

## 2 FÍSICA QUÂNTICA – TECIDO DE VÁRIAS REDES

*Sociedade em Rede, Era da Informação, Sociedade Pós Industrial e Terceira Onda* são alguns dentre muitos termos cunhados para exprimir grande diversidade de caracterizações da sociedade contemporânea. Por mais discrepantes que elas sejam, é difícil escapar da percepção de que a microeletrônica e demais tecnologias da informação e comunicação, bem como tecnologias mais recentes como a nanotecnologia e a biotecnologia, figuram como um dos fatores chave das transformações sociais, econômicas e culturais.

Se a microeletrônica e demais tecnologias dela emergentes tem tal importância para a sociedade contemporânea, pode-se assegurar que a física quântica também a tem como sua base tecnológica. Isso vale desde o desenvolvimento dos circuitos integrados das décadas de 50 e 60, decorrente da invenção dos transistores, dispositivos em que materiais semicondutores fazem amplificação de corrente, análoga à amplificação de tensão por válvulas termoiônicas clássicas.

Unificações conceituais e experimentais como essas não são, aliás, exceção na história da quântica, fazendo mesmo parte de sua própria emergência, haja vista alguns dos famosos problemas teóricos do início do século XX, como a questão da luz emitida por fornos e gases incandescentes, a dualidade onda-partícula e a condutância elétrica pela incidência de luz nos semicondutores.

Assim, seja pela promoção de vínculos históricos e conceituais internos à física, pelos estreitos laços que se estabelecem com conteúdos das demais ciências da natureza, bem como pela sua íntima relação com as tecnologias hoje impregnadas na vivência contemporânea e na estrutura social, a física quântica cumpre destacado papel na interligação entre os mais diversos campos de conhecimento. É a partir da explicitação de algumas destas conexões que este capítulo busca apresentar a física quântica enquanto tecido de várias redes, cujos entrelaçamentos conformam a primeira grande rede abordada neste trabalho.

Grande, vale esclarecer, por sua composição como interconexão entre vários enredamentos e não como qualificação de sua amplitude. Além de apontar possibilidades de extensões para cada um dos enredamentos trabalhados, neste capítulo também se reconhecem possíveis limites da abrangência da física quântica, deixando aberto o caminho para a incorporação de novas investigações, tal qual a referente aos sistemas complexos e evolutivos.

## 2.1 NA CONSTRUÇÃO HISTÓRICA E INTERLIGAÇÃO CONCEITUAL DA FÍSICA

Segundo Menezes (2005), o conjunto de conhecimentos que conformam a física pode ser representado por uma combinação de mapa conceitual e roteiro histórico (figura 2), uma espécie de arquitetura da física:

O conhecimento do mundo material [...] tem caráter histórico e se desenvolve por meio de contradições. Novas visões hegemônicas incorporam elementos das visões superadas, novas ideias são frequentemente construídas com formas antigas, assim como uma nova cultura não é independente das suas precedentes. Isso se reflete na estrutura do conhecimento, atribuindo-lhe uma curiosa arquitetura, que lembra templos que passaram por sucessivas civilizações, onde os pavimentos erguidos pelos conquistadores usam blocos tirados da demolição daqueles construídos pelos conquistados sobre as mesmas fundações. (MENEZES, 2005, p. 29).

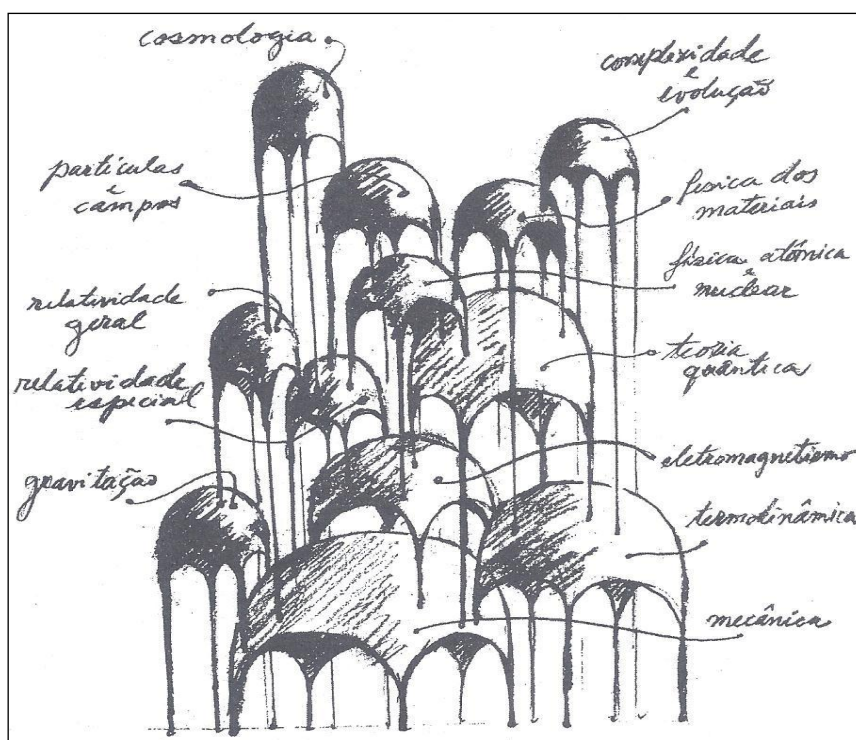


Figura 2 - Uma arquitetura para a física (MENEZES, 2005, p. 32)

