

CAPÍTULO 2: O conceito de tempo

O tempo veste um traje diferente para cada papel que desempenha em nosso pensamento
John Wheeler

A proposta deste capítulo é estruturar as zonas de um perfil epistemológico para o conceito de tempo, ou seja, estabelecer as características centrais de cada uma das regiões da “hierarquia de escolas filosóficas” bachelardiana para esse conceito. Essa caracterização é fundamental para que se possa avaliar até que ponto nosso referencial epistemológico permite compreender e interpretar os dados oriundos do contato com os estudantes.

As fontes para tal empreendimento, como discutimos antes, são duas: em primeiro lugar, a história e a filosofia da ciência; em segundo lugar, a literatura da área de pesquisa em ensino de ciências, principalmente no que se refere às concepções dos estudantes sobre o conceito de tempo. Dessa maneira encontra-se dividido o capítulo, que numa terceira seção busca unir essas duas fontes para a caracterização das zonas de nosso futuro perfil.

2.1.) Concepções sobre o tempo, na história e filosofia da ciência

Com um conceito extremamente amplo, complexo, e multidisciplinar por natureza, é preciso ter cuidado: não pretendemos resgatar a evolução histórico-filosófica do conceito de tempo com profundidade, pois, certamente, seria tarefa extensa e fugiria aos nossos propósitos. Tampouco é nosso objetivo discutir o *surgimento* das concepções sobre o tempo em seus contextos históricos, filosóficos e sociais, o que seria fundamental caso fosse esse um trabalho voltado à história da física. Contrapondo-se a uma “história crítica”, optamos simplesmente por apresentar um “apanhado” de visões sobre a temporalidade.

Tomamos então a liberdade – parafraseando Bachelard – de “pegar emprestado” concepções sobre o tempo desvinculadas do contexto (tanto histórico-social como mais propriamente filosófico) em que tiveram origem. Potencialmente isso empobrece as concepções expostas e pode dificultar sua plena compreensão. No entanto, consideramos esse o preço inevitável a pagar, uma vez que, dada a amplitude do tema em questão e o número de pensadores que se debruçaram sobre ele ao longo dos séculos, a outra opção seria escrever uma – impraticável no âmbito dessa proposta de trabalho – retrospectiva histórico-filosófica do conceito de tempo.

Assim sendo, o conteúdo desta seção reflete desde o início *um recorte particular*, que privilegia e enfatiza um conjunto de concepções, entre outros possíveis. Procuramos contemplar, por meio desse recorte, as visões sobre o tempo que consideramos mais representativas e pertinentes para a caracterização das diferentes regiões da hierarquia de doutrinas filosóficas bachelardianas.

Além do aspecto histórico e filosófico, abordaremos ainda as características e propriedades do conceito de tempo nas teorias físicas. Quanto a esse ponto, optamos por deixar de lado certos aspectos da questão temporal, principalmente os pormenores do debate mais atual sobre o conceito de tempo na física, relacionados à mecânica quântica e à cosmologia. Entendemos que essa discussão fugiria daquilo que é necessário a uma compreensão da construção desse conceito por alunos dos níveis de escolaridade que foram objeto desta pesquisa.

Tais esclarecimentos são necessários, para que se contextualize o uso que faremos aqui do material histórico. Partiremos do nosso próprio trabalho de mestrado, onde efetuamos uma revisão histórica das concepções sobre o tempo na física (Martins, 1998); e também de dois trabalhos posteriores voltados à mesma temática (Martins & Zanetic, 2002a e b). Esperamos poder contemplar a diversidade de concepções, tanto no aspecto histórico como filosófico, fornecendo com elas os subsídios de que precisamos para a nossa caracterização.

Antigüidade e Idade Média: algumas importantes visões sobre a temporalidade

Platão (427-347)

A concepção platônica do tempo pode ser encontrada no *Timeu*, obra em que o filósofo grego apresenta sua cosmogonia. Há ali uma contraposição entre aquilo que nunca se transforma e sempre “é”, que pode ser apreendido pela razão e pela inteligência, e as coisas que sempre mudam e nunca “são”, a respeito das quais temos somente um conhecimento temporário e imperfeito: a “opinião”¹. Na primeira categoria estariam Deus e as idéias.

O Deus platônico está, portanto, fora do tempo. É “eterno”, não tendo passado, presente nem futuro. Isso porque, sendo perfeito, Deus não pode mudar. Sua mudança o faria ficar “melhor” ou “pior”. No primeiro caso, ele ainda não seria perfeito, e no segundo ele deixaria de sê-lo (Martins, 1994, p. 58). Mas, ao colocar “ordem” no “caos” (*kosmos* é a palavra grega para ordem), utilizando em sua obra os quatro “elementos fundamentais” (água, terra, fogo e ar), Deus criou o universo e o tempo. Esse último seria uma espécie de “imagem

móbil da eternidade”, fazendo a ligação entre o universo criado – sujeito à mudança – e seu modelo. Vejamos esse trecho do *Timeu*, que nos fala da origem do tempo:

“Ora, quando o Pai que o engendrou compreendeu que se movia e vivia, esse Mundo, imagem nascida dos deuses eternos, rejubilou-se e, em sua alegria, refletiu sobre os meios de torná-lo ainda mais semelhante a seu modelo. E assim como esse modelo resulta ser uma alma imortal, esforçou-se, na medida de seu poder, tornar imortal igualmente a esse todo. Ora, é a substância da alma-modelo que era eterna, como vimos, e essa eternidade, adaptá-la inteiramente a um Mundo engendrado, era impossível. Por isso, seu autor preocupou-se em fabricar uma certa imitação móvel da eternidade, e, organizando todo o Céu, fez, da eternidade una e imóvel, esta imagem eterna que progride segundo a lei dos números, isso a que chamamos o Tempo.” (Platão, 1981, p. 92)

Enquanto o *espaço*, no *Timeu*, é a base de toda a matéria, e uma estrutura que existe por si, o *tempo* seria uma característica da ordem visível das coisas, tendo sido criado junto com o universo e o movimento. Segundo Platão, as próprias revoluções da esfera celeste *produziam* efetivamente o tempo (Whitrow, 1993, pp. 56-57). Um ponto importante e interessante a destacar na visão platônica é a maneira como ele associa a idéia de tempo à idéia de mudança, enquanto a “eternidade” atemporal é caracterizada pela imutabilidade.

Aristóteles (384-322)

Embora bastante influenciada por Platão, a concepção aristotélica do tempo é diferente em muitos aspectos. Para Aristóteles, se tempo e movimento encontram-se intimamente relacionados, não podem ser identificados um com o outro. Não existe tempo se não há movimento (entendido mais amplamente como mudança). No entanto, o movimento pode sofrer variações, cessar, ser uniforme ou não, mas o próprio tempo não varia. Por ser regular e eterno, o movimento da esfera celeste é privilegiado, estabelecendo a medida perfeita desse tempo (mas não *produz* o tempo, como na visão platônica)². Mas se o movimento dos céus “marca” o tempo, este último também marca os demais movimentos, de modo que há uma dependência recíproca:

“Não apenas medimos o movimento pelo tempo, mas também o tempo pelo movimento, porque eles se definem um ao outro. O tempo marca o movimento, visto que é seu número, e o movimento marca o tempo.” (Apud Whitrow, 1993, p. 57)

Para Aristóteles, se nada mudasse (em nossas mentes, por exemplo) não teríamos consciência do tempo. Essa consciência viria justamente pela percepção do “antes” e do “depois” na mudança, daí que ele compreenda o tempo como o número do movimento com relação ao “antes” e “depois”.

Um ponto fundamental da concepção aristotélica é o fato do tempo não existir sem o espírito, responsável por fixar sua medida. Enquanto o movimento pode existir fora da alma, o

“número do movimento” (que é o tempo) só pode existir quando há uma alma que numere, um ser que realize essa numeração (Pietre, 1997, p. 22). Sem o espírito, o tempo (em si) não existiria, mas apenas o movimento (que é seu “substrato”), sem aspecto mensurável. Subjacente a essa visão encontra-se uma característica marcante do *cosmos* aristotélico: o privilégio do espaço, do movimento e da matéria, em relação ao tempo. Esse último ainda aparece como um “coadjuvante” na descrição dos movimentos (Martins & Zanetic, 2002b).

Aristóteles também afirma que o tempo é *contínuo* e *infinito*. É contínuo porque está ocupado por um *movimento* contínuo. E o movimento, por sua vez, é contínuo porque se desenvolve através de um *espaço* contínuo. Dessa forma, a idéia de continuidade relaciona-se com o espaço, com o movimento, e em terceiro lugar, com o tempo. No que diz respeito a esse, podemos distinguir um “antes” e um “depois”, ou seja, dois “agoras” com um intervalo (contínuo) entre eles. Esses dois “agoras” não seriam as menores partes do tempo, segundo Aristóteles, pois o intervalo contínuo entre eles pode ser (potencialmente) dividido ao infinito. Do mesmo modo que não existe uma “linha mínima” (os pontos não seriam as menores partes de uma linha), não existe um “tempo mínimo” (Ross, 1957, p. 133).

O tempo, para Aristóteles, é infinito em dois sentidos: do ponto de vista da adição, pois não pode esgotar-se por nenhuma adição de partes, e do ponto de vista da divisão, ou seja, é divisível *ad infinitum*. Quanto ao primeiro aspecto, não haveria uma existência “simultânea” de todo o “infinito temporal”, uma vez que cada parte desaparece, embora não deixe de haver outras. E, no que se refere ao segundo aspecto, sua divisão infinita é apenas potencial, mas não real, e vincula-se à noção de continuidade discutida acima³.

“O tempo não existe como um todo dado infinito, pois não está na natureza de suas partes coexistir; mas, diferente da extensão, o tempo é potencialmente infinito desde o ponto de vista da adição. O tempo, como a extensão, é infinitamente divisível, mas não infinitamente dividido.” (Ross, 1957, p. 126 – tradução nossa)

Plotino (204-270)

Representante e um dos fundadores do chamado neoplatonismo, nome dado ao ressurgimento das idéias de Platão no início da era cristã, Plotino é considerado o último dos grandes filósofos da Antigüidade. Não era cristão, e em sua filosofia considerava o mundo material um receptáculo para as “formas ideais” impostas pela “alma do mundo” (Whitrow, 1993, p. 77). Essa, por sua vez, seria a responsável pelo constante devir e pelas transformações do mundo que, separado do “Um” – princípio divino de tudo o que existe – insere-se na temporalidade. As contínuas transformações representam a busca do universo

pelo retorno ao eterno, ao “Um”. Estar no tempo é estar afastado deste princípio original, uno e indivisível (Piettre, 1997, pp. 27-28).

Plotino opõe-se à visão aristotélica do tempo como o “número do movimento com relação ao antes e depois”, e também no que se refere à necessidade de um espírito que o meça. Para ele, o tempo mede o movimento no sentido de ser uma medida da *duração* na qual esse movimento ocorre. Nesse sentido, todo movimento acontece *no* tempo. Plotino parece atribuir uma objetividade maior ao tempo, uma realidade para além de sua medida. Diz ele:

“Não é necessário que se o meça para que exista; tudo tem a sua duração, mesmo que essa duração não seja medida” (Apud Piettre, 1997, p. 26).

Para Plotino, cujo pensamento influenciou Santo Agostinho e outros teólogos cristãos posteriores, há três tempos: o presente atual, que na verdade já pertence ao passado, o presente do passado, que se chama memória, e o presente do futuro, apenas imaginado por nossa esperança ou nosso medo (Borges, 1980, p. 95).

Santo Agostinho (354-430)

As considerações sobre o tempo de Santo Agostinho costumam ser bastante lembradas em trabalhos que tratam desse tema. Agostinho foi seguidor da corrente neoplatônica, antes de abraçar o cristianismo em 386. Sua visão sobre o tempo, manifesta principalmente nas obras *A cidade de Deus* e *Confissões*, foi influenciada principalmente por Platão e Plotino.

Em suas *Confissões*, Agostinho discorre longamente sobre o tempo, partindo de uma indagação de natureza religiosa: “o que estaria fazendo Deus antes da criação?”. Sua conclusão – que o aproxima da visão platônica – é que o *próprio tempo* passou a existir no momento da criação, pois não há sentido pensarmos em “antes” onde não havia tempo. A partir disso, Agostinho tenta responder “o que é o tempo?”. Para ele, o passado já não existe, e o futuro ainda não veio. Mas atribuir realidade ao presente também não soluciona a questão, pois ao considerarmos alguns intervalos de tempo (cem anos, um ano, um dia) sempre há, em qualquer divisão que se faça, um passado que já não é, e um futuro que ainda será. O presente, portanto, não tem nenhuma “duração”:

“Se pudermos conceber um espaço de tempo que não seja suscetível de ser subdividido em mais partes, por mais pequeninas que sejam, só a esse podemos chamar tempo presente. Mas este voa tão rapidamente do futuro ao passado, que não tem nenhuma duração. Se a tivesse, dividir-se-ia em passado e futuro. Logo, o tempo presente não tem nenhum espaço.” (Agostinho, 1980, p. 219)

Apesar de o presente não ter duração, Agostinho admite que podemos comparar intervalos de tempo, na música ou na poesia, e dizer, por exemplo, que “uma sílaba tem o

dobro de tempo de outra”. Isso o leva a considerar criticamente a associação aristotélica do tempo com o movimento dos corpos, em geral, e com o dos astros, em particular. Na ausência do movimento astronômico, ainda assim poderíamos avaliar se o movimento de uma roda é mais lento ou mais rápido a cada volta. Além disso, podemos comparar o tempo que um objeto permaneceu parado com o tempo que esteve em movimento. É interessante nesse ponto a justificativa de Agostinho para desvincular o movimento astronômico da passagem do tempo:

“Ninguém me diga, portanto, que o tempo é o movimento dos corpos celestes. Quando, com a oração de Josué, o Sol parou, a fim de ele concluir vitoriosamente o combate, o Sol estava parado, mas o tempo caminhava. Este espaço de tempo foi o suficiente para executar e para pôr termo ao combate.” (Agostinho, 1980, p. 224)

Para ele, a medida do tempo teria como base a atividade da mente, e não o movimento dos astros ou a “alma do mundo” (como para Plotino). Afirma que as lembranças passadas deixam vestígios em nosso espírito, e a memória evoca essas visões *no presente*. Da mesma forma, as visões futuras são prognósticos de coisas presentes que já existem, não existindo *de fato*. O *nosso espírito* mede os tempos, sendo capaz de realizar uma “distensão” em direção ao futuro (pela antecipação) e ao passado (pela memória).

Embora se afaste da associação entre tempo e movimento, Agostinho aproxima-se de Aristóteles ao considerar o espírito humano como senhor da mensuração temporal. E, mesmo que não adote a idéia de “alma do mundo”, aproxima-se também de Plotino ao propor uma nova terminologia, com três “tempos”: presente das coisas passadas, presente das presentes, e presente das futuras.

Um último ponto a ressaltar, mas não menos importante, é o combate que Agostinho faz às doutrinas de “tempo cíclico”, dominantes durante toda a Antigüidade e boa parte da Idade Média. O “tempo linear” é uma característica marcante de nossa herança judaico-cristã, influenciando decisivamente a visão ocidental do tempo⁴.

São Tomás de Aquino (1225-1274)

O teólogo Tomás de Aquino teve um papel fundamental na conciliação da cosmologia aristotélico-ptolomaica com as teses da Igreja, ocorrida durante a Idade Média. Embora levado a abandonar certas concepções aristotélicas (como a idéia de que o universo e o movimento sempre existiram, em flagrante conflito com as escrituras), ele também associa o tempo ao movimento e, seguindo Aristóteles, defende que o “antes” e o “depois” no movimento é que constituem a sucessão temporal. Por outro lado, é com Santo Agostinho que

ele compartilha a noção de que o tempo foi criado *junto* com o universo. O próprio tempo, bem como as coisas nele criadas, tiveram o seu início quando Deus assim o determinou.

A tentativa de conciliação entre um Deus eterno, a criação do mundo e do tempo, e a concepção aristotélica do tempo e do movimento dos astros levou São Tomás a defender a existência de três tipos de tempo: o dos corpos e fenômenos terrestres (uma sucessão com começo e fim definidos), a eternidade atemporal (prerrogativa de Deus apenas), e o tempo dos anjos, dos corpos celestes e das idéias (com início, mas sem fim) (Whitrow, 1993, p. 148).

A fusão do aristotelismo com a visão cristã, no que se refere ao tempo, fica clara nesta passagem do *Compêndio de Teologia* em que São Tomás, após afirmar a existência, a imobilidade e a eternidade de Deus, diz:

“De quanto expusemos até aqui evidencia-se que não há em Deus qualquer sucessão temporal, senão que Deus existe totalmente e simultaneamente. A sucessão temporal ocorre exclusivamente nas coisas que de um modo ou de outro estão sujeitas ao movimento, de vez que são o antes e o depois no movimento que constituem a sucessão temporal. Ora, Deus não está em absoluto sujeito ao movimento (...). Donde se infere que não há n’Ele qualquer sucessão de tempo.” (Tomás de Aquino, 1973, p. 79)

O tempo e o nascimento da ciência moderna

Galileu Galilei (1564-1642)

É bastante conhecido, na história da física, o papel preponderante de Galileu na defesa da teoria heliocêntrica de Copérnico, assim como no estabelecimento de uma *nova teoria do movimento* compatível com ela. O cientista italiano foi decisivo na superação da “física aristotélica”, inaugurando a descrição dos movimentos terrestres a partir das idéias de *relatividade dos movimentos*, movimento *compartilhado* e *composição* de movimentos.

Galileu foi o responsável pelo estabelecimento da lei de queda dos corpos, segundo a qual os incrementos de velocidade de um corpo em queda, próximo à superfície da Terra, são diretamente proporcionais ao tempo transcorrido. Ao compreender essa dependência temporal – e não espacial – da velocidade de queda, ele introduz de modo definitivo o tempo no estudo dos movimentos (Martins & Zanetic, 2001 e 2002b). Vejamos como ele o faz (pela boca de Salviati) nos *Discorsi...*, de 1638:

“Quando, portanto, observo uma pedra que cai de uma certa altura a partir do repouso e que adquire pouco a pouco novos acréscimos de velocidade, por que não posso acreditar que tais acréscimos de velocidade não ocorrem segundo a proporção mais simples e mais óbvia? Se considerarmos atentamente o problema, não encontraremos nenhum acréscimo mais simples que aquele que sempre se repete da mesma maneira. O que entenderemos facilmente, se considerarmos a estrita afinidade existente entre o tempo e o movimento: do mesmo modo, com efeito, que a uniformidade do movimento se define e se concebe com base na igualdade

dos tempos e dos espaços (...), assim também, mediante uma divisão do tempo em partes iguais, podemos perceber que os aumentos de velocidade acontecem com simplicidade; concebemos no espírito que um movimento é uniforme e, do mesmo modo, continuamente acelerado, quando, em tempos iguais quaisquer, adquire aumentos iguais de velocidade.” (Galilei, 1988, p. 160)

O tempo é uma *quantidade mensurável* no estudo dos movimentos. Galileu preocupou-se com esse aspecto, buscando relatar a maneira pela qual media o tempo em suas experiências. Havia uma percepção da importância de uma medição mais precisa do tempo, e seus estudos com o pêndulo refletem tal necessidade (embora ele nunca tenha utilizado o movimento pendular em suas experiências, chegou a projetar um relógio de pêndulo poucos anos antes de sua morte). Nos *Discorsi...*, a derivação da lei $s \propto t^2$, por meio do plano inclinado, é seguida por uma descrição da “clepsidra” usada por ele:

“No que diz respeito à medida do tempo, empregávamos um grande recipiente cheio de água, suspenso no alto, o qual, por um pequeno orifício feito no fundo, deixava cair um fino fio de água, que era recolhido num pequeno copo durante todo o tempo em que a bola descia pela canaletta ou por suas partes. As quantidades de água assim recolhidas eram a cada vez pesadas com uma balança muito precisa, sendo as diferenças e proporções entre os pesos correspondentes às diferenças e proporções entre os tempos; e isto com tal precisão que, como afirmei, estas operações, muitas vezes repetidas, nunca diferiam de maneira significativa.” (Galilei, 1988, p. 176)

Um último ponto que merece destaque é a representação que Galileu faz do tempo, em vários teoremas e proposições dos *Discorsi...*, por meio de um segmento de reta. Em sintonia com essa representação, ele acreditava que o tempo era *contínuo*, com *infinitos instantes*. Mas sua visão afasta-se da de Aristóteles. Enquanto esse último não acreditava que o contínuo pudesse ser composto de indivisíveis, para Galileu uma grandeza contínua seria constituída por uma infinidade de elementos infinitamente pequenos (os “indivisíveis”), ou seja, o *divisível* seria composto por *indivisíveis*⁵.

René Descartes (1596-1650)

A física e a cosmologia de Descartes eram essencialmente qualitativas. Ainda assim, ele foi o responsável pela formulação precisa do princípio da inércia e elaborou também uma teoria bastante complexa para explicar o surgimento e a evolução do universo. Nela, admite um início temporal do mundo, a partir do qual um conjunto de “leis naturais” – determinadas pela vontade divina – explicariam o seu desenvolvimento posterior.

Para Descartes, a permanência do mundo – sua *duração* – depende da vontade de Deus. Essa duração não existe, entretanto, independentemente das coisas que duram. Ele fazia uma distinção entre o *tempo como duração* das coisas que continuam a existir e se conservam

(concreto e real), e o *tempo como número ou medida*, que existe de modo ideal em nosso espírito, independentemente das coisas que duram (Piettre, 1997, p. 92). Essa separação entre o tempo e sua medida também está presente em Newton, mas de modo completamente diferente.

