

Princípio da incerteza de Heisenberg

Heisenberg's uncertainty principle

Daniel Nguedi Dilamonhi ^{1*}

¹ MSc. Professor. Escola Superior Politécnica de Lunda Sul. danieldilamonyi@gmail.com

*Autor para correspondência: danieldilamonyi@gmail.com

RESUMO

A incapacidade da Física Clássica de explicar certos fenômenos como por exemplo porquê num átomo, onde os electrons carregados negativamente orbitam a volta de um núcleo carregado positivamente, tudo não colapsar em uma bola de partículas, justificou a elaboração do Princípio da Incerteza por Heisenberg. Tal princípio da incerteza explica por que isso não acontece e explica a imprevisibilidade do comportamento de quantidades microscópicas. Isto é, não é possível medir simultaneamente a posição e a quantidade de movimento, pois quando se conhece com exactidão uma destas quantidades, perde-se a informação sobre a outra. No presente artigo, mostra-se como as aplicações do Princípio da Incerteza, saindo do enfoque quântico, abrangem hoje em dia problemas de decisão em vários campos da vida quotidiana. Assim abordagem focalizada no Princípio da Incerteza pode ajudar gestores na tomada de decisões em determinadas situações tanto econômicas, ambientais e até na atual situação de pandemia da Covid-19.

Palabras clave: Princípio da Incerteza, Física Quântica, visão ontológica, visão epistemológica, visão estatística, covid-19.

ABSTRACT

The inability of Classical Physics to explain certain phenomena, such as why in an atom, where negatively charged electrons orbit the back of a positively charged nucleus, all not collapsing into a particle ball, justified Heisenberg's elaboration of the Uncertainty Principle. This principle of uncertainty explains why this does not happen and explains the unpredictability of the behavior of microscopic quantities. That is why it is not possible to measure the position and the amount of movement simultaneously, because when one of these quantities is accurately known, the information about the other is lost. This article shows how the applications of the Uncertainty Principle, going from the quantum approach, nowadays cover decision problems in various fields of daily life. Thus, an approach focused on the Uncertainty Principle can help managers in decision-making in certain situations both economic, environmental and even in the current situation of the Covid-19 pandemic.

Keywords: *Uncertainty Principle, Quantum Physics, ontological vision, epistemological vision, statistical vision, covid-19.*

INTRODUÇÃO

O princípio de incerteza de Heisenberg é um dos pilares conceituais da Física Quântica. De acordo com esse princípio, em sistemas de escalas reduzidas, como nos átomos e moléculas, grandezas relacionadas, tais como quantidade de movimento e posição, não podem ser medidas simultaneamente com exatidão. Quando se conhece a medida de uma delas dessa forma, perde-se completamente a precisão sobre a medida da outra grandeza.

Em outros termos, o princípio da incerteza assegura, portanto, que não é possível que se meça, simultaneamente, a posição e quantidade de movimento, pois, quando se conhece uma delas, perde-se a informação sobre a outra. Além das grandezas de quantidade de movimento e posição, o princípio também se aplica às grandezas de energia e tempo. Ele expressa um limite inexorável à medição de sistemas quânticos. Tal princípio tornou-se parte integrante das interpretações da mecânica quântica mais bem-sucedida em voga.

Nossa pretensão não é discutir a correção do princípio, mas algumas de suas interpretações mais conhecidas. Por limitações de tempo e espaço, em nossa discussão não vamos abranger diversos autores, nem tão pouco tratar de todos os desdobramentos de tal debate. A expressão analítica do princípio de incerteza pode formular-se como segue:

$$\Delta X \Delta Q \geq \frac{\hbar}{2\pi} \quad \text{e} \quad \Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2\pi}$$

ΔX – incerteza da posição

ΔQ – incerteza da quantidade de movimento

ΔE – incerteza da energia

Δt – incerteza do tempo

Analizando a relação anterior, é possível perceber que a incerteza da medida ΔQ , multiplicada pelo erro da medida Δt , deve ser sempre maior ou igual à constante de Planck ($6,62607004 \cdot 10^{-34}$ J.s), dividida por 2π . Essa constante, já reduzida, pode ser escrita como a constante reduzida de Planck, dada por $\hbar = 1,0545 \cdot 10^{-34}$ J.s.

$$\Delta X \Delta Q \geq \hbar \quad \text{e} \quad \Delta E \Delta t \geq \hbar$$

O princípio da incerteza é uma das ideias mais famosas (e provavelmente incompreendidas) na Física. Ele nos diz que há uma natureza difusa, um limite fundamental para o que podemos saber sobre o comportamento das partículas quânticas e, portanto, as menores escalas da natureza. Destas escalas, o máximo que podemos esperar é calcular as probabilidades de onde as coisas estão e como elas se comportam. Ao contrário do universo determinístico de Isaac Newton, onde tudo segue leis claras e prever é fácil, se conhecer as condições iniciais, o princípio da incerteza consagra um nível de confusão na teoria quântica.

A ideia simples de Werner Heisenberg nos diz por que os átomos não implodem, como o sol consegue brilhar e, estranhamente, que o vácuo do espaço não está realmente vazio.

Uma consubstancialização precoce do princípio da incerteza apareceu em um artigo de 1927 de Werner Heisenberg, um físico alemão que trabalhava no instituto de Niels Bohr em Copenhague na época, intitulado “Sobre o conteúdo perceptivo da cinemática e mecânica teórica quântica”. A forma mais familiar da equação ocorreu alguns anos depois, quando ele refinou seus pensamentos em palestras e papéis subsequentes.

