

*Sentido Filosófico e Alcance Prático da Cibernética (\*)*

621.384

LOUIS DE BROGLIE

Tradução de

LYGIA NAZARETH FERNANDES

DE tempos para cá, fala-se muito em um novo ramo da ciência — a Cibernética —, que deve sua origem e seu nome aos trabalhos do matemático americano NORBERT WIENER. Podemos dizer que a Cibernética está na moda; sabemos que unifica domínios que pareciam separados até aqui, e que pode conduzir-nos a novas concepções, não só em muitos problemas de mecânica e de física, senão também de psicologia, e talvez de sociologia. Suscita, portanto, um interesse muito legítimo.

Não é fácil dar uma definição precisa de Cibernética. Seu nome, já empregado por AMPÈRE na classificação das ciências, significa, etimologicamente, ciência daquilo que governa, daquilo que “controla”, no sentido inglês da palavra; ciência que permite captar o funcionamento do pôsto de comando. Poderíamos dizer também que é a ciência das “movimentações”, isto é, de ações que põem em jôgo quantidades mínimas de energia, com as quais não nos preocupamos, mas que têm por efeito provocar ou modificar fenômenos de amplitude infinitamente maior: tomemos como exemplo o regulador de bola, que reconduz constantemente a velocidade de rotação de uma turbina possante, a seu valor normal, ou, numa ordem inteiramente distinta de idéias, o telegrama recebido pelo comandante de um vasto exército, e que o decide a travar a grande batalha, da qual dependerá a sorte de tôda a guerra.

Se dou, lado a lado, dois exemplos tão diferentes, é para mostrar melhor o que constitui a originalidade da Cibernética: os ramos da ciência de que ela se ocupa já eram, na maioria, conhecidos anteriormente, e se desenvolviam de maneira autônoma; o mérito da Cibernética consistiu, não em tê-los criado, mas em ter revelado o liame sutil existente entre êles.

Refletindo nisso, vemos surgir o papel fundamental que deve desempenhar na Cibernética a noção de *informação*, cuja importância não havíamos nitidamente distinguido até aqui. As “movimentações” que se produzem nos sistemas estudados pela Cibernética são provocadas pela chegada de

---

(\*) In *La Nouvelle Revue Française*, julho 1953. Ano 7.

informações provenientes de outras partes do sistema, e às vezes do exterior. Assim, numa turbina a vapor, se a velocidade de rotação ultrapassa o valor normal, o regulador, cujas bolas se afastam, devido a este aumento de velocidade, "informará" essa variação, por meio de uma transmissão mecânica que consome energia ínfima — o conduto de admissão de vapor na turbina — e este, ao diminuir a quantidade de vapor injetado, fará voltar a velocidade de rotação ao valor normal. É deste mesmo modo que, no campo de batalha, se os postos avançados assinalam, por telegrama ou telefonema, ao general comandante, que um dos setores da frente inimiga se acha desprovido de defesa, o comando decidirá lançar violento ataque neste setor, buscando operar uma abertura.

Um dos ramos capitais da Cibernética será, pois, a teoria das transmissões ou comunicações, isto é, o estudo científico dos meios de transmitir a informação por um processo qualquer, que poderá ser: mecânico, acústico, ótico, elétrico, rádioelétrico, etc. Toda a arte dos engenheiros de telecomunicação se integra, então, como um caso particular, no quadro da Cibernética. A análise e o aperfeiçoamento dos dispositivos reguladores, servomecanismos, processos de contra-reação nos aparelhos rádioelétricos, etc., formam um imenso domínio, que oferece hoje interesse primordial para numerosos ramos da técnica, vindo também incorporar-se por inteiro ao reino da Cibernética.

A esse reino se liga, do mesmo modo, o aperfeiçoamento das máquinas de calcular. Há mais de três séculos, BLAISE PASCAL, quase adolescente ainda, inventou a primeira máquina aritmética para facilitar o trabalho do pai, cujas funções de intendente da Normandia o levavam a efetuar longos cálculos para lançamento de impostos na sua província. Ninguém duvida que o lançamento de impostos seja, hoje em dia, ainda mais complicado que em 1640, mas não é por esta razão que o emprêgo de máquinas de calcular se generalizou tanto ultimamente. As causas são antes o desenvolvimento das pesquisas científicas e técnicas, que acarreta a complicação progressiva dos problemas formulados, e a crescente necessidade de precisão nas soluções. Utilizando todos os recursos da mecânica de precisão e da moderna eletrônica, a arte dos construtores de máquinas de calcular atinge hoje alto grau de perfeição, e não cansa de progredir. Um permanecem máquinas aritméticas, e, se bem que utilizando numerosos processos novos, como a numeração binária, têm ar de descendentes diretos de sua ancestral do século XVII. Outras, pelo contrário, as chamadas "máquinas analógicas", pertencem a um tipo verdadeiramente novo: aproveitando-se do fato de que todo fenômeno físico obedece a equações que podem ser algébricas, diferenciais, de derivadas parciais, ou mesmo integrais, ou íntegro-diferenciais, elas estão aptas a resolver estas equações, levando em conta condições iniciais ou condições de limites, impostos pela própria verificação de fenômenos que lhes obedecem. Embora menos precisas que as máquinas aritméticas, as analógicas prestam atualmente serviços inestimáveis. As espantosas máquinas de calcular, de que hoje dispomos, podem efetuar cálculos difíceis e variados, muito mais seguramente e, sobretudo, muito mais rapidamente que o cérebro humano: este foi, pois, ultrapassado por dispositivos que soube imaginar e idealizar. Ao que parece, a teoria das máquinas de cal-

cular, a da transmissão dos sinais, e mais genêricamente tôdas aquelas cuja reunião forma a atual Cibernética, devem fornecer-nos numerosas informações sôbre o funcionamento normal ou patológico do sistema nervoso, e em particular sôbre o mecanismo dos reflexos: alguns autores, como COUFFIGNAL, na França, mostraram que elas podiam ajudar-nos a compreender como funciona o pensamento lógico. Enfim, como acentuou WIENER, no fim de sua célebre obra "Cybernetics", os próprios fenômenos sociais poderiam beneficiar-se com a aplicação dos métodos dessa nova ciência.

