em 1924, apresentou uma palestra intitulada "Certain factors affecting telegraph speed" a qual gerou uma publicação de mesmo nome (8). Nela, Nyquist explora algumas variáveis que

² Os engenheiros, preocupados com o problema prático, valorizavam a aplicação dos métodos e não a validade universal da teoria, os matemáticos buscavam teoremas gerais não vinculados apenas a casos específicos, este conflito de interesses criava a tensão.

pareciam prejudicar a transmissão de inteligência, além de propor uma fórmula geral para a velocidade máxima de transmissão de inteligência em um sistema com um determinado código.

O primeiro fator abordado foi o formato das ondas transmissoras, Nyquist estuda as ondas retangular, senoidal e uma onda modificada proposta por ele. Segundo o cientista, a maior eficiência das ondas senoidais que estava sendo defendida por muitos engenheiros da época³ era falsa (8), mostrando que em sistemas operados em condições ótimas (máxima velocidade⁴) de transmissão de inteligência as ondas retangulares e as ondas modificadas seriam mais eficientes.

Em seguida, Nyquist faz algumas observações importantes, a primeira delas a respeito de ondas previsíveis não carregarem inteligência, isto é, não carregam consigo nenhuma informação nova e portanto não podem transmitir inteligência, nas palavras do autor:

"O fato de a componente [senoidal][...] não carregar inteligência [...] torna-se claro quando consideramos que seus valores são previsíveis a qualquer momento e portanto a componente pode ser produzida localmente."(8)

No trecho, notamos que Nyquist associa a transmissão de inteligência a incerteza na onda transmitida - uma onda perfeitamente previsível poderia ser produzida pelo destinatário a qualquer momento, assim, o remetente não enviou nenhuma inteligência pelo fio.

A segunda observação, fortemente apoiada nos trabalhos do engenheiro eletricista Jhon Carson (1886 - 1940) (9) (10) diz respeito a limitações de banda conforme a velocidade de transmissão. Isto é, para transmitir sinais em uma taxa determinada é preciso consumir uma largura de banda e caso o sistema não tenha banda suficiente parte da inteligência não é transmitida. Este segundo tópico gerou uma publicação própria em abril de 1928 intitulada "Certain topics in telegraph transmission theory".

Esses resultados foram explorados mais profundamente em julho do mesmo ano por Ralph Hartley que postulou uma lei mais geral para a interdependência da velocidade de transmissão e a largura de banda.

3.1.2 Os trabalhos de Ralph Hartley

Companheiro de Nyquist nos Laboratórios Bell e preocupado com as mesmas questões de transmissão de inteligência, o estadunidense Ralph Hartley ministrou um seminário no *International Congress of Telegraphy and Telephony* na Itália em 1927, posteriormente publicada no

³ Por exemplo: Crehore e Squier "A practical Trasmitter using the Sine Wave for Cable Telegraphy; Squier on an unbroken Alternating current for Cable Telegraphy"; ou Squier "A method of transmitting the Telegraph Alphabet Applicable for Radio, Land Lines and Submarine cables".

⁴ Vale notar que a definição desta velocidade é dada por ele no artigo como $W = K \log(m)$, onde k é uma constante e m é o número de valores possíveis do código (Se o código tem pontos e barras ou 0 e 1 temos m = 2. O alfabeto tem m = 26).

periódico interno dos Laboratórios Bell no ano seguinte sob o título "Transmission of Information". Hartley define o termo "informação" e propõe uma medida quantitativa para essa grandeza (11), defendendo que é preciso tratar as mensagens como uma sequência aleatória de símbolos e desconsiderar a interpretação que o destinatário faz da mensagem do remetente, ou seja, do ponto de vista da teoria as mensagens não precisam carregar significado, nas palavras do engenheiro ignorar o conteúdo semântico implica em “desconsiderar os fatores psicológicos da mensagem” (11).

O autor de "Transmission of Information" argumenta que para uma medida baseada em considerações físicas apenas, a mensagem não precisa ser relevante. A mensagem, segundo o artigo, pode ser completamente arbitrária; como uma máquina que seleciona letras aleatórias do alfabeto e as envia por um telégrafo⁵.

A segunda proposta do autor é em relação à forma de medir a informação, para Hartley, a quantidade de informação que é transmitida no sistema é dada por:

$$H = n \log(s) = \log s^n \quad (3.1)$$

Onde s é o número de símbolos para cada seleção (em código morse 2, no alfabeto 26) e n o número de seleções (5 letras corresponderiam a 5 seleções no conjunto de 26 símbolos que é o alfabeto).

Exemplificando a escolha do logaritmo, podemos tomar o caso do alfabeto. Cada escolha de letra corresponde a 1 em 26 possíveis símbolos. Portanto em uma escolha temos 26 possibilidades e em duas temos 676 (26^2) entretanto 2 letras não transmitem uma quantidade exponencialmente maior de informação que 1 letra. Na verdade ignorando os fatores interpretativos (psicológicos) 2 letras deveriam carregar exatamente o dobro da informação.

A escolha do logaritmo torna isso possível:

$$\begin{aligned} H &= n \log(s) = n \log(26) \\ \text{Primeira escolha : } H &= (1) \log(26) \\ \text{Segunda escolha : } H &= (2) \log(26) \\ \text{Enésima escolha : } H &= N \log(26) \end{aligned} \quad (3.2)$$

Hartley também vai expandir essas conclusões para sinais contínuos como os de telefone, defendendo que esses sinais transmitem quantidades finitas de informação e, portanto podem ser aproximados por pequenos degraus que formam a onda completa, esses degraus seriam os símbolos possíveis (s) na telefonia.

⁵ Hartley compara essa máquina a duas pessoas que não falam a mesma língua enviando mensagens por um telégrafo, quando as palavras do emissor, seriam praticamente uma sequência aleatória de letras para o receptor.