São várias as leituras que podem ser elaboradas dessa arquitetura. De baixo para cima, faz-se um percurso histórico de séculos, do mais antigo ao mais novo no desenvolvimento da física. Da esquerda para a direita, um percurso energético, das altas às baixas energias. Não por acaso, esse percurso energético é também o percurso de bilhões de anos do simples ao complexo. Das quebras de simetria nos primeiros instantes do conhecido universo precedente à “bola de fogo”, o Universo foi se resfriando e da nucleossíntese inicial à síntese das estrelas

foi se tornando mais e mais complexo até originar a vida na Terra e eventualmente em outras partes.

Traçados simultaneamente, estes dois percursos nos levam (não exatamente por uma linha diagonal sem desvios laterais ou verticais) da física clássica à física dos sistemas complexos e evolutivos. Do todo, “cartesianamente decomponível” em partes, à totalidade quântica, em que um único próton ou elétron a mais ou a menos faz toda a diferença entre um gás nobre e um elemento altamente interagente, ao mesmo tempo em que esse próton ou elétron é exatamente sempre o mesmo, indistinguível, seja lá onde esteja. Menezes (2005) faz interessante exploração a esse respeito:

Os objetos clássicos, martelos, ou penhascos, podem ser distinguidos de seus semelhantes e guardam marcas de sua história. Em contrapartida, seus processos são relativamente controláveis, como a trajetória de um martelo ou a queda de um penhasco. Talvez exatamente isso é que permite a infinita e contínua variedade clássica com que nos habituamos em nosso cotidiano no qual os pães, por exemplo, podem ter diferentes tamanhos, texturas e sabores, em oposição aos prótons, todos tão tediosamente idênticos.

Pães são feitos de coisas vivas, como o fermento e o trigo, mais complicados, por exemplo, do que os cristais de sal, também presentes no pão. O fermento e o trigo, assim como o sal, são feitos de átomos quânticos, mas sendo vivos, são ordens emergentes de processos complexos adaptativos, através dos quais a precisa ordem quântica se traduz na imprecisa e criativa variedade clássica. Cada ser vivo se funda na ordem infinitesimal da mensagem físico-química de seu DNA, assim como o cristal, herda sua transparência e cor da ordem quântica de suas células moleculares, mas entre a vida e o cristal, há um abismo de complexidade. (MENEZES, 2005, p. 247).

Atuando em todos esses percursos como se fosse um nó decisivo para a fluidez de informação através de uma rede, está o *quantum de ação*,  $h$ , gestado com certa aflição por Planck, um “físico clássico” por excelência. Constituinte conceitual fundamental dos processos naturais descontínuos, o *quantum de ação* provocou uma descontinuidade no próprio desenvolvimento da física que abriu as portas para reinterpretações de fenômenos há muito conhecidos, explicações de outros considerados enigmáticos e inaugurações de novos campos de conhecimento.

Como retrato desse processo vale resgatar o registro de Segrè (1980) acerca da desconfiança depositada pela comunidade científica na hipótese atômica às vésperas de sua consagração:

Em 1905 [...] o ceticismo ainda imperava, com alguns cientistas rejeitando incontinenti a teoria corpuscular da matéria e outros reconhecendo a utilidade da teoria atômica na química, mas considerando-a longe da realidade. Esses céticos não eram loucos nem incompetentes. Por exemplo, pouco tempo antes Sir Benjamim Collins Brodie (1817-1880), professor de química em Oxford, elaborava relatórios e escrevera livros para mostrar que os átomos não eram necessários à química. Com

toda seriedade, desenvolvera um sistema de onde os átomos foram excluídos, e ao qual deu o nome de “química ideal”. Sentiu-se ofendido quando usaram arames e bolas para construir modelos de moléculas em química orgânica: considerou essas construções como “obra de carpinteiro e de natureza inteiramente materialista”, um ultraje, algo absolutamente abaixo da dignidade da química.

Em 1887, o estandarte do antiatomismo foi erguido por Wilhelm Ostwald (1853-1932), um proeminente químico alemão e um dos primeiros cientistas a serem laureados com o Premio Nobel (1901). Naquele ano, na qualidade de professor de química em Leipzig, Ostwald pronunciou uma aula inaugural na qual apresentou uma doutrina “energética”, em que afirmava que todos os fenômenos podiam ser explicados através da ação recíproca da energia, sem a necessidade de átomos. Mais tarde, publicou um manual de química que não usava a teoria atômica e em 1909 esse livro foi traduzido para o inglês com o título de *Fundamental Principles of Chemistry*. Ostwald manteve-se arraigado em sua posição até que J.J.Thomson e S. A. Arrhenius conseguiram abalar-lhe as convicções e ele se retratou na edição de 1912 de sua *Allgemeine Chemie*. (SEGRÈ, 1980, p. 7).