DESENVOLVIMENTO

Surgimento do princípio da incerteza de Heisenberg

Heisenberg estava trabalhando com as implicações da teoria quântica, uma estranha nova maneira de explicar como os átomos se comportaram que tinham sido desenvolvidas por físicos, incluindo Niels Bohr, Paul Dirac e Erwin Schrödinger, na década anterior. Entre suas muitas ideias contraintuitivas, a

teoria quântica propôs que a energia não era contínua, mas em vez disso, pacotes discretos (quanta) e que a luz poderia ser descrita como uma onda e um fluxo dessas quantas.

Ao descobrir essa visão de mundo radical, Werner Heisenberg descobriu um problema na forma como as propriedades físicas básicas de uma partícula em um sistema quântico poderiam ser medidas. Em uma de suas cartas regulares para um colega, Wolfgang Pauli, ele apresentou os conceitos de uma ideia que desde então tornou-se uma parte fundamental da descrição quântica do mundo.

O princípio da incerteza diz que não podemos medir simultaneamente a posição (x_i) e o momento (p) de uma partícula com precisão absoluta. Quanto mais precisamente conhecemos um desses valores, menos precisamente conhecemos o outro. Multiplicando os erros nas medições desses valores (os erros são representados pelo símbolo do triângulo na frente de cada propriedade, a letra grega “delta”) deve dar um número maior ou igual à metade de uma constante chamada “ \hbar Barra”. Isso é igual à constante de Planck (geralmente escrita como \hbar) dividida por 2π . A constante de Planck é um número importante na teoria quântica, uma maneira de medir a granularidade do mundo em suas escalas menores e tem o valor de $\hbar = 6,626 \times 10^{-34}$ joule segundos.

Pensamento sobre o princípio da incerteza de Heisenberg

Uma maneira de pensar sobre o princípio da incerteza é enxergá-lo como uma extensão da forma como vemos e medimos as coisas no mundo quotidiano. Você pode ler essas palavras porque partículas de luz, fótons, saíram da tela ou do papel e chegaram aos seus olhos. Cada fóton nesse caminho traz consigo algumas informações sobre a superfície de que ele saltou, à velocidade da luz.

Ver uma partícula subatômica, como um elétron, não é tão simples. Você também pode saltar um fóton e, em seguida, detectar esse fóton com um instrumento. Mas as chances são de que o fóton dê um impulso ao elétron enquanto o atinge e altere o caminho da partícula que você está tentando medir. Ou então, dado que as partículas quânticas muitas vezes se movem tão rápido, o elétron pode não estar no lugar onde o fóton originalmente o rejeitou. De qualquer forma, sua observação de posição ou impulso será imprecisa e, mais importante, o acto de observação afecta a partícula que está sendo observada.

O princípio da incerteza é o cerne de muitas coisas que observamos, mas não podemos explicar com o uso da Física clássica (não-quântica). Assim por exemplo, consideremos átomos, onde os electrons carregados negativamente orbitam a volta de um núcleo carregado positivamente; pela lógica clássica, podemos esperar que as duas opostas se atraiam, levando tudo a colapsar em uma bola de partículas. O princípio da incerteza explica por que isso não acontece: se um elétron se aproximasse muito do núcleo, sua posição no espaço seria precisamente conhecida e, portanto, o erro na medição da posição seria minúsculo. Isso significa que o erro na medição da sua inferência e sua velocidade seria enorme. Nesse caso, o elétron poderia estar se movendo rápido o suficiente para voar completamente para fora do átomo.

Princípio da incerteza e processo de medição

É importante perceber que a impossibilidade de se obter medidas quânticas exactas não se refere à qualidade dos instrumentos de medida, muito menos à destreza do instrumentador, mas sim ao comportamento dual dos sistemas quânticos, isto é, sua natureza permite-lhes comportarem-se hora como partículas, hora como ondas.

As partículas podem ter suas posições medidas com sucesso, enquanto as ondas podem ter sua quantidade de movimento determinada, com sucesso, com base na **hipótese de De Broglie**, que afirma que objetos quânticos têm associados consigo um comprimento de onda e uma frequência.

O princípio de incerteza, formulado por Werner Heisenberg por volta de 1927, expressa um limite de observação para sistemas quânticos. A medição simultânea dos observáveis momentos e posição não é possível. Portanto, de acordo com este princípio, a posição e o momento de um elétron não podem ser obtidos, ao mesmo tempo, com exatidão. Se determinarmos a posição, não podemos ter acesso ao momento, e se determinarmos o momento, não podemos determinar a posição.

Nossa conhecimento sobre o nível quântico, de acordo com tal princípio, será sempre “inexoravelmente” limitado. O máximo que podemos obter com relação a estes dados são seus valores prováveis, mas nunca seus valores exactos.

Muitas são as interpretações do princípio de incerteza formulado por Werner Heisenberg. Destacaremos ao menos quatro: as interpretações ontológicas, epistemológica, tecnológica e estatística.

A interpretação ontológica considera que a incerteza é uma propriedade fundamental da natureza. Não podemos conhecer com precisão os estados quânticos porque os mesmos são intrinsecamente indeterminados.

A interpretação epistemológica considera que a natureza não é indeterminada: é o entendimento humano que se revela limitado para compreender a ordem oculta – o determinismo velado – encoberta pela incerteza aparente.