Dêste modo, o campo de ação da Cibernética, parece estender-se quase indefinidamente, e essas possíveis extensões suscitaram numerosas esperanças, algumas talvez exageradas. Aprofundando a questão, estudaremos em primeiro lugar, mais pormenorizadamente, os êxitos da Cibernética, e depois procuraremos acentuar os limites que convém atribuir à sua força explicativa.

Uma das formas precisas da Cibernética é o estudo matemático das transmissões, das telecomunicações. Ele se baseia na noção de "sinal", que cumpre ser definida com exatidão, e comporta o estudo da propagação e da deformação dos sinais. Provocou numerosos trabalhos, de que podemos ter um resumo nos relatórios (publicados pelas Edições da "Revue d'Optique") das reuniões sôbre Cibernética, que organizei em maio de 1950.

Quanto ao desenvolvimento matemático recente, em sua teoria das transmissões, experimentou, de maneira muito feliz, a influência dos métodos utilizados pela física quântica. É o que se pode ver especialmente nos trabalhos de GABOR e VILLE. Aí se encontra a apresentação dos sinais, por meio de uma função complexa, um tanto análoga à função complexa de onda, da mecânica ondulatória. E aí desempenha grande papel a desigualdade:

$$\Delta f \Delta t \geq 1$$

Exprime essa desigualdade que, quanto mais curta fôr a duração de um sinal, maior será o número de componentes monocromáticas, compreendidas pela "decomposição de FOURIER", e vice-versa. Salienta-se também a analogia entre a desigualdade precedente e a quarta relação de HEISENBERG. Teremos que fixar mais adiante o alcance exato dessas analogias "quânticas", mas é certo que elas foram sugestivas e fizeram com que recrudescesse a atividade no desenvolvimento da teoria das comunicações.

Estando a produção, a transmissão e a recepção dos sinais submetidas a tôda espécie de acidente, o cálculo das probabilidades tornou-se rapidamente auxiliar indispensável da teoria das transmissões. Trabalhos importantíssimos e de grande interesse foram executados nesse sentido; citarei apenas os do jovem sábio francês ANDRÉ BLANC-LAPIERRE. O conceito de correlação, essencial em cálculo das probabilidades, nêles foi aplicada com êxito. Particularmente, tôda uma teoria da autocorrelação foi ultimada de uns anos para cá, e se tornou muito importante em todos os problemas de transmissão; alguns dêsses resultados foram percebidos há cêrca de quinze anos, pelo saudoso BERNAMONT, durante suas originalíssimas pesquisas sôbre flutuações de corrente. Esta teoria da autocorrelação conduz a outros resultados, e a curiosas considerações sôbre a previsibilidade dos sinais.

Foi no decorrer de pesquisas sobre a teoria das transmissões, e problemas afins, que diversos autores, notadamente WIENER e SHANNON, conseguiram determinar a noção de “quantidade de informação”, e a correlativa de “velocidade de informação”, mostrando que a grandeza “informação”, assim definida, desempenha na teoria das transmissões papel análogo ao da entropia, em Termodinâmica. Aí está uma aproximação, absolutamente inesperada e sugestiva, que com razão despertou vivo interesse em todos os teóricos da física. Entre os novos pontos de vista sugeridos pelo progresso da Cibernética é este, certamente, um dos mais curiosos.

Sem o propósito de desenvolver cálculos que ficariam deslocados numa exposição de idéias gerais, como esta, gostaria entretanto de dar uma idéia bastante clara dessa analogia entre entropia e informação. Sabemos que na interpretação estatística da Termodinâmica, admitida hoje universalmente pelos físicos, a entropia de um sistema aparece diretamente ligada (pela fórmula de BOLTZMANN:  $S = k \log P$ ) à probabilidade, que tem o sistema, de se achar no estado em questão. O segundo princípio da Termodinâmica — princípio de CARNOT-CLAUSIUS, ou do aumento da entropia, recebe aí uma interpretação simples e quase intuitiva: exprime a tendência de todo sistema, no sentido de evoluir para estados de maior probabilidade.

Certamente, esta interpretação probabilista da entropia não deixou de levantar problemas espinhosos, chegando-se muitas vezes a assinalar (é o paradoxo de LOSCHMIDT) como é contraditório querer extrair das leis da mecânica clássica, reversíveis com relação ao tempo, uma evolução irreversível como a imposta pelo princípio de CARNOT — ao jeito do que tentava fazer a mecânica estatística, em sua forma clássica.

A mecânica quântica e suas concepções novas parecem trazer um começo de solução a esse paradoxo, e é certo que a irreversibilidade do tempo, dado essencial da experiência humana, está ligada ao aumento da entropia.

Quaisquer que sejam as conclusões finais dessas discussões árduas sobre a irreversibilidade dos fenômenos naturais, a definir um sentido privilegiado do tempo, é certo, porém, que a interpretação estatística da entropia e de seu aumento nos fizeram penetrar profundamente no significado verdadeiro do segundo princípio da Termodinâmica.