Ainda segundo Segrè (1980, p. 7-8), mesmo Planck “receava manifestar sua crença no átomo”, somente a aceitando “quando ela se tornou necessária para a fundamentação teórica de sua lei da radiação”, tendo inclusive escrito em sua autobiografia que chegou a ser “não apenas indiferente, mas, em certa medida, até mesmo hostil à teoria atômica”.

Na raiz dessa questão situa-se o prestígio ganho pela termodinâmica, impulsionada pela ascensão das máquinas a vapor inglesas e suas conversões de calor em trabalho, associadas a processos irreversíveis, assim como a ulterior interpretação estatística por Boltzman. Diferentemente da simples transmissão de movimento que caracteriza um moinho ou roda d’água, uma máquina a vapor produz movimento em ciclos: aquecido e pressionado pelo ganho de calor de uma fornalha, o vapor expande e empurra o pistão que, então, retorna à posição original após a liberação do vapor e resfriamento do sistema. Não fosse necessário o resfriamento, todo o calor fornecido pela fornalha seria transformado em movimento, equivalendo a um rendimento de 100% e a uma máquina perfeita!

A ciência termodinâmica não tardou a notar a impossibilidade de tal rendimento e à percepção de que a energia é algo que sempre se conserva, se acrescentou o reconhecimento de sua tendência à degradação associada às transformações irreversíveis, processo contextualizado por Prigogine e Stengers (1984) como uma das marcas da era industrial:

Quando comparamos aparelhos mecânicos aos motores térmicos, como as caldeiras em brasa das locomotivas, percebemos com um golpe de vista o degrau entre a idade clássica e a tecnologia do século dezenove. De início os físicos pensaram que esse degrau podia ser ignorado, que os motores térmicos podiam ser descritos como os mecânicos, negligenciando o fato crucial de que o combustível usado pelo motor a vapor desaparece para sempre. Mas tal complacência tornou-se logo impossível. Para a mecânica clássica o símbolo da natureza era o relógio; para a era industrial, ele se tornou um reservatório de energia sempre ameaçado por sua extinção. O mundo queima como uma fornalha; energia, embora conservada, também está sendo dissipada. (PRIGOGINE e STENGERS, 1984, p. 111, tradução nossa).

As transformações irreversíveis apontavam para uma evolução espontânea do sistema desde um estado de maior organização, portanto com maior quantidade de energia disponível para a realização de trabalho, para um estado de maior desordem. Tal preferência da natureza por estados de maior entropia, como veio a ser chamada a grandeza física formulada para se quantificar o grau de desordem de um sistema, apresentava-se como um sério problema para a mecânica newtoniana. Ainda que em nosso cotidiano possa parecer absurdo ver cacos de vidro se juntar e reverter a queda de um copo de água, o legado newtoniano não apresentava obstáculo teórico a essa possibilidade: conhecidas as condições iniciais e todas as forças envolvidas, poderíamos “rodar o filme” tanto para o futuro como para o passado; efeitos energéticos dissipativos, como o atrito, apenas imporiam maior dificuldade para se conhecer em detalhe a realidade, nada que um cuidadoso estudo ou um aprimoramento das técnicas de observação e medida não pudessem resgatar com precisão cada vez mais acurada.

Mas o que os motores a vapor indicavam não era uma questão restrita à maior ou menor precisão nas medidas efetuadas e, sim, a existência de uma tendência universal de degradação da energia mecânica, inviabilizando o caminho para o passado: tendo chegado ao chão com grande velocidade (passado), aquele copo de vidro se espatifou (futuro); o contato de dois objetos a diferentes temperaturas (passado) resultará em seu equilíbrio térmico (futuro). À lei da degradação da energia associava-se, assim, uma flecha do tempo, um vetor, apontando do passado para o futuro. Em seu conjunto, a termodinâmica se mostrava, assim, como uma nova ciência, muito mais comprometida com uma visão global do sistema amparada nas medidas de grandezas macroscópicas, como pressão, volume e temperatura, do que com a descrição da dinâmica de cada partícula componente do sistema.

Na tentativa de reconciliar a mecânica com a termodinâmica, floresceu a mecânica estatística e a hipótese de Boltzmann de que a entropia relativa a determinado estado macroscópico de um sistema estaria associada à probabilidade do conjunto de suas partículas se organizarem daquela forma: calculadas todas as combinações possíveis de um sistema isolado de muitas partículas, é muito maior a probabilidade de encontrá-lo na situação de equilíbrio, com as partículas tendendo à mesma distribuição de velocidade e se movimentando em direções aleatórias. Portanto, a tendência ao estado de maior entropia se explicaria pela maior probabilidade de assim estar organizado um sistema isolado, hipótese que, como bem analisado por Prigogine e Stengers (1984), se afastava dos pressupostos newtonianos:

O resultado de Boltzmann significa que a transformação termodinâmica irreversível é uma transformação para estados de maior probabilidade e que o estado atrator é o estado macroscópico que corresponde à máxima probabilidade. Isto nos leva bem longe de Newton. Pela primeira vez um conceito físico era explicado em termos de

probabilidade. Sua utilidade se faz presente de imediato. Probabilidade pode adequadamente explicar o esquecimento do sistema de todas as assimetrias iniciais, de todas as distribuições especiais (por exemplo, o conjunto de partículas concentradas em uma sub-região do sistema, ou a distribuição de velocidades que é criada quando dois gases de diferentes temperaturas são misturados). Este esquecimento é possível porque seja qual for a evolução peculiar para o sistema, cedo ou tarde ele será levado a um dos estados microscópicos correspondente ao estado macroscópico de máxima desordem e simetria, haja vista que este estado macroscópico corresponde à esmagadora maioria dos possíveis estados microscópicos. Uma vez atingido esse estado, o sistema dele se afastará somente por pequenas distâncias e por curto período de tempo. Em outras palavras, o sistema meramente flutuará ao redor do estado atrator. (PRIGOGINE e STENGERS, 1984, p. 124, tradução nossa).