A interpretação tecnológica defende que a tecnologia actual não é capaz de investigar a natureza sem superar as relações de incerteza. Tais relações não seriam, portanto, ontológicas, mas apenas efeitos das interações ainda grosseiras entre os instrumentos de medida e os sistemas subatômicos.

Por fim, a interpretação estatística considera que os sistemas quânticos são complexos e não individuais, de modo que as relações de incerteza são produtos das análises estatísticas de tais sistemas.

Como os agrupamentos de entidades quânticas são complexos, seu comportamento é estatístico, logo, de certa forma, indeterminado. Tal indeterminação é fruto das estruturas pelas quais investigamos tais sistemas. Deste modo, a indeterminação não é nem ontológica, nem tão pouco epistemológica. É porque tratamos de tais sistemas por meio de um formalismo estatístico que estes se revelam indeterminados. A ciência estatística não trata de indivíduos, mas de “populações”. Podemos determinar os estados de indivíduos, mas acerca do comportamento de populações só nos resta calcular a probabilidade de que determinados eventos ocorram.

Segundo Bohr (1995), o aspecto crucial neste ponto é o reconhecimento de que qualquer tentativa de analisar, à maneira habitual da Física clássica, a individualidade dos processos atômicos, condicionados pelo quantum de ação, é frustrada pela inevitável interação dos objetos atômicos em exame, com os instrumentos de medida indispensáveis para este fim. Neste assunto, muitos teóricos defendem que é a interação entre o objeto medido e os instrumentos de medição que perturba as partículas, tornando-as incertas, como é o caso de Niels Bohr.

O limite imposto pelo princípio da incerteza não depende da maneira pela qual você tenta medir a posição ou velocidade da partícula, nem do tipo de partícula. O princípio da incerteza de Werner Heisenberg é uma propriedade fundamental, inescapável, do mundo, e teve profundas implicações na maneira como vemos o mundo é a interpretação de Hawking, através dele, muitos teóricos defendem que a incerteza é característica imanente da natureza quantica. (Hawking, 2005, p. 95)

Um dos pioneiros do Princípio da Incerteza de Werner Heisenberg é Paul Dirac, que apresentou teoricamente a descoberta do pósitron, uma antipartícula do elétron, e, defendeu esta tese: há quem afirme que não se pode localizar exactamente um elétron, porque ele não se encontra em um lugar determinado. Existe um limite para os nossos poderes de observação e para o mínimo de perturbação que acompanha o nosso acto de observação, um limite inerente à natureza das coisas e que nunca pode ser vencido pelo aperfeiçoamento da técnica e da habilidade do observador. (Caruso, 2006, p.468-47)

Dado um elétron e , sua posição e seu momento (sua massa multiplicada por sua energia) são sempre prováveis. É mais provável que o elétron se localize em determinadas regiões do que em outras, mas, ainda assim, nosso conhecimento é probabilístico. De acordo com a equação de Schrödinger, podemos inferir que, enquanto não sofrer um colapso observacional, o elétron se ramifica em diversas realidades superpostas, em cada qual apresentará uma maior probabilidade de ser identificado a um vector que relate suas coordenadas espaciais (x,y,z) em um espaço de Hilbert (*Um espaço de Hilbert é uma generalização do espaço euclidiano com n dimensões*) com uma coordenada temporal t . Assim, de acordo com esse modelo, o elétron, antes de ser observado, existe em todos os lugares possíveis, com todos os níveis de energia possíveis e em todas as velocidades possíveis, mas com distribuição desigual de probabilidades para cada uma destas realidades potenciais.

De acordo com a equação de Schrödinger, todas as probabilidades são concomitantemente reais. Sendo assim, no nível quântico, uma probabilidade deixa de ser compreendida como uma

“possibilidade” e passa a ser entendida como uma potência objetiva do mundo”. A implicação epistemológica deste princípio é a limitação inevitável do empreendimento intelectual em face da natureza. Nunca conhiceremos a natureza com absoluta precisão, ou porque nunca “podemos” observá-la precisamente (como defendem os que postulam que a incerteza é provocada por uma inevitável perturbação entre os instrumentos de medida e os objetos medidos) ou porque a própria natureza não possui valores precisos (como postulam os que defendem a tese de que a incerteza é uma característica necessária, ontológica, da própria natureza quântica).

De Silvio Seno Chibeni (2005) demarcou as diferentes interpretações da incerteza quântica citando o artigo “Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg”:

- Versão ontológica: A incerteza diria respeito a uma indeterminação intrínseca aos entes físicos [Esta seria a interpretação de Paul Dirac].
- Versão epistemológica: A incerteza como perturbação inescapável da interação entre o observado e o sistema observador. Os experimentos que fornecem tal definição [dos conceitos mecânicos] sofrem, eles próprios, de uma indeterminação introduzida puramente pelos procedimentos experimentais que utilizamos para a determinação simultânea de duas quantidades canonicamente conjugadas.
- Versão estatística: “Dispersão estatística”: Para Karl Popper (2000), a indeterminação não possui caráter ontológico, tão pouco epistemológico, sendo o resultado da matemática estatística utilizada nas operações quânticas. O que Popper propôs é que as relações de incerteza fossem entendidas como “relações de dispersão estatística”. (Chibeni, 2005, p. 30)

Seja como for, estando correcta a interpretação ontológica, epistemológica ou estatística, a impossibilidade técnica de medirmos simultaneamente a posição e o *momento* de uma partícula quântica qualquer poderia representar a negação do determinismo causal no escopo da mecânica quântica. Isto ocorre porque se há incerteza acerca de x_i , então não podemos determinar com precisão nem o estado passado de x_i , nem seu estado futuro, bem como não podemos determinar de modo inequívoco um encadeamento causal entre os diferentes estados de x_i em diferentes momentos do tempo. Se não podemos determinar estes eventos porque a natureza é indeterminável em si, ou porque nosso entendimento é limitado, não muda em nada o facto de que uma descrição determinista de x_i permaneceria impossível.