Isaac Newton (1642-1727)

A visão newtoniana do tempo marcou de forma indelével a cultura ocidental. A sua base é a analogia entre o tempo e uma linha reta geométrica. Mas Newton elevou o tempo à categoria de um absoluto, separando-o de sua medida⁶. Ele inicia sua obra mais fundamental, o *Principia...*, com um conjunto de definições (quantidade de matéria, quantidade de movimento, força centrípeta etc.), nas quais o tempo já aparece. No escólio da primeira parte, Newton afirma não haver definido certas grandezas (entre elas o tempo) por serem bem conhecidas de todos, mas acrescenta:

“Contudo, observo que o leigo não concebe essas quantidades sob outras noções exceto a partir das relações que elas guardam com os objetos perceptíveis. Daí surgem certos preconceitos, para a remoção dos quais será conveniente distingui-las entre absolutas e relativas, verdadeiras e aparentes, matemáticas e comuns.

I - O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e da sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com qualquer coisa externa e é também chamado de duração; o tempo relativo, aparente e comum é alguma medida de duração perceptível e externa (seja ela exata ou não uniforme) que é obtida através do movimento e que é normalmente usada no lugar do tempo verdadeiro, tal como uma hora, um dia, um mês, um ano.” (Newton, 1990, p. 7)

O tempo absoluto “flui” por “direito próprio”, desvinculado de qualquer outra coisa, enquanto que o tempo relativo é uma *medida* do primeiro. Diferentemente de Descartes, Newton atribui uma realidade ontológica ao tempo absoluto (a que chama de duração), uma realidade que independe dos corpos. Ele reforça e esclarece sua posição nesta outra passagem:

“Tempo absoluto, em astronomia, é distinguido do tempo relativo, pela equação ou correção do tempo aparente. Porque os dias naturais são de fato desiguais, apesar de serem comumente considerados como iguais e usados como uma medida de tempo; os astrônomos corrigem essa desigualdade, para que possam medir os movimentos celestes por um tempo mais rigoroso. Pode ser que não haja algo como movimento uniforme, onde o tempo possa ser rigorosamente medido. Todos os movimentos podem ser acelerados e retardados, mas o fluxo de tempo absoluto não é passível de mudanças. A duração ou perseverança da existência das coisas permanece a mesma, sejam os movimentos rápidos ou lentos, ou até completamente nulos. E, portanto, essa duração deve ser distinguida daquelas que são apenas suas medidas perceptíveis, a partir das quais aquela é deduzida através da equação astronômica.” (Newton, 1990, pp. 8-9)

Para Newton, tempo e espaço são os sentidos de Deus. Se o espaço absoluto é o “sensório de Deus”, conforme descrito na questão 31 do *Opticks*, é a intervenção de Deus na natureza que permite o ajuste de seu funcionamento, como um relojoeiro que dá corda em seu

relógio (segundo Rodrigues (1988), Newton relacionava o dt – infinitésimo de tempo do cálculo diferencial e integral – com a ação de Deus no universo. Já O'Connor & Robertson (2002) afirmam que o cálculo, que para ele era a “teoria dos fluxões”, relacionava o movimento ao *fluxo* universal do tempo). Assim, o tempo absoluto passa a ser conseqüência do atributo divino da *eternidade*⁷.

As características mais formais do tempo, na mecânica newtoniana, não contemplam todos esses aspectos da concepção original de Newton. Elas serão analisadas mais adiante.

Críticos do tempo absoluto newtoniano

Gottfried W. Leibniz (1646-1716)

Contemporâneo de Newton, Leibniz acreditava que o tempo não poderia existir sem os fenômenos. É a “ordem sucessiva das coisas” que nos dá a noção de tempo, sendo ele, pois, relativo. Ele é uma ordem que relaciona os corpos em suas posições sucessivas, possuindo um valor lógico, mas não ontológico. Se não houvesse fenômenos nem criaturas, não haveria tempo.

Para Leibniz, o tempo é algo “ideal”, constituindo-se a partir de relações, o que não o impede de ser dotado de “quantidade”. Vejamos dois trechos de sua longa correspondência com Samuel Clarke (1675-1729), discípulo de Newton. Neles, Leibniz explicita sua visão de tempo:

“4. Quanto a mim, deixei assentado mais de uma vez que, a meu ver, o espaço é algo puramente relativo, como o tempo; a saber, na ordem das coexistências, como o tempo na ordem das sucessões.” (Leibniz, 1983, p. 177 – terceira carta)

“55. Quanto à questão de saber se Deus podia criar o mundo mais cedo, é preciso entender bem os termos. Como demonstrei que o tempo sem as coisas não passa de uma simples possibilidade ideal, é manifesto que, se alguém dissesse que esse mesmo mundo que foi criado efetivamente teria podido, sem nenhuma outra mudança, ter sido criado mais cedo, não diria nada de inteligível, pois não há nenhum sinal ou diferença pela qual seria possível conhecer que ele tivesse sido criado mais cedo. Assim, como já deixei dito, supor que Deus tenha criado o mesmo mundo mais cedo é supor algo de quimérico. É fazer do tempo uma coisa absoluta, independente de Deus, ao passo que o tempo deve coexistir com as criaturas, e não se concebe senão pela ordem e quantidade de suas mudanças.” (p. 205 – quinta carta)

Em sua crítica aos conceitos newtonianos, Leibniz usa ainda outro argumento: se duas coisas são idênticas em tudo, então elas são uma mesma coisa. Como o espaço absoluto é idêntico em todos os lugares, e o tempo absoluto é idêntico em todos os instantes (por suas próprias definições), quaisquer dois lugares são na verdade um único e mesmo espaço, assim como quaisquer dois instantes são um único e mesmo tempo (O'Connor & Robertson, 2002).

Ernst Mach (1838-1916)

As idéias de Leibniz têm muito em comum com a concepção desenvolvida quase dois séculos depois por Mach, no que diz respeito às críticas ao espaço e ao tempo absolutos de Newton.

Mach, em seu tratado sobre o desenvolvimento histórico da mecânica, defende que a própria idéia de tempo é uma *abstração*, a que chegamos pela variação das coisas. Seria equivocado, por exemplo, pensarmos que o movimento de um pêndulo ocorre *no tempo*. O que fazemos é comparar as sucessivas posições do pêndulo com outros pontos (na superfície da Terra, por exemplo). Mesmo sem esses pontos, poderíamos fazer a comparação com nossos pensamentos e sensações, que seriam diferentes. Da mesma maneira, um movimento só é uniforme quando comparado a outro movimento, também uniforme:

“A questão de que um movimento seja uniforme em si não tem nenhum sentido. Muito menos podemos falar de um “tempo absoluto” (independente de toda variação). Este tempo absoluto não pode ser medido por nenhum movimento, não tem pois nenhum valor prático nem científico; ninguém está autorizado a dizer que sabe algo dele; não é senão um ocioso conceito “metafísico”.” (Mach, 1949, p. 190 – tradução nossa)

Afirma, mais adiante, que a nossa representação do tempo surge a partir de uma correspondência entre o conteúdo de nossa percepção e o conteúdo de nossa memória.

Ao negar a possibilidade de um tempo absoluto, considerando-o como um conceito metafísico, Mach aproxima-se de Leibniz, por um lado, e de Einstein – a quem influenciou – por outro⁸. Veremos ainda nessa seção as características do tempo relativístico.

Breves comentários acerca de algumas posições filosóficas sobre a temporalidade

Espinosa (1632-1677)

Na concepção de Espinosa, a distinção entre passado e futuro não existe para a razão, mas apenas para a imaginação. É próprio da razão perceber a ordem eterna e necessária da natureza, “perceber as coisas como tendo algo de eternidade” (Apud Piettre, 1997, p. 53). A natureza, ao manifestar essa ordem necessária e não contingente, confunde-se com Deus.

Nosso conhecimento insuficiente não nos permite conhecer a intrincada complexidade de causas e efeitos dos fenômenos. Devemos isso à nossa inteligência finita, mas – em princípio – o futuro seria previsível (de direito). Segundo Piettre (1997), esse determinismo de Espinosa representa o primado da eternidade sobre o tempo, compreendendo esse “eterno” como uma negação do passado e do futuro em favor do único presente.

Immanuel Kant (1724-1804)

Responsável por elaborar uma cosmovisão a partir das leis de Newton, esse filósofo alemão foi também bastante influenciado por Leibniz. No entanto, no que concerne ao tempo, Kant distancia-se de ambos. Para ele, o tempo não existe fora de nós, mas é algo que utilizamos para descrever o mundo, é uma forma de nossa intuição. Não é possível atribuímos conteúdo de realidade ao tempo, ele é somente uma forma necessária a toda representação do real, um a priori da experiência sensível. Em sua *Crítica da razão pura*, assevera:

“O tempo é uma representação necessária subjacente a todas intuições. Com respeito aos fenômenos em geral, não se pode suprimir o próprio tempo, não obstante se possa do tempo muito bem eliminar os fenômenos. O tempo é, portanto, dado a priori.” (Kant, 1980, p. 44)

“O tempo nada mais é que a forma da nossa intuição interna. Se a condição particular da nossa sensibilidade lhe for suprimida, desaparece também o conceito do tempo, que não adere aos próprios objetos, mas apenas ao sujeito que os intui.” (p. 45)

Não podemos ter conhecimento dos fenômenos “em si”, mas somente a partir da experiência, no espaço e no tempo. Ao esquecermos disso, somos levados a conflitos insolúveis que Kant denominou de “antinomias da razão pura”, dentre as quais nos chama a atenção aquela em que o autor nega tanto a possibilidade de um início temporal para o universo quanto a hipótese contrária (o universo não teve um início). Para o filósofo, só há conflito de proposições se pensarmos o tempo como um conteúdo objetivo da experiência, e não como uma condição subjetiva da mesma (Piettre, 1997, pp. 103-104).

Henri Bergson (1859-1942)

A filosofia de Bergson centra-se no *devenir*, no processo contínuo de mudança, e não no *ser*. Daí que ele privilegie a figura do futuro ao invés do presente. A consciência, desprendendo-se do presente da ação, seria capaz de perceber a passagem do tempo. É sobre a intuição dessa “duração pura” que nos fala Bergson.

A duração não consiste de instantes justapostos, ela é a própria matéria do tempo. Bergson faz uma distinção entre o tempo como medida e o curso efetivo do tempo. O primeiro é um tempo abstrato e matematizado, que é apenas um número (é o tempo do relógio, o tempo medido pela física). Já o curso do tempo pode ser experimentado pela consciência, é o tempo concreto que passa: a duração (Piettre, 1997, pp. 45-46).

Mas a distinção de Bergson é maior do que simplesmente a separação entre o tempo e sua medida. Enquanto o tempo matematizado deixa de ser “tempo”, na medida em que adquire um caráter numerado e geométrico, passando a ser “especializado”, e portanto

perdendo o seu caráter de *devir*, a duração (vivida) não é mensurável, objetivável, mas apenas experimentada subjetivamente. A duração “constitui uma realidade absoluta além de toda medida” (Piettre, 1997, p. 48). Por isso, a duração pura estaria além da possibilidade de compreensão científica, permanecendo objeto de uma intuição metafísica.

Para Bergson, a duração implica a consciência, pois só podemos falar de uma realidade que dura, de “antes” e “depois”, se introduzirmos a memória e, portanto, a consciência. A experiência da duração forneceria ainda uma intuição do “impulso vital” que anima a vida em geral, fazendo com que o tempo constitua a própria essência da existência dos seres vivos.

Gaston Bachelard (1884-1962)

O pensador que, para nós, é referência no campo epistemológico, elaborou também ensaios sobre os fenômenos temporais, principalmente *La intuición del instante* (2000, original de 1932) e *A Dialética da Duração* (1988, original de 1936).

No primeiro dos dois trabalhos, Bachelard propõe-se a tratar do que considera uma intuição nova e de interesse metafísico, presente na obra *Siloë*, de Gaston Roupnel: a idéia de que o *instante* é a única realidade do tempo. O instante tem um caráter dramático, representa uma ruptura do ser, em que a descontinuidade se impõe.

Opondo as teses de Roupnel às de Bergson, Bachelard defende que a duração contínua é indireta e mediata, uma construção de nosso espírito. Ela é uma *sensação* como outra qualquer, e não seria uma unidade indestrutível, como queria Bergson. Ao contrário, o instante é o elemento primordial do tempo, fundando uma metafísica da descontinuidade e dos *atos* criadores. “E como não ver logo que a vida é o descontínuo dos atos?” (Bachelard, 2000, p. 21 – tradução nossa). A atomização do tempo faz com que a duração seja deduzida em vez de postulada. Os pontos temporais sem dimensão, uma vez unidos, esquematizam uma duração que é apenas uma função panorâmica e retrospectiva. Trata-se de uma *aritmização* completa e franca do tempo.

Bachelard busca auxílio na física contemporânea para criticar a duração bergsoniana e defender sua tese da descontinuidade. Da relatividade, resgata a idéia da destruição de uma duração absoluta e objetiva. E, a partir da mecânica quântica, sugere que o átomo só existe no momento em que muda, permitindo que pensemos numa espécie de “concepção estatística dos instantes fecundos” (p. 51). Mas não se propõe a aprofundar esses aspectos científicos.

Também a idéia de direção do tempo, de um passado e de um futuro, tem para Bachelard o caráter de uma impressão. O instante não sugere qualquer direção. A consciência

é consciência do instante, e vice-versa. De modo que a recordação do passado e a previsão do futuro baseiam-se em *hábitos*, sendo necessária uma negação absoluta da realidade do passado. Dedicava então o restante da obra para analisar como o hábito explica a permanência do ser e de seu progresso. É basicamente pela idéia de *ritmo* que Bachelard busca compreender a continuidade do descontínuo. O hábito, cuja expressão é a permanência do ser, é um “ritmo sustentado”, mas que sempre mantém sua idéia de novidade. O hábito implica em repetição, e constitui-se em progresso na medida em que essa repetição leva à novidade, ao desconhecido. O tempo tem um valor essencial de renovação, ele só “dura” inventando.

As teses bachelardianas de um tempo descontínuo, em que a realidade última é o instante, são retomadas e aprofundadas em *A Dialética da Duração*, obra considerada pelo próprio autor como de teor “metafísico”. Bachelard não se propõe a discutir, exatamente, o *conceito* de tempo, mas a problematizar o que seria uma “experiência da duração contínua”.

Contrapõe-se novamente, de início, à tese de Bergson da continuidade, chamando sua filosofia de “filosofia do pleno”. Ao contrário, Bachelard defende que haja *lacunas* na duração, e que o repouso deve ser considerado um dos elementos do devir, inscrito no âmago do ser. O que ele pretende é fundar uma dialética do ser na duração. A idéia de um tempo único e contínuo seria imperfeita, pois os fenômenos temporais não “duram” todos do mesmo modo, havendo um ritmo apropriado para o estudo de cada fenômeno temporal. A noção de *ritmo* é então mais adequada a uma filosofia dialética da duração, levando o autor a propor uma “ritmanálise” baseada na descontinuidade.

A continuidade – tanto física quanto psíquica – não é um dado, mas uma obra. Ela tem um caráter metafórico, é uma conseqüência de “superposições temporais” em que o tempo de cada fenômeno gera, globalmente, a ilusão de um tempo único, em analogia às ondículas que, juntas e em grande número, compõem uma frente de onda. Bachelard defende a existência de uma descontinuidade essencial, principalmente, no terreno da psicologia dos fenômenos temporais, abordando também o campo da música e da poesia, onde encontraríamos metáforas ilusórias a uma psicologia do tempo.

Bachelard procura também fundamentar sua proposta do ponto de vista físico, analisando a relação entre duração e causalidade. Para ele, a duração não tem qualquer papel na ligação entre a causa e o efeito, e a ordem de sucessão é o único aspecto realmente objetivo do tempo. Tendemos a “exagerar a riqueza do devir”. Busca, então, apoio nos “microfenômenos”:

“A microfenomenologia não deve tentar ultrapassar a descrição de uma ordem de sucessão, ou, mais simplesmente ainda, a enumeração dos casos possíveis. Essa enumeração exigirá em

seguida um tempo pura e simplesmente estatístico, que não tem mais eficácia causal. Alcançamos aqui um dos mais curiosos princípios fundamentais da ciência contemporânea: a estatística dos diferentes estados de um único átomo, ao longo de uma duração, é exatamente a mesma que a de um conjunto de átomos, num instante particular. Meditando sobre esse princípio, devemos-nos convencer de que, na microfísica, a duração antecedente não empurra o presente, e que o passado não pesa sobre o futuro. Já que a figura da evolução de um indivíduo é inteiramente homográfica à figura do estado de uma sociedade, as condições de estrutura são intercambiáveis em face das condições de evolução.” (Bachelard, 1988, p. 61)

O devir do átomo aplica-se a um número, e não a um contínuo. O indeterminismo e o caráter quântico das medidas fazem com que não possamos “esticar” uma continuidade temporal para analisar passagens verdadeiramente descontínuas. O tempo dos instrumentos de medida passa a ser um “tempo regulado”, que promove uma *correspondência* com o tempo dos microfenômenos, sendo esse o papel da duração. A matéria, portanto, tem características ondulatórias e rítmicas, fazendo com que o tempo primitivo seja um “tempo vibrado”. Daí a ritmanálise, mesmo procedendo de uma visão metafísica geral, também possuir bases físicas.

As teorias físicas e o tempo

Da reversibilidade mecânica à irreversibilidade termodinâmica

Os princípios metafísicos de Newton acabaram sendo deixados de lado no desenvolvimento do formalismo matemático da mecânica, nos séculos que se seguiram à publicação dos *Principia*.... O tempo, por exemplo, adquiriu o caráter de “parâmetro matemático abstrato”, presente nas leis e equações tão familiares aos físicos profissionais. Quais seriam as características desse “tempo clássico”?

Sinteticamente, poderíamos dizer que o tempo da mecânica é linear, contínuo, homogêneo, independente do referencial e da presença de campo ou matéria. Compõe com o espaço, numa bem conhecida metáfora, o “palco” para os fenômenos físicos. Assim, espaço e tempo são entidades distintas, ainda que vinculadas de imediato por essa descrição. A existência de campos ou da matéria, que seriam os “atores” nesse roteiro da natureza, não afeta a estrutura do palco, que por sua vez existe mesmo na ausência dos atores.

O tempo independe do referencial, ou seja, é o mesmo para qualquer observador inercial. Isso significa que dois referenciais inerciais que se desloquem, um em relação ao outro, perceberão o transcorrer do tempo da mesma maneira, medindo, por exemplo, iguais intervalos de tempo entre dois eventos. Assim como o Δt , a *simultaneidade* de eventos é também uma noção absoluta, independente do referencial. As transformações de Galileu, que

deixam as leis da mecânica invariantes segundo uma mudança de coordenadas, expressam claramente esse caráter absoluto do tempo:

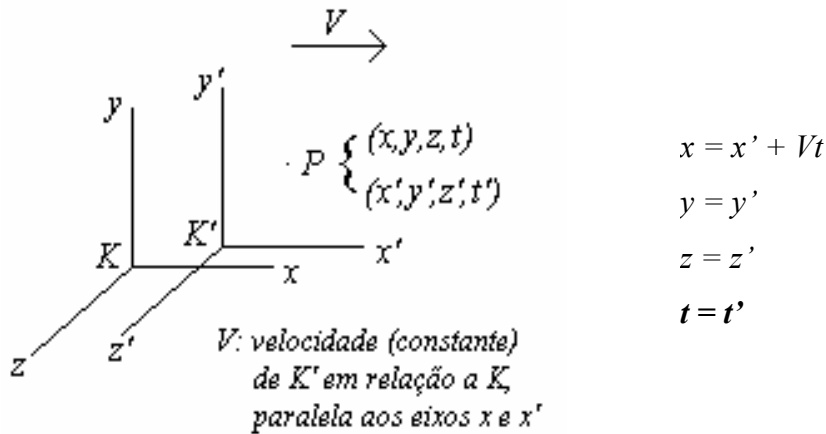


Figura 1: as transformações de Galileu

O tempo e a simultaneidade absolutos, compartilhados por todos os referenciais inerciais, são necessários para dar significado às leis mecânicas. A terceira lei de Newton mostra que se A exerce uma força sobre B, B exerce *instantaneamente* uma força igual e oposta sobre A, estando a simultaneidade das medidas implicada. Haveria um problema caso a simultaneidade para A fosse diferente da simultaneidade para B, mas na mecânica newtoniana elas são a mesma (Rindler, 2001, p. 65). A noção de *simultaneidade absoluta* dá um significado inequívoco à terceira lei e insere-se no quadro da “ação instantânea à distância”, característico da teoria.

O tempo não é tridimensional como o espaço, mas unidimensional. É ainda contínuo, no sentido de que entre dois instantes quaisquer há infinitos outros. Esse caráter linear e contínuo do tempo clássico faz com que uma boa representação para ele seja a reta dos números reais. Mas essa ainda seria uma imagem estática. O aspecto dinâmico, próprio do tempo, começa a aparecer quando consideramos outra de suas propriedades: a sua *homogeneidade*.

Por homogeneidade entende-se, grosso modo, que todas as “partes” do tempo são iguais entre si. Isso assegura que quaisquer dois experimentos (isolados do resto do universo) que tenham *hoje* igual duração possam ser repetidos *no futuro* com igual resultado (Rindler, 2001, p. 64). Dito de outra forma, é isso que garante que o resultado das experiências não dependa do momento em que sejam realizadas, ou seja, não há necessidade de repetição de uma experiência com o passar do tempo, pois seu resultado continua válido, consideradas as

mesmas condições iniciais (claro que isso não é válido para os fenômenos que, intrinsecamente, variem no tempo). Essa propriedade do tempo encontra-se relacionada, pelo formalismo matemático da teoria, a um dos mais importantes princípios de conservação da física: o da energia⁹. Pode-se dizer que a homogeneidade é uma simetria do tempo que se reflete na lei de conservação da energia.