Consideremos um caso simples de transmissão de sinais, por exemplo, o da transmissão de um telegrama pelo aparelho Morse, comum, em que um emissor de sinais elétricos se liga ao receptor, por meio de uma linha condutora. Se enviamos uma mensagem por essa linha, torna-se evidente que a seqüência dos sinais que formam esta mensagem, e correspondem a palavras e a frases, é *a priori* altamente improvável. Sendo os sinais Morse apenas de duas espécies — traços e pontos — as sucessões mais prováveis de sinais seriam aquelas em que os sinais se sucedessem ao acaso na linha, saindo cada sinal do emissor com a probabilidade  $1/2$  de ser um traço ou um ponto: a mensagem seria incoerente e sem nenhum significado, como a que fôsse transmitida por um telegrafista louco, ao bater sem discernimento traços ou pontos no manipulador. Torna-se então evidente que a mensagem sensata, fornecedora da informação, é um fenômeno extremamente improvável, impôsto pelo pensamento do expedidor e pelas regras da língua por

êle empregada para exprimi-lo. Percebe-se então que deve haver uma espécie de relação inversa entre a informação transmitida pelos sinais e a probabilidade da sucessão dos sinais no tempo, pois a informação será tanto maior quanto mais débil fôr a probabilidade, e, em conseqüência, a entropia desta seqüência de sinais. Se, como LÉON BRILLOUIN, chamarmos "neg-entropia" (entropia negativa) à entropia de sinal trocado, quantidade que diminui quando a probabilidade aumenta, poderemos dizer que a quantidade de informação é uma espécie de "neg-entropia".

Essa conclusão se confirma, se levarmos em conta a deformação possível dos sinais na transmissão: em virtude de perturbações, umas acidentais, outras mais ou menos impostas pelas condições físicas da propagação, ou, às vêzes da transcrição do texto à partida e à chegada, a mensagem recebida não é integralmente idêntica à mensagem enviada, e em geral contém alguns erros que podem diminuir a informação transmitida. É fácil compreender que a informação poderá assim diminuir, e nunca aumentar. Se eu lhes mandar, por telegrama, a demonstração complicada de um teorema de matemática, pode acontecer que a má transmissão, alterando certas passagens essenciais do raciocínio, lhes impeça compreender ou reconstituir minha demonstração. Mas, se lhes telegrafo para explicar por que não consegui demonstrar um teorema de matemática, a meu ver exato, jamais acontecerá que, em conseqüência de alterações na transmissão, o telegrama contenha a demonstração. Isto mostra claramente que a informação tende sempre a diminuir, a perder-se, tal como a "neg-entropia" termodinâmica: o caso mais favorável, que corresponde às transformações reversíveis de um sistema isolado em Termodinâmica, é aquêle em que a "neg-entropia" se conserva.

Esta correlação recebeu, aliás, uma expressão quantitativa, tendo SHANNON e outros autores mostrado que a informação pode representar-se por uma fórmula do tipo

$$\sum_1 p_i \log p_i$$

(em que os  $p_i$  são as probabilidades das diversas sucessões possíveis de sinais), expressão idêntica, menos o sinal, à célebre função  $H$ , que forneceu a BOLTZMANN a primeira representação estatística da entropia. Acha-se, assim, matematicamente posta em evidência a analogia entre a informação e a entropia de sinal trocado. Um paralelo profundo e sugestivo parece, pois, firmemente estabelecido entre a informação e a "neg-entropia". Veremos entretanto, quando passarmos à crítica dos resultados da Cibernética, que sérias dificuldades subsistem nesta assimilação.

O estudo das relações entre entropia e informação dirigiu a atenção dos físicos para um curioso homenzinho, imaginado outrora por MAXWELL, ao elaborar suas reflexões sobre a teoria cinética dos gases: o "demônio", de MAXWELL.

Esse "demônio", tal como o homenzinho de AMPÈRE, faz parte do que se poderia chamar os "bonecos de Epinal" da física teórica. Imaginemos, dizia MAXWELL, um recinto mais ou menos vasto, de temperatura fixa, dividido em dois compartimentos por um tabique, onde há um orifício. Os dois compartimentos estão cheios de um gás cujas moléculas podem passar

de um lado para outro do tabique, atravessando o orifício. Atingindo o equilíbrio termodinâmico, o gás passa a ter a mesma pressão e temperatura nos compartimentos do recinto. MAXWELL supôs então que um ser ínfimo, pertencente à escala molecular, mas dotado de inteligência, se houvesse postado junto ao orifício. Auxiliado por uma janelinha, cujo manejo não requer energia apreciável, êle pode fechar ou abrir o orifício de que se tornou guarda. Poderá pois deixar passar as moléculas mais rápidas, da esquerda para a direita, interditando-lhes a passagem inversa, e, igualmente, deixar passar as moléculas mais lentas da direita para a esquerda, vedando-lhes também a passagem inversa. No fim de algum tempo, acumulará assim, no compartimento da direita, as moléculas rápidas, e no da esquerda as moléculas lentas, e quando, em consequência dos choques, as duas categorias de moléculas voltarem separadamente ao equilíbrio térmico, teremos no compartimento da direita um gás mais quente que o do compartimento da esquerda; em outros termos, teremos, em contradição com o segundo princípio da Termodinâmica, criado sem consumo de trabalho uma diferença de temperatura num sistema primitivamente em equilíbrio térmico. Nada, aliás, impediria o demônio de MAXWELL de deixar passar pelo orifício tôdas as moléculas que vão da esquerda para a direita, detendo as que vão da direita para a esquerda. Então, no fim de algum tempo, todo o gás se acharia reunido sempre com a mesma temperatura inicial no compartimento da direita, achando-se o da esquerda completamente vazio. Assim, as fórmulas da Termodinâmica mostram que a entropia do gás teria diminuído espontaneamente, o que contraria ainda o princípio de CARNOT.