A partir disso, Hartley procura entender o limite da transmissão de informação para cada sistema com uma largura de banda definida, estudando os sistemas existentes à luz da nova teoria. Em suas conclusões, o estadunidense defende que dada uma quantidade de informação, um produto específico de largura de banda por tempo é requerido para que o sistema consiga realizar a transmissão.

As lacunas do estudo de Hartley, residem em dois pontos principais: (1) a definição de informação dada só funciona em sistemas nos quais cada símbolo (s) tem a mesma chance de ser escolhido, um dado viciado não poderia ser representado e (2) os resultados são apoiados exclusivamente na aplicação tecnológica, não há uma tentativa de generalização matemática dos conceitos.

3.1.3 Informação nos Laboratórios Bell

Uma proposta a respeito do significado de informação foi construída na década de 1920 nos Laboratórios Bell. Nyquist e Hartley defendem que informação é incerteza; o primeiro faz essa afirmação de forma indireta, através do exemplo das ondas senoidais. Ao propor que uma onda previsível poderia ser produzida pelo destinatário e por isso o remetente não está enviando informação, Nyquist indiretamente afirma que o envio de informação depende da indeterminação do sinal. Já Hartley afirma isso diretamente ao definir uma medida de quantidade de informação – para ele informação é sinônimo de indeterminação.

3.2 O velho continente

O período entreguerras na Europa foi marcado pela instabilidade política e social, causas da ascensão de regimes cada vez mais totalitários e extremistas que culminaram na Segunda Guerra Mundial. Nesse contexto surgiram poucos trabalhos sobre comunicação, e apenas Karl Küpfmüller foi citado nos desenvolvimentos posteriores.

3.2.1 Os trabalhos de Karl Küpfmüller

Küpfmüller foi um engenheiro e professor alemão que trabalhou durante a década de 1920 para a Siemens & Halske em Berlim. Nesse período realizou estudos sobre transmissão telegráfica e chegou a conclusões semelhantes às de Nyquist nos Estados Unidos (12) - principalmente a respeito das limitações na velocidade de transmissão impostas por limitações na largura de banda de sistemas. O alemão também investigou questões de estabilidade de sistemas (13) criticando a aplicabilidade do critério de Barkhausen no caso geral⁶.

⁶ O critério é uma condição matemática para a oscilação em circuitos elétricos, para mais detalhes ver (31). Posteriormente (em 1928) Nyquist abordou sistemas semelhantes chegando às mesmas conclusões e avançando em alguns pontos que não são relevantes para o nosso estudo.

3.2.2 Os trabalhos de Leo Szilárd

O físico nuclear Leo Szilárd (1898-1964), diferente dos demais cientistas até aqui, não estava estudando fenômenos ligados à comunicação quando propôs uma relação entre entropia e memória. O húngaro estava procurando uma forma de resolver o antigo paradoxo termodinâmico do demônio de Maxwell. Em seu artigo de 1929 (14), o autor defende que a ação do demônio em um sistema termodinâmico implicaria em uma medida e uma decisão; esse processo estaria associado a um aumento de entropia da forma $\Delta S = k \log(2)$. Expressão semelhante à encontrada por Hartley em seus estudos.

A conexão entre termodinâmica e teoria de informação vem do fato de o modelo de Szilárd permitir interpretação e análise termodinâmicas, que ao mesmo tempo implicam em um processo de decisão binária, sendo possível estabelecer uma relação quantitativa entre informação usada pelo demônio e diminuição de entropia do reservatório. Tal relação, a posteriori, foi utilizada por Norbert Wiener para definir um conceito próprio de informação em uma primeira tentativa de unir a teoria de informação à termodinâmica.

3.3 Depressão e guerra

A crise econômica de 1929 nos Estados Unidos marcou o inicio da recessão econômica que acompanharia o país pela década seguinte. Acompanhando a recessão, notamos uma redução considerável da produção científica sobre a teoria da comunicação em solo estadunidense. O engenheiro soviético Vladimir Kotelnikov (1908-2005) publicou, em 1933, um artigo sobre a capacidade de transmissão do éter⁷ (15), chegando às mesmas conclusões de Nyquist e Küpfmüller a respeito limitação de banda restringir também a velocidade máxima de transmissão. Esse trabalho não parece ter chegado aos Estados Unidos antes das publicações de Shannon, Wiener e Tuller em 1948 e 1949.

No final da década de 1930 eclodiu na Europa a Segunda Guerra, pouco tempo depois os Estados Unidos acompanharam e grande parte dos pesquisadores envolvidos na pesquisa em comunicação foram recrutados para os esforços de guerra (7), provocando um novo período sem publicações. Esse hiato terminou com uma nova onda de trabalhos a partir de 1946 que discutiremos nas seções seguintes.

⁷ Devido aos experimentos do final do século XIX e a relatividade restrita, em 1933 a existência éter já era questionada por muitos o que pode ter contribuído para a negligência em relação aos estudos do Russo, para um estudo aprofundado consultar (32).

4 OS TRABALHOS DE CLAUDE ELWOOD SHANNON

Claude Elwood Shannon nasceu em Petoskey, Michigan em 30 de abril de 1916 (16). Frequentou o ensino médio na *Gaylord High School*, escola na qual sua mãe lecionava, e se formou em 1932. No mesmo ano, entrou na Universidade de Michigan e em 1936 obteve uma formação dupla em engenharia elétrica e matemática. Após graduar-se, Shannon se inscreveu para operar o Analisador Diferencial de Vannevar Bush no MIT. A máquina era "uma plataforma metálica de cem toneladas cheia de eixos e engrenagens em movimento"(7) dedicada a resolver analogicamente equações diferenciais. A formação dupla de Shannon tornou-o extremamente qualificado para o trabalho de traduzir as equações em movimentos mecânicos no analisador.