Podemos pensar ainda a homogeneidade do tempo na mecânica como equivalente à afirmação da *uniformidade* do transcurso do tempo. Na mecânica clássica, o tempo “flui”. E flui uniformemente. Dizer que o transcurso do tempo é uniforme significa algo como afirmar que ele “passa” sempre da mesma maneira, sem “acelerações” ou “retardamentos”, num dado referencial. Na verdade, isso não é muito preciso, pois o que significaria o tempo passar “mais rápido”? Uma “maior rapidez” significaria uma passagem de “mais tempo” em relação... ao tempo? De qualquer modo, podemos imaginar (com uma certa dose de permissividade...) a não-uniformidade do tempo como sendo o passar desigual dos minutos, ou o movimento ora mais rápido ora mais devagar da Terra em sua órbita, como num filme “acelerado” ou “em câmera lenta”. Num mundo de tempo não-uniforme, a energia pareceria não se conservar, “surgir do nada” ou simplesmente “desaparecer”¹⁰.

Entretanto, afirmar que o tempo é linear, contínuo e homogêneo (ou uniforme) não significa dizer que ele “flui” necessariamente do passado em direção ao futuro. Tanto é possível percorrer a “linha reta” num sentido como no outro. A homogeneidade (ou uniformidade) não implica irreversibilidade¹¹. Nossa “imagem dinâmica” do tempo ainda precisa de “retoques”. Para isso, é necessário distinguirmos as situações nas quais há conservação da energia mecânica daquelas em que essa energia não se conserva (embora a energia total, sim).

Antes, é importante salientarmos que a mecânica clássica é uma *teoria reversível temporalmente*, ou seja, é invariante por reversão temporal (uma transformação que troque t por $-t$). Isso é claro se olharmos a segunda lei de Newton: $F = m \cdot d^2x/dt^2$, em que a substituição de t por $-t$ não modifica a equação. A primeira e a terceira leis, assim como a lei de força da gravitação ($F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$), também são invariantes, pois o tempo sequer aparece explicitamente em suas formulações. Podemos ainda compreender esta invariância por reversão temporal como uma declaração de que uma seqüência qualquer de estados de um sistema mecânico ($E_i \rightarrow E_f$) é dinamicamente possível se, e somente se, sua reversão no tempo ($E_f^{Rev} \rightarrow E_i^{Rev}$) também o é.

Como, então, uma teoria reversível acomoda a irreversibilidade do tempo? Na verdade, não acomoda. Consideremos inicialmente apenas os sistemas chamados *conservativos*, nos quais a energia mecânica total permanece constante. Um sistema desse tipo, como um pêndulo que oscila sem atrito ou qualquer resistência, seria idêntico a outro sistema que fosse a sua reversão no tempo. Dito de outra maneira, não conseguiríamos distinguir, numa filmagem desses dois sistemas, qual deles “avança” e qual “retrocede” no tempo. A formulação da mecânica assegura, nesses casos, que haja homogeneidade do tempo (conservação da energia total) e reversibilidade. Mas sistemas assim representam sempre uma aproximação, pois a energia mecânica nunca se conserva, estritamente.

A quebra da simetria de inversão temporal parece, então, vincular-se à não-conservação da energia mecânica. Nos sistemas não-conservativos, ou *dissipativos*, há sempre transformação de energia mecânica em formas mais “desorganizadas” de energia, principalmente energia térmica. Um sistema dessa natureza pode ser considerado irreversível, mas apenas no sentido de que sua reversão temporal nunca é observada. Dessa maneira, somos capazes de distinguir entre a filmagem de um pêndulo (dissipativo) que oscila até parar e sua inversão no tempo, um pêndulo que milagrosamente parte do repouso e oscila com amplitude cada vez maior. Daí que os termos de dissipação apareçam quase sempre como “derivadas primeiras” em relação ao tempo (como $F \propto dx/dt$, por exemplo), ou seja, têm uma dependência assimétrica em relação ao tempo, o que os torna sensíveis à troca de t por $-t$. A não-conservação da energia mecânica acrescenta uma característica fundamental ao tempo: a sua *irreversibilidade*, que pode ser encarada como uma “assimetria” ou, mais propriamente, uma *anisotropia*. O “fluir” do tempo linear, contínuo e homogêneo tem um sentido preferencial: do passado para o futuro.

Mas a relação entre a não-conservação da energia mecânica e a anisotropia do tempo não é tão imediata. Embora o reverso temporal dos sistemas dissipativos nunca seja *observado*, ele é *dinamicamente possível*. Não há nada nas *leis* (reversíveis) da mecânica que impeça o milagre do pêndulo começar a oscilar com amplitude cada vez maior a partir do repouso. O que faz então com que os sistemas dissipativos, que em princípio também obedecem a essas leis, sejam de fato (mas não de direito!) irreversíveis? A irreversibilidade foge ao escopo da mecânica, e, com isso, adentramos no universo da termodinâmica e da mecânica estatística¹².

Parte da resposta já foi dada: nos processos espontâneos, a energia transforma-se, passando de formas mais organizadas para formas menos organizadas de energia. Isso representa um aumento da *entropia* do sistema, o que *sempre* ocorre nos processos

espontâneos, em sistemas isolados (como determina a segunda lei da termodinâmica¹³). Esse aumento de entropia, ou do grau de “desordem” do sistema, é o processo *mais provável* quando consideramos a evolução temporal de um sistema.

Se imaginarmos, por exemplo, um frasco de perfume que é aberto numa sala vazia, sabemos que com o tempo as moléculas irão dispersar-se pelo ambiente, procurando ocupar todo o espaço disponível. Ao atingirem o equilíbrio, o número de configurações de velocidades moleculares (microestados) compatíveis com o macroestado de equilíbrio é infinitamente maior do que uma configuração particular de velocidades das moléculas (sua inversão) que as fizesse retornar ao frasco, esvaziando a sala. Uma vez que a entropia é uma medida do número de microestados do sistema compatíveis com um determinado macroestado, há certamente uma maior entropia na situação de equilíbrio, e uma probabilidade muito maior de encontrarmos o sistema numa das configurações de velocidades compatíveis com ele. Houve, portanto, uma evolução temporal no sentido da entropia crescente, partindo-se de um contexto mais organizado (moléculas no frasco) para uma situação mais desorganizada e mais provável (ocupação da sala pelo gás de moléculas).

O caráter *estatístico* da lei do aumento de entropia faz com que a reversão no tempo seja – simplesmente – um processo *pouco provável*. Na verdade, ao calcularmos a probabilidade de retorno das moléculas para o frasco, no nosso exemplo, vemos que ela é ínfima o suficiente para considerarmos, na prática, esse processo reverso como *impossível*. Mesmo assim, isso serve para deixar claro que, ao vincularmos a irreversibilidade do tempo à segunda lei da termodinâmica, devemos encará-la em sua natureza *probabilística*, e não absoluta¹⁴.

Essa não é, entretanto, a única posição possível. Mais modernamente, o estudo dos sistemas dissipativos e da termodinâmica longe do equilíbrio têm procurado mostrar a existência de uma “seta do tempo” mais fundamental, associada a equações não-lineares que descrevem de modo assimétrico os sistemas mais elementares tratados pela mecânica estatística (Prigogine & Stengers, 1992). Para outros, no entanto, a termodinâmica não-linear irreversível não revolucionou a visão tradicional sobre a “seta do tempo”, pois continua apoiando suas conclusões sobre condições suplementares, e não sobre leis fundamentais realmente irreversíveis (von Borzeszkowski & Wahnson, 1984). Daí que muitos autores busquem na mecânica quântica ou na teoria da relatividade argumentos em prol tanto de uma “irreversibilidade real” quanto de sua “aparência ilusória”. Esse é um debate ainda em aberto, cujo aprofundamento deixaremos de lado.

O tempo relativístico

O fato de a velocidade da luz ser finita já impõe conseqüências sobre a temporalidade, mesmo antes de considerarmos efeitos propriamente relativísticos. Na mecânica clássica era possível considerar a interação entre a Terra e a Lua, por exemplo, dentro da concepção de uma “ação instantânea à distância”, ou seja, supondo uma transmissão de informação a uma velocidade infinita. Nessa visão, o par ação-reação referente à interação gravitacional entre ambas, que se encontra na reta que une seus respectivos centros de massa, seria deslocado *simultaneamente* a qualquer alteração na posição de um dos dois corpos, e de modo *instantâneo*.

A velocidade finita da luz fixou um limite superior para a velocidade de transmissão de informações. Seu valor elevado ($c = 300.000$ km/s, no vácuo), entretanto, faz com que as conseqüências não sejam perceptíveis em nosso cotidiano. Isso muda ao considerarmos distâncias astronômicas. Nelas, o conceito de *simultaneidade* torna-se relativo, e não absoluto, como na mecânica newtoniana. Um observador a meio caminho entre a Terra e o Sol, por exemplo, demoraria cerca de quatro minutos para notar uma anomalia nas emissões solares, que seriam percebidas na Terra outros quatro minutos depois. Dois eventos ocorridos na Terra e no Sol, que aos seus olhos fossem simultâneos, não o seriam para um observador lunar.

No entanto, a ruptura com o conceito de tempo clássico, promovida com o advento da teoria da relatividade, foi mais profunda do que isso. Para lidar com os dois postulados básicos da teoria (a *constância da velocidade da luz no vácuo*, medida por qualquer sistema de referência inercial, e o *princípio da relatividade*, que determina a invariância das leis físicas segundo uma mudança de coordenadas entre sistemas inerciais de referência), Albert Einstein (1879-1955) precisou “sacrificar” nossa intuição comum de que distâncias e intervalos de tempo são absolutos¹⁵. Eles passaram a ser *relativos*, no sentido de que dependem do movimento relativo entre observadores.

Para a primeira das duas teorias propostas por Einstein, a relatividade especial, deixa de existir um espaço e um tempo desconectados entre si. As medidas de ambos não podem mais ser consideradas independentemente, o que é expresso pelo novo sistema de transformação de coordenadas entre referenciais inerciais, as transformações de Lorentz:

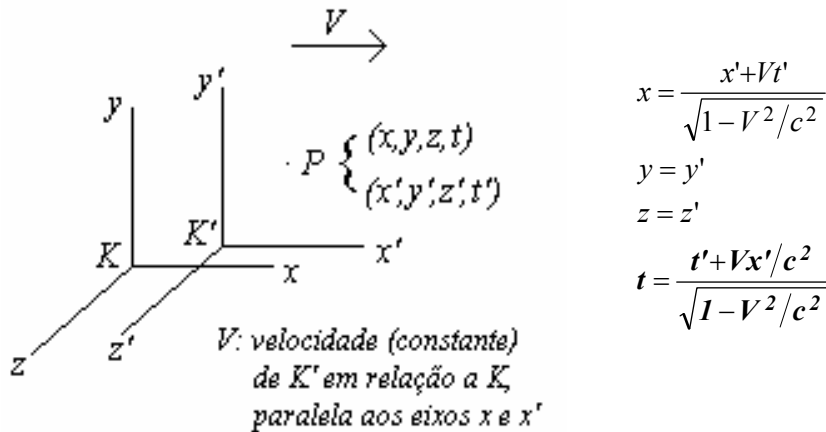


Figura 2: as transformações de Lorentz

Vemos como há verdadeira “imbricação” entre tempo e espaço que, indissociáveis, formam uma nova entidade: o espaço-tempo tetradimensional. Um evento passa a ser descrito em função de quatro coordenadas, três espaciais e uma temporal. Nesse novo “palco” inaugurado pela relatividade, destacam-se dois efeitos muito conhecidos: a contração do comprimento e a *dilatação do tempo*. Esse último merecerá nossa especial atenção¹⁶.

Dois relógios em movimento relativo *não* marcam a mesma coisa, ou seja, o transcurso do tempo não é mais absoluto e independente do observador:

“Consideremos agora um relógio que marque segundos e que se encontra em repouso no ponto inicial ($x' = 0$) de K' . Consideremos $t' = 0$ e $t' = 1$ duas batidas consecutivas deste relógio. Para estas duas batidas, a [quarta equação] das transformações de Lorentz [fornece]:

$$t = 0 \text{ e } t = \frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}.$$

Observado a partir de K , o relógio está em movimento com a velocidade V ; em relação a este corpo de referência, entre duas de suas batidas transcorre não um segundo, mas sim $\frac{1}{\sqrt{1 - V^2/c^2}}$ segundos, portanto um intervalo de tempo um pouco maior. Como

conseqüência do seu movimento, o relógio anda um pouco mais lento do que no estado de repouso.” (Einstein, 1999, pp. 36-37)

Esse efeito é maior quanto maior for a razão V/c , ou seja, quanto mais próximo da velocidade da luz for o deslocamento relativo. E, justamente por ser relativo, não há algo como uma “visão divina”, um referencial privilegiado para se medir o tempo: *cada um* dos observadores percebe o relógio *do outro* andar mais lentamente, havendo uma simetria na descrição de ambos¹⁷.

Embora os intervalos de tempo e a simultaneidade dependam do sistema de referência adotado, isso não significa que “tudo é relativo”. A relatividade especial incorporou *novos*

absolutos, como a velocidade da luz e o “intervalo relativístico” ($s^2 = d^2 - c^2 t^2$), que é uma espécie de “distância generalizada” no espaço-tempo. Também a causalidade foi preservada, uma vez que dois eventos possivelmente conectados causalmente entre si (separados por uma distância d tal que $d < ct$) mantêm o seu nexos causal independentemente do referencial. Somente eventos separados no espaço tal que $d > ct$ podem inverter a ordem “antes”-“depois” dependendo do observador.

Se a homogeneidade do transcurso do tempo relacionava-se, classicamente, à conservação da energia, a dependência desse transcurso em relação ao estado de movimento do observador modifica essa relação, generalizando-a. Do mesmo modo que tempo e espaço perdem sua autonomia, energia e momento também formam um quadrvetor, fazendo corresponder ao espaço-tempo a conservação da energia-momento.

Um último golpe sobre o tempo da mecânica clássica veio com a relatividade geral. Com essa teoria, Einstein incorporou a gravitação no contexto relativístico, estabelecendo a equivalência entre movimentos acelerados e a presença de campos gravitacionais. O princípio da relatividade passa a ter validade geral, e não apenas para sistemas inerciais de referência. O espaço-tempo, nesse novo quadro teórico, é afetado pela presença da *matéria*. É como se a estrutura do palco, até agora não influenciada pelos atores (tanto na mecânica newtoniana quanto na relatividade especial), passasse a depender da presença deles. A *métrica* do espaço-tempo, determinada também numa geometria generalizada (não-euclidiana), é afetada pelo conteúdo material do Universo.

A relatividade geral prevê uma outra “dilatação do tempo” na presença de um campo gravitacional. Relógios próximos à superfície da Terra, por exemplo, andam mais lentamente do que seus semelhantes colocados em grandes altitudes. A dilatação do tempo é maior quanto maior for a intensidade do campo gravitacional¹⁸. Assim, o transcurso do tempo, além de depender da velocidade relativa entre observadores, é afetado pela matéria.

No século passado, as teorias da relatividade, aliadas à mecânica quântica, levaram a um desenvolvimento sem precedentes da cosmologia. Surgiram diversos modelos cosmológicos, sempre acompanhados de dúvidas e afirmações nas quais o tempo desempenha um papel central. Mesmo atualmente, no âmbito do chamado “modelo padrão”, que admite a ocorrência de um Big Bang e posterior expansão do universo, a “origem do tempo” e a idade do cosmos são temas controversos. Conjecturas teóricas como a do físico Stephen Hawking (1996) levam a um “tempo imaginário”, enquanto outros propõem “viagens no tempo”, aparentemente paradoxais, mas permitidas pela relatividade geral.

Como já afirmamos, o aprofundamento dessas questões foge aos propósitos desta apresentação. No entanto, é importante termos em mente a relevância do tempo para a cosmologia, pois é nesse terreno do conhecimento que costumamos encontrar questionamentos básicos associados à temporalidade e compartilhados por qualquer pessoa, tais como: o tempo teve um início? Terá fim? O tempo é finito ou infinito? Etc.

Aspectos quânticos

Há diversas questões envolvendo a noção de tempo na mecânica quântica, quase todas muito polêmicas – como é característico dessa teoria. Apontaremos a seguir, muito brevemente, algumas delas, apenas com o intuito de situar mais amplamente o conceito de tempo na física em geral. As questões e polêmicas do mundo quântico também ultrapassam os objetivos deste trabalho.

Um primeiro ponto a destacar é o fato de o tempo ser um *parâmetro numérico* no formalismo quântico. Outros “observáveis” (como é o caso da posição, do momento e da energia) são representados por *operadores*, mas não o “observável tempo”, que não permite a definição de um “operador de tempo” auto-adjunto, compatível com os autovalores do operador de energia. Segundo Pessoa Jr. (1995), alguns teóricos vêm tentando explorar a idéia de um operador de tempo com autoestados não-ortogonais.

Outro destaque é a presença do tempo numa das relações de incerteza de Heisenberg, conjugado com a grandeza energia ($\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar/2$), evidenciando que ambos não podem ser, simultaneamente, conhecidos com precisão arbitrária. Como exemplo dessa relação, podemos pensar em estados excitados num átomo. Um elétron num estado excitado, cuja probabilidade de transição espontânea seja elevada (curta duração), tem uma incerteza grande em sua energia, ou seja, ela é “mal definida”. Por outro lado, a energia do estado fundamental é bem definida, mas um elétron pode ficar um tempo muito longo (o que corresponde a uma incerteza grande no tempo) nesse estado, até ser excitado. No entanto, houve historicamente diversas interpretações para a desigualdade de Heisenberg envolvendo o tempo e a energia, e ainda hoje parece não haver consenso quanto a melhor maneira de interpretá-la. Pessoa Jr. (1995) agrupa essas interpretações em cinco grupos diferentes!

O tempo reaparece na mecânica quântica no contexto dos chamados “efeitos não-locais”. Neles, sistemas que interagiram no passado, mas que agora encontram-se separados por uma distância maior do que ct , são capazes de interagir entre si instantaneamente ($\Delta t=0$). A explicação de correlações não-locais dessa natureza, confirmadas por resultados

experimentais recentes, pode sugerir que haja uma transmissão de informação a uma velocidade maior do que c , o que contradiz a teoria da relatividade.

O problema da irreversibilidade também está presente na mecânica quântica. Sendo uma teoria reversível temporalmente, como a mecânica clássica, a assimetria no tempo dos sistemas de muitas partículas precisa ser explicada. Muitos argumentam que o processo de medição (e o correspondente colapso da função de onda) introduz de modo definitivo e inevitável a irreversibilidade nos sistemas quânticos. Outros defendem que são vínculos impostos sobre as condições iniciais que geram a assimetria temporal¹⁹. Já no universo da física de partículas elementares, em que a teoria quântica incorpora o eletromagnetismo e a relatividade especial, o tempo faz parte de uma simetria mais ampla, que envolve a carga elétrica e a paridade (o “teorema CPT”). Nesse contexto, em que antipartículas podem ser interpretadas como partículas viajando “para trás” no tempo, há tentativas de se descobrir processos elementares marcados por uma “seta do tempo”. É o caso do estudo com o méson K ou *káon*, criado em colisões nucleares. O *káon* neutro, K^0 , transforma-se espontaneamente na sua antipartícula (antikáon), \bar{K}^0 , e vice-versa. Embora esses processos sejam simétricos, o *káon* permanece mais tempo como antikáon do que como *káon*. Essa “assimetria” parece privilegiar um dos processos de decaimento em vez do outro, sugerindo uma espécie de “irreversibilidade elementar”.

A medida do tempo

Se o tempo – em si – é um conceito complexo e multifacetado, seja no âmbito filosófico ou no das teorias da física, as questões relativas à sua *medida* são bastante mais objetivas e menos sujeitas a debates e controvérsias. Não seria esse o espaço para algo como uma detalhada “história da medida do tempo”, certamente fascinante, mas que pode ser encontrada em outras referências, como Whitrow (1993) ou Andrewes (2002). Apontaremos a seguir somente aspectos relevantes para nossa caracterização futura da empiria do tempo.

O problema da *marcação do tempo* sempre esteve presente desde os primórdios da humanidade, ligado à possibilidade da agricultura. Diversos povos desenvolveram calendários baseados nos movimentos periódicos do Sol ou da Lua, como resposta a essa questão eminentemente prática. O dia solar, o mês lunar e o ano solar eram os ciclos naturais básicos utilizados para esse fim²⁰. Devemos aos egípcios os primeiros relógios solares, assim como os primeiros relógios d’água (clepsidras), ambos utilizados posteriormente por gregos e

romanos. Esses dois tipos de relógio foram usados desde a Antigüidade também no oriente, onde parece ter surgido a marcação do tempo por meio de bastões de incenso e velas graduadas²¹.

Como instrumentos capazes de marcar intervalos de tempo menores do que o dia solar, clepsidras e relógios de Sol só foram superados pelo surgimento dos primeiros relógios mecânicos, ocorrido na Europa por volta do século XIII. O desenvolvimento desses aparelhos vincula-se à Igreja, que necessitava de instrumentos mais precisos de marcação do tempo devido à pontualidade exigida nas orações e serviços religiosos. Dessa forma, os relógios destinavam-se às grandes catedrais, e utilizavam pesos suspensos e rodas dentadas. No entanto, o dispositivo mais revolucionário, segundo Andrewes (2002), foi o *escape*, que controla a rotação das engrenagens, mantendo-a uniforme (ver Figura 3).