Segundo Baggott (2011) foi com o intuito de rebater a análise de Boltzmann e encontrar uma comprovação definitiva da termodinâmica enquanto uma ciência independente da hipótese atômica que Planck se dedicou ao, na época, intrigante problema da radiação de corpo negro emitida por cavidades de fornos aquecidos:

Parecia uma escolha perfeita. A física teórica da radiação da cavidade parecia não ter conexão com átomos ou moléculas. Era um problema das ondas contínuas de radiação eletromagnética, tal qual descrito pela teoria de Maxwell, e da termodinâmica, cuja segunda lei dirigiria a radiação ao equilíbrio. Planck raciocinou que se ele pudesse demonstrar como o equilíbrio era estabelecido sem recorrer ao modelo mecânico estatístico dos atomistas, ele poderia minar a própria base da descrição mecânica. (BAGGOTT, 2011, p. 9).

Como modelo para a reflexão da radiação nas paredes da cavidade, Planck a imaginou constituída de osciladores hertzianos que, vibrando em movimento harmônico simples, garantiriam o necessário equilíbrio entre absorção e reemissão da radiação. Planck esperava, então, encontrar uma distribuição contínua para a energia destes osciladores. No entanto, o resultado a que chegou foi que a energia,  $E$ , dos osciladores harmônicos não se distribuía continuamente, mas sim, em pacotes múltiplos inteiros de uma quantidade mínima correspondente a cada frequência,  $f$ , ou seja,  $E = nhf$ , com  $n$  inteiro e  $h$ , por ele chamado de *quantum de ação*, valendo aproximados  $6,6.10^{-34}$  Js. Em vez de rebater a abordagem da mecânica estatística para interações na matéria, Planck a estendeu para interações entre matéria e radiação, estabelecendo importante conexão entre a mecânica, a termodinâmica e o eletromagnetismo. Tal conexão foi logo aprofundada pelo próprio Planck que com auxílio de seu *quantum de ação* derivou a carga do elétron e o número de Avogadro com uma precisão somente ultrapassada 20 anos depois (SEGRÈ, 1980, p. 75-76).

Apesar da exatidão com que resolveram o enigmático problema do corpo negro, os pacotes energéticos de Planck careciam de uma interpretação física mais consistente, papel cumprido por Einstein alguns anos depois em sua explicação para o efeito fotoelétrico. Para

Einstein, não apenas os osciladores, mas a própria radiação emitida pela cavidade, bem como a luz em geral se caracterizaria por sua granulação energética determinada pelos *quanta* hf. A ejeção de elétrons pela incidência de luz seria resultado da absorção por parte destes elétrons de pacotes hf de energia. Os *quanta* de luz comportavam-se, assim, como partículas, mais tarde apelidadas de fótons<sup>1</sup>. Tal manifestação corpuscular não negava, no entanto, o comportamento ondulatório apresentado pela luz nos fenômenos de difração e interferência. Florescia aí o reconhecimento do caráter dual da luz, nova conexão entre a mecânica e o eletromagnetismo possibilitado pelo *quantum de ação*.

Apostando na granulação da energia como uma regra fundamental da natureza, Einstein desenvolveu também uma satisfatória explicação para a dependência do calor específico para com a temperatura observada em sólidos submetidos a baixas temperaturas. Para tanto, Einstein tratou os átomos da substância como osciladores vibrando com valores discretos de energia, múltiplos inteiros de uma energia fundamental de vibração,  $E = hf$ , característica de cada material: em altas temperaturas, os osciladores vibram com grande energia e a absorção de um *quantum* de energia a mais ou a menos tem efeito desprezível, levando-os ao comportamento clássico de terem suas energias mudando continuamente e com o sólido não sofrendo variações em seu calor específico; mas conforme a temperatura do sólido é diminuída, um *quantum* de energia deixa de ser desprezível e a energia dos osciladores revela seu caráter descontínuo, comportamento que tem como consequência a diminuição do calor específico do material que tende a zero próximo ao zero absoluto.