Sob orientação de Bush, escreveu sua tese de mestrado relacionando os muitos circuitos, interruptores e relés do Analisador com a álgebra Booleana, resultando em sua primeira publicação em 1938 na *I.E.E.E Transactions* que seria premiada em 1940 pelo prêmio Alfred Noble das sociedades de engenharia dos Estados Unidos. No mesmo ano da premiação, Shannon recebeu doutorado em matemática com um trabalho que relacionava genética e álgebra Booleana.

Durante esse período, Shannon desenvolveu interesse pela área da comunicação, passando o verão de 1937 nos Laboratórios Bell. Dois anos depois escreveu uma carta a Bush (16) na qual cita os trabalhos de Hartley (11) e Carson (10) além de dizer:

"Estou tentando provar o seguinte teorema: para quaisquer operadores T R o comprimento de uma mensagem arbitrária f_1 multiplicado por seu espectro essencial e dividido pela distorção do sistema é menor que uma certa constante vezes o tempo de transmissão de F multiplicado por sua largura de espectro essencial ou - grosso modo - é impossível reduzir largura de banda vezes tempo de transmissão para uma distorção constante."(16)

Como citado pelo próprio Shannon, a ideia é parecida com o que foi proposto por Hartley para sistemas específicos em 1929 (11) . Entretanto, notamos a tentativa de aplicar uma linguagem matemática e encontrar uma prova para quaisquer operadores.

Shannon passou os anos de 1940-1941 entre os Laboratórios Bell e o Instituto de Estudos Avançados em Princeton sob tutela de Hermann Weyl. Em 1941 Shannon foi recrutado para compor o time de pesquisa dos Laboratórios Bell dedicando-se aos *anti-aircraft directors* - sistemas dedicados a observar aeronaves inimigas e calcular a mira dos mísseis em solo.

Em 1945 Shannon publica o artigo "A Mathematical Theory of Cryptography" no qual utiliza pela primeira vez o termo "*information theory*". Três anos depois, Shannon apresentaria seu artigo de maior impacto, "A Mathematical Theory of Communication" publicado em duas partes no periódico interno dos Laboratórios Bell, composto por vinte e três teoremas e sete

apêndices com provas matemáticas detalhadas (nem todas corretas (7)(18)) que mudariam o rumo da comunicação.

4.1 A Teoria Matemática da Comunicação

O artigo de 1948 de Shannon representa a realização de algumas ideias presentes na carta a Bush de 1939 (16). Em particular, a tentativa de provar teoremas gerais para a comunicação que independiam das aplicações tecnológicas ou de casos específicos, na introdução o trabalho cita Nyquist (8) e Hartley (11) como importantes bases, mas propõe a inclusão de outros fatores como o ruído e a estrutura real da mensagem na teoria. Para tal, Shannon começa a obra definindo uma unidade de medida de informação e uma representação geral para sistemas de comunicação esquematizado na figura 1.

A unidade proposta por Shannon é o "bit", nome, proposto pelo estatístico e colega nos Laboratórios Bell, John Tukey (1915-2000) como uma abreviação para *binary digits* e corresponde a quantidade de informação armazenada em um sistema de duas posições (como um interruptor), N interruptores possuem 2^N estados podendo portanto carregar consigo $\log_2 2^N = N$ bits. Shannon utiliza o logaritmo, como proposto em 1927 por Ralph Hartley.

Em relação à representação de um sistema de comunicação geral temos, de acordo com a figura 1, uma fonte (I) e um transmissor (II) que produzem e codificam a mensagem a enviando pelo canal (III), do outro lado do canal há um decodificador e o destinatário que recebem a mensagem enviada, esse sistema representa todos os meios de comunicação da época de forma simples e direta.

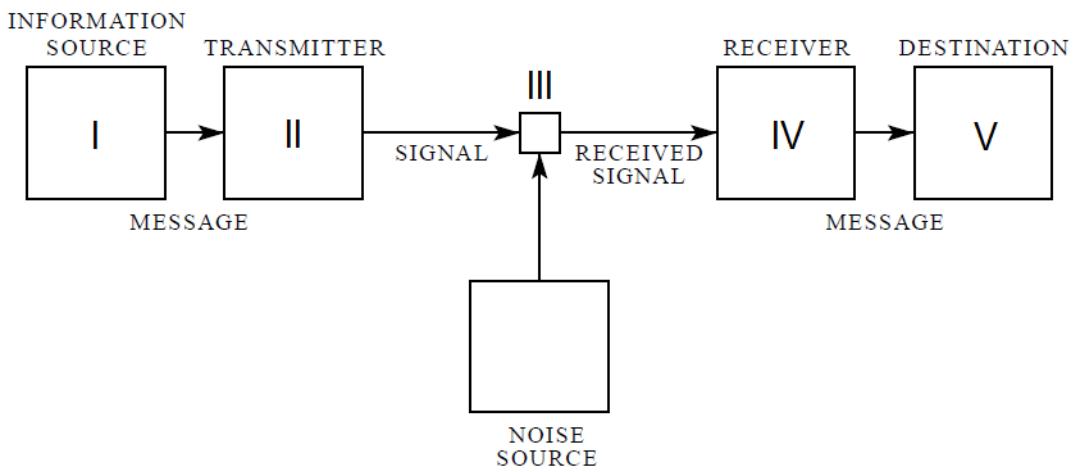


Figura 1 – Diagrama proposto por Shannon para um sistema de comunicação geral.

Fonte: Adapatada de SHANNON(4)

Nyquist afirmara, em 1924, que uma onda previsível não poderia carregar consigo nenhuma informação. Hartley utilizou essa ideia para propor uma medida de informação que

dependia das escolhas do transmissor frente às possibilidades disponíveis, considerando apenas casos nos quais os símbolos da mensagem tinham a mesma probabilidade de escolha. Shannon, por sua vez, generaliza essa proposta, criando um modelo válido para línguas ocidentais. Em uma língua, as escolhas de letras e palavras para compor um texto não são aleatórias e independentes, mas dependem de uma estrutura anterior. Para ilustrar, tomemos o exemplo da língua portuguesa. Quando uma palavra apresenta a letra "M" as únicas consoantes que podem se seguir são "P" e "B", portanto sempre que um "M" aparece estamos limitados a sete seleções (A,E,I,O,U,P,B). Essa estrutura, na qual a escolha seguinte depende da variável atual, é característica de um processo estocástico, Shannon mostra, durante seu trabalho, que além disso é um processo de Markov, um tipo específico do anterior.