O princípio da incerteza de Werner Heisenberg desabilita o caráter universal do determinismo causal da Física clássica que postulava: (i) a determinação dos estados físicos e (ii) a possibilidade de conhecimento de tais estados. Ou seja: ao determinismo é imposto agora uma espécie de “limite de validade”. Ele é válido quando os sistemas analisados em questão são clássicos, e deixa de ser válido para sistemas quânticos.

Todos os fenômenos quânticos estão submetidos à incerteza. James T. Cushing (1998), em *Philosophical Concepts in Physics*, sustenta que a indeterminação quântica possui, de acordo com a Interpretação de Copenhagen, um *status* ontológico: existe, no nível mais fundamental da natureza, uma indeterminação que não pode ser reduzida ou eliminada [a indeterminação é uma propriedade ontológica do mundo]. Três são as assunções fundamentais da Escola de Copenhagen: (i) nenhuma partícula realiza trajectórias definidas no espaço-tempo, (ii) nenhuma descrição determinística de fenômenos físicos fundamentais é possível (iii) Dentre as leis fundamentais da física devemos incluir a indeterminação quântica. Tal indeterminação é essencial e não eliminável.

Aplicações do Princípio da Incerteza no quotidiano

Por muito tempo, o mundo que conhecemos parecia seguir regras facilmente compreendidas por nossas intuições. E muitas descobertas científicas vieram a partir destas intuições: a gravidade tende a puxar tudo para “baixo” – para o centro da Terra; ao observar um navio desaparecendo no horizonte, ele desaparece por “partes”, sendo a última parte o mastro, e assim pode-se concluir que a Terra não é plana; a água é indispensável à vida na Terra; e assim por diante.

Mas isso tudo mudou com a mecânica quântica. Este campo de estudo colocou a intuição humana de cabeça para baixo. Elétrons são, ao mesmo tempo, onda e partícula, e a forma como se comportam

muda apenas pela observação; partículas são “entrelaçadas” de tal forma que podem se comunicar quase que instantaneamente a distâncias absurdas; isso só para citar alguns exemplos.

Neste texto, não pretendo entrar no mérito de explicar a Física quântica, coisa que já foi feita várias vezes na sala de aula.

O que quero mesmo fazer é aludir a uma frase que Dias, C.M. (2020) usa com frequência, e que é muitíssimo adequada: “a ciência não é democrática. Por exemplo, o facto da gravidade ou da electricidade funcionarem, não depende da quantidade de pessoas que acreditam nisso”.

Esta frase é adequadíssima por que ela aponta para uma característica fundamental da ciência: A capacidade de traduzir modelos científicos em aplicações no mundo real. Graças ao nosso conhecimento da gravidade, movimento e aceleração somos capazes de sair do nosso planeta e voar todos os dias em vôos comerciais de um continente a outro. Graças ao nosso conhecimento sobre energia, somos capazes de colectar eletricidade do sol, do movimento e da fissão de átomos.

Tudo isso tem aplicação prática no dia-a-dia. Sem estas descobertas, você provavelmente não estaria lendo este texto num computador, que funciona a electricidade, nem faria aquelas tão desejadas férias em Angola ou em Japão, (algumas que inclusive se consideram cépticos), principalmente pela ignorância em relação a como a ciência funciona, possuem sentimentos confusos em relação a mecânica quântica, o que muitas vezes os levam a acreditar em vigarices pseudocientíficas e documentários todos como “Quem Somos Nós?”. Um dos motivos que consegui perceber é a crença de que a física quântica não é uma teoria “comprovada” (sim, lá vamos nós de novo), por que não tem aplicação no mundo real. Acham que, por que este campo de estudo trata do muito pequeno, que não há um impacto relevante na vida dos cidadãos.

Estas pessoas, é claro, não poderiam estar mais enganadas. As aplicações da teoria quântica no cotidiano não são novas, e graça à ela fomos capazes de aperfeiçoar e inovar em diversas tecnologias que usamos hoje.

Já ouviu falar do princípio da Incerteza de Heisenberg? Nele, se estabelece que, a nível quântico, não podemos determinar com precisão e simultaneamente a posição e o momento de uma partícula. Aproveitando-se dessa imprevisibilidade, os cientistas criam o equivalente a um “dado quântico” gerando algo chamado “ruído quântico” através de flutuações no vácuo. Medindo os níveis aleatórios de ruído produzido, os pesquisadores podem desenvolver números realmente aleatórios.

Incerteza em Tempo de Pandemia Covid-19

Confrontada com uma nova doença causada por um agente viral, desconhecido até dezembro de 2019, a resposta da comunidade médica e de outros profissionais que trabalham na área da saúde foi dada, simultaneamente, em duas vertentes de acção: a abordagem clínica, em que o alvo principal de atenção é o indivíduo, e a abordagem de saúde pública, em que esse foco é a população ou seus sub-grupos.