Dêste modo, nosso terrível diabinho conseguiria fazer o que nós, homens, somos inteiramente incapazes de realizar: inverter o princípio de CARNOT. E, se êle pode fazê-lo, é porque pode agir rapidamente em escala molecular, sobre as moléculas tomadas individualmente, ao passo que os meios grosseiros de ação humana só nos permitem agir sobre quantidades enormes de moléculas, e em tempo demasiado longo, com relação à cadência da agitação molecular.

Admitiu-se por muito tempo que o “demônio” de MAXWELL invertia o princípio de CARNOT. Mas será verdade?

Antes de começar seu trabalho, o “demônio” está mergulhado num meio em equilíbrio térmico, onde reina uma irradiação isotrópica negra. Nestas condições, não pode ver nada. Como saberá, então, que uma molécula caminha para êle, com velocidade grande ou pequena? Aliás, sendo o “demônio” um ser da escala atômica, não irá também êle ser pôsto em movimento pela agitação molecular, e participar do movimento browniano? Certamente que sim, o que não vai facilitar sua tarefa de guarda.

Devemos, pois, retomar o problema, analisando as coisas muito mais de perto do que o fizera MAXWELL. Assim agiram diversos autores, especialmente LEÓN BRILLOUIN, desenvolvendo as pesquisas interessantíssimas de Termodinâmica estatística, empreendidas há vinte e cinco anos por SZILARD.

Para poder observar as moléculas que vêm sobre êle, o “demônio”, mesmo supondo que o movimento browniano não o impeça de realizar seu trabalho, deverá dispor de uma fonte de luz, uma “tocha”, como diz BRILLOUIN,

de temperatura mais elevada que a do gás ambiente, e então, não haverá mais equilíbrio térmico completo. Graças a essa tocha, o "demônio" poderá ver as moléculas e calcular-lhes a velocidade. Vai, portanto, receber uma informação que lhe é necessária para efetuar sua tarefa, e dêsse modo nos encontramos com a Cibernética, utilizando a noção de informação.

A análise do processo mostra que a informação é adquirida à custa da "neg-entropia" do meio exterior, por intermédio da tocha. O "demônio" de MAXWELL, como aliás o físico em seu laboratório, só pode fazer observações que lhe permitam adquirir informações, pedindo finalmente emprestado ao meio exterior a "neg-entropia"; esta necessidade de consumir a "neg-entropia", para obter a informação, confirma suficientemente nossa conclusão de que a informação é apenas uma forma da neg-entropia. De posse da informação, poderá o "demônio" manobrar a janelinha, de modo que possa aumentar a "neg-entropia" do gás ambiente, mas afinal êste crescimento da "neg-entropia" do gás será compensado pela diminuição da "neg-entropia" do meio exterior, de modo que não haverá nenhuma criação de "neg-entropia". Se chamarmos "decisão" ao ato de abrir a janelinha, poderemos dizer que o ciclo realizado é o seguinte:

"Neg-entropia — observação — informação — decisão — neg-entropia".

A observação transformou a "neg-entropia" em informação, e a decisão retransformou essa informação em "neg-entropia". Podemos dizer que, durante êste ciclo, a neg-entropia mudou de forma, porém se conservou.

Insisti um pouco nesta questão do "demônio" de MAXWELL, porque ela esclarece muito bem a analogia entre informação e neg-entropia, e mostra que as concepções da Cibernética nos permitem encarar, sob novos e instrutivos aspectos, problemas já antigos.

A teoria dos servo-mecanismos e a dos fenômenos de reação, tão importantes para a radioeletricidade e suas aplicações, podem ser consideradas ramos da Cibernética, e embora possam desenvolver-se independente das concepções cibernéticas, estas, nesse domínio, por sua vez, permitem esclarecer numerosos problemas e melhor penetrar-lhes a natureza real.

Por outro lado, a Cibernética parece destinada a numerosos êxitos no domínio da fisiologia, em particular na fisiologia normal e patológica do sistema nervoso. Para desenvolver nesse sentido a doutrina que havia criado, o eminente matemático NOBERT WIENER não hesitou em tornar-se um pouco fisiologista, e em pedir admissão como pesquisador no Instituto Nacional de Cardiologia do México. Desculpem-me se não entro em muitos pormenores sôbre êsses aspectos fisiológicos da Cibernética, pois me sinto muito pouco competente na matéria.

O que sabemos hoje sôbre o funcionamento do sistema nervoso mostramos que os neurônios de nosso sistema nervoso central recebem, do exterior, "informações" que, partindo de nossos órgãos sensoriais, caminham da periferia para o centro, graças ao influxo nervoso. Os centros nervosos do cérebro, ou da medula espinhal, podem reagir a essas informações enviando para a periferia, quer por um ato voluntário, quer por um processo reflexo, influxos nervosos que se traduzem por atos. Em particular, os reflexos condicionados,

tão brilhantemente estudados por PAVLOV, entram evidentemente nesse esquema geral. Certas doenças orgânicas, como a ataxia, desorganizando de diversas maneiras o funcionamento dos circuitos nervosos, provocam perturbações de transmissões no sistema nervoso. Introduzindo assim as palavras "informação" e "transmissão" na descrição do funcionamento das conexões nervosas, acentuamos bem o papel que podem desempenhar as concepções e os resultados da Cibernética, na análise da fisiologia normal ou patológica do sistema nervoso.