Enfim, com relação à codificação e quantidade de informação, temos uma estrutura estatística para a mensagem, um processo estocástico que pode aumentar de complexidade conforme adicionamos regras a ele⁸. Partindo desta estrutura Shannon propõe uma série de condições que devem ser satisfeitas para se definir uma medida para "a quantidade de 'escolha' envolvida em uma seleção" e termina com a fórmula:

$$H = -K \sum_{i=1}^n p_i \log_s p_i , \quad (4.1)$$

onde K é uma constante positiva, p_i as probabilidades de eventos possíveis e s é o número de símbolos disponíveis (2 em um código morse, 26 em um alfabeto, etc).

Nesse ponto o autor nota a semelhança entre essa expressão e a da entropia termodinâmica, em particular o teorema-H de Boltzmann (17), denotando H como uma medida de entropia⁹. A ligação é semelhante a feita anteriormente por Szilárd, entretanto Shannon não cita o húngaro em seu trabalho e afirma, anos depois em uma entrevista (18), que não conhecia os trabalhos no período da publicação.

Shannon aborda também o problema relacionado à capacidade máxima de transmissão de um canal durante um intervalo de tempo determinado, partindo da definição para a capacidade de transmissão:

$$C = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\log N(T)}{T} \quad (4.2)$$

onde N(T) é a quantidade de símbolos possível durante um período de tempo T.

Essa definição foi justificada no artigo, principalmente pela busca da capacidade máxima de transmissão de diferentes meios de comunicação. Para isso, Shannon trata o ruído estocasticamente, de forma semelhante à mensagem, e explora suas definições e teoremas nos

⁸ Se adicionamos regras o suficiente, um texto gerado por uma máquina que escolhe palavras aleatoriamente dentro destas regras será indistinguível de um texto escrito por uma pessoa, ou seja um processo estocástico suficientemente complexo mimetiza a língua perfeitamente.

⁹ Esta conexão será brevemente comentada na seção 5.3.1.

exemplos práticos, posteriormente expandindo as conclusões para canais de transmissão contínua, apoiando-se na discretização proposta por Hartley: considerar o sinal contínuo como sucessivos degraus discretos.

Finalmente, Shannon retorna para a linguagem escrita para propor uma forma de reduzir os erros de transmissão. A língua possui uma redundância inerente, no inglês, segundo o artigo, a redundância chega a 50%, isto é, apenas metade das letras em um texto são relevantes para sua compreensão, entretanto é exatamente essa redundância que reduz os erros na nossa comunicação, pois não precisamos de todas as letras ou palavras para entender um texto. Com isso em mente Shannon propõe uma forma de eliminar o erro pela introdução de redundância no sistema, por exemplo, enviando uma mesma mensagem duas ou mais vezes seguidas e comparando o que foi recebido pelo destinatário.

Mas como aumentar a redundância sem perder velocidade de transmissão? Através da compressão dos dados, Shannon alega que o próprio código Morse é uma forma de compressão, pois os menores símbolos correspondem às letras mais comuns no inglês. Já existiam na época livros de abreviações para utilização de telégrafos e Shannon propôs um sistema de abreviações comum ao transmissor e o receptor, de forma que estes aparelhos codificassem e decodificassem as mensagens enviadas pelo canal.

Nas páginas de "A Mathematical Theory of Communication" notamos algumas ideias facilmente reconhecíveis na computação moderna, todavia devemos entender como o trabalho foi recebido em 1948 para entender os desdobramentos posteriores, e para isso devemos estudar alguns artigos publicados no mesmo período com intenções semelhantes.

5 CONTEMPORÂNEOS

Até o momento exploramos o contexto científico na época da publicação do famoso artigo de Shannon, sendo fácil notar que as conclusões e os teoremas propostos em "A Mathematical Theory of Communication" não são fruto de uma mente isolada e brilhante mas resultado de um processo histórico envolvendo diversos atores que se influenciaram mutuamente. Nesta seção abordamos alguns estudos publicados em um período próximo a obra de Shannon com o objetivo de entender melhor como este foi recebido e os caminhos que teoria de informação tomou a partir de 1948.

5.1 Os trabalhos de Dennis Gabor

Dennis Gabor (1900-1979) foi um engenheiro elétrico e físico nascido na Hungria, embora seja mais reconhecido por seus trabalhos com holografia - pelos quais foi laureado com o Nobel em 1971 - Gabor publicou o artigo intitulado Theory of Communication (19) em 1946 no qual faz deduções a respeito das limitações ligadas à frequência e tempo de transmissão nos sistemas de comunicação além de propor uma unidade de medida de informação, ou nas palavras do autor um "quanta de informação" denominado "Logon".

O artigo começa reconhecendo os trabalhos de Carson (10), Nyquist (8), Kupfmüller (13) e Hartley (11) mas aponta que o problema da comunicação envolve as bandas de transmissão (limitações de frequência) e tempo no qual a transmissão acontece (limitações de tempo), os quatro autores citados se mantiveram no domínio das limitações de frequência em suas obras. Gabor trabalhou com ambos ao mesmo tempo. Para isso, o húngaro propõe o uso dos "diagramas de informação" (nome dado por ele) que seriam "representações bidimensionais de sinais, com tempo e frequência como coordenadas" (19).