As interpretações quânticas de Einstein para o efeito fotoelétrico e para o calor específico dos sólidos tiveram influência direta ou indireta na formulação de diversas descobertas teóricas ou experimentais, inspirando-nos a reolhar aquela arquitetura da física proposta por Menezes (2005) de forma a considerar a evolução do *quantum de ação* como uma flecha do tempo no desenvolvimento histórico e conceitual da física ao longo do século XX: os *quanta* de luz mostraram-se fundamentais na elaboração do modelo atômico de Bohr e, por extensão, no desenvolvimento da física atômica e nuclear, intimamente vinculada ao estudo de partículas e campos e, portanto, às teorias cosmológicas de como tudo começou

---

<sup>1</sup> De acordo com Kragh (2014), o termo fóton foi cunhado de forma independente e em sentido diferente do que hoje conhecemos em (a) 1916, por Leonard Thompson Troland, como uma unidade para a iluminação da retina, (b) 1921, por John Joly, como unidade de estímulo ou sensação visual e (c) 1926, por Gilbert N. Lewis como um novo tipo de átomo que, associado a uma completa simetria entre os processos de emissão e absorção de luz, teria sua quantidade sempre conservada em sistemas isolados. Foi somente a partir da Conferência de Solvay de 1927, que o termo começou a ganhar maior presença e equivalência com os *quanta* de luz de Einstein, tendo sido utilizado nas apresentações de H. A. Lorentz, Louis de Broglie, Paul Dirac, Léon Brillouin, Paul Ehrenfest e Arthur Compton.

(figura 3, seta azul); por sua vez, a percepção do comportamento quântico dos sólidos a baixa temperatura foi o ponto de partida para a impulsão da física da matéria condensada que veio reconhecer as propriedades semicondutoras e supercondutoras que caracterizam alguns materiais, bem como a existência das transições de fase e dos pontos críticos, termos que já dialogam com o estudo da evolução dos sistemas complexos (figura 3, seta vermelha).

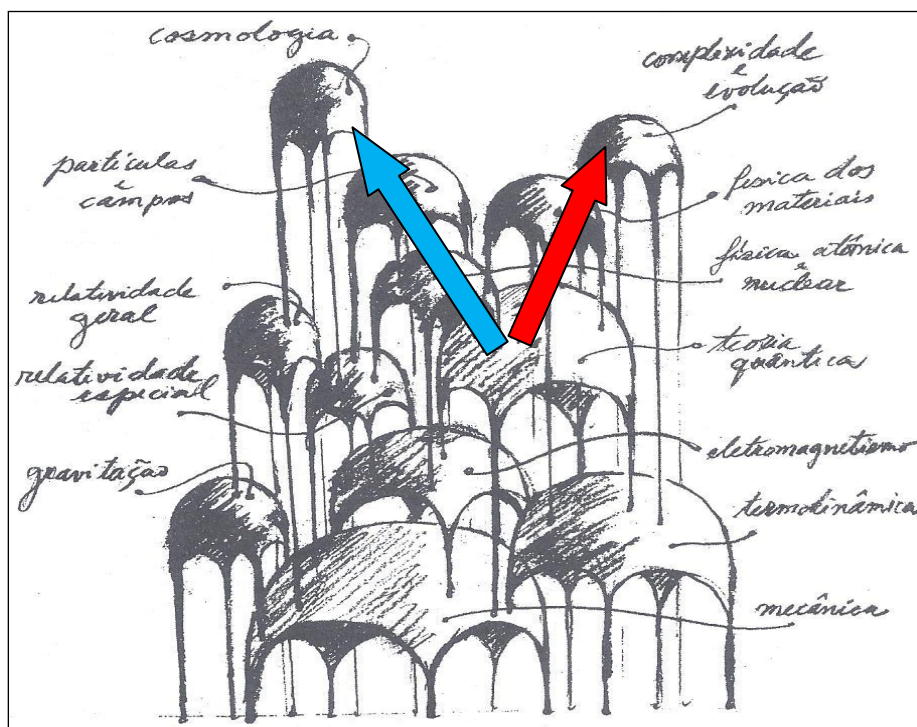


Figura 3 - Dois percursos históricos que podem ser percebidos como decorrentes da teoria dos quanta: (seta azul) rumo às teorias cosmológicas de como tudo começou, passando pela física atômica e nuclear, intimamente vinculada ao estudo de partículas e campos; (seta vermelha) rumo à evolução dos sistemas complexos, passando pelo desenvolvimento da física da matéria condensada que veio reconhecer as propriedades semicondutoras e supercondutoras que caracterizam alguns materiais, bem como a existência das transições de fase e dos pontos críticos.

É recomendável ponderar alguns limites da argumentação aqui apresentada. Longe da fidelidade ao uso de consagrados termos teóricos e a precisas análises históricas, intenciona-se destacar o papel desempenhado pela física quântica, essencialmente por sua interpretação descontínua da matéria e da radiação, na conexão conceitual e histórica da física desenvolvida desde a virada do século XIX ao XX. Nos dois percursos históricos acima identificados, decerto há uma infinidade de ramificações, além de algumas pontes que os identifiquem como



parte de processos conjuntos, ou mesmo que possibilitem a descrição de caminhos alternativos.

A fim de realçar o enredamento conceitual desempenhado na física pelo *quantum de ação*, pode-se também pensar em representações menos históricas e mais conceituais, como a representada na figura 4, abrindo espaços próprios para campos de conhecimento como a ótica e ondulatória, absorvidas em visões mais globais pelo eletromagnetismo ou pela mecânica.