Numa ordem de idéias muito próxima, insistiu-se recentemente sobre a analogia entre o funcionamento das máquinas de calcular e o do cérebro. As máquinas de calcular contemporâneas não só executam cálculos mecânicos, mas resolvem problemas difíceis de análise matemática. Efetuam essas operações, como dissemos, com maior segurança e rapidez que o próprio cérebro. Tratando-se de operações dependentes da lógica, podemos dizer, em certo sentido, que tais máquinas são providas de faculdades lógicas. Podemos também dotá-las de "memória", pois foram inventados dispositivos graças aos quais a máquina de certo modo guarda em reserva os resultados que obteve, podendo em seguida usá-los novamente. É certo que essas analogias podem esclarecer-nos muito sobre o funcionamento da razão e do pensamento. Seria lícito também considerar possível a explicação até das mais altas operações intelectuais por meio de analogias com as máquinas de calcular, e fornecer disso uma interpretação completa, com auxílio das leis da Cibernética. Dizeremos mais adiante por que tal opinião nos parece exagerada, mas é incontestável que há nela ampla matéria para reflexão.

Assim, se a Cibernética nos abre novas perspectivas sobre o funcionamento do sistema nervoso e sobre o próprio mecanismo da atividade mental, pode também fornecer-nos preciosas indicações sobre os processos vitais em geral, de vez que estes repousam, com efeito, sobre uma rede extremamente complicada de ações e reações em que as noções de sinal, de transmissão, de informação, e de "neg-entropia" devem desempenhar sem dúvida um papel essencial. Levando essas idéias ao extremo — e sobre esse ponto também terci que formular reservas — acabamos por nos perguntar se os organismos vivos não serão totalmente assimiláveis a autômatos, cujo mecanismo a Cibernética, apoiando-se em leis unicamente físico-químicas, chegará um dia a explicar completamente.

Como DE VAUCANSON se sentiria feliz ao ver assim voltar a moda dos autômatos, êle que, em meados do século XVIII, os fabricara tão notáveis, sobretudo os patos, "que funcionavam ao natural"! Com efeito, os autômatos, que, depois de terem estado muito em moda, foram durante longo tempo considerados como curiosidades engraçadas, mas sem maior alcance científico, estão de novo na ordem do dia. Precursor desse renascimento, o espanhol TORRES Y QUEVEDO retomou a fabricação dos autômatos e construiu o célebre "jogador de xadrez", capaz de ganhar uma partida simples desse nobre jogo, contra um adversário de carne e osso, capaz de protestar tocando uma campainha, se esse adversário não observar as regras do jogo. Hoje, GREY WALTER, eletroencefalografista de BRISTOL, apresenta-nos tartarugas automáticas, dotadas de reflexos condicionados completamente análogos aos dos seres



vivos, e que como os animais impelidos pela fome vão à procura de alimento, são capazes de ir alimentar-se numa fonte de energia, quando suas reservas estão prestes a esgotar-se. O animal — o próprio homem — não será um “robot” particularmente bem organizado? A questão se apresenta, e os êxitos obtidos na construção de autômatos parecem trazer novos argumentos em favor de uma interpretação puramente mecânica e físico-química de todos os processos da vida.

Depois de haver insistido sobre algumas concepções mais interessantes e sobre alguns dos êxitos mais notáveis da Cibernética, gostaríamos de fazer, a seu respeito, algumas observações críticas que nos servirão para traçar os limites do seu poder explicativo.

Antes de mais nada, a Cibernética, tal como se apresenta hoje, é essencialmente um ramo da física clássica, isto é, utiliza as concepções e as leis clássicas da mecânica e da eletricidade. Ignora portanto as concepções novas da teoria dos Quanta e da Mecânica ondulatória, e isto faz com que a Cibernética, no seu estado atual, só possa fornecer uma interpretação exata dos fenômenos macroscópicos de grande escala, não lhe sendo possível estender-se aos fenômenos da escala atômica, que entretanto figuram na base de toda a Física.

Podemos dizer também que a Cibernética não inovou tanto quanto fôra lícito acreditar. A teoria das transmissões, a dos reguladores ou dos servomecanismos etc., haviam já adquirido alto grau de desenvolvimento antes do aparecimento da Cibernética, e podem ser considerados ramos autônomos da ciência, prolongamentos diretos da Física clássica. O papel da Cibernética foi sobretudo de, introduzindo interessantes e novas concepções gerais, unificar teorias que pareciam independentes, mostrando os laços profundos que as unem, e fornecendo uma espécie de esquema geral, que as contém todas como casos particulares. Ao mesmo tempo, abriu-nos horizontes novos de incontestável interesse, mas está longe de nos haver trazido, sobre o que há de mais profundo nos fenômenos físicos, informações tão radicalmente novas quanto o fez, por exemplo, a teoria dos Quanta.

Gostaria de insistir um pouco nas relações da Física quântica com a Cibernética. O fato de que a teoria das transmissões emprega hoje, com vantagem, uma representação complexa dos sinais (sinais analíticos de GABOR e VILLE), o fato de que ela utiliza a desigualdade  $\Delta_f \Delta_t \geq 1$  exprimindo que a representação-de-FOURIER, de um sinal de duração  $\Delta_t$  compreende componentes-espetáculos cobrindo um intervalo de frequência  $\Delta_f$  pelo

1

menos igual a  $\frac{1}{\Delta_t}$  foram, às vezes, interpretados como indicando um laço

estreito entre a teoria das transmissões e a Física quântica. Não é nada disso. O emprêgo das funções complexas, os desenvolvimentos de FOURIER, e a desigualdade  $\Delta_f \Delta_t \geq 1$ , são conhecidos há muito tempo, pelos matemáticos, e não estão ligados a nenhuma teoria física particular. O que caracteriza a Física quântica não é o emprêgo desses algarismos em si mesmos. É, como disse e repetiu várias vezes BOHR, a introdução do *quantum* de ação.