Para entender tais diagramas, vamos analisar a figura 2(a), onde temos um oscilador harmônico representado no diagrama de informação. Sabendo com exatidão a frequência do oscilador o tempo de oscilação é completamente indefinido (linha vertical). Um sinal típico possui um intervalo de tempo no qual ele é transmitido e um intervalo de frequências (f_1 a f_2), no diagrama de informação isso é representado por um retângulo (figura 2(b)).

Gabor reconhece a similaridade desses diagramas com os gráfico de posição e momento (x e p) da mecânica quântica e deduz a incerteza de t e f . Tomando o aparato matemático da teoria quântica como base e modulando o sinal como uma soma de senos e cossenos complexos o autor faz um procedimento matematicamente similar ao princípio de incerteza de Heisenberg para momento e posição, chegando ao resultado:

$$\Delta t \Delta f > \frac{1}{2} \quad (5.1)$$

Em seguida o autor encontra o sinal que gera o menor valor possível para a desigualdade, ou seja $\Delta t \Delta f = 1/2$, e o define este como o "sinal elementar"¹⁰. Ou seja, qualquer sinal no diagrama de informação poderia ser representado como uma soma desses sinais elementares de lados Δt e Δf , como mostrado na figura 2(c) cada um destes retângulos contém um "quanta de informação" e são as unidades mínimas que Gabor chama de Logons.

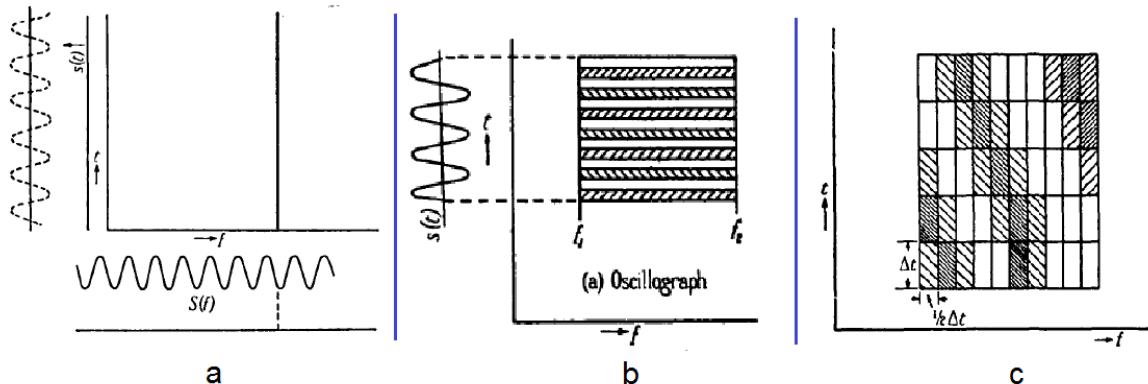


Figura 2 – Representação de sinais nos diagramas de informação.

Fonte: Adaptada de GABOR(19)

Gabor aplica esses conceitos para alguns casos práticos como modulações de frequência e telefonia. O trabalho traz para a teoria de comunicação o formalismo matemático da mecânica quântica, e uma unidade prática de medida de informação: o Logon. Todavia não discute nenhuma forma de ruído e não fornece aos engenheiros um método prático de transmitir informação mais eficientemente.

5.2 Os trabalhos de William Tuller

"Theoretical Limitations on the Rate of Transmission of Information"(20) foi um artigo do pesquisador americano William Gordon Tuller (1918-1954), baseado na tese de doutorado do próprio. O estudo, publicado em abril de 1949, encontrou uma comunidade científica em polvorosa pelas publicações do ano anterior, a tese não traz nada novo em relação aos demais, entretanto as conclusões de Tuller ocorreram, segundo o próprio autor, em paralelo com as demais portanto devem ser estudadas independentemente.

O ponto de partida para a tese de Tuller é a medida de informação proposta por Hartley (11) com a inclusão de uma constante (K):

$$H = n(K \log s) \quad (5.2)$$

novamente n é o número de seleções e s o número de símbolos possíveis.

¹⁰ O sinal é $\psi(t) = e^{-\alpha^2(t-t_0)^2} \cos(2\pi f_0 t + \phi)$ onde α , t_0 e f_0 são constantes associadas à características do pulso.

Em seguida o autor parte para a transmissão de informação sem ruído. No período era praticamente unanimidade que canais desprovidos de ruído possuiriam um limite natural para a transmissão de informação, Tuller afirma que isso é falso.

Os demais pesquisadores defendiam que o primeiro pulso enviado criaria um transiente no filtro que adicionaria banda aos demais pulsos do sistema, gerando um efeito acumulativo com cada pulso. Tuller defende que caso se conheça o filtro com antecedência, seria possível adicionar ao sinal recebido uma onda inversa à interferência, anulando o efeito do transiente e permitindo transmissões ilimitadas em sistemas sem ruído. Em seguida, o autor parte para a sistemas com ruído e cria um diagrama para o sistema de comunicação geral, semelhante ao proposto por Shannon (Figura 1)

A análise de Tuller baseia-se fortemente nas definições de Hartley de 1928 e estaria limitada às lacunas presentes no trabalho como a falta de um tratamento para o ruído e a definição de quantidade informação limitar-se a casos nos quais a probabilidade de escolha dos símbolos é igual. Tuller reconhece esses problemas e procura solucioná-los criando uma análise para o ruído e generalizando a quantidade de informação.

A generalização consiste em ampliar a definição de informação como incerteza da escolha, dada por Hartley, Tuller afirma que em um sistema no qual todos os símbolos podem ser selecionados¹¹ ($s_{av} = s_{max}$) a informação na transmissão é máxima, quando os símbolos são limitados ($s_{av} < s_{max}$) o sistema está transmitindo informação abaixo da capacidade máxima.

Os esforços de Tuller para generalizar a abordagem de Hartley não foram reconhecidos pela comunidade, os trabalhos do ano anterior (4)(21), somados às novas publicações do início de 1949 (22) mantiveram a tese fora do radar das grandes discussões.