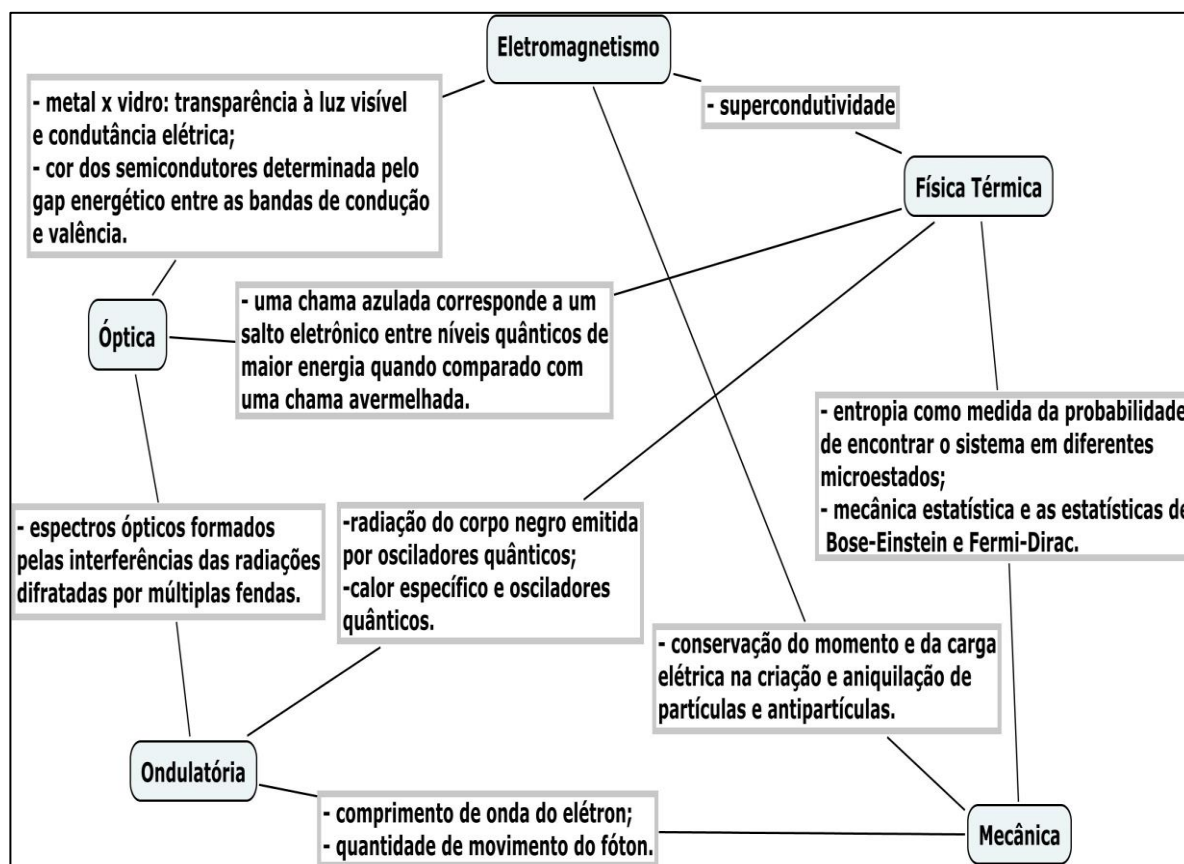


Figura 4 – Uma interligação de campos da física com exemplos de “pontes quânticas”.

Vale a pena descrever as conexões apresentadas nesta figura que ainda não foram objeto de análise ao longo do texto. A opacidade à luz visível e a condutância elétrica de um metal, contrapondo-se ao comportamento transparente e isolante do vidro, são fenômenos associados à extensão dos intervalos entre as bandas de valência e condução do material, pequena no caso do metal e maior no caso do vidro. Cor e temperatura são características da matéria associadas pela emissão de fótons por elétrons que transitam desde níveis quânticos mais energéticos para aqueles de menor energia. A cor dos semicondutores é determinada pelo *gap* energético entre a banda de valência e a banda de condução. Eletromagnetismo e

física térmica conectam-se a partir da propriedade de alguns materiais em se tornarem supercondutores a partir de seu resfriamento. Os espectros ópticos dos elementos químicos formados pela interferência das radiações difratadas por múltiplas fendas fornecem uma ponte entre a óptica e a ondulatória. Eletromagnetismo e mecânica vinculam-se pela conservação do momento e da carga elétrica na criação e aniquilação de pares de partículas e anti-partículas. Mecânica e física térmica ligam-se, por exemplo, em razão da interpretação quântica da entropia e do desenvolvimento da mecânica estatística quântica de Bose-Einstein, aplicada aos fótons e outros bósons, e a de Fermi-Dirac, aplicada aos elétrons e outros férmions.

Características ópticas, elétricas, mecânicas, ondulatórias e térmicas dos materiais, são, assim, conectadas umas às outras por meio da intimidade quântica da matéria. Quando se mergulha na estrutura da matéria, há pouco espaço para a identificação de fenômenos que genuinamente pertençam a este ou aquele campo da física e ainda que possamos imaginar diferentes maneiras pela qual a física quântica poderia ter surgido, é difícil defender uma via de desenvolvimento histórico na qual ela não tivesse exercido um papel protagonista ou, ao menos, de importante ator sempre presente.