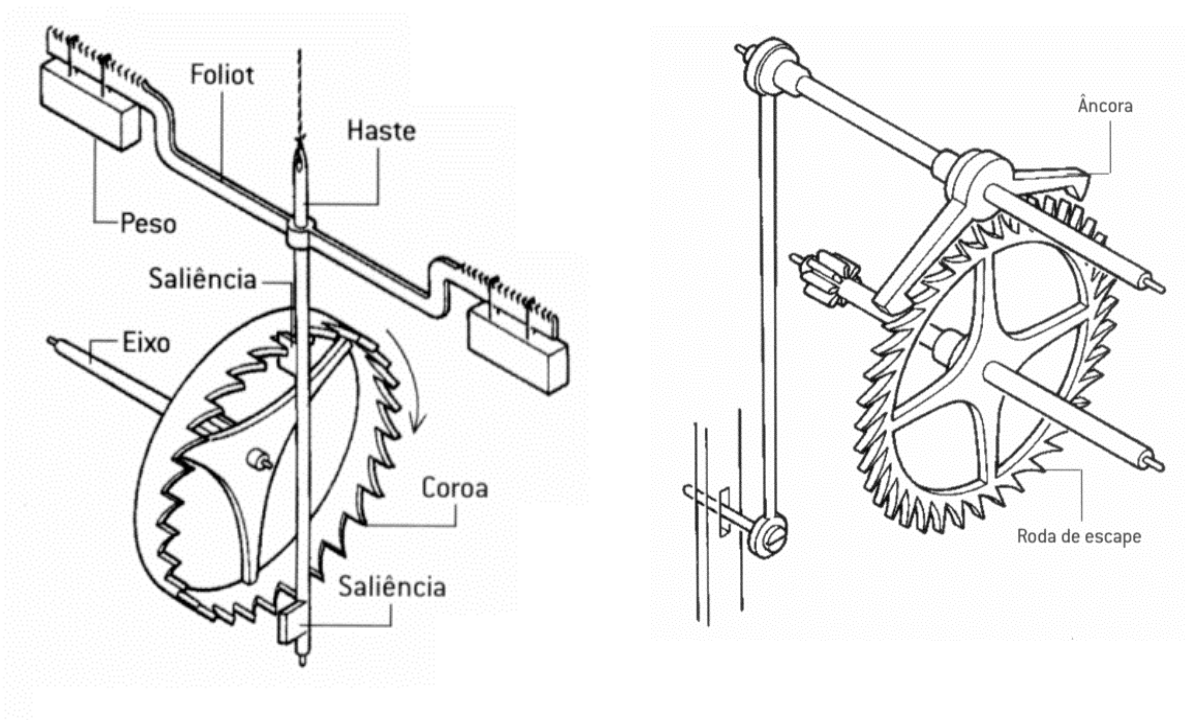


Figura 3: dois diferentes tipos de escape: o de *haste e folha*, característico dos primeiros relógios mecânicos (à esquerda), e o de *âncora*, desenvolvido no século XVII (à direita)

Aos poucos surgiram relógios públicos e, no século XV, os primeiros relógios portáteis. Neles, o peso foi substituído pela *corda*, uma mola em espiral. Aperfeiçoamentos posteriores (como o *fuso* e o *balancim*) difundiram os relógios portáteis e levaram aos

relógios de algibeira. Já as ampulhetas, ou relógios de areia, parecem ter surgido por volta do século XIV, fornecendo uma alternativa aos relógios d'água, que congelavam no inverno²².

Um grande aprimoramento na medição do tempo foi proporcionado no século XVII por Christian Huygens (1629-1695), construtor do primeiro relógio de *pêndulo*. Cerca de cem vezes mais precisos que os relógios mecânicos da época, os relógios de pêndulo espalharam-se rapidamente. O ritmo de oscilação do pêndulo, determinado pelo seu comprimento e pela gravidade, passou a movimentar a haste do escape, mostrando ser um movimento mais confiável e preciso. Aperfeiçoamentos, como o escape de *âncora* (ver Figura 3), proporcionaram uma precisão ainda maior, tendência que se seguiu nos séculos XVIII e XIX. Enquanto o erro do relógio de Huygens chegava a 10 segundos por dia, por volta de 1900 os relógios de pêndulo mais precisos alcançavam um erro de 0,01 segundos/dia²³.

No início do século XX, eram de pêndulo os relógios mais precisos usados em observatórios astronômicos ao redor do mundo. Sua superioridade foi suplantada na década de trinta, com o surgimento dos relógios de *quartzo*. A vibração de um cristal de quartzo, mantida por impulsos elétricos, tem uma frequência extremamente regular. Relógios dessa natureza tornaram-se muito comuns, e acumulam um erro da ordem de 0,1 segundos por ano.

Em pouco tempo, no entanto, foram desenvolvidos relógios ainda mais precisos, baseados em padrões *atômicos*. Num relógio de césio-133, por exemplo, átomos desse elemento absorvem microondas de uma dada frequência fundamental, dirigindo-se a um detector. O número de átomos que chegam a ele é maximizado por um circuito de retroalimentação, que regula a frequência de microondas cada vez que esse número diminui. Assim, a frequência mantém-se ajustada à frequência fundamental da transição atômica. Um dispositivo eletrônico (divisor de frequências) faz a “contagem” dos pulsos, gerando “pulsos temporais”. Para isso, foi necessário estabelecer a relação entre a frequência fundamental citada e o segundo definido astronomicamente, o que foi realizado numa série de experimentos realizados entre 1955 e 1958. Essa relação é: 9.192.631.770 períodos da radiação = 1 segundo, que passou a ser a definição internacional padronizada do segundo, aceita desde 1967.

Os relógios atômicos alcançaram rapidamente uma precisão de cerca de 1 segundo em um milhão de anos. Entretanto, relógios com uma precisão ainda maior têm sido projetados e desenvolvidos nos últimos anos, como o de maser de amônia ou hidrogênio e o de fonte de césio, esse último utilizando o bombeamento óptico, em que lasers controlam o movimento dos átomos²⁴.

O que contribui para a precisão de um relógio? Segundo Itano & Ramsey (1993), os

três mais importantes parâmetros que determinam a qualidade de um relógio, cujo funcionamento esteja baseado na regularidade de um movimento periódico, são: *estabilidade*, *reprodutibilidade* e *acuidade*. O primeiro é uma medida de quão bem a frequência permanece constante. O segundo diz respeito à habilidade de aparelhos independentes e semelhantes produzirem o mesmo valor, enquanto a acuidade é uma medida do grau com o que o relógio replica um intervalo de tempo definido (um segundo, por exemplo)²⁵.

Se a evolução e o aprimoramento dos instrumentos destinados à marcação do tempo, ao longo da história, levou a um aumento de precisão, também promoveu uma crescente possibilidade de medição de intervalos cada vez menores de tempo: do dia solar passamos a horas, minutos, segundos, até atingirmos os atuais “attosegundos” (10^{-18} s).

Outro ponto a destacar, nessa evolução, foi a modificação de nossa referência básica quanto a um “padrão” de medida do tempo: a rotação da Terra deu lugar às transições atômicas²⁶. Nesse sentido, merece destaque a multiplicidade de *fenômenos* que serviram, através dos tempos, para a construção de relógios: o movimento aparente do Sol (relógio de Sol); o escorrer da água (clepsidra) ou da areia (ampulheta); o queimar de uma vela ou de incenso; o movimento de rodas dentadas (relógios mecânicos), de um pêndulo ou de uma mola comprimida (relógio de corda); a vibração de um cristal de quartzo; a transição atômica de um elemento químico. Por trás dessa diversidade há, no entanto, aspectos comuns que permitem justamente realizar a marcação do tempo por meio de fenômenos tão diferentes. Vejamos então o que é preciso para se medir o tempo.

Os diversos tipos de relógios podem ser divididos, basicamente, em dois grupos, levando-se em conta as características do fenômeno físico envolvido em seu funcionamento: de um lado, aqueles cujo mecanismo está baseado em um *fenômeno cíclico* ou *periódico*, como os relógios atômico, de quartzo ou de pêndulo; de outro, temos relógios que não têm por base um fenômeno periódico, mas sim um *movimento regular* ou *uniforme* (velocidade constante), em geral o fluxo contínuo e uniforme de algum material, como no caso dos relógios de água ou de areia. Podemos chamar os primeiros de “relógios de ciclo”, e os segundos de “relógios de fluxo”²⁷. Para a medida do tempo precisamos, em ambos os casos, do *fenômeno base* (periódico ou uniforme) e de uma *escala de registro*, o que implica a adoção de uma *métrica temporal*. E para estabelecermos essa métrica necessitamos de um intervalo de tempo que funcione como uma “unidade móvel” que possa ser repetida (a qual denominaremos de “unidade métrica”).

Surge com isso a principal diferença entre os dois tipos de relógios: nos do primeiro

tipo, o próprio ciclo gera naturalmente essa unidade métrica, que se repete com o ciclo, fornecendo a base para a construção de uma escala numérica para a marcação do tempo. Temos então a repetição da unidade métrica atrelada à repetição do próprio fenômeno. Já nos relógios de fluxo a unidade métrica não provém diretamente do fenômeno físico, mas precisa ser imposta – arbitrariamente – sobre um movimento regular e uniforme. A repetição da unidade métrica não se encontra mais, agora, atrelada à repetição do próprio fenômeno (como nos relógios de ciclo), mas sim atrelada à repetição, em geral, de alguma “quantidade” associada ao fluxo²⁸.

O importante a assinalar, como conclusão, é que a criação de qualquer relógio supõe o estabelecimento de uma métrica temporal, que por sua vez contém a idéia de *repetição*, de uma *unidade básica que se repete*. Essa idéia de *repetição* pode estar associada à de *periodicidade* (no caso dos relógios de ciclo) ou não (no caso dos relógios de fluxo), mas encontra-se sempre presente.

2.2.) O conceito de tempo na pesquisa em ensino de ciências

Embora haja muitos trabalhos explorando o conceito de tempo nas mais variadas áreas, como a física, a filosofia, a psicologia, a biologia, a literatura ou a arte, e seja ele de importância central na ciência, não encontramos muitas referências sobre o *ensino* desse conceito (principalmente com relação às últimas séries do ensino fundamental e ao ensino médio).

Muitas vezes, o tempo surge no desenvolvimento de outros estudos, por exemplo sobre a “teoria da relatividade” ou a “mecânica newtoniana”. A “imbricação” do tempo com outros conceitos, principalmente deslocamento e velocidade, ajuda a entender, quem sabe, por que há escassez de estudos especificamente sobre o tempo no terreno da pesquisa em ensino de ciências. Isso para além, é claro, do fato da ausência de uma tradição de discussão dessa noção em salas de aula ou em livros didáticos de física.

Nossa pesquisa bibliográfica revelou, no entanto, alguns trabalhos de interesse, que serão discutidos a seguir. Antes, vamos apresentar as principais conclusões de Piaget acerca da construção psicológica do conceito de tempo. Além da importância intrínseca do referencial piagetiano para a pesquisa em ensino de ciências, os estudos desse autor sobre o tempo fornecem justamente a base principal sobre a qual repousam os trabalhos de que trataremos depois.

Piaget e a construção do tempo pela criança

Embora a preocupação central de Piaget não fosse o *ensino* do conceito de tempo, dedicaremos aqui especial atenção ao seu extenso trabalho *A Noção de Tempo na Criança* (s/d, original de 1946), em função de sua relevância para o nosso estudo.

Em linhas gerais, podemos dizer que o autor mostra, nessa obra, como um *tempo intuitivo*, marcado pela percepção imediata e por “centrações” na ação própria da criança, evolui em direção a um tempo cada vez mais uniforme e homogêneo. Piaget analisa exaustivamente uma série de experimentos realizados com crianças de 5 a 9 anos aproximadamente, que evidenciam a construção solidária das relações de sucessão, duração e simultaneidade, na formação de um *tempo operatório* (por volta dos 8 anos, em média), qualitativo ou métrico. O tempo para Piaget é um “esquema único”, constituindo-se como coordenação de movimentos de velocidades diferentes (movimento do objeto para o tempo físico e movimento do sujeito para o tempo psicológico). Essa coordenação ocorre segundo três etapas, através das quais a criança gradativamente vai se tornando capaz de “descentrar” sua intuição temporal, à medida que se torna apta a uma reversibilidade de pensamento.

Talvez a melhor maneira de “digerirmos” a síntese esboçada no parágrafo precedente seja retomar um dos muitos experimentos trabalhados por Piaget, usando-o como exemplo na tentativa de compreender melhor as idéias do autor. Tentaremos isso da maneira mais simplificada possível, apontando apenas os aspectos centrais do problema, uma vez que há uma série de detalhes envolvidos em cada experimento.

Na primeira das três partes em que se divide a obra, o autor trabalha com a seguinte técnica: são apresentados às crianças dois recipientes de vidro superpostos. O superior (I) tem a forma de uma pêra, a extremidade superior aberta, e está preenchido por um líquido colorido. O inferior (II) tem a forma de um cilindro delgado, e a mesma capacidade volumétrica do superior. A intervalos regulares, é permitido que uma mesma quantidade de líquido escoe por uma torneira de I para II, até que II esteja cheio e I vazio. Embora Piaget não apresente um desenho da montagem descrita, sugerimos o que se encontra ao lado (Figura 4):

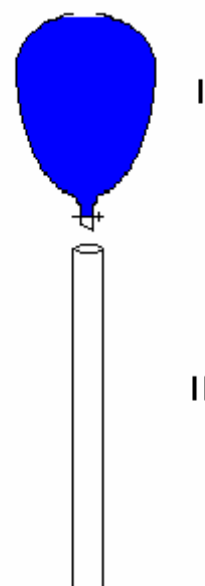


Figura 4: montagem da experiência

Durante a realização da experiência, foram fornecidas à criança fotocópias contendo um desenho dos dois recipientes vazios. Após cada escoamento, a criança tinha de representar com um traço horizontal o nível do líquido em cada um dos recipientes, de modo preciso o suficiente para que fosse possível distinguir um desenho do outro (havia uma folha diferente para cada escoamento). Obtidos todos os desenhos e terminado o escoamento, misturavam-se as folhas e a criança tinha de ordená-las novamente, partindo do desenho que havia feito primeiro. Caso a seriação não fosse a correta, perguntas eram feitas para induzir o êxito.

Num segundo momento, as folhas eram cortadas de modo a separar os recipientes I e II. Caso a criança não tivesse feito – de início – a ordenação precedente corretamente, esses recortes eram misturados e ela teria de fazer uma seriação do conjunto, atividade mais difícil que a anterior.

Misturando-se uma vez mais os recortes, questões sobre *sucessão e simultaneidade* eram então formuladas, tais como (I_1, I_2 etc, representando os níveis da água no recipiente I, e II_1, II_2 etc os níveis correspondentes em II): quando a água estava aqui (I_2 , por exemplo), onde estava a água no outro recipiente (II)? Quando a água estava aqui (I_4 , por exemplo), isso era antes ou depois disso (II_3 , por exemplo)?

Em seguida, eram feitas questões referentes à avaliação da *duração*, tais como: a água gasta o mesmo tempo para ir daqui até ali (de I_1 a I_2), e para subir daqui até ali (de II_1 a II_2)? E também referentes à igualdade de duas durações sucessivas (medida dos intervalos): é preciso o mesmo tempo ou não para que a água suba daqui até aqui (de II_1 a II_2) e daqui até ali (de II_2 a II_3)?

Piaget identifica então a existência de três etapas. Na 1^a, a criança tem dificuldade em ordenar os desenhos (juntos ou recortados). Na 2^a, ela os ordena juntos, mas não consegue reconstruir os sincronismos com eles recortados. Na 3^a etapa, há uma correspondência serial correta.

Com relação às questões de ordem de sucessão e simultaneidade, a 1^a etapa evidencia que a seqüência linear do tempo não se impõe por si. As dificuldades estariam relacionadas, segundo Piaget, à necessidade de reconstituir dedutivamente o movimento sob a forma de uma sucessão temporal, sem contudo observá-lo diretamente. Nessa etapa, há um início de sucesso empírico, a partir do momento em que a evocação do movimento coordena-se com a ordem espacial das alturas (níveis da água nos recipientes). Mas não há compreensão da sucessão propriamente temporal, pois isso implicaria uma seriação não apenas das alturas, mas animada pelo movimento de conjunto.

Na 2^a etapa, a dificuldade da criança repousa na dupla seriação (desenhos recortados), onde reside o problema mesmo do tempo. Trata-se de *co-ordenar dois movimentos de velocidades diferentes* (a descida do líquido em I e sua subida em II), o que torna necessário um princípio de correspondência que é precisamente a simultaneidade. A criança desenvolve inicialmente uma “intuição articulada” capaz de dar conta apenas de um movimento isolado (a seriação dos desenhos não recortados), pois nesse caso as relações propriamente temporais de “antes” e “depois” confundem-se com as relações de sucessão espacial. Entretanto (e por isso mesmo), ela erra depois (com os desenhos recortados) ao desconsiderar as diferenças de forma e de volume entre os recipientes. Ao não levar em conta a diferença de velocidade da descida da água em I e da subida em II, a criança é incapaz de fazer a correspondência correta entre os níveis nos dois recipientes, julgando a simultaneidade em função dos valores absolutos desses níveis, e não de acordo com suas correspondentes ordens de sucessão (por exemplo: I₂ é emparelhado com II₆ porque “há a mesma quantidade de água nos dois”). A dificuldade está na seriação *conjunta*, ou seja, em ordenar as duas séries em correspondência uma com a outra. Isso reflete, para Piaget, uma rigidez ou ausência de mobilidade do pensamento, um não domínio do mecanismo operatório que determina as relações de sucessão e simultaneidade. Segundo ele:

“(...) para ordenar os acontecimentos de acordo com a sua sucessão temporal, é preciso poder remontar ou seguir o curso natural do tempo, ou seja: construir uma série $A \rightarrow B \rightarrow C...$ que tanto possa ser lida na ordem “A antes de B; B antes de C; etc.”, como na ordem “C depois de B; B depois de A”; e para construir essa série logicamente reversível, que exprime o curso fisicamente irreversível das coisas, é necessário, precisamente, que o pensamento seja suficientemente móvel para reconstituir, entre todas as ordens de sucessão possíveis, a única que reúna sem contradição todas as relações de “antes” e de “depois”, dadas entre os acontecimentos considerados.” (p. 33)

No entanto o tempo, nessa etapa, é pensado por meio de simples relações intuitivas e não por operações reversíveis. Somente com a reversibilidade operatória a criança seria capaz de desapegar-se de uma intuição irreversível do tempo (o próprio escoamento irreversível das coisas) e reconstituir uma seqüência de relações – reversíveis – de co-locações e co-deslocações. Essa correspondência serial é precisamente o esquema do tempo. Mas, ao longo da 2^a etapa, haveria somente um sucesso empírico ainda não fundado na capacidade operatória.

Na 3^a etapa, passa a existir a co-seriação operatória e uma mobilidade de pensamento, havendo uma “correspondência antecipada” entre as séries, ou seja, a criança antecipa uma correspondência *necessária* entre as posições, compreendendo a simultaneidade temporal. Um resumo dessas três etapas é apresentado por Piaget:

“Na etapa I a criança não consegue seriar os desenhos não recortados D nem os níveis I à parte nem II também à parte, porque ele não sabe ainda seriar espacialmente alturas, mas logo em seguida porque, sabendo, já, seriar estas, ele não as consegue ainda considerar em função de um mesmo movimento (abaixamento ou elevação da água). Na etapa II, o sujeito, graças a uma intuição articulada feita da evocação deste movimento único, juntamente com a seriação das alturas, consegue seriar sem erros os desenhos D [não recortados] e I ou II à parte, mas embora saiba muito bem efetuar uma dupla seriação quando se trata de grandezas puramente espaciais (por exemplo, bonecas e suas bengalas), ele fracassa na dupla seriação dos níveis por não ser capaz de pensar em termos de movimentos combinados, ou seja, de co-deslocamentos: as correspondências ou co-localizações não têm então para a criança uma significação temporal unívoca (simultaneidade). Na terceira etapa, enfim, a compreensão dos co-deslocamentos conduz à co-seriação correta e esta à construção das relações exatas de sucessão e simultaneidade.” (pp. 44-45)

Com relação à avaliação da duração dos intervalos, Piaget reencontra as mesmas três etapas. Na 1ª delas, a criança não atribui um significado preciso à noção de duração ou intervalo de tempo. Ela responde indiferentemente as questões, e não domina a relação inversa entre o tempo e a velocidade. Sua intuição permanece “imediate” ou “amorfa”, sendo correta somente na avaliação de um único movimento com velocidade uniforme, em que a duração de um trecho é considerada maior que a duração de qualquer subdivisão do mesmo. Para um só movimento dessa natureza, quanto maior o espaço percorrido, maior a duração, o que faz com que a criança transfira erroneamente essa relação quando estão em jogo velocidades diferentes. Nesse caso, ao atribuir uma “maior atividade” ao móvel mais rápido, que percorre uma distância maior, ela acaba por estabelecer a relação: mais depressa = mais tempo.

Na 2ª etapa, surge uma “intuição articulada”, havendo uma compreensão da relação inversa entre tempo e velocidade. No entanto, isso não garante a avaliação correta das durações. A criança é capaz de considerar duas durações sincrônicas (como de I_1 a I_2 e de II_1 a II_2) e, ainda assim, afirmar que a duração dos intervalos não é a mesma, pois velocidades diferentes estão envolvidas (mesmo compreendendo que a mesma quantidade de líquido esteja envolvida). Isso torna claro, mais uma vez, como o tempo seria uma coordenação progressiva de dois movimentos. Nesta etapa, não existe ainda um tempo homogêneo e uniforme, mas um tempo próprio para cada movimento, ainda não “agrupados” em um tempo único. Ainda não sendo capaz de igualar duas durações sincrônicas, a criança também falha quanto à possibilidade de igualar duas durações sucessivas, o que possibilitaria a constituição do tempo métrico. Piaget afirma novamente aqui que a imbricação (ainda que qualitativa) das durações implica a reversibilidade do pensamento, ainda não alcançada nesta etapa. Desse modo, o tempo permanece intuitivo, mas ligado à ação irreversível: “a intuição “realiza” o tempo, ao invés de construir a sua estrutura móvel” (p. 78).