5.3 Os trabalhos de Norbert Wiener

Formado em matemática aos 14 anos e doutor em lógica matemática em 1913 com apenas 19 anos, o filósofo e matemático estadunidense Norbert Wiener era considerado um dos mais influentes cientistas e matemáticos no período. Durante o esforço de guerra, dedicou-se à problemas relacionados a mira de aeronaves, que se mostraram semelhantes ao problema da comunicação na presença de ruído. Em 1942 publicou o artigo "The extrapolation interpolation and smoothing of stationary time series"(23) que abordava o problema do ruído irredutível presente em misturas de sinal e ruído.

O artigo teve circulação reduzida pelas forças armadas estadunidenses mas Shannon e Tuller tiveram acesso a ele e o citaram em suas teses. Todavia o artigo empregava uma linguagem matemática *"muito além da capacidade do engenheiro de comunicação comum"* (20) e acabou esquecido. Após a guerra Wiener assumiu a liderança de um grupo multidisciplinar que buscava

¹¹ s_{av} é o nome dado a quantidade de símbolos disponíveis na transmissão.

desenvolver aplicações militares (24) e começou a escrever um livro igualmente multidisciplinar sobre cibernetica (21), termo criado por ele.

No mesmo ano da publicação do trabalho de Shannon (1948), Wiener publicou o livro: *Cybernetics or control and communication in the animal and the machine* (21), no qual elabora um tratado extenso que discorre sobre diversos tópicos, desde mecânica estatística até as relações entre informação, linguagem e sociedade.

Ao longo da obra, Wiener define quantidade de informação como uma medida do grau de organização de um sistema. No presente estudo vamos nos limitar a esse aspecto do trabalho, principalmente porque um de seus desdobramentos foi uma disputa pela definição mais adequada para o conceito entre Wiener e Shannon. A definição dada no *Cybernetics* é:

"A noção de quantidade de informação se liga muito naturalmente a uma noção clássica da mecânica estatística: a entropia. Da mesma forma que a informação é a medida do grau de organização do sistema, a entropia é uma medida do grau de desorganização; e uma é simplesmente o negativo da outra."(21)

O raciocínio por traz da afirmação acima surgiu no paradoxo do demônio de Maxwell, Wiener, semelhantemente a Szilárd¹², criou um conceito para a informação que se encaixasse no problema, contudo, esse conceito mostrou-se na contra mão dos trabalhos anteriores na teoria da comunicação, pois Hartley e Shannon definem informação como uma medida de incerteza e Wiener trata informação como ordem, ou certeza.

5.3.1 Dois conceitos, uma informação

Wiener cita, na introdução do livro *Cybernetics*, o trabalho de Shannon nos Laboratórios Bell e alega que ambos tiveram a mesma ideia: criar uma medida para a quantidade de informação. Entretanto, uma análise cuidadosa na forma pela qual os autores definem os conceitos mostra que eles são diferentes em seus fundamentos. A informação de Shannon é análoga à entropia de Boltzmann enquanto a informação de Wiener é oposta. Temos assim uma discordância ontológica na teoria, os desenvolvimentos desse debate foram extensos e existem estudos dedicados apenas aos conceitos de entropia e quantidade de informação em diversos contextos (24).

Vale observar que a decisão de Shannon de pautar a definição de informação na incerteza de uma escolha do sistema é coerente com trabalhos anteriores da equipe dos Laboratórios Bell. Nyquist, por exemplo, havia discutido a onda senoidal previsível em 1924, concluindo que ela não carregaria nenhuma informação enquanto que, Hartley baseou sua noção de informação na indeterminação presente na escolha de um símbolo.

¹² Como o húngaro não é citado no livro do americano, entende-se que o trabalho de Szilárd não era conhecido por Wiener.

Na década de 1950, ocorreram esforços para explorar os conceitos de entropia e informação mais profundamente, principalmente ligados a unificar a entropia termodinâmica e a entropia informational, entre esses esforços destacaram-se os estudos de Brillouin que expandiu o trabalho de Szilard, procurando no demônio de Maxwell a conexão entre as duas entropias (24).

Finalmente, é notável a diferença de abordagem dos dois matemáticos, Shannon ataca o problema diretamente, trazendo definições, teoremas e deduções fortemente apoiadas na prática da engenharia. Wiener, por sua vez, traz suas definições em meio a uma obra complexa e multidisciplinar. Essas diferenças influenciaram a escolha da comunidade e, principalmente, contribuíram para a valorização tecnológica da teoria, pois o trabalho de Shannon é direto e aplicado enquanto que o tratado de Wiener é extenso e não ataca os problemas práticos diretamente. A imensa maioria da comunidade utilizou as formulações propostas por Shannon para a prática. Nas palavras de David Forney¹³: "*O conselho era: 'não trabalhe com a teoria, vá para as aplicações'*" (18).

¹³ Forney é professor de engenharia elétrica no MIT e no período era estudante.

6 COMUNIDADE, SOCIEDADE E INFORMAÇÃO

Até o momento, nosso estudo mostrou que o desenvolvimento da teoria de informação, desde as suas bases na década de 1920 até os trabalhos de 1949, foi um processo que envolveu contribuições de vários pesquisadores de áreas diferentes. Nesta seção vamos explorar os desenvolvimentos imediatamente posteriores, começando pelas reações à publicação do artigo de Shannon "A Mathematical Theory of Communication" procurando entender o caminho que a teoria de informação tomou após 1948.