Entretanto não é impossível introduzir o *quantum* de ação, de certo modo como dado experimental exterior, no quadro da Cibernética; e em particular na teoria das transmissões. Até aqui, só houve, creio eu, uma única tentativa séria nesse sentido: a de DENIS GABOR, que se acha exposta em sua comunicação às reuniões sobre Cibernética, de que já falei. GABOR insiste, com razão, no fato de que a teoria das comunicações não pode desenvolver-se unicamente sob forma puramente matemática. Deve levar em conta a natureza física dos sinais, e as condições físicas de sua emissão, de sua propagação e de sua recepção. Ora, quando analisados de perto, êsses fenômenos se revelam afinal como resultantes de transições quânticas, e dependem, pelo menos em princípio, da constante  $h$ . Assim, podemos ser levados a introduzir considerações quânticas na teoria das comunicações, e portanto na Cibernética.

Fenômeno característico, com o qual a teoria das comunicações deve preocupar-se, é “ruído térmico”. Consideremos uma antena de T.S.F. que não seja acionada por qualquer corrente de emissão, e que esteja em equilíbrio térmico com a atmosfera circundante. A agitação térmica dos eletrons contidos na antena dará lugar a uma emissão radioelétrica, que virá perturbar o funcionamento dos receptores vizinhos, e que constituirá uma forma de “ruído térmico”, cujas flutuações incessantes poderão prejudicar a recepção dos sinais. Como o movimento dos eletrons é essencialmente quantificado, vemos que uma análise rigorosa do fenômeno fará aparecer a constante  $h$ . GABOR estudou essas questões, de modo muito interessante, em relação com a sua teoria dos elementos de informação  $\Delta_f \Delta_t$ .

Analisou também a maneira como um feixe de eletrons absorve parte da energia de uma onda eletromagnética por êle atravessada, e fornece interessantes indicações sobre a maneira como se opera a passagem das absorções quânticas elementares à absorção contínua, considerada pela teoria eletromagnética clássica. Êsses resultados abrem caminhos promissores, de que a Física quântica, e em especial a teoria quântica do campo eletromagnético, poderão tirar partido. Mostram que poderá ser útil, e mesmo necessário, introduzir os quanta em certos capítulos da Cibernética. Mas esta introdução se faz de certo modo pelo exterior, apoiando-se nos ensinamentos da Física quântica, tirados da experiência, e daí não se conclui absolutamente que a Cibernética em si mesma possa conduzir-nos à teoria dos Quanta.

Devemos também insistir no fato de que a assimilação da informação à “neg-entropia”, por mais instrutiva e sedutora que seja, não deixa de suscitar ainda dificuldades. Em primeiro lugar, a definição própria da quantidade de informação, definição que, naturalmente, deve ser precisa e geral se quisermos assimilar esta grandeza à entropia de sinal trocado, não parece estar ainda estabelecida de modo incontestável. Em seu relatório sobre a transmissão da informação, nas reuniões sobre a Cibernética, já citadas. AGIRIN formula dúvidas sobre a possibilidade de definir a quantidade de informação independente da utilização desejada. Esta circunstância poderia ser incômoda, para o estabelecimento de um paralelismo completo entre informação e entropia. Além disso, LÉON BRILLOUIN, que recentemente estudou todos êstes problemas com muito espírito crítico, assinalou uma dificuldade gravíssima. Sabemos, com efeito, que, se se produzem transformações termodinâmicas em um sistema

isolado, a entropia desse sistema só pode aumentar ou, no máximo, permanecer constante, para transformações reversíveis. Empreguemos ainda a linguagem cômoda da neg-entropia que, esta sim, vai sempre diminuindo. Podemos dizer que, quando um corpo cede neg-entropia a outro, a neg-entropia adquirida pelo corpo receptor é, no máximo, igual à perda pelo corpo doador; torna-se fácil verificá-lo com exemplos. Portanto, toda aquisição de neg-entropia por certos corpos tem como contrapartida necessária a diminuição da neg-entropia de outros corpos. Ora, no que se refere à informação, as coisas não se passam absolutamente da mesma maneira. Quando um professor ensina aos alunos as leis da Física, dá-lhes informação, mas sem perdê-la de nenhum modo, pois o fato de ensinar as leis da Física não tem como consequência que ele as esqueça. Da mesma maneira, se eu lhes mando um telegrama para anunciar, por exemplo, que o governo acaba de ser derrubado, estou-lhes transmitindo uma informação, mas, por isso, não perco absolutamente o conhecimento da crise ministerial que acaba de explodir.

Ora, vê-se que aqui a analogia entre informação e neg-entropia, de que havíamos percebido a extensão, parece não perdurar. Como essa analogia se afigurava perfeita no caso de transmitir-se a informação por meio de processos físicos, operação no curso da qual a informação só tende a diminuir, poderíamos crer que a dificuldade, agora encontrada, provém da intervenção de seres vivos: aquele que dá a informação, e aquele que finalmente a recebe. Mas parece que não é nada disso, pois a máquina de calcular provida de "memória", no sentido que os construtores dessas máquinas dão à palavra, pode muito bem comunicar a utilizadores o resultado dos seus cálculos, isto é, a informação, conservando ao mesmo tempo esse resultado na sua memória. LÉON BRILLOUIN parece considerar importantíssima essa dificuldade, e de natureza a criar dúvida sobre a analogia entre informação e entropia, que era um dos resultados mais atraentes da Cibernética. Talvez possamos superar de algum modo tal dificuldade, porém ela parece indicar que o conjunto do problema ainda não está bem "no ponto".

