

Sobre o conceito de incerteza em Física e na Metrologia

Álvaro Silva Ribeiro

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

1. Introdução e Enquadramento Histórico

A adoção do termo "incerteza" como a forma de expressar a inexatidão associada ao processo de medição tem sido objeto de discussão no meio científico quer pela sua definição comum quer pela diversidade de aplicações que tem tido nos mais variados domínios, nomeadamente, nos científicos.

A definição do termo "incerteza" num contexto linguístico comum é a seguinte¹:

Nome feminino

- i. falta de certeza, dúvida;*
- ii. estado de espírito caracterizado pela dúvida e pela indecisão; irresolução; perplexidade;*
- iii. situação possível mas que não se sabe se vai ocorrer; contingência;*
- iv. situação cuja resolução é imprevisível, incógnita.*

A interpretação do termo "incerteza" no modo colquial traduz enquadramentos distintos, em regra subjetivos, apontando para uma condição, comportamento ou característica cuja interpretação se associa a algo indesejável, justificando a impressão negativa que o termo frequentemente induz.

Num caminho distinto, pode-se afirmar que o desenvolvimento da Ciência foi construído ao longo dos tempos com o intuito de que o conceito de causalidade seria o suporte da previsibilidade dos fenómenos naturais. Neste contexto surge com alguma naturalidade a corrente de pensamento designada por "Determinismo causal" que se consolidou com a criatividade de Newton (ao estabelecer as três Leis do Determinismo), defendendo o princípio de que os fenómenos naturais observáveis resultam das circunstâncias.

A evolução do pensamento no Século XIX é determinada por dois fatores que alteram significativamente este quadro:

- por um lado, verifica-se um crescente interesse pelo estudo da Estatística e pela Teoria das Probabilidades, com inúmeras aplicações desde o cálculo atuarial, às teorias dos jogos e a métodos numéricos;
- por outro lado, o desenvolvimento científico e tecnológico que se encontra no Século XIX levou a que se procurassem entender os fenómenos não apenas na sua perspetiva macroscópica, onde as Teorias estabelecidas conseguiam apresentar respostas plausíveis (por exemplo, no contexto da Mecânica Clássica) mas, também, numa perspetiva microscópica (onde a mesma abordagem não produzia resultados tão satisfatórios).

¹ Fonte: Porto Editora.

Estes são alguns dos argumentos que podem justificar a evolução ocorrida em diferentes domínios e em diferentes momentos. Nos primórdios dessa revisão das ideias encontramos figuras como a de Maxwell que, em 1873, partindo das premissas mecânicas, desenvolve um conjunto de equações fundamentais da teoria electromagnética de alguma forma divergentes dos fundamentos da mecânica newtoniana, Clausius que introduz uma primeira descrição matemática do conceito de entropia e Boltzmann, que desenvolve a definição estatística da entropia pela análise do comportamento estatístico dos componentes microscópicos de um sistema termodinâmico, ambos contribuindo para a evolução do estudo da Termodinâmica no seu percurso de associação à Estatística. Neste domínio o conceito de **entropia** será entendido como uma medida da **incerteza** associada aos estados microscópicos que permanecem após a avaliação das propriedades macroscópicas.

Esta evolução do pensamento científico torna-se particularmente evidente quando se observa a evolução cronológica do modelo atômico (figuras seguintes):

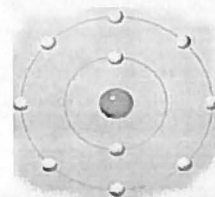
1803 **Modelo atômico de Dalton** – partículas pequenas indivisíveis e indestrutíveis.



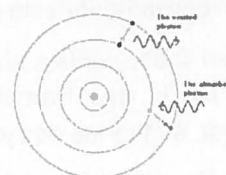
1897 **Modelo atômico de Thomson** – partículas negativas (elétrons) mais pequenas que os átomos. Modelo: esfera com carga elétrica positiva e elétrons dispersos de modo que a carga total fosse nula.



1911 **Modelo atômico de Rutherford** – a maior parte do átomo é espaço vazio, encontrando-se a carga positiva (prótons) concentrada no núcleo (contendo a maior parte da massa). Os elétrons gravitam em torno do núcleo.