A 3ª etapa caracteriza-se pela construção de um tempo único e métrico, a partir da coordenação da duração e da ordem de sucessão. A criança chega à igualdade das durações sincrônicas, e essa imbricação das durações torna possível uma métrica temporal. Para isso, deve haver a igualdade de durações sucessivas, o que implica a suposição da conservação do movimento e da sua velocidade, bem como um deslocamento, pelo pensamento, de uma unidade de tempo tornada móvel²⁹. Na experiência realizada, o “relógio” usado pela criança é o escoamento da própria água. Para Piaget, a grande diferença nesta etapa é a reversibilidade operatória do pensamento, que permite aos sujeitos não mais medir o tempo pelas alturas ou pelas velocidades, mas pelo seu aspecto genuíno de coordenação de movimentos com velocidades diferentes.

Consideradas as três etapas em seu conjunto, há uma interdependência crescente entre sucessão e duração, que faz com que a construção de uma se apóie na outra. Piaget salienta esse aspecto, que evidenciaria para ele a natureza operatória do esquema do tempo único.

Na segunda parte da obra, o autor procura *generalizar* suas conclusões, retomando a análise efetuada na primeira parte, mas *variando* as situações experimentais. Acreditamos não ser necessário realizarmos uma discussão desse material, uma vez que Piaget estabelece o mesmo conjunto de três etapas para caracterizar os resultados dos diversos experimentos, chegando essencialmente às mesmas conclusões³⁰.

Já na terceira e última parte, Piaget analisa o “tempo vivido”, primeiro por meio da noção de idade e, depois, pelo tempo da ação individual e a duração interior. A principal questão aqui é a da *estruturação do tempo psicológico*, que para o autor é *construído pela inteligência em total sintonia com a construção do tempo físico*. Em oposição à hipótese de uma “intuição imediata do tempo”, Piaget procura mostrar como a constituição de um tempo psicológico também passa por uma coordenação de movimentos, mas agora de movimentos do sujeito, e não de objetos do mundo exterior. Todavia, essa construção é solidária à do tempo físico, apoiando-se uma sobre a outra.

No que diz respeito à idade, há inicialmente uma visão essencialmente estática e descontínua por parte da criança, que confunde idade e crescimento: envelhecer é crescer. Assim, as idades independem da ordem dos nascimentos, e as diferenças de idade podem mudar com o tempo. A sucessão não se funda na duração, nem inversamente, em analogia com o que foi visto para o tempo físico. Dessa maneira, podemos compreender esse “tempo intuitivo”, que não distingue o próprio tempo de outros dados físicos ou espaciais, como o tamanho. Num segundo momento, há “intuições articuladas”, embora descoordenadas entre si, de modo que a criança acerta a ordem dos nascimentos, mas não conserva as diferenças de

idade, ou ao contrário. Na 3ª etapa, surgem a coordenação e uma necessidade lógica que funda um fato no outro.

Para Piaget, esses resultados apontam para o fato de que a noção de idade, longe de ser subjetiva, parte do exterior, vinculando-se inicialmente a aspectos do meio externo, como a estatura. Mais importante ainda é o fato de que sua construção é inteiramente paralela à do tempo físico. Assim como o tempo físico constituía-se enquanto coordenação de movimentos de velocidades diferentes, é somente com a coordenação das velocidades de crescimento que a criança torna-se capaz de separar a idade do tamanho.

Entrando mais propriamente na análise do tempo psicológico, Piaget defende que não há um “tempo interno” construído a priori e projetado nas coisas. O tempo interior é construído apoiando-se na construção do tempo exterior, e vice-versa. Trabalhando a partir da avaliação da duração de tarefas executadas mais ou menos rapidamente no mesmo tempo, Piaget verifica que, enquanto os mais jovens avaliam o tempo da ação própria em função dos resultados da atividade ou por sua velocidade (condutas realistas), os maiores conseguem corrigir parcialmente a ilusão, por meio da introspecção, avaliando o tempo na tomada de consciência das impressões vividas no momento da ação. Para o autor, o tempo psicológico seria uma “diferenciação interiorizada” do tempo físico, mas que obedeceria a mesma lógica constitutiva:

“Em suma, o desenvolvimento do tempo psicológico, (...) é ao mesmo tempo a réplica interiorizada e a explicação do tempo físico intuitivo e depois operatório: é a sua réplica, porquanto são as mesmas intuições e a seguir as mesmas operações que explicam os mesmos erros, explicando depois a mesma coerência; mas é também a explicação, porque é na medida em que o sujeito não consegue dissociar sua atividade própria das condições exteriores e dos resultados dela que ele permanece intuitivo, ao passo que a dupla construção operatória do tempo físico e do tempo psicológico resultará da reflexão simultânea sobre a ação própria e sobre as coisas.” (p. 276)

Embora não divida a constituição do tempo psicológico em três etapas, apontando inclusive a existência de uma maior continuidade entre o pensamento infantil e o adulto nesse caso, Piaget afirma que as múltiplas ações que se diferenciam e superpõem-se, com velocidades diferentes, complicam para o sujeito as questões relativas à duração e à sucessão. Dessa forma, as diversas “cadências” desses atos particulares tornaria o problema da constituição de um tempo interior análogo ao do tempo exterior:

“Em suma, o conjunto das realidades vividas é comparável ao espaço percorrido por um sistema complexo de movimentos físicos, sendo os ritmos ou cadências das seqüências particulares de ação análogos em suas velocidades. O problema do tempo psicológico se reduz então, como o do tempo físico, à coordenação dos movimentos e das suas velocidades, e, no presente caso, à das ações e das suas respectivas cadências.” (p. 290)

A ênfase de Piaget, ao longo de toda a discussão do tempo psicológico, é na afirmação da existência de uma construção interdependente e solidária com a do tempo físico (embora o primeiro não seja métrico). Sua intenção é a de negar a hipótese de que o tempo interior seja a “forma primitiva” do tempo, um dado a priori da consciência³¹. Ao contrário, busca estabelecer uma *rota genética* tanto para a constituição do tempo físico quanto para o tempo psicológico.

Nas conclusões de *A Noção de Tempo na Criança*, Piaget resume os principais resultados e chama-nos a atenção para a existência dessa rota, que se inicia nos primeiros meses de vida, no âmbito da inteligência sensório-motora. A evolução do tempo intuitivo ao tempo operatório é precedida por outra série de conquistas, que, para Piaget, asseguram a transição entre o perceptivo e o representativo. Para finalizar nossa discussão aqui, seria importante destacarmos brevemente uns poucos aspectos a esse respeito.

Nos primeiros dois anos de vida, o tempo começa por ser um tempo perceptivo, vinculado às ações do bebê e concebido em função delas. Desse modo, a procura por um objeto desaparecido (a mãe que se afasta do berço, por exemplo) recomeça no ponto em que ele foi visto pela primeira vez, estando a sucessão dos acontecimentos vinculada à sucessão das ações. As trajetórias e o espaço encontram-se centrados na própria ação, de maneira que o bebê tenciona reencontrar o objeto repetindo-a. A ordem temporal é então abolida ou invertida, havendo “séries subjetivas” (ou “egocêntricas”) ligadas a essa sucessão temporal, fundada na ação momentânea. O tempo é não-homogêneo, no sentido de que há um tempo próprio para cada ação. Aos poucos, por um processo de descentração perceptiva, os objetos começam a destacar-se da ação própria e imediata, e ganham autonomia permitindo a constituição de “séries objetivas”, que possibilitam estabelecer uma ordem correta de sucessão dos acontecimentos sobre os quais a ação incide.

Num grau superior de objetivação, a “inteligência intuitiva” que nasce com a linguagem superpõe o pensamento à ação (ao longo desse período – entre 1,5 e 4 anos aproximadamente – Piaget avalia como impraticável qualquer interrogatório, que pode, no entanto, ser substituído pela observação direta). Nessa fase, a criança refaz o que conquistou no plano sensório-motor, mas agora no plano representativo, onde a ação é prolongada por meio de “experiências mentais”. As dificuldades, que eram de ordem prática, passam para o terreno dos signos. As “centrações” da criança dar-se-ão não mais na própria ação, mas na tomada de consciência da mesma. As sucessões e durações temporais ficam então à mercê da ordem de sucessão espacial, das velocidades, do esforço envolvido etc, ou seja, da

“cinemática primitiva” da criança. Reencontramos assim o ponto de partida do tempo intuitivo característico dos sujeitos da 1ª etapa, conforme descrita anteriormente³².

Muito embora o que tenha sido dito nos dois últimos parágrafos seja, sem dúvida, excessivamente sintético para permitir uma compreensão plena do ponto de vista piagetiano, nossa intenção aqui é somente a de finalizar essa discussão acerca da construção da noção de tempo para Piaget sugerindo uma rota genética. Tal construção não se encontra, portanto, restrita a um período particular do desenvolvimento infantil, e representa um esforço de objetivação e de superação gradativa de diferentes níveis de egocentrismo.

Outros trabalhos de interesse

Muito poucos estudos são encontrados, na área de pesquisa em ensino de ciências, versando sobre o conceito de tempo, como dissemos na introdução desta seção. Descreveremos abaixo aqueles que consideramos relevantes em nossa revisão.

A principal referência relacionada às concepções de estudantes sobre o conceito de tempo é Proverbio & Lai (1989). Para os autores – que apresentam aspectos da visão de Piaget na introdução – a base da “informação temporal elementar” é a percepção (qualitativa) da mutabilidade de eventos externos. O processo de construção do conceito de “tempo físico” (entendido por eles no seu significado newtoniano) estaria associado a uma reconstrução intelectual de algumas características significativas da estrutura interna da maior parte dos eventos percebidos, a saber: mutabilidade e movimento.

Na opinião dos autores, essa “informação básica” associada à temporalidade (a percepção da mutabilidade) é a raiz da explicação do duplo significado que a palavra latina ‘tempus’ tem em muitas línguas modernas: “tempo” e “clima” (esse é o caso do Italiano – citado pelos autores – e também do Português. Não é o caso do Inglês, que tem ‘time’ e ‘weather’). Isso porque, na origem do conceito abstrato de tempo físico (o “tempo”), estaria a percepção da mutabilidade e variabilidade de grandes fenômenos naturais (o “clima”). Sendo assim, seria natural que, no caminho da elaboração de um conceito cada vez mais abstrato de tempo, independente das ações do sujeito ou de fenômenos percebidos por ele, as crianças mais novas estabelecessem uma maior conexão entre “tempo físico” e “tempo meteorológico” (ou “clima”).

É isso que os autores ressaltam, relatando um estudo com crianças de 7 a 11 anos de idade, realizado na Itália. A partir de discussões coletivas livres e de desenhos feitos pelas crianças, tendo como motivação inicial a pergunta “o que é o tempo?”, Proverbio e Lai

dividem o material obtido em três grandes grupos: (A) clima; (B) tempo físico; e (C) clima / tempo físico. O primeiro contempla desenhos ou expressões verbais que retratam situações atmosféricas, tais como: “bom tempo”. O segundo refere-se à percepção de mudanças contínuas ou descontínuas, associadas à idéia qualitativa de “passagem do tempo”. Pode ser subdividido em seis categorias: (i) *tempo como ação*, em que o tempo é uma condição da experiência (“se não houvesse tempo, não poderíamos fazer nada”); (ii) *tempo psicológico*, percebido como um estado de consciência (“quando eu brinco o tempo voa”); (iii) *tempo objetivo*, independente das ações do sujeito (“o tempo quando as castanhas estão maduras”); (iv) *tempo histórico*, com evocação de eventos para representar a passagem do tempo; (v) *tempo cronológico*, vinculado à ordem de sucessão de eventos (“de manhã você pode dizer se o tempo está ruim”); (vi) *tempo associado com fenômenos naturais e astronômicos*, como a passagem da juventude à idade adulta, ou do verão ao inverno. O terceiro grande grupo (C) corresponderia a um nível de formalização intermediária. Nele, haveria um compartilhamento de características semânticas e estruturais entre “clima” (A) e “tempo físico” (B). Exemplos do material agrupado nessa categoria seriam frases como: “é inverno, mas a primavera chegará logo”, ou “o tempo está passando hoje, mas ainda é inverno” (os autores ainda falam – em separado – de uma última categoria relacionada ao tempo físico: *medidas de tempo*, associada a expressões como “o tempo é as horas, as horas que passam”).

Os autores buscam apontar como, com a idade, há uma tendência ao aparecimento de frases do segundo grupo (B) em detrimento de frases pertencentes aos grupos A ou C. Na realidade, defendem que na origem do conceito de tempo encontram-se tanto as ações do próprio sujeito quanto a percepção elementar da mudança, particularmente associada aos fenômenos climáticos. Gradativamente, haveria uma formalização de um número cada vez maior de “modelos temporais” diferenciados. A indiferenciação inicial entre “tempo físico” e “clima” daria lugar a uma diferenciação progressiva, com os eventos meteorológicos tornando-se menos “concretos”, e a “essência” dessas mudanças fundamentando modelos de “tempo físico”.

Embora os dados apresentados no estudo não pareçam sustentar solidamente as conclusões a que chegam os autores (diferentes técnicas foram usadas com diferentes turmas, e o aumento de respostas do grupo B não é tão expressivo), consideramos interessante as categorias de análise estabelecidas por eles, assim como a proposta da existência de uma “informação temporal elementar” associada à idéia de mudança. O duplo significado da palavra ‘tempo’ é outro aspecto a destacar. Quanto a isso, apesar de acreditarmos também que

esse duplo significado não é casual, esse fato não parece lançar muita luz (ao menos não tanto quanto pretendem os autores) sobre o processo de construção do conceito de tempo físico.

Veremos adiante de que modo nosso próprio estudo empírico aproximou-se ou afastou-se das categorias estabelecidas por Proverbio e Lai, encontrou questões semelhantes às deles, e lidou com elas.

Outra referência de interesse para nós é Mariani & Ogborn (1991). Fundamentados na epistemologia piagetiana, os autores visam estabelecer uma “ontologia básica” para o raciocínio de senso comum em estudantes secundários brasileiros. Partem da idéia de que a *ação* é a base sobre a qual a estrutura da realidade é construída, e de que dela derivam as categorias ontológicas fundamentais de causa, objeto, tempo e espaço, formando um todo interligado. Essas categorias foram utilizadas na elaboração de um questionário, cujo objetivo era associar nove entidades (conceitos) a um conjunto de “características ontológicas” básicas, divididas em três grandes grupos: (a) “com o que uma coisa se parece” (é como um tipo de gás? tem existência real? etc.); (b) “o que ela pode fazer” (agir por contato? destruir coisas? etc.); e (c) “o que pode ser feito a ela” (tocá-la? transformá-la? etc.). Os conceitos escolhidos foram: matéria, energia, tempo, espaço, movimento, calor, luz, som e força.

Para situar melhor cada um desses conceitos com referência às características ontológicas básicas, Mariani e Ogborn constróem um “espaço ontológico fundamental” de quatro dimensões. A primeira dimensão é o binômio estático-dinâmico, a segunda é a polaridade localizado (num lugar)-“tipo lugar” (espalhado), a terceira é a díade discreto-contínuo, e a quarta causa-movimento (efeito). Para cada uma das nove entidades foram “plotadas”, nesse espaço, as características ontológicas básicas que obtiveram maior índice de correlação, numa análise estatística. Torna-se então “visível” em que região desse espaço ontológico (e, portanto, com quais características nesse nível) podemos situar cada conceito.

O que nos importa nesse momento é de que forma o *tempo* aparece nesse trabalho. Por um lado, ele surge como *categoria ontológica fundamental*, a partir da qual, juntamente com o espaço, o objeto e a causalidade, é possível formular o conjunto de características ontológicas básicas do questionário e também construir as dimensões do espaço ontológico. Por outro, surge como *conceito* (ou entidade) que pode ser explorado junto aos estudantes e “plotado” nesse mesmo espaço ontológico, associado a determinadas características ontológicas.

Como o enfoque do trabalho não é o conceito de tempo, há pouco a esse respeito na discussão dos resultados. Os autores afirmam que o tempo compartilha com o espaço a propriedade de ser um “lugar” (aspecto da segunda dimensão do espaço ontológico), porém

tem uma natureza mais “dinâmica” (primeira dimensão). Apresenta as características de “causa” (quarta dimensão), sendo uma espécie de “lugar que pode efetuar mudanças”. É ao mesmo tempo discreto e contínuo (terceira dimensão). O tempo ainda aparece como algo imaterial e imaginário (“na mente”). Embora essas últimas também sejam características associadas ao espaço, o tempo é visto como mais imaginário, talvez porque em algum sentido pareça ser possível aos estudantes “ver” o espaço.

Ao final, os autores sugerem que existam dois substratos básicos, a partir dos quais as entidades são construídas: podemos vê-las como *substância*, combinando a permanência dos objetos e a continuidade do espaço, numa existência contínua; ou como *atividade*, combinando as propriedades causais da ação e o efeito visível do movimento, o que se relaciona à contingência e mudança, ao que poderia ser de outra forma (p. 83). Haveria uma permanente tensão entre *atividade* e *substancialidade*, entre o que se conserva o mesmo e o que faz as coisas mudarem. Essa tensão seria irreduzível, se o que permanece o mesmo acaba por ser aquilo que a ação não pôde tornar diferente (p. 85).

Consideramos oportuna a utilização desse “nível ontológico” para compreendermos o pensamento dos estudantes. Veremos que algumas das características ontológicas associadas ao tempo também estão presentes em nossos dados.

Valeria a pena citar também os estudos de Pedrinaci (1993) e Trend (1998) acerca da compreensão do complexo conceito de tempo geológico. Embora mais preocupados com o ensino da geologia, esses trabalhos apresentam alguns pontos de contato com o nosso tema. Trend (1998) relata a dificuldade enfrentada por crianças de 10 a 11 anos de idade, no Reino Unido, em lidar com o conceito de “tempo profundo”, ou seja, com os grandes intervalos de tempo associados a eventos geológicos e à formação do universo. O autor mostra como as crianças enfrentam problemas em situar tais eventos numa ordem cronológica correta (embora sejam capazes de seriar eventos históricos mais recentes e familiares), separando-os grosseiramente em dois grupos: os “extremamente antigos” e os “menos antigos”. No primeiro grupo, entram eventos relacionados à formação das estrelas, planetas etc, enquanto no segundo estão os eventos relacionados a mudanças que afetam esses corpos. O estudo também é interessante ao mostrar a forma com que as crianças avaliam os intervalos de tempo diante de certas questões (citam de modo quase aleatório cifras enormes na tentativa de caracterizar “imensos intervalos de tempo”), e ainda ao evidenciar certos tipos de concepções espontâneas sobre eventos (o “Big Bang” é visto como “um asteróide que se chocou com a Terra e matou os dinossauros”; e a “era do gelo” é “um clima frio que matou os dinossauros”, por exemplo).

Já Pedrinaci (1993) realiza um estudo teórico, evidenciando que a construção histórica do conceito de tempo geológico foi marcada por uma série de obstáculos, sendo alguns deles enfrentados por estudantes no processo de desenvolvimento dessa noção. Utiliza a idéia de *obstáculo epistemológico* (de Bachelard) para caracterizar essas dificuldades históricas, cujas principais seriam: a visão estática da Terra, o criacionismo, a visão teleológica e o antropocentrismo. Haveria ainda outras dificuldades conceituais e procedimentais “objetivas” (não seriam obstáculos epistemológicos, no sentido bachelardiano), tais como: dificuldade de representar cifras de grande magnitude, lentidão (na escala temporal humana) dos processos geológicos, a dificuldade/impossibilidade de reproduzi-los em laboratório, entre outros.

O importante, para nós, é apontar a intersecção entre os resultados desses dois trabalhos e a construção do conceito de tempo físico. Ou seja, verificarmos em que medida podem estar presentes, em nossos dados, elementos levantados pelos autores na análise da construção do conceito de tempo geológico.

Finalizando este tópico, gostaríamos de lembrar o que foi afirmado na introdução dessa seção: que certas discussões sobre o conceito de tempo surgem no contexto de outros estudos da pesquisa em ensino, voltados à teoria da relatividade ou à mecânica newtoniana, por exemplo. Esse é o caso de Villani & Pacca (1987 e 1990), que trabalharam, junto a estudantes graduados, problemas envolvendo a velocidade da luz (contexto relativístico) e a teoria de colisões (contexto newtoniano). Os autores identificam a existência de certos “modos gerais de raciocínio dos estudantes” (aproximadamente independentes do contexto), a saber: tendência a interpretar as noções fundamentais do movimento como absolutas; simplificação do problema na busca de uma única variável significativa; aplicação de uma fórmula conhecida sem interpretação correta do problema; e uso de um “raciocínio por compensação”, em que o estudante pressupõe antecipadamente uma espécie de “compensação” total ou parcial dos efeitos.

No que diz respeito propriamente ao tempo, os problemas envolvendo a velocidade da luz evidenciam uma visão “absoluta”, tanto do movimento em si quanto dos efeitos relativísticos. Há sempre um observador privilegiado, para o qual o efeito é “real” e não “aparente”. O “tempo real” de um fenômeno é visto, muitas vezes, como um desses absolutos, intrínseco ao movimento e independente do observador. Assim, intervalos de tempo até podem variar entre diferentes observadores, mas sempre há um deles que vê o “tempo real” do fenômeno. Os resultados também mostram que, embora muitos respondam de forma coerente com a teoria da relatividade, as *justificativas* de suas respostas são menos consistentes com essa teoria.