Aliás, a última afirmação abre o caminho para um eventual estudo complementar ao presente texto rumo ao terreno das histórias contrafactuais definidas por Pessoa Jr (2000) como “*histórias possíveis que não se realizaram*” e que mapeadas poderiam “*explicar melhor por que os diferentes episódios da história da ciência ocorreram*”. A partir da análise da correlação de assuntos e citações presentes em centenas de artigos publicados na transição da física clássica à quântica, Pessoa Jr identifica na rede de influências entre artigos (figura 5) quatro grandes vias que poderiam ter levado ao surgimento da física quântica: a própria via factual da radiação térmica que poderia ter trilhado caminhos alternativos e as vias da espectroscopia, dos efeitos ópticos e do calor específico. A investigação de Pessoa Jr sugere possíveis caminhos alternativos para o desenvolvimento da física quântica ao longo do século XX, estudo que poderia melhor caracterizar o enredamento construído pela quântica, objeto de análise nesta tese.

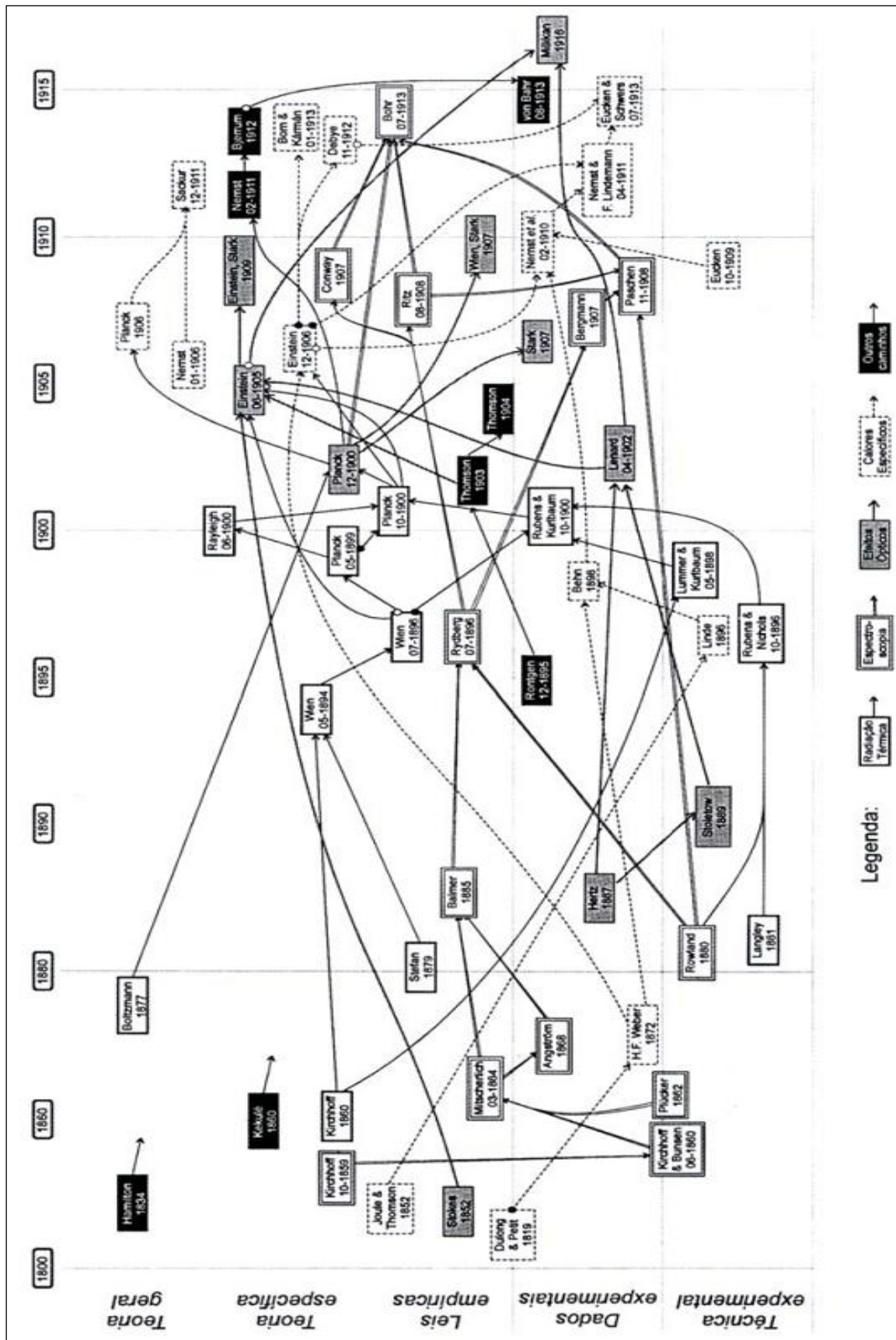


Figura 5 - Rede de influências entre artigos publicados na transição da física clássica à quântica com destaque a quatro vias que poderiam ter levado ao surgimento da física quântica: radiação térmica, espectroscopia, efeitos ópticos, calores específicos (PESSOA JR, 2000).