As recepções ao trabalho no meio acadêmico foram diversas. Joseph Leo Doob (1910-2004), um matemático estadunidense, publicou no periódico dos Laboratórios Bell uma revisão da obra de Shannon criticando a abordagem matemática do trabalho considerando-a mais sugestiva do que realmente matemática (25). No geral, a comunidade de matemáticos não gostou das demonstrações apresentadas, pois o artigo tomava algumas "liberdades" na análise. Shannon alegava que tais liberdades poderiam ser "justificadas em todos os casos de interesse prático" (4), entretanto a proposta geral do estadunidense era formular uma teoria matemática para o campo e não apenas resolver para alguns casos específicos como seus antecessores. Por essa falta de generalidade em algumas análises, os matemáticos criticaram o trabalho e os teoremas até que alguns de seus pares como Brockway McMillan (26), Khinchin (25) e Robert Fano, o último apoiado pelos estudantes do MIT na nova disciplina "*Transmission of Information*" (18), dedicaram-se a formular os teoremas e as provas de forma matematicamente precisa. Com isso, pouco menos de vinte anos depois da publicação do artigo, os teoremas de Shannon haviam sido devidamente provados.

Retornando aos anos seguintes a 1948, a publicação de novos trabalhos no campo como *Cybernetics* de Wiener, auxiliaram o artigo de Shannon a tomar um caráter interdisciplinar e não apenas uma obra para engenheiros e matemáticos; melhorando a opinião da comunidade de engenheiros, interessados principalmente nas aplicações; e recebendo atenção de novos grupos de cientistas como biólogos, psicólogos, entre outros.

Somado a isso, do ponto de vista da sociedade, o artigo de Shannon encontrou os Estados Unidos em um momento particularmente favorável, o final da Segunda Guerra e a expansão da ameaça soviética fizeram com que o público geral passasse a valorizar mais a pesquisa científica e tecnológica, principalmente as vinculadas a usos militares, como era o caso dos Laboratórios Bell (27).

Shannon também publicou seu artigo em um livro no ano seguinte (28) (1949) em parceria com Warren Weaver (1894-1978) que fez uma introdução em linguagem comprehensível voltada ao grande público na *Scientific American* (29) para a obra ampliar seu alcance.

Em suma, as reações imediatamente posteriores às publicações do trabalho de Shannon

foram negativas por parte dos matemáticos, mas positivas na comunidade de engenheiros. Além disso o surto de popularidade da obra e a ideia de máquinas pensantes (promovido pelo livro de Wiener) atraiu a atenção da sociedade e dos pesquisadores, o conceito de informação passou a ser utilizado, muitas vezes de forma errada, em muitas áreas, como a psicologia, economia e algumas ciências sociais. Conferências passaram a ser organizadas regularmente para explorar a interdisciplinaridade do tópico e suas aplicações. Os conceitos de entropia, informação e redundância pareciam capazes de resolver diversos problemas que não diretamente relacionados com a comunicação.

Shannon passou a frequentar as conferências promovidas pela fundação Josiah Macy Jr (7) com o apoio de Wiener. As reuniões, reuniam biólogos, físicos, psicólogos entre outros pesquisadores para apresentar e discutir problemas relacionados aos seus respectivos campos. A teoria da informação atraiu a atenção de muitos desses cientistas, o que resultou na a utilização dos conceitos de forma descuidada em diversas áreas de pesquisa. Em resposta, alguns pesquisadores (como Shannon e Wiener) começaram a criticar o uso da teoria fora do campo da comunicação para o qual ela foi inicialmente proposta, em 1956 Shannon escreveu (30):

"A teoria de informação, nos últimos anos, se tornou um 'efeito manada'¹⁴ científico. Começando como uma ferramenta para o engenheiro da comunicação, ela recebeu uma publicidade extraordinária na impressa popular e científica. (...) pesquisadores de muitos campos diferentes, atraídos pela festa e pelas novas avenidas abertas para análise científica, estão utilizando as ideias para seus próprios problemas. Aplicações estão sendo feitas na biologia, psicologia, linguística, física básica, economia, teoria da organização, entre outros. (...) Eu pessoalmente acredito que muitos dos conceitos da teoria da informação vão se provar úteis nesses outros campos - e realmente alguns resultados são bastante promissores - mas estabelecer essas aplicações não é um processo trivial de traduzir as palavras para um novo contexto, mas o processo tedioso e lento de criação de hipóteses e verificação experimental."(30)

As reações de Shannon às novas aplicações mostram que "A Mathematical Theory of Communication" é um artigo escrito por um engenheiro e matemático para outros engenheiros do campo, que visava primeiramente a aplicação tecnológica na engenharia. Essa interpretação é corroborada pela análise das publicações posteriores à de Shannon, artigos sobre comunicação (22) na presença de ruído e a "máquinas pensantes", em particular uma máquina capaz de jogar xadrez (25) e um "rato" capaz de resolver um labirinto simples (7), o qual poderia ser modificado para tornar o trabalho do "rato" mais complicado.

Notamos portanto, que a comunidade de engenheiros deixou de se preocupar com as discussões básicas do conceito de informação e entropia para aplicar tais ideias nos mais diversos

¹⁴ O original *bandwagon* se refere ao viés cognitivo das pessoas de aderirem a uma ideia unicamente porque muitas pessoas estão fazendo o mesmo.

campos, em particular a engenharia da comunicação que finalmente poderia utilizar equações matemáticas para aprimorar as tecnologias existentes, buscando a eficiência máxima de transmissão de informação.

7 CONCLUSÕES

O objetivo deste estudo foi mostrar o longo processo que levou à formação de um novo campo de estudos conhecido atualmente como teoria de informação. É notável que foram necessários diversos anos e pesquisadores dedicados e não apenas um surto de genialidade de um grande cientista. A caracterização de Shannon como "o pai" da teoria de informação é ingênuo e desconsidera desenvolvimentos anteriores, contemporâneos e posteriores à publicação de seu trabalho.