Uma das conclusões dos autores é que noções espontâneas continuam sendo utilizadas por estudantes graduados, mas não devido a qualquer ausência de habilidades matemáticas (a “compreensão formal” da dilatação do tempo não implica a interpretação correta das situações problemáticas colocadas). Além disso, apesar do ensino da teoria da relatividade especial pressupor que o estudante tenha compreendido a relatividade galileana, isso não parece ser verdadeiro. Isso porque a tendência à atribuição de noções absolutas ao movimento contraria a essência do próprio ponto de vista galileano, ou seja, sua incompatibilidade com a noção de um sistema de referência ou um movimento absolutos.

Curiosamente, é essa mesma incompreensão da relatividade galileana que leva certos estudantes a negar a invariância temporal da física clássica, assumindo agora uma diferença nos intervalos de tempo medidos por observadores em movimento relativo, justamente quando esses intervalos teriam um valor absoluto! É o que mostra o estudo de Ramadas et al. (1996) acerca de concepções alternativas sobre distância, tempo, energia e leis, no contexto da problemas cinemáticos não-relativísticos (por exemplo: uma pessoa que nada numa piscina de um navio em movimento, ou que se desloque sobre um vagão de um trem em movimento).

Lidando com estudantes indianos de graduação em física, os autores mostram que os sujeitos, mesmo admitindo *implicitamente* a existência de um tempo absoluto entre referenciais que se deslocam com velocidade constante, um em relação ao outro, não compreendem essa invariância temporal como um axioma da relatividade galileana. Na resolução de problemas, tentam muitas vezes “provar” essa invariância ao invés de assumi-la, e, quando um erro de cálculo a viola *explicitamente*, raramente percebem a contradição. Em outras situações, os estudantes acabam negando o tempo absoluto ao pressupor a invariância da distância percorrida.

O percentual de estudantes que lida corretamente com a invariância temporal é apontado pelos autores como surpreendentemente pequeno (32% em duas das situações consideradas), se levarmos em conta que a noção de um tempo único e comum é tratada, em geral, como intuitivamente óbvia. Outra conclusão interessante vem da análise das situações que envolvem para o aluno a idéia de “arrasto”: o nadador esforça-se mais para mover-se, ao longo de uma certa distância, contra o sentido de movimento do “meio” (o navio, o rio etc.) do que a seu favor, o que implica em mais tempo num sentido do que no outro (reencontramos aqui a idéia de que “mais esforço = mais tempo”, que havíamos visto com os estudos de Piaget). Os autores também relatam o uso de referenciais privilegiados pelos estudantes, na tentativa de separar o “real” do “aparente” (a pessoa no vagão “sabe” que ela é quem está em movimento...), mostrando o compromisso com pontos de vista absolutos.

Esses últimos trabalhos evidenciam as dificuldades enfrentadas por estudantes na tentativa de compreensão tanto da relatividade galileana quanto da teoria da relatividade especial. As complicações que surgem quando é necessário lidar com diferentes sistemas de referência, seja do ponto de vista clássico ou relativístico, fazem brotar concepções sobre o tempo incompatíveis com a visão científica. Vemos que, em ambos os contextos, a questão temporal encontra-se imbricada com outros conceitos (principalmente velocidade e deslocamento).

2.3.) O conceito de tempo em seu progresso epistemológico: uma visão

As seções anteriores deste capítulo, ainda que breves e fragmentárias diante da vastidão de trabalhos sobre o conceito de tempo, fornecem-nos elementos suficientes para uma análise ampla da questão da temporalidade. No entanto, para que possamos realizar uma tentativa de caracterização das diferentes regiões da hierarquia de escolas filosóficas bachelardianas para o tempo – objetivo desta seção – precisamos ter cautela.

Elementos e possibilidades para uma análise

Alguns cuidados são necessários. Em primeiro lugar, devemos evitar qualquer simplificação demasiada principalmente do material histórico-filosófico, como por exemplo uma leitura estritamente linear das concepções sobre o tempo, como se o posterior (cronologicamente pensado) fosse sempre o mais avançado (epistemologicamente). Embora possamos estabelecer um grande paralelismo entre as concepções históricas e uma visão de progresso epistemológico (e o faremos), isso não pode ser tomado strictu sensu. Esse aspecto, para o qual já havíamos chamado a atenção no final do capítulo anterior, é particularmente significativo no que diz respeito ao tempo, talvez pelo seu caráter peculiar de “conceito elementar” (ou “categoria ontológica fundamental”).

Em nosso estudo, deparamo-nos muitas vezes com concepções muito antigas que compartilham traços essenciais com visões mais recentes, e com formulações de certos pensadores que, pela sua complexidade, apresentam elementos absolutamente pertinentes ao debate atual – científico e filosófico – sobre a temporalidade. Claro que isso pode ser atribuído ao *nosso olhar*, ou seja, a uma visão do passado *a partir* do presente. Mas é como se, com relação a esse conceito, vez por outra encontrássemos concepções semelhantes em um

novo contexto, numa espécie de “tempo cíclico” no qual idéias sempre retornam. O trecho a seguir ilustra o que queremos dizer:

“(…) o tempo não existe por si: é dos próprios acontecimentos que vem o sentimento do que se deu no passado, depois do que é presente, em seguida do que há de vir; na realidade, ninguém tem idéia do tempo em si próprio, separado do movimento das coisas e do seu plácido repouso.”

A quem atribuí-lo? A Leibniz? Mach? Pois a citação foi extraída da obra *Da Natureza* (1980, p. 37), de autoria do poeta Lucrécio (98-55 a.C.).

Em segundo lugar, é preciso deixar claro que pretendemos estabelecer, para o conceito de tempo, *uma visão particular* de seu progresso epistemológico. Em outras palavras, não se trata de uma análise filosófica, que tencione apresentar “o” progresso epistemológico desse conceito. Outros certamente serão capazes de diferentes seleções de autores e referências, diferentes leituras e interpretações de materiais, e de conclusões alternativas à nossa, sobre a pertinência e a caracterização de tal evolução filosófica.

Em nosso caminho para a introdução de uma visão desse progresso, acreditamos ser importante uma espécie de “visão de conjunto”, algo que estruture minimamente o que parece um conjunto de concepções desconectadas entre si. Pereira Jr. (1997), embora não preocupado diretamente com essa questão, oferece-nos uma análise interessante. Separa o *próprio tempo* dos *processos temporais* (aquilo que ocorre no tempo), e afirma que existiriam três concepções filosóficas sobre o tempo: *absolutista*, *relacionista* e *cognitivista*. Na visão absolutista, o tempo teria uma existência objetiva, sendo suas propriedades independentes das propriedades dos processos temporais, mas podendo eventualmente influenciá-las. Para os relacionistas, as propriedades do tempo seriam as mesmas dos processos temporais, ou seriam construídas por um agente cognitivo em função das propriedades dos processos temporais. Já os cognitivistas defenderiam a existência a priori das propriedades do tempo em um agente cognitivo, como organizadoras de suas representações do mundo.

A nosso ver poderíamos – grosso modo – eleger Newton, Mach e Kant como representantes legítimos dessas três escolas, respectivamente. Mas essa “visão de conjunto”, sintética, a posteriori, interessante do ponto de vista estrutural, carece de um sentido evolutivo do ponto de vista epistemológico. Um enfoque diferente pode ser encontrado na obra *O Problema do Tempo* (1969), de I. F. Askin. Para esse autor, a evolução filosófica do conceito de tempo pode ser compreendida a partir da polaridade entre o idealismo e o materialismo. De uma perspectiva materialista dialética, a ciência moderna seria capaz de estabelecer a realidade objetiva do tempo, refutando concepções idealistas subjetivistas (como a de Kant), irracionistas (como a de Bergson), e neo-positivistas ou instrumentalistas (como certas

interpretações da teoria da relatividade). De certo modo, Askin aponta para uma superação da subjetividade em favor de um conceito objetivo de tempo, fundando sua argumentação em resultados do próprio desenvolvimento das ciências naturais³³. Embora Bachelard não se coloque num dos extremos daquela polaridade, como vimos, essa abordagem de Askin tem pontos de contato com suas idéias, ao estabelecer uma evolução no sentido da objetivação.

As “visões de conjunto” oferecidas tanto por Pereira Jr. quanto por Askin são úteis na medida em que nos auxiliam a estruturar nosso pensamento sobre as diferentes concepções. Ambas apontam para diferenças ontológicas e epistemológicas na maneira de se conceber o tempo, representando possibilidades de análise do conjunto de concepções. Por seu turno, subjacente à noção bachelardiana de *hierarquia* de escolas filosóficas encontra-se também uma “visão de conjunto”, porém de caráter mais geral. O progresso epistemológico proposto por Bachelard vale para cada noção em particular e não apenas para o tempo. A “visão de conjunto” que nos é oferecida é a de uma evolução no sentido de uma maior coerência racional, de um racionalismo crescente que supera e alarga conhecimentos anteriores. Assim sendo, *nosso próprio referencial teórico* no campo epistemológico fornece-nos os elementos para a estruturação e organização do conjunto de concepções sobre o tempo e, por sua própria natureza, garante uma visão do progresso epistemológico dessa noção.

A importância do que foi dito reside na afirmação de que nossa caracterização das diferentes regiões da hierarquia de escolas filosóficas bachelardianas a partir do material estudado funda-se nessa “visão de conjunto”, e ao mesmo tempo a recupera. É, portanto, com esse olhar que pretendemos dialogar com as seções precedentes, tendo claro que o referencial bachelardiano fornece uma possibilidade de análise, dentre outras possíveis.

Estruturando a hierarquia

Passemos à caracterização das diferentes regiões da hierarquia de escolas filosóficas propostas por Gaston Bachelard em sua concepção do progresso epistemológico dos conceitos científicos.

Como Bachelard o fez para os conceitos de massa e energia em *A Filosofia do Não*, consideraremos aqui uma hierarquia de quatro escolas (ou regiões): Realismo Ingênuo; Empirismo; Racionalismo Tradicional; e Surracionalismo (composto pelo Racionalismo Complexo e Racionalismo Dialético).

Apresentamos a seguir as características centrais de cada escola, da maneira como as concebemos:

Realismo Ingênuo:

Sob esta denominação estaremos associando uma noção de tempo essencialmente carregada de subjetividade e marcada pelo egocentrismo.

Do ponto de vista de sua construção psicológica, como vimos nos estudos de Piaget, o tempo, antes de objetivar-se e tornar-se efetivamente uma “coordenação de movimentos com velocidades diferentes”, é marcado por uma série de “centrações” indevidas por parte do sujeito. Dessa forma, tanto do ponto de vista do tempo psicológico como do tempo físico, o sujeito associa indevidamente o tempo a outras variáveis, tais como: o esforço físico (quanto maior o esforço para a realização de uma atividade, mais tempo passa) ou a distância (um objeto que percorre uma distância maior do que outro leva necessariamente mais tempo para fazê-lo). A existência dessas “centrações” leva a um tempo *heterogêneo*, porquanto não aplicável a todos os objetos e movimentos. A não existência de um tempo comum a todos eles (e, nesse sentido, objetivo) é uma característica marcante do que caracterizamos como um *pensamento realista* relativamente ao tempo.

Para nós, que lidaremos com alunos de idades superiores às estudadas por Piaget (e portanto capazes – em princípio – da reversibilidade operatória e da construção de um tempo objetivo), o realismo ingênuo também será caracterizado por uma idéia de que a passagem do tempo depende (varia) de indivíduo para indivíduo, ou seja, justamente pela atribuição de “realidade” a uma “sensação” de natureza subjetiva (ou “centração” psicológica). Sob essa ótica não há, novamente, um tempo objetivo e comum a todos os sujeitos, não sendo o tempo uma “realidade em si” e, muito menos, um parâmetro matemático abstrato. Conseqüentemente, também não há uma medida do tempo unívoca e claramente determinada por qualquer aparelho. O tempo permanece essencialmente heterogêneo, qualitativo e, por isso mesmo, perde sua objetivação.

Podemos ainda considerar dentro desta categoria a idéia da necessidade da presença de um indivíduo para que haja a “contagem” do tempo. Assim, o conceito de tempo parece vincular-se a uma espécie de “animismo”, não no sentido de atribuir-se “vida” ao tempo, mas no da vinculação da realidade ontológica do tempo a um espírito que o marque. Obviamente não nos referimos aqui a esse indivíduo como o criador de um aparelho de medida, ou à noção cognitivista do tempo como um *a priori* da consciência, mas à concepção de que a própria existência do tempo depende da presença de um ser que a perceba. O pensamento realista deixaria levar-se, desse modo, por outros subterfúgios da subjetividade.

Empirismo:

O estabelecimento de um “empirismo claro” pressupõe a superação do pensamento realista, em que o tempo heterogêneo impede a atribuição de um tempo único e comum a todos os objetos e movimentos. Além disso, o tempo já não é apenas qualitativo, mas quantitativo. A construção psicológica do tempo evidenciou, como vimos em Piaget, que a objetivação do tempo (qualitativo) é conquistada concomitantemente ao “tempo métrico”, ou seja, somente com a compreensão da existência de um tempo comum a relógios e ações a cronometrar é que a métrica temporal torna-se possível.

Para o *pensamento empírico*, o tempo – comum e objetivo – é uma quantidade mensurável, passível de marcação ou medição de modo unívoco, o que implica a existência de um aparelho de medida que, ao mesmo tempo, marque e defina essa grandeza. Esse aparelho pode ser mais ou menos preciso, mais ou menos “moderno” (relógio de Sol, clepsidra, ampulheta, relógio atômico etc.), mas sempre procurará medir um tempo compreendido como objetivo, comum a todos os indivíduos. Sabemos algo sobre esse tempo objetivo, medindo-o. Da mesma maneira que Bachelard atribui uma “conduta da balança” para o caso da massa, poderíamos talvez afirmar que há uma “conduta do relógio”. Isso porque, para o empirista, o tempo reduz-se aos procedimentos de sua medição.

Quanto aos fenômenos e aparelhos que podem ser usados na marcação do tempo, há certamente grande diversidade. No entanto, se pensarmos em relógios baseados em um movimento contínuo e uniforme (tipo clepsidra) ou em um movimento periódico (tipo pêndulo), há sempre a suposição da constância da velocidade do relógio. Como vimos, a diferença entre eles reside, basicamente, na existência a priori de uma unidade que pode ser repetida (o período do pêndulo, no caso dos últimos), ou na necessidade de imposição dessa unidade (métrica) por meio de uma marcação arbitrária (níveis da água, no caso dos primeiros). Daí que, embora não sejam imprescindíveis fenômenos periódicos para a construção de relógios, uma idéia de *repetição* esteja sempre presente, impondo-se de certo modo pela métrica.

Apesar de podermos pensar o tempo, nesse estágio, como linear, contínuo e homogêneo, tais “propriedades” não se encontram vinculadas a uma perspectiva de conjunto, a um ideal teórico. No empirismo, tal como o concebemos, o tempo ainda não se insere num corpo de conhecimentos articulado.

Racionalismo Tradicional:

Indo além da medida objetiva, chamaremos de *racionalista* o conceito de tempo que se insere num corpo de conhecimentos. A mecânica clássica é o paradigma do qual participa esse tempo racionalista, cujas propriedades adquirem sentido no interior da perspectiva teórica de conjunto oferecida por essa teoria. Assim, a homogeneidade do tempo não é algo “isolado”, mas imbricado teoricamente com a conservação da energia, ou seja, é uma *simetria* que se reflete numa *lei* ou *princípio*. Como vimos, o tempo da mecânica compõe com o espaço o “palco” no qual os fenômenos irão ocorrer, sendo independente do referencial (portanto, absoluto) e da matéria.

O tempo surge então, nesse estágio, como um verdadeiro *parâmetro matemático abstrato*, que participa das equações mecânicas e permanece inalterado por uma mudança de coordenadas entre dois sistemas inerciais de referência. Se o empirismo já considerava o tempo objetivo e comum a todos, não o fazia na mesma perspectiva – formal e teórica – das “transformações de Galileu”, em que, por trás da ingenuidade aparente de $t=t'$, encontramos a afirmação da invariância das leis mecânicas e do caráter absoluto da simultaneidade. Se o “tempo do relógio” é o mesmo para todos, agora há *razões* para isso.

Conquistado e superado (alargado) o empirismo, reencontramos o tempo com outro status ontológico: ele passa a ter uma “existência em si”, é algo absoluto e que (no próprio dizer de Newton) independe de qualquer coisa externa. Dessa forma, podemos distinguir esse tempo de sua medida aproximada (que Newton chama de “tempo relativo” nos *Principia*...). O relógio já não define o tempo, apenas o marca. A separação entre *tempo* e *medida do tempo* é uma característica marcante do *pensamento racionalista* com referência a esse conceito.

Surracionalismo:

O racionalismo que se alarga e se dialetiza acaba retificando e transformando o conceito de tempo moldado pelo racionalismo tradicional. O conceito surracionalista de tempo seria extraído da física mais avançada.

Por um lado, a teoria da relatividade especial irá negar o tempo absoluto newtoniano, estabelecendo que o transcorrer do tempo depende do referencial adotado. As leituras dos relógios dependem essencialmente da velocidade relativa entre referenciais inerciais (em substituição às “transformações de Galileu”, temos agora as “transformações de Lorentz”), como vimos. A simultaneidade também não é mais absoluta, e o tempo compõe com o espaço

uma nova entidade: o espaço-tempo quadridimensional. E do ponto de vista da relatividade geral, a geometria desse espaço-tempo é afetada pela presença de matéria, o que faz o transcorrer do tempo depender da intensidade do campo gravitacional.

Por outro lado, a termodinâmica e a mecânica estatística também contribuem para a retificação (no sentido mesmo bachelardiano) do conceito racionalista tradicional de tempo, oferecendo uma abordagem explicativa, de natureza probabilística, para a existência de um sentido preferencial para o transcorrer do tempo (irreversibilidade). Se essa anisotropia temporal era restrita a uma “constatação sem explicação” nos estágios anteriores, agora ela é um *resultado* (oriundo da mesma coerência racional que uniu a mecânica à termodinâmica, fundando a mecânica estatística).

Embora haja uma clara *ruptura* com o conceito racionalista de tempo, do ponto de vista filosófico, as novas características e propriedades do tempo surracional proporcionam verdadeira generalização da noção anterior, do ponto de vista estritamente lógico-matemático. As “transformações de Lorentz” reduzem-se às “transformações de Galileu” para $V \ll c$, fazendo com que o ponto de vista relativístico seja mais amplo e geral. A explicação para a irreversibilidade temporal também a insere num contexto mais amplo, como possibilidade mais provável para a evolução dos sistemas, porém não única.

Ontologicamente, o tempo (objetivo) absoluto foi superado em favor da idéia de um tempo relativo. Deixa de ter sentido pensarmos na existência do tempo independentemente da matéria do universo.

Uma vez que os sujeitos de nossa pesquisa dificilmente manifestam visões que contenham aspectos do conceito surracionalista de tempo, não nos preocuparemos aqui em diferenciar o racionalismo complexo do racionalismo dialético. Além disso, muitas questões relativas ao tempo permanecem em aberto ainda hoje, o que tornaria essa possível diferenciação ainda mais difícil e controversa³⁴.

Sobre evolução, epistemologia, ontologia e obstáculos: breves comentários

A caracterização das escolas filosóficas bachelardianas, realizada acima, representa o nosso compromisso com uma visão do progresso epistemológico da conceitualização do tempo. Para finalizar este capítulo, gostaríamos de tecer alguns comentários sobre certos pontos, a saber: (i) a natureza do paralelismo entre esse progresso epistemológico e a evolução histórico-filosófica do conceito de tempo, por um lado, e a sua construção

psicológica, por outro; (ii) a possibilidade ou não de considerarmos um progresso no plano ontológico; e (iii) a questão dos obstáculos epistemológicos envolvidos. Iniciemos por (i).

Conforme dissemos anteriormente, embora haja um grande paralelismo entre nossa hierarquia e o material histórico, ele não pode ser tomado *strictu sensu*. As concepções que apresentamos de pensadores da Antigüidade não se resumem a um pensamento do tipo realista. Pelo contrário, encontramos em Aristóteles, por exemplo, a preocupação de considerar o movimento celeste como passível de ser utilizado para uma medida perfeita do tempo, o que mostra a compreensão da necessidade de um movimento uniforme ou periódico para a marcação do tempo, característica que associamos a um empirismo. Além disso, Aristóteles estabelece propriedades para o tempo, como a continuidade e infinitude, o que evidencia, a nosso ver, um pensamento que se aproxima do racionalismo tradicional. Porém, a concepção aristotélica também tem laços estreitos com o pensamento realista, principalmente quando vincula a existência do tempo à presença de um espírito que possa contar. Sendo o tempo o “número do movimento com relação ao antes e depois”, há a necessidade de uma “alma que numere”, sem a qual o tempo não existiria.

O mesmo valeria para outras concepções de outros pensadores. Em Santo Agostinho, o tempo ganha objetividade ao ser desvinculado do movimento astronômico, mas permanece no terreno realista dada a determinação de sua medida pelo espírito humano.

O que queremos dizer, resgatando Aristóteles e Santo Agostinho, é que as concepções histórico-filosóficas sobre a temporalidade têm uma complexidade tal que dificilmente conseguiríamos “encaixá-las”, uma a uma, sob os rótulos de “realista”, “empirista” etc. Dito de outra maneira, poderíamos quem sabe até construir os *perfis epistemológicos* dos diferentes pensadores, não permanecendo eles limitados a uma única escola filosófica. Embora não seja essa nossa intenção, acreditamos que uma descrição dessa natureza, se realizada, mostraria um aumento gradativo da “intensidade de presença” das regiões mais avançadas da hierarquia, em conformidade com o avanço cronológico (grosso modo).