A constatação de um surto de casos com um ponto de potencial infecção comum num mercado na cidade de Wuhan, na China, e as características clínicas comuns foi crucial para identificar o surto e definir as características clínicas e laboratoriais da nova doença. Esta informação foi indispensável para a gestão clínica individual, mas, também, para a contagem de novos casos incidentes na comunidade permitindo identificar outros surtos de casos e investigar as suas cadeias de transmissão, sem o que o controlo da disseminação comunitária não teria sido possível. A rápida evolução da epidemia em Wuhan e na China, com o impacto nos serviços de saúde e o confinamento de várias cidades foi seguida de forma dramática a nível global. Até 20 de Janeiro a doença tinha já sido exportada para vários países asiáticos, e em 24 de Janeiro é registado o primeiro caso em França, em 28 de Janeiro na Alemanha, e em 22 de Fevereiro na região italiana da Lombardia (Jorge, R., 2020¹).

A necessária avaliação desta fase identificará, possivelmente, a rapidez e qualidade da resposta das estruturas, serviços e unidades de Saúde Pública, das estruturas e serviços hospitalares e das unidades de saúde primários do Serviço Nacional de Saúde, como determinantes para a actual situação epidemiológica, associadas, certamente, a um cumprimento reconhecidamente exemplar do Plano de

¹ Comunicação do Dr. Jorge Ricardo do Departamento de epidemiologia do Instituto Nacional de Saúde., Março-Abril de 2020.

Resposta coordenado pela Direcção-Geral da Saúde. Mas ficará também como exemplar adoção pronta das medidas pela população angolana como o confinamento, o estado de emergência.

O controlo de surtos, epidemias e pandemias segue princípios conhecidos há décadas pelos especialistas em Saúde Pública e epidemiologia, constantemente actualizados a novas realidades e modernos instrumentos. A vigilância epidemiológica, área de aplicação particular da abordagem epidemiológica a problemas de Saúde Pública, convive, muitas vezes, com diagnósticos e intervenções baseadas em dados incompletos e com qualidade imperfeita. O rigor da investigação de um surto, ou pandemia, não é geralmente compaginável com a necessidade de respostas para a contenção rápida da incidência de casos. É neste contexto que os métodos de vigilância e a investigação epidemiológica durante surtos ou epidemias revelam vantagens benefícios mais relevantes.

Quando são necessárias respostas rápidas com base em informação que se exige rigorosa, para que as intervenções possam ser atempadas, efetivas e implementadas de acordo com a realidade atual, é necessário ter consciência, mesmo numa época de rápida digitalização, informação e comunicação, que os dados disponíveis podem ser incompletos, por exemplo que os dados relativos que estamos a receber em determinado momento do tempo correspondem a quem foi infetado e, ou, adoeceu há dias ou mesmo semanas atrás.

Por outro lado, quem recolhe, valida e analisa os dados deve estar consciente que nos serviços curativos, hospitalares e centros de saúde, a prioridade é o tratamento dos doentes e não o registo de dados, rigorosos e completos, por vezes em várias bases de dados em simultâneo, para além das necessidades da gestão clínica. Todos estes fatores conjugados devem levar obrigatoriamente quem tem a responsabilidade em produzir informação e conhecimento para a decisão a procurar soluções metodológicas que permitam extraer a melhor evidência científica dos dados para uma decisão que se pretende a mais informada e mais atempada possível. Esta é uma combinação difícil de atingir em simultâneo, colher dados de elevada qualidade e completos demora o seu tempo, fator que se exige o mais curto possível para que a análise dos dados e a informação produzida se apresente aos decisores em tempo útil.

É neste contexto que surge a necessidade de aperfeiçoar os dados com base no conhecimento que eles contêm para além da simples contagem dos casos. Por exemplo, para conhecer a transmissibilidade da infecção através dos seus números de reprodução (básico - R_0 ou efectivo - R_t), o tempo de duplicação da infecção, o tempo de geração da infecção, é necessário conhecer a frequência de casos novos por data de início de sintomas, um dos passos críticos numa investigação epidemiológica. Para todos estes parâmetros é essencial uma informação: a data do dia, ou o intervalo de dias, em que cada indivíduo desenvolveu os primeiros sintomas e, caso o indivíduo não apresente sintomas, a data do dia em que esteve em contacto com um caso provável ou confirmado da infecção.

Pode ser uma surpresa para alguns, mas, durante a investigação epidemiológica de um surto, a data do início de sintomas pode estar omisa em quase metade dos casos registados. Este problema coloca-nos perante um dilema: ou optar por usar uma outra das datas disponíveis no registo, como a data do diagnóstico laboratorial, ou a data da notificação do caso, em substituição da data de início dos sintomas, ou recorrer a métodos estatísticos para estimar, para cada caso nesta circunstância, a data mais provável em que os sintomas terão tido início.

Se a data de início dos sintomas é o momento do tempo mais próximo da data de infecção, a diferença entre estes dois momentos é o tempo de incubação da doença, ou seja um processo biológico, que pode depender das características de cada indivíduo, mas que pouco dependerá de fatores logísticos e organizacionais que são os principais determinantes do tempo que vai desde o início dos sintomas até ao diagnóstico ou até à notificação, e que muito provavelmente poderão depender também do momento da epidemia.

Atualmente, a comunidade científica das áreas da epidemiologia e estatística tem desenvolvido várias técnicas de imputação e de *nowcasting* que permitem estimar informação omisa e “prever” o presente, ou seja, estimar os casos de infecção ou doença já ocorridos, mas que no momento da análise ainda não foram diagnosticados ou notificados no sistema de informação, designadamente informático.