Vimos que a Cibernética oferece à fisiologia normal e patológica, e em particular à do sistema nervoso, pontos de vista e sugestões de altíssimo interesse. Parece mesmo que ela deve esclarecer-nos sobre mais de um ponto concernente ao funcionamento de nossa inteligência e de nossa razão. Não chegará ela, a partir daí, a conduzir-nos a uma compreensão total da Vida? A tartaruga de GREY WALTER já não é quase um ser vivo? As grandes máquinas de calcular, da época contemporânea, já não são espécies de cérebros em funcionamento?

Creio que também aqui há muitas reservas a fazer. Sem dúvida, as máquinas de calcular conseguem fazer, com mais segurança e rapidez que nosso cérebro, certos cálculos e certas resoluções de problemas analíticos. Mas essa segurança e essa rapidez provém justamente de seu automatismo; como contrapartida, a máquina não possui essa faculdade criadora, esse desejo de ir além do que já foi adquirido, características do pensamento humano. LÉON BRILLOUIN, que insistiu de maneira muito pertinente sobre estes pontos, acentuou bem que as máquinas de calcular, obras do gênio humano, só sabem fazer o trabalho para o qual foram construídas. Concebidas e realizadas pelo

sábio e pelo engenheiro, carecem de seus cuidados para serem mantidas, e, eventualmente, consertadas. Falta-lhes seguramente esta propriedade essencial dos seres vivos, sem a qual o pensamento é inconcebível: a consciência da própria existência e da própria personalidade. Sendo impossível atribuir-lhes uma consciência análoga à nossa, o funcionamento dessas máquinas, por mais aperfeiçoadas que sejam, não é idêntico ao do nosso pensamento. Aliás, o nome de "máquinas", que somos naturalmente levados a atribuir-lhes, já não indica que elas constituem criações de nossa inteligência, análogas a todos os utensílios de que a humanidade, pouco a pouco, soube prover-se para aumentar a eficácia de sua ação, desde o machado de sílex talhado às realizações mais requintadas da técnica moderna? Por sua própria natureza, a máquina parece incapaz desses esforços criadores, que conduzem, por exemplo, às grandes descobertas científicas, e que se diriam próprios da inteligência humana. Neste gênero de esforço, nossa inteligência cria a "informação absoluta" (segundo a expressão de LÉON BRILLOUIN), e esta criação, em verdade, só tem valor porque estamos conscientes dela. Pode-se imaginar a máquina fazendo alguma coisa de análogo?

A esperança que, aparentemente, cultivam alguns adeptos da Cibernética, de explicar, não só todo o funcionamento do sistema nervoso, senão mesmo toda a atividade intelectual, com o auxílio da teoria das comunicações, ou de seus prolongamentos, parece aproximar-se da opinião dos que consideram possível a explicação de todos os problemas biológicos, pelas leis da Físico-química, atualmente conhecidas. Isto nos conduz ao grande problema da Vida, e se bem que esse problema saia, afinal, um pouco do quadro da Cibernética, gostaria de dizer, entretanto, algumas palavras a seu respeito pois o desenvolvimento da teoria dos Quanta e da Cibernética levou numerosos físicos, sobretudo SCHRÖDINGER, PIERRE AUGER e ainda LÉON BRILLOUIN, a se preocuparem com ele, nesses últimos anos.

Um ponto sobre o qual parece que todo mundo está de acordo, é que, do ponto de vista do físico, e de acordo com a idéia profunda do filósofo HENRI BERGSON, o traço característico dos fenômenos biológicos consiste em retardar de certo modo o inevitável crescimento da entropia. Com efeito, o segundo princípio da Termodinâmica nos diz que a evolução do Universo é acompanhada inexoravelmente por um aumento da entropia, porém não nos diz nada sobre a velocidade desse aumento. Se conseguíssemos (o que é praticamente irrealizável) suprimir, durante certo tempo, todos os fenômenos irreversíveis, a entropia ficaria momentaneamente constante, e só depois, quando fatalmente reaparecessem os fenômenos irreversíveis, é que ela passaria a aumentar. Em princípio, nada impede, pois, que se atenuem o aumento da entropia, malgrado o caráter inevitável desta. Do mesmo modo que existem agentes chamados "catalizadores", que, ao provocarem reações irreversíveis, precipitam o aumento da entropia, existem mecanismos de "catálise negativa", tendentes a travá-lo, e a característica da Vida parece ser de fato a de criar tais mecanismos. Disse um pessimista: "A vida é uma luta sem esperança de vencer". Esta frase amarga contém uma verdade profunda, pois a vida é mesmo uma luta para manter o estado, tão pouco provável, que representa o organismo vivo, com a certeza de que, afinal, o aumento de entropia vencerá, voltando-se ao estado mais provável, em que o organismo

será dissolvido e se reduzirá a pó, isto é, a uma disseminação de moléculas, não mais unidas por qualquer laço orgânico. Mesmo assim, a Vida inventou, com o mecanismo da reprodução, o meio de prolongar, através do tempo, essa luta desesperada contra o aumento da entropia. Vista sob esse aspecto, a vida, com sua faculdade de assimilação, de reparação espontânea e de reprodução, e com as manifestações de consciência, inteligência e razão, que aparecem em suas formas elevadas, é realmente uma coisa extraordinária.