Tanto a evolução histórico-filosófica quanto a hierarquia de escolas bachelardianas representam um progresso no sentido da *objetivação* e de um *racionalismo crescente* com relação ao tempo. Em outras palavras: essa é a natureza do paralelismo entre ambas, em nosso entendimento. Assim é que, como analisamos pormenorizadamente em outra oportunidade (Martins & Zanetic, 2002b), a superação da cosmologia aristotélica pela nova mecânica, no Renascimento, representou uma transformação na inserção do tempo no estudo dos movimentos. De um mero coadjuvante do espaço e da matéria, o tempo passou a protagonista de uma mecânica matematizada. É patente a distinção entre a “alma que numera” de

Aristóteles (solidária de um pensamento realista) e a preocupação de Galileu em estabelecer e descrever uma medida clara do tempo em suas experiências, um instrumento de medição (característica de um empirismo).

A subjetividade que vimos estar presente nas concepções de Aristóteles e Santo Agostinho, no sentido de vincular a experiência do tempo a um espírito que o meça, desaparece com a perspectiva galileana e, mais ainda, com Newton e Descartes, que separam o tempo de sua medida. O movimento histórico-filosófico é o da objetivação, que chega a ser “extrema” no caso newtoniano, em que se atribui uma realidade ontológica ao tempo absoluto. Da mesma forma, em nossa caracterização, o progresso ocorre a partir de um tempo atrelado à experiência individual e subjetiva em direção a um tempo comum e objetivo. E esse caminhar passa pelo estabelecimento de um empirismo claro, pela determinação do tempo por meio de um aparelho de medida.

A objetividade do tempo conquistada pelo racionalismo tradicional, como vimos, é problematizada e alargada pelo conceito surracionalista de tempo. Assim também foi historicamente. Leibniz, Mach e posteriormente Einstein atacaram o conceito de tempo absoluto de Newton, o que nos levou ao tempo da relatividade, que generaliza o tempo newtoniano, embora rompa com ele.

A hierarquia de escolas filosóficas, tal como a caracterizamos, reproduz então – em certo grau – a evolução histórica. Caberia ainda perguntarmos em que medida esse progresso epistemológico reflete também a construção psicológica do conceito de tempo. O diálogo entre eles existe de fato, e não poderia ser diferente, uma vez que buscamos na epistemologia genética de Piaget e na literatura da área de pesquisa em ensino (assim como na história e na filosofia da ciência) os subsídios necessários à caracterização da hierarquia.

Por um lado, portanto, a resposta já foi dada, uma vez que o próprio referencial piagetiano nos forneceu elementos para a caracterização – principalmente – das duas primeiras escolas filosóficas (realismo e empirismo). O mesmo movimento em direção à objetivação, que procuramos caracterizar em nossa hierarquia e vimos estar presente na evolução histórica, é assinalado por Piaget, mas sob outra perspectiva (a da estruturação de operações mentais): a construção de um tempo comum e objetivo (como coordenação de movimentos a velocidades diferentes) é precedida por um tempo heterogêneo e egocêntrico (aplicado a cada movimento). Também outros estudos, particularmente o de Proverbio & Lai (1989), sugerem um caminhar no sentido de um conceito cada vez mais abstrato de tempo, que independa das ações do próprio sujeito ou de fenômenos por ele percebidos.

Por outro, é por meio de nossa própria pesquisa empírica, que será apresentada a seguir, que pretendemos vislumbrar uma resposta a essa questão. Na verdade, na adequação ou não do referencial bachelardiano em geral, e da noção de perfil epistemológico em particular, aos dados provenientes de nosso estudo é que se encontra a raiz desse questionamento, que passaremos a abordar a partir do próximo capítulo.

Mas, se podemos falar em progresso epistemológico, é possível atribuir a esse movimento qualquer significado de progresso no plano ontológico? Chegamos ao ponto (ii).

Nem Bachelard nem o material estudado por nós permitiriam responder afirmativamente a essa indagação. Basta para isso compararmos o realismo, o racionalismo tradicional e o surracionalismo. Com a superação do tempo absoluto em favor de um tempo relativo, houve uma maior vinculação da experiência do tempo ao observador individual. Claro que o tempo *relativo* não é *subjetivo*, mas *ontologicamente* podemos considerar que certos aspectos do conceito surracional de tempo aproximam-se mais do realismo do que do próprio racionalismo tradicional, em que o tempo é igual para qualquer observador³⁵.

A questão ontológica é bastante complexa, e certamente mais apropriada a um estudo de cunho filosófico. O referencial bachelardiano parece ser refratário a concepções como a do filósofo Kant, para quem o tempo seria uma forma de nossa intuição, um *a priori* da experiência sensível. Visões como essa (que Pereira Jr. (1997) chamaria de “cognitivistas”), na medida em que não atribuem a existência do tempo ao mundo objetivo, fugiriam a sua possível incorporação na perspectiva de Bachelard, uma vez que ele se propõe a realizar uma *psicanálise do conhecimento que se pretende objetivo*. Nesse sentido, nosso autor parece ser partidário de um “realismo ontológico”, antes de qualquer coisa. Mas não é nossa intenção aqui avançarmos mais a esse respeito.

No que se refere a (iii), consideramos mais apropriado realizar a discussão acerca dos obstáculos epistemológicos envolvidos na construção do conceito de tempo em momento posterior, juntamente com a análise dos nossos dados. Isso porque o material empírico deve ser capaz de explicitar e ilustrar de um modo melhor o teor de tais obstáculos. Do ponto de vista teórico, no entanto, é importante que apontemos certas direções onde procurá-los, certos focos onde devem residir.

Num nível elementar, as “centrações” da criança que ainda permanece no tempo heterogêneo representam obstáculos. Ater-se à distância percorrida ou ao tamanho, como vimos, não possibilita a construção de um tempo comum e objetivo. Se para Piaget a aquisição da reversibilidade do pensamento leva à superação desse obstáculo, essa por sua vez não é definitiva, sendo esse um primeiro terreno a explorar em nossa análise.

Acreditamos que a construção do conceito de tempo também reencontre certos obstáculos analisados por Bachelard em *A Formação...*, tais como o *obstáculo substancialista*, que corresponderia a um dos momentos de um pensamento do tipo realista, e os *obstáculos ao conhecimento quantitativo*, que dificultariam a objetivação de um conceito em função de questões envolvendo sua mensuração.

Passemos, então, à segunda parte deste trabalho. Nela, descreveremos nossa pesquisa empírica junto a estudantes do ensino fundamental e médio. Apresentaremos inicialmente nossa metodologia de coleta de dados para, em seguida, procedermos a análise dos mesmos.

Notas:

¹ (p. 63) De certo modo, Platão retoma aqui uma “polaridade filosófica” fundamental, estabelecida entre Heráclito de Éfeso (c. 540-470) e Parmênides de Eléia (c. 530-470) cerca de um século antes. O primeiro ficou conhecido pela sua visão da contínua transformação das coisas, por sua doutrina da “eterna mudança”. Já o segundo relega a mudança ao “mundo das aparências”, revelado pelos sentidos, enquanto a razão revelaria o “mundo da realidade”, atemporal e imutável. Se para Heráclito o tempo e a mudança seriam a própria essência do universo, para Parmênides somente o presente “é”, e o passado e o futuro carecem de significado (Whitrow, 1993, p. 56; Os pré-socráticos, 1978, p. 84). O binômio “permanência”-“mudança” marcou profundamente o desenvolvimento científico e filosófico ao longo dos séculos, ecoando por exemplo na própria idéia de “leis naturais”, tão presente na física. Nossa discussão sobre o tempo irá reencontrar esse binômio implícita ou explicitamente, bem como seus correlatos (como “conservação”-“transformação”).

² (p. 64) Nesse sentido, Aristóteles parece concordar com uma visão muito corrente na Antigüidade: a de que o tempo é um *círculo*, e a repetição dos movimentos celestes instaura, a cada ciclo, o “mesmo instante” (ver também nota 4, abaixo).

³ (p. 65) A defesa de Aristóteles de um infinito apenas “potencial” deve-se, provavelmente, ao seu conhecimento dos famosos paradoxos de Zenão, os quais ele procurou refutar. Zenão de Eléia (c. 504/1-?), discípulo de Parmênides, formulou no século V a.C. uma série de paradoxos sobre espaço, tempo e movimento, questionando particularmente a possibilidade de uma divisão infinita do espaço e do tempo. No “paradoxo da dicotomia”, por exemplo, Zenão afirmava ser impossível percorrer uma certa distância qualquer, uma vez que para isso teríamos que percorrer metade dela primeiro. Mas para isso seria preciso percorrer metade desta metade, e assim por diante, sendo impossível percorrer a distância dada. Aplicado ao tempo, esse paradoxo impediria que se passassem 10 minutos, pois primeiro precisam transcorrer 5 minutos, mas antes disso 2,5 minutos etc. Se o tempo for infinitamente divisível, essa partição nunca termina, e é impossível que se passem os 10 minutos. Por outro lado, se imaginarmos instantes indivisíveis de tempo, também somos levados a contradições, como mostra Zenão no “paradoxo da flecha”. Aqui, ele nega a possibilidade de que uma flecha em pleno vôo esteja realmente em movimento, pois a cada instante (indivisível) de tempo ela ocuparia o espaço exato correspondente ao seu tamanho, permanecendo imóvel (se a flecha pudesse mover-se nesse instante, ele seria ainda divisível, e poderíamos imaginar a flecha percorrendo metade da distância – por exemplo – na metade deste intervalo). Só que isso vale para qualquer instante, e não pode haver um tempo entre dois destes instantes para que a flecha desloque-se entre eles, pois nesse caso esse tempo também seria composto de instantes. Desse modo, fica difícil explicar como a flecha (sempre imóvel) pode mover-se, e como o tempo poderia ser composto de instantes indivisíveis (Ray, 1993, p. 20; ver também O’Connor & Robertson, 2002).

⁴ (p. 67) A crença num tempo circular ou cíclico é mais comum, historicamente, do que se costuma pensar. Civilizações pré-colombianas do Novo Mundo, como os maias e os astecas, acreditavam num tempo cíclico. Essa noção era também majoritária entre os povos da Antigüidade, do Ocidente ao Oriente. Hindus e chineses desenvolveram visões de “ciclos cósmicos” que se repetiam. A natureza cíclica do mundo era visão corrente na Grécia antiga, onde o conceito de “grande ano”, um ciclo de milhares de anos no qual o Sol, a Lua e os planetas retornariam a uma mesma posição, parece ter tido muita influência. Aristóteles faz referência ao “grande ano”, embora não acreditasse que os fenômenos e eventos do passado iriam se repetir *exatamente* (Morris, 1998, p. 36). Essa última concepção foi defendida pelo *estoicismo*, fundado na Grécia ao redor de 300 a.C., mas difundido entre os romanos nos séculos seguintes. Os estóicos acreditavam que *os mesmos* eventos tornariam a se repetir um número infinito de vezes, havendo a destruição e renascimento do universo a cada ciclo. O tempo era, portanto, circular e finito. Contrastando com essa posição, tanto judeus como cristãos desenvolveram uma concepção de tempo linear, que é também histórico: para os primeiros, o tempo era unidirecional, estendendo-se da criação até o triunfo do povo eleito (Israel). Para os segundos, o tempo se iniciara também com a criação, e terminaria com a segunda vinda de Cristo. Como coloca Whitrow (1993, pp. 72-73): “Uma vez que consideravam a crucifixão um evento não passível de repetição, o tempo devia ser linear, e não cíclico. Esta visão essencialmente histórica do tempo, com sua ênfase particular na não-repetibilidade dos eventos, é a própria essência do cristianismo”. É por essa razão que Agostinho e outros teólogos posteriores preocuparam-se em combater a idéia do tempo cíclico, que resistiu por muitos séculos. É impressionante esse dado levantado por Morris (1998, p. 42): “Em 1277, quando Etienne Tempier, bispo de Paris, mencionou 219 opiniões a serem condenadas como heréticas, a doutrina do tempo cíclico figurou em sexto lugar na lista”.

⁵ (p. 69) Essa visão de Galileu, que parte da própria idéia de contínuo em Aristóteles para dela tirar conclusões bastante diversas, é discutida por Gandt (1986). Segundo o pensador italiano, para que uma linha possa ser subdividida ao infinito, as “partes” devem ser em *número infinito* – caso contrário a divisão terminaria – e devem ser “sem grandeza” (e, portanto, *indivisíveis*) – caso contrário formariam, em número infinito, uma extensão infinita. Em suma: o *contínuo divisível* seria composto por *indivisíveis*.

⁶ (p. 70) A concepção newtoniana do tempo foi influenciada por seu antecessor na cátedra de matemática em Cambridge, Isaac Barrow, cuja visão, exposta num trabalho de 1670, parece ter sido extraída dos *Principia...* de

Newton: “O tempo não implica movimento, na medida em que é absoluto e no que diz respeito à sua natureza intrínseca; como tampouco indica repouso; quer as coisas se movam ou estejam paradas, quer durmamos ou estejamos despertos, o Tempo segue a natureza uniforme de seu curso”. A analogia com uma linha reta é evidente neste outro trecho: “o Tempo tem apenas comprimento, é similar em todas as suas partes e pode ser visto como constituído por uma simples adição de instantes sucessivos ou um fluxo contínuo de um instante” (Apud Whitrow, 1993, pp. 146-147).

⁷ (p. 71) Newton escreveu no Escólio Geral adicionado aos *Principia...*, em 1713: “Ele é eterno e infinito...; isto é, sua duração alcança da eternidade à eternidade; sua presença da infinidade à infinidade...Ele não é eternidade e infinidade, mas eterno e infinito; ele não é duração ou espaço, mas ele dura e é presente. Ele dura para sempre, e está presente em todo lugar; e, existindo sempre e em todo lugar, ele constitui duração e espaço. Uma vez que toda partícula de espaço está *sempre*, e todo momento indivisível de duração é *em todo lugar*, certamente o Criador e Senhor de todas as coisas não pode ser *nunca* e *de lugar nenhum*” (Apud Selleri, 1997, p. 1528 – tradução nossa).

⁸ (p. 72) Talvez de uma maneira um tanto quanto apressada, Mach é quase sempre apontado como positivista, entre outras coisas por sua recusa em aceitar o atomismo. Nessa leitura, ao designar de “metafísico” o conceito de tempo absoluto de Newton, Mach teria também a intenção de realçar que ele não é verificável experimentalmente, não pode ser reduzido aos atos de medida (Selleri, 1997, pp. 1528-1529). Embora responsável por introduzir (mais solidamente do que Leibniz) qualitativamente conceitos relacionais no escopo da mecânica, Mach nunca conseguiu construir de fato uma *teoria* relacional quantitativa, que pudesse contrapor-se à mecânica newtoniana. De acordo com Assis (1999) – um dos principais propositores de uma teoria dessa natureza na atualidade – nem Einstein o fez.

⁹ (p. 78) Formalmente, é a uniformidade do tempo que permite inferir a invariância temporal da Lagrangeana de um sistema fechado, do que decorre a lei de conservação da energia. Pois, de acordo com Landau & Lifshitz (1978, pp. 52-54), se (VER ARQUIVO “05capitulo2-nota9.pdf”)

¹⁰ (p. 78) Apresentamos aqui o que consideramos a “visão dominante” sobre o tempo da mecânica clássica, ou seja, a idéia de que há um “fluir uniforme” do tempo. As imagens normalmente associadas a isso podem ser tanto a de um “agora” que se move ao longo de uma “linha do tempo”, do passado em direção ao futuro, como a do nosso próprio movimento no tempo, como o de um barco num rio. Seja o movimento *no* tempo ou o movimento *do* tempo, é sobre a própria intuição tão comum de um “fluir” que podemos encontrar, no entanto, críticas de físicos e filósofos. Davies (1999, cap. 12; e 2002a) considera essa idéia uma pura ilusão, e um mito a ser desfeito. Para ele, é *conveniente* usarmos a linguagem do fluxo do tempo para descrevermos eventos do mundo objetivo, mas não é *obrigatório*. Podemos pensar em eventos que se sucedem como estados do mundo em diferentes datas, sem que haja uma “passagem” do tempo. Esse autor, que se utiliza principalmente da teoria da relatividade em suas argumentações, considera o tempo como inteiramente mapeado, contendo todos os eventos passados e futuros. Não haveria um momento especial, que pudesse ser designado por “presente” (ou “agora”), até porque tal denominação depende do sistema de referência adotado. Todos os tempos seriam igualmente reais, sendo irreal o *fluxo* do tempo. Mesmo desconsiderando argumentos relativísticos, há também objeções filosóficas ao fluir do tempo, quase sempre baseadas no caráter auto-contraditório de um “conceito dinâmico” do tempo, em que é impossível avaliar a “velocidade” do fluir temporal sem remetermos-nos a uma segunda, terceira etc, dimensões temporais (Harrison, 2002. Para um resumo das críticas de natureza filosófica ver Savitt, 1996, pp. 348-351).

¹¹ (p. 78) Uma consequência disso é que, fenômenos absurdos à nossa “intuição temporal” (parecendo ocorrer de “trás para frente” no tempo), como por exemplo uma bola em repouso que comece a saltar, ou um omelete que vira ovos novamente, não violariam em nada, se ocorressem, o princípio de conservação da energia. Num universo em que situações hipotéticas como essas fossem tão comuns quanto o seu reverso no tempo, a energia poderia continuar sendo conservada, e o tempo ser homogêneo.

¹² (p. 79) Essa discussão sobre a possibilidade de explicação da irreversibilidade no âmbito da mecânica clássica, apesar de antiga, permanece atual. Suas origens remontam ao final do século XIX, quando J. Loschmidt levantou uma objeção, no contexto da teoria cinética, contra Ludwig Boltzmann (1844-1906), que ficou conhecida como o “paradoxo da reversibilidade”. A idéia central é aquela que expusemos no texto: como explicar a irreversibilidade macroscópica (observada) se, microscopicamente, as leis mecânicas que regem o movimento das partículas são reversíveis temporalmente? Mais recentemente, a própria visão da mecânica como “teoria reversível” tem sido debatida. Hutchison (1993) argumenta, por exemplo, que sistemas dissipativos e irreversíveis fazem parte do corpo da teoria, que portanto não poderia ser considerada – como *teoria* – reversível. Somente *sistemas* mecânicos conservativos e determinísticos seriam realmente reversíveis (sistemas não-determinísticos, cujas equações diferenciais levam a mais de uma solução para um mesmo conjunto de condições iniciais, seriam sempre irreversíveis). Já Savitt (1994) discorda da maior parte das conclusões de Hutchison, afirmando que ele não teria lançado nenhuma luz sobre o problema, pois assume uma definição de irreversibilidade associada à não *observação* do reverso temporal dos sistemas dissipativos. Entretanto, essa não é a única definição possível de uma teoria reversível temporalmente, e Savitt apresenta três possibilidades. Segundo a mais adotada delas, a mesma que usamos em nosso texto (a teoria é considerada invariante por reversão temporal sob a seguinte condição: uma seqüência qualquer de estados de um sistema mecânico ($E_i \rightarrow E_j$) é dinamicamente possível se, e somente se, sua reversão no tempo ($E_j^{Rev} \rightarrow E_i^{Rev}$) também o é), a mecânica clássica é reversível. Em trabalho posterior, Hutchison (1995) defende que a evolução temporal dos sistemas mecânicos, consideradas as imprecisões paramétricas inerentes ao conhecimento dos mesmos, mostraria em muitos casos uma instabilidade que seria uma fonte de irreversibilidade. Em outras palavras, uma pequena

imprecisão (epistêmica) nas condições iniciais de um sistema pode aumentar com a evolução temporal do mesmo, o que faz com que a reversão no tempo não permita que ele retorne a mesma condição (as próprias incertezas não são reversíveis, havendo uma analogia com sistemas caóticos). Como vemos, o debate sobre a reversibilidade da mecânica continua atual, embora a posição majoritária seja considerá-la uma teoria reversível.

¹³ (p. 80) A segunda lei da termodinâmica pode ser expressa ao menos de duas maneiras equivalentes: 1) é impossível, numa máquina térmica que funcione em ciclo, converter completamente o calor em trabalho mecânico; ou 2) um sistema fechado evolui espontaneamente em direção ao equilíbrio termodinâmico, onde sua entropia é máxima.

¹⁴ (p. 80) A associação entre a irreversibilidade do tempo e a interpretação probabilista da segunda lei é outra questão que, juntamente com o “paradoxo da reversibilidade”, tem suas raízes no nascimento da mecânica estatística, mas alimenta debates até hoje. Ela suscitou outra objeção levantada contra L. Boltzmann em 1896, desta vez por E. Zermelo (a partir de um teorema matemático demonstrado por H. Poincaré), que ficou conhecida como “paradoxo da recorrência”: considerando a interpretação probabilista da lei do aumento da entropia, e um intervalo de tempo suficientemente grande, os sistemas deveriam retornar a uma configuração inicial de baixa probabilidade. Em outras palavras, o *improvável* seria *realidade* – e muitas vezes! – num tempo infinito (essa idéia teria influenciado, inclusive, o filósofo Friedrich Nietzsche (1844-1900) em sua concepção de um “eterno retorno”. Sobre esse paradoxo ver: Salinas, 1982). A questão central aqui é a de que a irreversibilidade não pode ser atribuída a nenhum princípio ou lei fundamental, relacionando-se apenas à transição de estados improváveis a mais prováveis. Segundo von Borzeszkowski & Wahsner (1984), a direção do tempo não advém das leis dinâmicas, mas sempre de condições suplementares sobre elas, de condições iniciais ou de contorno especiais, ou de postulados estatísticos. No caso específico de Boltzmann, ele assumiu uma condição estatística suplementar sobre o número de colisões – o “princípio da desordem elementar” – em sua dedução do teorema-H (equivalente à segunda lei). O desenvolvimento da termodinâmica mostrou, no entanto, que não podemos usar a curva da entropia para definirmos uma direção unívoca para o tempo, pois há oscilações do tipo “alta-baixa-alta” entropia. Assim sendo, o crescimento da entropia estaria limitado a sub-regiões nas quais se impõe uma condição inicial de baixa entropia para o sistema. Uma saída é apontada por Reichenbach, que se utilizou dessa idéia, redefinindo a entropia para um “conjunto de sistemas ramificados” (ao invés da definição de Boltzmann, que a associava a cada microestado), numa tentativa de atribuir significado para uma direção única do tempo (Savitt, 1996, pp. 351-354). Essa pode ser considerada a posição majoritária, em que a entropia é associada a um conjunto de sistemas, e a assimetria do tempo surge como um resultado probabilístico quando é levado em conta esse conjunto. Claramente, no entanto, esse resultado não satisfaz a todos. Tanto a imposição de condições suplementares, ou iniciais altamente improváveis (como a entropia do universo primordial, por exemplo), quanto a própria redefinição da entropia, geram críticas como a de Callender (1997), para quem a mecânica estatística não deve ser considerada uma “ciência fundamental”, e não *prevê*, de fato, uma entropia maior no passado. Para esse autor, as *generalizações* dessa teoria seriam aplicáveis somente no contexto de condições de contorno muito especiais, e uma explicação para a assimetria temporal deve ser buscada alhures. Como podemos perceber, não há um consenso no que diz respeito ao vínculo entre a irreversibilidade do tempo e a segunda lei, nem mesmo se a primeira é mesmo passível de esclarecimento partindo-se da termodinâmica e da mecânica estatística. Um bom resumo dessas questões pode ser encontrado em Savitt (1996).