Propusemos alguns motivos para a valorização da aplicação da nova teoria frente ao aprofundamento dos conceitos nos desenvolvimentos posteriores, como: (1) o artigo de Shannon, que se popularizou entre os engenheiros e pesquisadores, era focado nos aspectos práticos do problema da comunicação e não nos conceitos; (2) O desentendimento ontológico entre Shannon e Wiener não teve resultados imediatos, décadas se passaram até a entropia termodinâmica e a entropia informacional se conversarem e (3) os engenheiros e cientistas envolvidos no campo passaram a priorizar a construção de ‘máquinas pensantes’, um problema fundamentalmente tecnológico, utilizando a abordagem proposta por Shannon.

REFERÊNCIAS

- 1 WALDROP, M. Claude Shannon: Reluctant father of the digital age. **MIT Technology Review**, 2001. Disponível em: www.technologyreview.com/2001/07/01/235669/claudeshannon-reluctant-father-of-the-digital-age/. Acesso em: 22 mar. 2021.
- 2 PRESS.OFFICE/MIT. Mit professor Claude Shannon dies; was founder of digital communications. **MIT Technology Review**, 2001. Disponível em: <https://news.mit.edu/2001/shannon..> Acesso em: 22 mar. 2021.
- 3 JOHNSON, G. Claude Shannon, mathematician, dies at 84. **The New York Times**, 2001. Disponível em: www.nytimes.com/2001/02/27/nyregion/claudeshannon-mathematician-dies-at-84.html. Acesso em: 22 mar. 2021.
- 4 SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. **The Bell System Technical Journal**, Nokia Bell Labs, v. 27, n. 3, p. 379–423, 1948.
- 5 KRAGH, H. **An introduction to the historiography of science**. Cambridge: Cambridge University Press, 1987.
- 6 KING, B.; BIGGS, R. **Spearhead of logistics**: a history of the United States army transportation corps. Washington, D.C.: Department of the Army, 2016.
- 7 GLEICK, J.; CALIL, A. **A informação: uma história, uma teoria, uma enxurrada**. São Paulo: Companhia das Letras, 2013.
- 8 NYQUIST, H. **Certain factors affecting telegraph speed**. New York: Transactions of the American Institute of Electrical Engineers - IEEE, 1924, p. 412–422.
- 9 CARSON, J. R. Theory of the transient oscillations of electrical networks and transmission systems. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, XXXVIII, n. 1, p. 345–427, 1918.
- 10 CARSON, J. R. Notes on the theory of modulation. **Proceedings of the Institute of Radio Engineers**, v. 10, n. 1, p. 57–64, 1922.
- 11 HARTLEY, R. V. Transmission of information 1. **Bell System Technical Journal**, Wiley Online Library, v. 7, n. 3, p. 535–563, 1928.
- 12 CHERRY, E. C. A history of the theory of information. **Proceedings of the IEE - Part I: general**, v. 98, n.55, p. 183–393, 1951.
- 13 BISSELL, C. Karl Kupfmuller, 1928. **IEEE Control Systems Magazine**, IEEE, v. 26, n. 3, p. 115–116, 2006.
- 14 SZILARD, L. On the decrease of entropy in a thermodynamic system by the intervention of intelligent beings. **Behavioral Science**, Wiley Online Library, v. 9, n. 4, p. 301–310, 1964.
- 15 KOTEL'NIKOV, V. A. On the transmission capacity of 'ether' and wire in electric communications. **Physics-Uspekhi**, IOP Publishing, v. 49, n. 7, p. 736, 2006.

- 16 SHANNON, C. E. Letter to Vannevar Bush. In: SLOANE, N. J. A.; WYNER, A. D. **Claude E. Shannon:** collected papers, New York: Wiley-IEEE Press, 1993.
- 17 LEFF, H.; REX, A. F. **Maxwell's Demon 2 entropy, classical and quantum information, computing.** Bristol: CRC Press, 2002.
- 18 GUIZZO, E. M. **The essential message:** Claude Shannon and the making of information theory. 2003.77p. (Master Science in Science Writing) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts 2003.
- 19 GABOR, D. Theory of communication. **Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part III:** radio and communication engineering, IET, v. 93, n. 26, p. 429–441, 1946.
- 20 TULLER, W. G. Theoretical limitations on the rate of transmission of information. **Proceedings of the IRE, IEEE,** v. 37, n. 5, p. 468–478, 1949.
- 21 WIENER, N. **Cybernetics:** or control and communication in the animal and the machine. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1948.
- 22 SHANNON, C. E. Communication in the presence of noise. **Proceedings of the IRE, IEEE,** v. 37, n. 1, p. 10–21, 1949.
- 23 WIENER, N. **The extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series.** Washington: National Defense Research Council, Section D2 Report, 1942.
- 24 PINEDA, J. O. C.; GOLDFARB, J. L. **A entropia segundo Claude Shannon:** o desenvolvimento do conceito fundamental da teoria da informação. 2006. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica. São Paulo, 2006.
- 25 PIERCE, J. The early days of information theory. **IEEE Transactions on Information Theory,** v. 19, p. 3 – 8, 02 1973.
- 26 MCMILLAN, B. *et al.* The basic theorems of information theory. **The Annals of Mathematical Statistics,** Institute of Mathematical Statistics, v. 24, n. 2, p. 196–219, 1953.
- 27 GEOGHEGAN, B. D. Historiographic conceptualization of information: a critical survey. **IEEE Annals of the History of Computing,** IEEE, v. 30, n. 1, p. 66–81, 2008.
- 28 SHANNON, C.; WEAVER, W. **The mathematical theory of communication.** Urbana, Illinois: The University of Illinois Press, 1949.
- 29 WEAVER, W. The mathematics of communication. **Scientific American,** v. 181, n. 1, p. 11–15, 1949.
- 30 SHANNON, C. E. The bandwagon. **Scientific American,** v. 2, n. 1, p. 3–3, 1956.
- 31 LINDBERG, E.; LIFE, I. The barkhausen criterion (observation?). **Proceedings of the NDEx,** p15-18, 2010.
- 32 MARTINS, R. d. A. Espaço, tempo e éter na teoria da relatividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física,** v. 27, n. 11, 2008.