Sobre esse problema da Vida, ERWIN SCHRÖDINGER, físico eminente, e um dos fundadores da Mecânica ondulatória, escreveu há pouco, uma obra muito interessante, intitulada: "Que é a Vida?" (*What is Life?*). Ao lado de numerosas outras observações importantes, SCHRÖDINGER desenvolve a idéia essencial de que só a existência dos quanta pode tornar possível a persistência dos seres vivos. Sabemos, efetivamente, que se a Física clássica fôsse exata, a própria matéria seria instável: somente a existência das descontinuidades quânticas permite compreender a estabilidade dos edifícios atômicos e moleculares, e por conseguinte a estabilidade da matéria inerte. Ora, a matéria viva também nos oferece exemplos notáveis de estabilidade: estabilidade dos organismos vivos, ao longo de toda a duração de sua existência às vezes longa, implicando a estabilidade das células e dos conjuntos celulares que as compõem; estabilidade, também, podendo persistir durante milênios, de forma das espécies vivas, implicando notável estabilidade de constituição das células geradoras, capazes de manter as mesmas características durante milhões de gerações sucessivas. Como para a matéria inerte, semelhante estabilidade só é possível graças à intervenção das descontinuidades quânticas; como os átomos, as células e os genes só permanecem estáveis porque sua estrutura não pode suportar as variações contínuas, admitidas pela física clássica, e lhe é dado apenas suportar bruscas e importantes modificações. Tal como no caso das moléculas e dos átomos da matéria inerte, o fato de que apenas são possíveis modificações bruscas e finitas protege as estruturas existentes, tornando-as estáveis, e dá origem a certa tendência à reconstituição das estruturas destruídas. A descoberta das mutações bruscas, devida sobretudo a DE VRIES, e todo o movimento de idéias que daí decorreu para a Biologia moderna, não tendem, aliás, a provar que as estruturas biológicas, exatamente como a dos átomos e das moléculas da matéria inerte, só podem modificar-se por meio de saltos bruscos e por transições quânticas?

Esse breve resumo basta para provar a importância das idéias de SCHRÖDINGER e o interesse que se prende à interpretação quântica dos fenômenos biológicos. Mesmo, porém, admitindo que essa Biologia quântica chegue a explicar o segredo da Vida, nem por isso seria menos verdadeiro que a Cibernética, cujos fundamentos nada têm de quântico, é insuficiente para tal.

Sem dúvida alguma, SCHRÖDINGER tem razão ao pensar que a explicação dos fenômenos biológicos deverá necessariamente comportar a intervenção das concepções quânticas. Mas, ele parece crer que as teorias quânticas possam bastar para fazer-nos penetrar os últimos segredos da Vida. LÉON BRILLOUIN não acha assim, e enunciou, a esse respeito, opiniões que aprovo inteiramente. Lembra ele que é uma ilusão, sempre renascente, e por isso mesmo perigosa, acreditar que a ciência está agora estabilizada, e que, com os conhecimentos por ela fornecidos *atualmente*, poderemos explicar tudo que

continua misterioso. Dizem que LAGRANGE há século e meio, se lastimava por só haver um sistema do mundo, e porque, depois da obra de NEWTON, não restasse nada de essencialmente novo a descobrir. Êle se enganava redondamente, e, se vivesse ainda, o espetáculo da Astronomia e da Física contemporâneas o demonstraria bem a seus olhos. Mas estamos sempre arriscados a cometer o mesmo erro que êle, e a acreditar que, se ontem não sabíamos nada, hoje sabemos tudo: estejamos certos que o amanhã se encarregará de nos desiludir. Penso como LÉON BRILLOUIN, que, se chegarmos um dia a compreender melhor a verdadeira natureza da Vida, ainda tão misteriosa, isso só poderá acontecer quando tivermos adquirido o conhecimento de novas leis da natureza, e mesmo, sem dúvida, quando houvermos alcançado pontos de vista e maneiras de pensar, de que nossa inteligência ainda não dispõe. Talvez mesmo, como parece sugerir LÉON BRILLOUIN, uma vez compreendidas, as leis da Biologia nos aparecerão como as mais gerais e, as leis físico-químicas da matéria inerte, como seus simples casos particulares ou degenerescências.

Mas, sem nos lançarmos a considerações demasiado hipotéticas, podemos, ao que parece, afirmar que não está na Cibernética a chave do conjunto dos fenômenos biológicos. Quanto às aplicações econômicas ou sociais da Cibernética, é possível que um dia elas sejam importantes, mas, por enquanto, isso é apenas um programa, e o que diz a respeito NORBERT WIENER, no fim de seu livro, me parece ainda bastante vago.

Agora, gostaria de resumir, rapidamente minhas conclusões.

A Cibernética nos trouxe resultados de incontestável interesse. Forneceu-nos métodos novos e pontos de vista originais, o que é sempre precioso.

Sem dúvida, ela não criou ramos verdadeiramente novos da ciência, pois todos aqueles que ela possibilitou agrupar num feixe já existiam antes, e teriam podido continuar a desenvolver-se sem ela. Mas foi precisamente ao agrupá-los e unificá-los que ela os vivificou por meio de aproximações assim sugeridas. E, como alguns desses ramos da ciência, por exemplo, a teoria das comunicações, têm grande importância do ponto de vista das aplicações técnicas, a Cibernética não é somente uma bela construção do espírito: é também capaz de suscitar, em muitas direções, progressos de alta importância prática.

A mais importante e a mais bela das idéias sugeridas pela Cibernética é, certamente, a da profunda analogia entre informação e entropia, pois esta idéia lança ondas de luz sobre muitos problemas até então um pouco obscuros, como o do "demônio" de MAXWELL. Embora esta nova concepção, tão estimulante para o pensamento do sábio, ainda esbarre, como já vimos, com tantas dificuldades, parece-me provável que, depois talvez de convenientemente aperfeiçoada, acabará constituindo como uma magnífica aquisição para o patrimônio do conhecimento científico.

O espírito da Cibernética já fecundou e continuará a fecundar numerosos ramos da ciência. Não devemos, porém, pedir à Cibernética mais do que ela pode dar-nos. Não podemos esperar, creio eu, que ela sozinho nos ofereça, em futuro mais ou menos próximo, a solução do tríplice enigma da Vida, da Consciência e do Pensamento.