¹⁵ (p. 81) É irrelevante neste ponto discutirmos aspectos históricos do surgimento da relatividade. No entanto, cabe apontar que não foi no contexto de uma crítica aos conceitos de espaço ou tempo absolutos que Einstein propôs o conceito de “tempo relativo” em 1905. O problema original enfrentado por ele foi o de compatibilizar o eletromagnetismo clássico, na formulação de Maxwell-Lorentz, com o “princípio da relatividade” da mecânica, uma vez que as equações de Maxwell não eram invariantes pelas transformações de Galileu, e continham explicitamente a velocidade da luz. Ao buscar uma solução para isso, Einstein estabeleceu como postulado básico a constância de c , conforme medida por qualquer sistema de referência inercial. Isso o levou a redefinir espaço e tempo para tornar essa premissa – e as equações de Maxwell – compatíveis com o princípio da relatividade, assumindo como válidas as transformações de Lorentz.

¹⁶ (p. 82) Caberia apontar aqui que a alteração no “passo” dos relógios em movimento foi proposta antes de 1905. Segundo Selleri (1997, pp. 1530-1536), W. Voigt sugeriu essa idéia num trabalho de 1887, mas com uma formulação diferente daquela apresentada por Einstein. Já J. Larmor propôs, em 1900, a dependência dos intervalos de tempo em função da velocidade numa formulação equivalente a que surgiria depois, no contexto de um trabalho sobre a deformação de campos elétricos de duas cargas opostas orbitando em torno do centro de massa. Por outro lado o próprio H. A. Lorentz, responsável por estabelecer num trabalho de 1895 a noção de contração universal dos corpos em movimento (útil na explicação do resultado negativo da experiência de Michelson-Morley), não aceitava como real a diminuição do passo dos relógios que se deslocam, considerando-a como uma convenção útil. A sua formulação da relatividade (exposta numa obra de 1909), embora equivalente à de Einstein, diferia ainda pelo seu compromisso com a idéia de éter.

¹⁷ (p. 82) Uma interessante e bem conhecida comprovação experimental do efeito da dilatação do tempo é a duração de mésons da radiação cósmica que atinge incessantemente nosso planeta. Os mésons μ , ou múons, oriundos do decaimento de píons, por sua vez provenientes da colisão de partículas de alta energia (tipicamente prótons) com partículas da atmosfera, têm um tempo de vida médio de $t=2,2 \cdot 10^{-6}$ s. Esse é o seu “tempo próprio”, medido num referencial onde o múon está em repouso. Esse tempo não seria suficiente para que ele atingisse o solo, uma vez que ele é produzido a cerca de 10 km de altitude. À velocidade da luz, o tempo necessário para percorrer os 10 km seria de: $t_0=1,0 \cdot 10^4/3,0 \cdot 10^8=33 \cdot 10^{-6}$ s ($t < t_0$). Entretanto, o múon é detectado no solo, devido justamente à *dilatação do tempo* (o efeito é significativo, pois a velocidade do múon chega a 99,9% de c). No referencial da Terra, a duração dessa partícula é de (conforme a quarta das equações de Lorentz): $t'=t/(1-V^2/c^2)^{1/2}=49 \cdot 10^{-6}$ s. Com isso, o múon tem tempo para atingir o solo ($t' > t_0$). A contrapartida, no referencial do múon, onde o seu tempo de vida é menor, é que a *distância* a ser percorrida pela atmosfera não é mais a mesma: ao invés dos 10 km, ela percorre cerca de 450 m, devido à *contração do comprimento* (Eisberg & Lerner, 1982, pp. 237-241). A simetria presente na descrição acima parece quebrar-se num outro fenômeno bastante explorado na literatura, e que decorre da dilatação do tempo: o “paradoxo dos gêmeos”, segundo o qual dois gêmeos, um permanecendo na Terra e outro partindo numa viagem espacial a uma velocidade próxima à da luz, terão idades diferentes quando se reencontrarem. O gêmeo que permaneceu “vê” o relógio do irmão viajante andar mais lentamente, justificando o fato dele retornar à Terra mais jovem. O paradoxo consiste no fato de que o gêmeo viajante deveria, a princípio, fazer uma descrição análoga dos fatos, uma vez que o movimento é relativo (para ele, é a Terra que se afasta...). Assim, é *ele* quem deveria estar mais velho ao final da viagem. A solução é tradicionalmente atribuída à assimetria dos referenciais, uma vez que o irmão que parte ao espaço sofre acelerações (na partida, na freada para o retorno, no início da volta, e na chegada) a que o irmão “terrestre” não está submetido.

¹⁸ (p. 83) Embora no exemplo citado a diferença entre os relógios seja bastante pequena, experimentos para detectar tal variação já foram realizados com sucesso. Para objetos astronômicos muito massivos, como uma estrela de nêutrons, a dilatação do tempo (em relação à Terra) em sua superfície pode chegar a 30%. Buracos negros proporcionariam um efeito ainda maior, fazendo com que o tempo parecesse “estar parado” em sua superfície (Davies, 2002b).

¹⁹ (p. 85) Aparentemente, a interpretação da mecânica quântica adotada determina a explicação para a “seta do tempo”. Arntzenius (1997) analisa, por exemplo, um experimento hipotético com fontes de fótons, detectores e um espelho semi-refletor, afirmando que os partidários de uma visão quântica baseada na noção de colapso da função de onda são obrigados a supor a existência de uma “seta do tempo”, ao passo que a visão de D. Bohm (determinista e reversível) explicaria a assimetria do experimento em função das condições iniciais, sem a inferência da existência da “seta”. Já Price (1997) defende que a assimetria na microfísica não pode ser tratada da mesma forma que em outras áreas da física, especialmente a termodinâmica. Ocupando-se da análise das correlações pré e pós-interativas no caso de fótons que atravessam polarizadores, o autor afirma que a ausência de correlações pré-interativas – normalmente usada para pensar a assimetria temporal – é pressuposta tacitamente na mecânica quântica, mas não seria necessária nem suficiente para explicar tal assimetria. Price conclui que a crença na ausência de tais correlações é uma característica da experiência humana que não deve ser transposta para o micromundo, e que devemos rejeitar essa asserção. Isso recuperaria uma “perspectiva clássica” fundamentada na simetria, e evitaria inclusive problemas com fenômenos não-locais.

²⁰ (p. 85) O calendário dos egípcios, por exemplo, era solar e composto de 12 meses de 30 dias cada, com 5 dias adicionais de festa no final de cada ano. Era dividido em três estações (inundação, semeadura e colheita) relacionadas ao ciclo anual de cheias do rio Nilo. Já o calendário babilônico era baseado no movimento da Lua, havendo 12 meses lunares com 29 ou 30 dias cada, sendo um décimo terceiro mês acrescentado de vez em quando. Os gregos também utilizavam um calendário lunar bastante caótico, que diferia de cidade para cidade (Boczko, 1984). Outro exemplo de calendário solar pode ser encontrado entre os maias, na América, que construíram um calendário extremamente preciso e complexo, formado por um “ano solar” de 18 meses de 20 dias – com cinco dias intercalados – totalizando 365 dias. Segundo Whitrow (1993, pp. 109-113), cada dia era um deus, e uma fila de carregadores divinos, numa estrada sem começo nem fim, transportavam cargas representando as divisões do tempo (dias, meses, anos etc.).

²¹ (p. 86) Os chineses, em particular, desenvolveram e aperfeiçoaram relógios d’água desde a Antiguidade, chegando a utilizar mercúrio ao invés de água para evitar o congelamento nos dias de inverno. Do período medieval, resta a descrição de um sofisticado relógio d’água, mais exato que os primeiros relógios mecânicos europeus. Quanto aos bastões de incenso, diz Whitrow (1993, p. 108): “Em alguns desses relógios, diferentes porções de incenso exalavam diferentes aromas, pelos quais as pessoas de olfato apurado podiam identificar a hora aproximada”.

²² (p. 87) Ao invés de areia, utilizava-se nas ampulhetas pó de casca de ovo, uma vez que a areia comum alargava o orifício por onde escoava, prejudicando a estabilidade do aparelho.

²³ (p. 87) Uma grande contribuição para esse desenvolvimento foi, sem dúvida alguma, a tentativa de resolução do “problema da longitude”, ou seja, a determinação precisa do deslocamento para leste ou oeste nas viagens marítimas. Essa questão, de vital importância na época das navegações, implicava na possibilidade de comparar a “hora local” (no navio) com a hora atual do ponto de partida. A resolução desse problema envolveu a elaboração de relógios mais precisos e resistentes. A história detalhada do “problema da longitude” pode ser encontrada em Sobel (1998).

²⁴ (p. 87) A tentativa de se alcançar uma precisão cada vez maior justifica-se na medida em que isso contribui para o desenvolvimento de diversas áreas da ciência e da tecnologia. Por um lado, a combinação de medidas “simultâneas” de radiotelescópios separados por grandes distâncias requer medidas muito precisas do tempo, assim como os testes da teoria da relatividade. Por outro, o Sistema de Posicionamento Global, conhecido como GPS, é um sistema de navegação que depende dos relógios atômicos a bordo dos satélites para determinar com precisão a posição sobre a superfície da Terra (Itano & Ramsey, 1993).

²⁵ (p. 88) Esses parâmetros parecem dar conta clara e objetivamente da comparação entre aparelhos de medida do tempo, mas: seria um segundo hoje igual a um segundo amanhã? A questão foi colocada por Henri Poincaré (1854-1912), que nos chama a atenção para um problema fundamental: *admitimos* que as oscilações de um pêndulo (ou a rotação da Terra) têm igual duração, mas isso é sempre uma aproximação. *Mesmo para um aparelho ideal*, somos obrigados a supor – implicitamente – que a duração de dois fenômenos idênticos é a mesma, ou que as mesmas causas levam o mesmo tempo para produzir os mesmos efeitos. Mas como há infinitas causas de um fenômeno (supondo que nada encontra-se isolado do resto do universo), isso também é aproximado. Por outro lado, para concebermos tal variação na duração de dois fenômenos idênticos precisamos confiar na validade das leis físicas, tal como as leis de Newton e a conservação da energia. Disso decorre a existência de uma suposição implícita na própria definição de tempo adotada astronomicamente: a de que o enunciado das leis naturais seja tão simples quanto possível (Poincaré, 1995, cap. II). Embora não existissem relógios de quartzo ou atômicos na época em que Poincaré desenvolveu esses argumentos (a publicação original dessa referência em francês data de 1905), o aumento da precisão na medida do tempo não parece afetá-los. A ligação entre a igualdade de duração de dois fenômenos idênticos e a suposição implícita da simplicidade das leis é uma outra maneira de olhar um mesmo problema, objeto de nossa atenção quando relacionamos anteriormente a homogeneidade do tempo e a conservação da energia.

²⁶ (p. 88) O “horário padrão” adotado internacionalmente, assim como a própria definição do segundo, sempre tiveram como referência o movimento diário de rotação da Terra em torno de seu próprio eixo, até o surgimento dos relógios atômicos. Com o advento desses, criou-se o Tempo Atômico Internacional (TAI), uma escala de tempo resultante de uma média dos horários marcados por diversos relógios atômicos espalhados ao redor do mundo. O Bureau Internacional de Pesos e Medidas, sediado na França, é o responsável pela coordenação de um tempo internacional, baseado nessa escala. Esse é o Tempo Universal Coordenado (UTC), que é determinado pela frequência TAI. No entanto, existem outros padrões de tempo, referenciados no movimento de rotação da Terra. Por causa de variações nesse movimento, esses padrões astronômicos apontam a necessidade de, de vez em quando, inserir-se um segundo no UTC. Isso costuma ser feito no último minuto de junho ou dezembro, que passa a ter 61 segundos.

²⁷ (p. 88) Adotamos aqui a terminologia sugerida pelo prof. José Luciano M. Duarte, do IFUSP.

²⁸ (p. 89) Podemos exemplificar isso com uma ampulheta: se optássemos por construir uma escala segmentando o fluxo da areia (fazendo marcas em diferentes níveis, por exemplo), a imposição dessa métrica geraria uma unidade que se repete, cada vez que uma determinada quantidade de areia (sempre a mesma, existente entre duas marcas) escoar, fazendo com que a repetição da unidade métrica esteja vinculada à repetição da “quantidade de areia escoada” (e não a qualquer ciclo). Por outro lado, se tomarmos a unidade métrica – no caso da ampulheta – como o intervalo de tempo necessário para o escoar completo da areia, essa imposição acaba por trazer consigo um tipo de periodicidade que não existia *a priori*: se não tornarmos a virar a ampulheta, repetidas vezes, ela não funcionará autenticamente como um relógio. E, ao virá-la, estabelecemos de certo modo um “ciclo”, repetindo a unidade métrica. Sem a repetição da unidade não é possível a existência da métrica temporal, e, portanto, do funcionamento do aparelho como um relógio (o simples escoar da areia, uma única vez, não estabelece uma medida do tempo). Claro que isso não torna periódico o *fenômeno em si* da queda da areia, mas mostra que mesmo os relógios de fluxo – uma vez estabelecida uma certa métrica – podem incorporar um tipo de periodicidade, sendo essa idéia estendida (em algum nível) aos relógios do segundo tipo.

²⁹ (p. 94) Piaget dedica todo um capítulo da segunda parte da obra ao tempo métrico, cuja construção não envolve uma etapa própria, mas seria concomitante à do tempo (qualitativo) operatório. A métrica dependeria da tomada de uma unidade de tempo α como “unidade móvel” que pode ser repetida à vontade, e sincronizada sucessivamente com α' , α'' etc. Segundo o autor, “para medir o tempo, a criança deve compreender: 1º que o relógio não muda de velocidade e pode assim indicar tempos sucessivos iguais; 2º que o tempo do relógio é idêntico ao dos movimentos ou ações a cronometrar; 3º que o espaço percorrido pela areia ou pelo ponteiro, etc, pode ser dividido em unidades que, relacionadas com a velocidade do relógio, constituem unidades de tempo,

iguais entre si na sua sucessão (em virtude de 1) e aplicáveis à duração dos outros movimentos (em virtude de 2)” (p. 214). Utilizando uma ampulheta graduada e um relógio de ponteiros, Piaget reencontra as mesmas três etapas, mostrando que um isocronismo elementar (igualação de duas durações sucessivas de um mesmo móvel animado de certa velocidade), que supõe a conservação da velocidade do relógio, precisa combinar-se com o sincronismo assegurado pela imbricação das durações (igualdade dos tempos medidos por dois relógios diferentes) para constituir o tempo métrico. Antes da 3ª etapa, a criança mede a duração pelo espaço percorrido ou pelo trabalho executado, aplicando a conservação da velocidade a um único móvel apenas. Assim sendo, o tempo da ampulheta permanece heterogêneo ao do relógio, não havendo um tempo único. É necessário que as unidades advindas desse isocronismo elementar apliquem-se a co-deslocamentos, ou seja, que haja imbricação das durações, para que se constitua o tempo métrico. Piaget conclui – novamente – que se trata então de coordenar movimentos de velocidades diferentes. Feito isso, é possível separar a duração em unidades passíveis de repetição e aplicação aos objetos medidos.

³⁰ (p. 94) Ao longo dos seis capítulos que compõem essa segunda parte são analisados uma série de experimentos que se utilizam de técnicas diferentes. No entanto, o foco encontra-se – como anteriormente – nas noções de sucessão, simultaneidade e duração. Piaget acrescenta a isso uma discussão sobre as operações de transitividade, aditividade e associatividade, evidenciando o paralelismo existente entre a construção dessas operações e a elaboração de um tempo operatório. De todos os experimentos realizados, valeria a pena aqui citar um deles, pois a mesma técnica foi utilizada por nós em uma das partes do estudo empírico deste trabalho. Piaget realizava com bonecos dois movimentos retilíneos e paralelos de velocidades diferentes (no nosso caso, usávamos lápis). O boneco I percorria uma linha, cujas posições podemos designar por A_1 , B_1 etc, enquanto o boneco II deslocava-se paralelamente, passando por A_2 , B_2 etc. Numa primeira montagem, eles partem simultaneamente, e enquanto I vai de A_1 até D_1 , II vai de A_2 até B_2 . Após a parada de I, II ainda desloca-se de B_2 a C_2 , quando enfim pára, de modo que o boneco I desloca-se por uma distância maior, mas pára antes (no tempo). Em outra montagem, eles partem e param simultaneamente, mas I vai mais rápido do que II, parando em D_1 enquanto II pára em C_2 . Em ambas as situações, antes da constituição de um tempo operatório (3ª etapa), é comum a criança cometer os mesmos tipos de erros que vimos no caso do escoamento do líquido, como associar uma maior duração ao movimento do boneco que andou por uma distância maior ou foi mais rápido. Isso ocorre mesmo quando há reconhecimento da partida e da chegada simultâneas, na segunda montagem. A “centração” da criança no aspecto puramente espacial é inteiramente análoga ao que vimos anteriormente para o caso das alturas do líquido nos dois recipientes.

³¹ (p. 96) Piaget faz aqui uma crítica explícita à filosofia de Bergson, a quem cita no Prefácio, na Conclusão e na introdução da terceira parte da obra. As suas conclusões de que o tempo exterior e interior constroem-se apoiando-se mutuamente vai contra a idéia de “duração pura” de Bergson, que a distinguia justamente do tempo exterior (tempo físico abstrato, matematizável). Enquanto que, para o filósofo, a duração vivida e experimentada pela consciência seria o verdadeiro tempo, para Piaget “nada é mais ilusório do que considerar essa metafísica bergsoniana como correspondendo à gênese psicológica real das relações temporais” (p. 223). Seria interessante também apontar que Piaget, que se referencia em muitos momentos em Kant, estabelece laços com o pensamento desse outro filósofo, mas para depois afastar-se de suas conclusões. Assim é que ambos considerem o tempo não como um conceito: para Kant, ele era uma “forma a priori da sensibilidade”, uma condição subjetiva da experiência. Para Piaget, ele é um “esquema único”, um objeto formal ou uma estrutura. No entanto, enquanto Kant acreditava em uma natureza intuitiva do tempo, para Piaget ele é fruto do desenvolvimento de um mecanismo operatório. A principal diferença entre ambos, portanto, é a consideração do tempo como *dado* ou *construído*.

³² (p. 97) A construção de um tempo prático, associado à inteligência sensório-motora, é inteiramente solidária à construção das noções de *objeto*, *espaço* e *causalidade*. Essas quatro categorias básicas constituem um todo indissociável para Piaget, e os seus respectivos e interdependentes desenvolvimentos iniciais (ao longo dos dois primeiros anos de vida da criança, aproximadamente) são extensamente estudados na obra *A Construção do Real na Criança* (1996, original de 1937).

³³ (p. 105) Askin, além de combater o idealismo filosófico no que se refere ao tempo, elabora uma profunda reflexão sobre esse conceito, principalmente nos capítulos II e III de sua obra. Infelizmente não poderemos nos deter aqui sobre a análise dessa questão pelo autor, que – sinteticamente – compreende o tempo como “forma de ser da matéria em movimento”. Evita o que chama de “substancialização do tempo”, ou seja, a atribuição de uma realidade objetiva ao tempo independentemente da matéria, como no caso do tempo absoluto de Newton. Ao contrário, para Askin o tempo não existe sem a matéria, sendo portanto a forma condicionada pelo conteúdo. A essência do tempo está relacionada ao processo de *ser* da matéria. As características do tempo – sucessão e duração – vinculam-se ao *porvir* (vir-a-ser) e à *conservação da existência*, respectivamente, quando analisamos o processo de desenvolvimento do mundo material.

³⁴ (p. 109) Um possível caminho para pensarmos a diferenciação entre racionalismo complexo e racionalismo dialético deve levar em consideração, a nosso ver, os aspectos quânticos relacionados ao tempo, assim como a perspectiva de um tempo descontínuo colocada por alguns filósofos (dentre eles, Bachelard).

³⁵ (p. 112) O mesmo parece valer quando pensamos no problema da gravitação e da queda dos corpos. Enquanto para Aristóteles os corpos que caem (os “graves”) tendem ao seu “lugar natural”, sendo esse movimento espontâneo (não há “força”), para Newton a força gravitacional seria a responsável pela atração entre os corpos. Do ponto de vista relativístico, também não há “força”, e as trajetórias são geodésicas no espaço-tempo, curvado devido à presença de matéria. Assim, os corpos que “caem”, na verdade, movimentam-se “espontaneamente” ao longo de suas geodésicas, numa concepção talvez mais próxima – ontologicamente – da idéia de “lugar natural” do que da idéia newtoniana de força.