No caso da COVID-19, o tempo entre a data do início dos sintomas e a data do diagnóstico tem sido reportado em vários países como sendo da ordem dos 5 a 6 dias, e o tempo médio até à notificação como indo até 8 dias, chegando a ser necessário passarem 15 dias para ter registados 95% dos casos ocorridos num determinado dia. Estes factos significam que as últimas duas semanas da curva epidémica estão incompletas, e que número de casos já ocorridos, mas ainda não conhecidos precisa de ser estimado para que a tomada de decisão seja realizada com base no passado mais recente, ou seja quase em tempo real.

Na França, tal como outros países, como a China, o Japão, a Alemanha até mesmo a Angola, estes procedimentos analíticos (imputação e *nowcasting*) tem sido implementado para estimar a curva epidémica da Covid-19 corrigida e respetivos parâmetros de transmissibilidade desde o início da emergência, um desafio único e nunca antes experienciado pelas equipas de epidemiologistas durante tantos meses.

Conseguir descrever daqui a uns meses aquilo que sabíamos agora e como estes procedimentos analíticos contribuíram para nos aproximar de uma realidade que apenas é parcialmente conhecida no momento em que está a acontecer, irá sem dúvida melhorar a nossa capacidade de preparação, análise e resposta em tempo real. Mas o primeiro passo essencial para obter este conhecimento é estar consciente que, em tempo real, não conhecemos com detalhe nem o presente nem o passado recente durante uma epidemia.

Um “known unknown” impele-nos a procurar respostas e a estimar o desconhecido com base em padrões do passado, mas um “unknown unknown” ou seja desconhecer que desconhecemos, poderá levar-nos a tomar decisões com níveis de confiança que não existem. Durante uma epidemia a decisão tem obrigatoriamente de ser tomada com consciência da incerteza que está presente na informação e conhecimento, e que se deve procurar medir, mas a incerteza ou o desconhecimento nunca devem ser assumidos como inexistentes.

Incerteza ambiental numa certa Organização

A incerteza e o risco nunca estiveram propriamente separados. A incerteza tem particularidades subjectivas, o que está intrinsecamente ligado a processos intuitivos, nos quais o tomador de decisão acaba se baseando em julgamentos próprios e em experiências vivenciadas (Knight, 1921).

Luce e Raiffa (1957) definem a incerteza como uma condição em que não se sabe quais são as chances de determinado resultado se concretizar, visão oposta às situações de risco, nas quais os possíveis efeitos podem ser mensurados e geridos. Power (2007), por sua vez, considera que a incerteza é transformada em risco quando se torna um objetivo de gestão, mesmo que o grau de informação sobre sua probabilidade de ocorrência seja baixo. Assim, em razão das condições de incerteza, a literatura tem destacado que as organizações devem se adaptar continuamente ao seu ambiente. (Dill, 1958, Duncan, 1972, Lawrence e Lorsch, 1967, Miller, 1992, Miller, 1993, Milliken, 1987, Milliken, 1990)

Para Duncan (1972), o ambiente organizacional pode ser descrito como a totalidade dos factores físicos e sociais que envolvem o comportamento e a tomada de decisão dos indivíduos em uma organização. Dessa forma, o ambiente interno é composto dos factores físicos e sociais relevantes dentro dos limites da organização e o ambiente externo é composto dos fatores além desses limites.

Duncan (opcit) assegura que o ambiente interno é formado pelos componentes: pessoal, funcionalidade organizacional e unidades de equipa e nível organizacional. Já o ambiente externo constitui-se dos componentes: clientes, fornecedores, concorrentes, sociopolítico e tecnológico.

Assim, a falta de informação por parte dos gestores sobre esses fatores ambientais, associada às decisões tomadas em determinadas circunstâncias, dificulta a compreensão dos ambientes organizacionais pelos tomadores de decisão. (Duncan, ibid.)

No entanto, Milliken (1987) destaca que ocorre uma inadequação conceitual na literatura relacionada à incerteza ambiental, relata que autores como Lawrence e Lorsch (1967), Duncan (1972), Downey e Slocum (1975) e Hubber, O'Connel e Cummings (1975), que objectivaram mensurar os aspectos da incerteza ambiental, a fim de ampliar a compreensão sobre o tema, têm entendimentos distintos sobre a natureza das incertezas. Uma das causas de imprecisão na definição do termo incerteza ambiental, segundo Milliken (1987), é o facto de a expressão ser usada tanto para relatar o estado de incerteza em

ambientes organizacionais quanto para descrever o estado de incerteza de um indivíduo que constata a insuficiência de informações críticas a respeito do ambiente.

Para Milliken (1987), a incerteza se inicia na incapacidade do indivíduo de fazer previsões sobre circunstâncias inerentes ao ambiente organizacional. Assim, propôs um aprimoramento nas mensurações feitas e definiu três categorias de incerteza ambiental, cada qual com suas respectivas peculiaridades: incertezas de estado, incertezas de efeito e incertezas de resposta. A Incerteza de Estado representa basicamente a incapacidade de prever a forma como os componentes do ambiente estão mudando. A Incerteza de Efeito descreve a incapacidade de prever como alterações no ambiente vão influenciar a entidade. A Incerteza de Resposta caracteriza-se pela falta de visão sobre as opções de resposta, dado um ambiente em constante mudança, ou ainda, a incapacidade de prever as prováveis consequências de uma tomada de decisão. (Milliken, 1987, Milliken, 1990)

As categorias propostas por Milliken (1987) implicam uma distinção conceitual entre os tipos de incerteza em função de sua natureza. Cada categoria representa diferentes características da falta de informação; dessa forma, cada tipo de incerteza pode ter diferentes implicações, bem como produzir comportamentos distintos em cada indivíduo tomador de decisão (Doty et al., 2006, Gerloff et al., 1991, Milliken, 1990).