1913 **Modelo atômico de Bohr** – Modelo em que os elétrons ocupam níveis de energia. No estado fundamental os elétrons possuem os níveis mais baixos de energia.



1927 - Heisenberg associou distribuições de probabilidade à descrição da localização dos elétrons, conduzindo à ideia de "nuvem eletrônica".

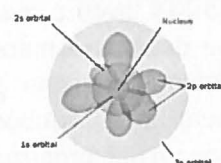


Figura 1 – Evolução do modelo atômico

Encontrando-se também aqui a utilização da **incerteza** no célebre **princípio de Incerteza de Heisenberg** que determina a impossibilidade de se efetuar a medição com exatidão, em simultâneo, da posição e da velocidade de uma partícula atômica. Neste princípio encontrar-se-á, de alguma forma, um argumento válido para a Metrologia (Ciência da Medição) que consiste em considerar que a medição, ao perturbar o fenómeno observado, impossibilita a obtenção de resultados exatos.

Como afirmaria posteriormente Bohr [1], este princípio aplicado num contexto mais vasto da Mecânica Quântica, contrapõe às bases do pensamento determinístico da causalidade, onde se admite que os fenómenos naturais se explicam por uma relação entre a causa e o efeito por uma abordagem estatística e de probabilidades como base para suportar a capacidade de previsão admitindo-se uma margem de incerteza.

Esta revolução no pensamento científico não é pacífica, havendo outros vultos da Ciência, com destaque para Einstein, que a contestaram e se mantiveram fieis à herança newtoniana originando um diferendo entre correntes de pensamento científico distintas que se verifica ainda existir na atualidade.

Duas afirmações ilustram estas duas visões opostas uma defendendo a causalidade² e outra a fundamentação estocástica [2]:

"I will never believe that God plays dice with the universe."

Albert Einstein

"The conception of chance enters in the very first steps of scientific activity in virtue of the fact that no observation is absolutely correct. I think chance is a more fundamental conception than causality; for whether in a concrete case, a cause-effect relation holds or not can only be judged by applying the laws of chance to the observation."

Max Born

A preocupação emergente na década de 40 com a problemática associada à transmissão de mensagens e dos conceitos associados a esse processo, suscitou o desenvolvimento de estudos que tiveram como resultado a introdução dos fundamentos da **Teoria da Informação**, de que Shannon foi precursor.

Nestes estudos, re-emerge a ideia de incerteza como elemento inserido no formalismo teórico de suporte matemático que pretende contribuir para a compreensão dos fenómenos de transmissão de informação por sistemas de comunicações. Shannon (1948) encontra uma interpretação onde esta componente se inclui, associando-a a uma ideia fundamental: *o que é importante numa mensagem que se recebe é a alteração de incerteza que existia antes de receber a mensagem.*

A relação estabelecida entre a informação e a incerteza assume um papel central na explicação, como admitem os autores Peixoto e Rodrigues [3] no texto que se transcreve "... a nossa expectativa sobre a realização de um acontecimento futuro está

² Correspondência trocada entre Albert Einstein e Niels Bohr

associada a um certo grau de incerteza, ou a uma falta de informação . . . O efeito da mensagem depende, portanto, do nosso estado de conhecimento em relação a um dado acontecimento. Logo, o conteúdo de informação recebido é, portanto, dado pelo decréscimo da falta de informação, isto é, pela diferença entre a incerteza que existia antes de receber a mensagem e a incerteza que resta depois de receber a mensagem".

Refira-se que esta associação promovida por Shannon resulta da sua interpretação (por sugestão de von Neumann) de semelhança do conceito com o de "entropia" – "desordem" – com o de "incerteza" – representando a "falta de informação", caracterizando um sistema com elevada entropia como correspondendo a um sistema do qual se possui pouca informação.

No quadro dessa analogia estabelece-se, igualmente, uma lei de conservação aplicada às duas quantidades (*incerteza*, H , e *informação* I), bem como, considerar-se que existem estados de *informação* máxima, I_{\max} , e de *incerteza* máxima, H_{\max} .