Gerloff, Muir e Bodensteiner (1991) objectivaram analisar a incerteza ambiental percebida por gestores de projetos em seu processo de tomada de decisão. As percepções foram analisadas dentro das três categorias idealizadas por Milliken (1987), a partir dos factores de Duncan (1972). Os resultados indicaram problemas em vários itens em razão da baixa confiabilidade do Alfa de Cronbach, para a escala de incerteza de efeito. Segundo os autores acima referidos, os gestores respondem ao ambiente sequencialmente, primeiro com relação à incerteza de estado, em seguida, preocupam-se com os efeitos da incerteza e com a forma pela qual essa afecta a organização, para então atentar para as incertezas de resposta. No entanto, eles assumem que a percepção da incerteza não necessariamente se inicia a partir da incerteza de estado, visto que os gestores podem não perceber tais incertezas até evidenciarem incertezas de efeito.

Muitos pensadores como Knight (1921) e Heisenberg (1927) já se debruçaram sobre tal conceito. W. Heisenberg, físico teórico alemão, formulou quantitativamente o *princípio da incerteza* segundo o qual é impossível fazer a observação com total acurácia da posição de uma partícula subatômica e, simultaneamente, determinar a sua velocidade. Nas ciências físicas, o princípio da incerteza ganhou amplitude, deu um novo sentido ao comportamento dual da matéria (a chamada dualidade onda-partícula) e contribuiu para o entendimento do mundo quântico moderno.

No que tange às ciências econômicas e políticas, a incerteza não tem sido profunda e adequadamente explorada enquanto conceito quantitativo. Com efeito, quase não há documentos científicos, tão pouco registros ou debates entre pensadores e pesquisadores, dessas áreas do conhecimento na referida temática.

Não obstante, o princípio da incerteza parece apresentar-se naturalmente aderente a problemas de natureza econômica. Seria possível, por exemplo, uma empresa determinar a quantidade vendida e, simultaneamente, o preço de venda de um bem ou serviço? De fato, as empresas ou fixam um determinado preço e se empenham em vender a maior quantidade possível, ou determinam uma quantidade a ser produzida e buscam vendê-la ao preço que for possível. Como as incertezas no mercado estão quase sempre presentes, empresas industriais preferem escolher a quantidade, deixando o preço como variável de ajuste, se necessário, evitando o oposto.

Na medida em que a ameaça da Covid-19 se materializa, faz-se presente um debate, nem sempre intelectualmente livre da contaminação ideológica, de interesses econômicos espúrios e de interesses políticos (muitas vezes pouco republicanos), que envolve, notadamente, uma grande incerteza quanto às melhores ações a serem tomadas bem como quanto aos seus desdobramentos.

No caso em tela, a incerteza emerge porque, no momento da decisão, a informação corrente pode não ser suficiente para induzir os agentes a tomá-la da maneira mais correta ou apropriada ou, ainda, ética. Isso outorga à incerteza um papel fundamental na decisão dos agentes políticos e econômicos e no comportamento da dinâmica das variáveis de interesse (número de infectados, número de mortos,

disponibilidade de leitos hospitalares, impacto na renda das famílias, perda ou preservação de empregos, impactos políticos/eleitorais, entre outros).

Para além das questões puramente filosóficas parece, portanto, razoável refletir a respeito da conveniência e/ou da necessidade de um entendimento mais amplo e de um efectivo uso de ferramentas quantitativas para nortear estratégias e planos de ação que permitam tomadas de decisões mais certeiras. Nesse sentido, é notório que a matemática avançada e os métodos quantitativos têm contribuído de forma substantiva, por exemplo, para a tomada de decisões econômicas mais precisas, permitindo que se alcancem efeitos desejados sobre o desempenho de empresas e de países.

Em uma dimensão mais abrangente, quando incertezas de ordem econômica e política se fazem presentes e, de alguma maneira, misturam-se, tal como ocorre na atual pandemia, urge que as melhores e mais precisas decisões sejam tomadas. Para avançar com elas na direção mais apropriada, devemos nos prover não só do conhecimento das mais consolidadas e modernas ferramentas matemáticas, mas também dos conceitos e princípios (tal como o da incerteza) dos quais já dispomos, adaptá-los a essa nova finalidade com vistas a mitigar os efeitos danosos e muitas vezes traumáticos que são deixados na esteira de crises profundas. Para tal, antes, devemos nos desprover de qualquer medo ou preconceito quanto ao uso desses poderosos instrumentos.

CONCLUSÕES

A situação que vive atualmente o mundo desde as vésperas do ano de 2019 até hoje nos levou a vivenciar umas das pessimas tragédias da humanidade depois da segunda Guerra mundial. E a teoria da incerteza de estados de Heisenberg é propícia para servir de ferramenta à Modelos de Decisão. Previsões foram desmentidas com a pandemia da Covid-19, sistemas de saúde pública mostraram-se ultrapassados e desatualizados, levando a opções decisionais inadequadas ou inadaptadas. Perante a incerteza das respostas, caracterizada pela falta de informações e de visão sobre as opções de resposta, a Teoria da Incerteza de Heisenberg torna-se oportuno para relatar o estado de incerteza em ambientes organizacionais quanto para descrever o estado de indeterminação de um indivíduo que constata a insuficiência de informações críticas a respeito do ambiente. O que adequa, portanto, a dita teoria no âmbito de ferramenta de apoio à decisão para gestores e tomadores de decisões. Nesse sentido, o presente estudo mostrou como a matemática avançada e os métodos quantitativos têm contribuído de forma substantiva, por exemplo, para a tomada de decisões econômicas mais precisas, permitindo que se alcancem efeitos desejados sobre o desempenho de empresas e de países.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beller, M. (1996): The Rethoric of Antirealism and the Copenhagen Spirit. *Philosophy of Science*, 63, p.p.183-204.
- Borh, N. (1995): *Física atômica e conhecimento humano: ensaios 1932-1957*. Trad. Vera Ribeiro. Rio de Janeiro: Contraponto.
- Borh, N., Anger, M., Schrödinger E.; Heisenberg W. (2006): Problemas da Física Moderna. Trad. Gita, K. Guinsburg. São Paulo: Perspectiva.
- Caruso, F. e Oguri, V. (2006): Física Moderna: Origens clássicas e fundamentos quânticos. Rio de Janeiro: Editora Campus.
- Chibeni, S. (2005): Certezas e incertezas sobre as relações de Heisenberg). *Rev. Bras. Ensino Fís.* vol.27 no.2 São Paulo Apr./June.
- Clark, G. (1997): Reassessing resource allocation strategies in higher education: methods of analysis. *International Journal of Education Management* (1997)
- Cushing, J. (1998): Philosophical concepts in Physics. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dill (1958): Environment as na influence on managerial autonomy.
- Doty & al. (2006): Divergence between informant and archival measures of the environment: real differences artifact or perceptual error.

- Downey, K. H. e Slocum (1975): Uncertainty: measure, research and sources of variation. *The Academy of Management Journal*.
- Duncan, R. B. (1972): Characteristics of organizational environment and perceived environmental uncertainty. *Administrative Science Quarterly*.
- Gerloff & al. (1991): Three componentes of perceived environment uncertainty: na exploratory analysis of the effects of aggregation. *Journal of management*.
- Grace, I. M. e Moreira, M. A (2001): Uma proposta para o ensino de Mecânica Quântica. *Revista Bras. Ensino Físico*, Vol. 23. Nº 4 Brasil.
- Greca, I. M.; M0reira, M. A. e Herscovitz, V. E. (2001): Uma proposta para o ensino de mecânica quântica). *Rev. Bras. Ensino Fís.*, vol.23, n.4, pp. 444-457.
- Hawking, S. (2001): *O Universo numa casca de noz*. Trad. Ivo Korytowski. São Paulo: Arx.
- Hawking, S. e Mlodinow, L. (2011): *O Grande projeto*. Trad. Mônica Gagliotti Fortunato Scientiarum Historia VII . 2014 . ISSN 2176-1248 Friaça. Rio de Janeiro: Nova Fronteira.
- Hebber & al. (1975): Perceived environment uncertainty: effects of information and structure. *The Academy of Management Journal*.
- Heisenberg, W. (1981): A imagem da Natureza na Física Moderna. Lisboa: livros do Brasil.
- Knight, F. H. (1921): Risk uncertainty and profit. Beard Books, Whashington, DC.
- Lawrence, P. e Lorsch, J. (1967): Organization and environment: Managing differentia in and integration. Harvard University Press, Boston, MA.
- Luce, L. e Raiffa, H. (1967): Games and Decisions: Introduction and critical survey. Willey, New York.
- Marco, C. e Marta, M. (2013): Mecânica Quântica. Vol 1 Ed. IST Press, Lisboa.
- Martins, G. e Theophilo, C. (2009): Metodologia da Investigação Científica paa ciências sociais. São Paulo: Atlas, 2^a ed. (2009).
- Miller, K. D. (1992): A framework for integrated risk management in international business. *JOURNAL of International Business Studies*.
- _____. (1993): Industry and country effect on managers perceptions of environment uncertainty. *Journey of International Business Studies*.
- Milliken, F. I. (1990): Three types of perceived uncertainty about the environment: state, effect and response uncertainty. *Academy of Management Review* (1987).
- _____. (1990): Perceiving and interpreting environment change: na examination of college administrator's interpretation of changing demographics. *Academy of Management*.
- Popper, K. (2000): Conjecturas e refutações. Coimbra: Almedina.
- _____. (2004): A Lógica da pesquisa científica. Trad. Leonidas Hegenberg e Octannys Silveira da Costa. São Paulo: Cultrix.
- _____. (2007): Pós-escritos à Lógica da descoberta científica. Vol.3. A Teoria quântica e o cisma na Física. Lisboa: Dom Quixote.
- Power, M. (2007): Organized uncertainty: designing a world of risk management. Oxford University Press, New York.
- Simons, R. (1995): Levers of control: How managers use innovative control systems to drive strategic renewal. Harvard Business Press, Boston, M.A (1995)
- _____. (2000): Performance measurement and control systems for implementing strategy: Text and cases. Prentice Hall, New Jersey, USA.

Síntese curricular dos autores

MSc. Daniel Nguedi Dilamonhi: Mestre em Ciências, Orientação: Física Teórica pela UAA, foi coordenador de Curso de Engenharia Electromecânica de 2009 a 2012 na Escola Superior Politécnica de Lunda Sul. Leciona várias cadeiras de Física nos cursos de Engenharia e a Pesquisa Operacional no curso de Matemática na mesma instituição.