Antes de se avançar para a investigação de outros enredamentos tecidos pela física quântica, vale explicitar que não se trata aqui de meramente enaltecer este campo de conhecimento, mas de enfatizar seu papel como pivô na formação científica. Apesar do grande êxito alcançado pela física quântica na explicação de diversos fenômenos e da versatilidade de sua aplicação tecnológica, há, por exemplo, todo um debate que segue aberto acerca da interpretação quanto a aspectos que lhe são essenciais, tal como a dualidade onda-partícula: o que “realmente” acontece com fótons e elétrons para tornar possível a projeção de padrões de interferência em um anteparo após suas passagens por um dispositivo de dupla fenda?

Segundo Pessoa Jr. (2003, p. 5) as dezenas de interpretações existentes podem ser agrupadas nos seguintes blocos: (a) interpretação ondulatória, que supõe a propagação do objeto como onda redutível a um pacote de onda bem estreito no momento da detecção; (b) interpretação corpuscular, que considera o objeto como partícula sem existir qualquer onda a ele associada e com o padrão de interferências sendo formado devido à natureza das leis quânticas; (c) interpretação dualista-realista, que associa uma onda à partícula, com a probabilidade da partícula se propagar em certa direção dependendo da amplitude da onda que lhe está associada, não havendo partícula nas regiões em que as ondas se cancelam; (d) interpretação da complementaridade, que nega dar sentido à definição da real natureza de um objeto quântico, que tanto pode se comportar como onda ou como partícula, comportamentos, aliás, mutuamente excludentes, sendo o fenômeno ondulatório quando ocorre ou possa ocorrer franjas de interferência e corpuscular quando se pode inferir a trajetória passada do *quantum* detectado, detecção essa explicada pelo postulado de Planck que considera a existência de uma descontinuidade essencial em qualquer processo atômico<sup>2</sup>.

À problemática da identificação da real natureza dos objetos quânticos e respectivo questionamento se tal identificação é até mesmo provida de algum sentido, soma-se a questão das abordagens subjetivista e objetivista da medição, com a primeira atribuindo ao observador um papel de destaque e a segunda buscando excluir qualquer essencial influência do observador nos resultados. Na base do problema está a contradição entre a evolução temporal determinista que caracteriza o estado quântico antes da medição e o indeterminismo inerente ao processo da medição:

A mecânica quântica (MQ) pode ser estruturada da seguinte maneira. Um sistema fechado é descrito por um "estado" que evolui no tempo de maneira determinista (de

---

<sup>2</sup> Mais recentemente o autor considerou importante destacar um quinto grupo associado às interpretações instrumentalistas dos físicos matemáticos.

acordo com a equação de Schrödinger). Ao contrário da mecânica clássica, este estado em geral fornece apenas as "probabilidades" de se obterem diferentes resultados de uma medição. Após a medição, o sistema passa a se encontrar em um novo estado, estado este que depende do resultado obtido. Assim, pode-se dizer que no decorrer da medição o sistema evoluiu de maneira indeterminista. Esta transição tem sido chamada de "colapso do pacote de onda" ou "redução de estado", sendo descrita pelo postulado da projeção de Von Neumann. (PESSOA JR, 1992, p.177-178).

Além das polêmicas envolvendo suas diversas interpretações, a teoria quântica não tem conseguido abranger tudo o que hoje se conhece de física. Uma teoria que dê conta da unificação entre quântica e relatividade geral ainda está, por exemplo, a ser formulada. Ainda que fortalecido com a detecção do *bóson de Higgs*, a famosa “partícula de Deus”, o modelo padrão ainda não esclarece todos os mistérios, a exemplo das chamadas matéria e energia escuras.

Assim também, as questões da entropia, da irreversibilidade e da flecha do tempo que a quântica procurou responder em seu nascimento, talvez precisem da formulação de uma teoria que transcenda tanto a física clássica como a quântica. Esta última ideia já é, claro, um resgate aos estudos de Prigogine sobre a instabilidade dos sistemas distantes da condição de equilíbrio e sujeitos a diversas possibilidades evolutivas irreversíveis.

Diferentemente da estabilidade de um pêndulo que oscila em torno de sua posição de equilíbrio após a ação de uma pequena perturbação, grupos de pêndulos acoplados apresentam comportamento caótico a cada ínfima perturbação que lhes seja aplicada. A problemática da previsão do tempo, a evolução da fumaça de uma chaminé, a ocorrência de arritmias do coração e de ataques epiléticos e a dinâmica do crescimento populacional são também exemplos que se enquadram no estudo dos sistemas caóticos, assim denominados devido à imprevisibilidade da ordem a ser instaurada após determinada perturbação e não por serem desordenados.

Também emergentes de situações distantes do equilíbrio, transições de fase como as que ocorrem na imantação e no congelamento da água, são fenômenos de particular interesse para o estabelecimento de uma primeira ponte com *O mundo das redes*, título do próximo capítulo desta tese. Resgato, então, a explicação sobre o assunto dada por Duncan Watts, um dos pioneiros nos estudos das chamadas redes complexas:

É bem estranho, mas, no ponto crítico de transição, todas as partes do sistema agem como se pudessem se comunicar entre si, apesar de suas interações serem puramente locais. A distância através da qual os *spins* individuais parecem se comunicar é geralmente chamada de distância de correlação do sistema, e uma forma de pensar no ponto crítico é o estado no qual a *distância de correlação* cobre o sistema inteiro. Nessa condição, conhecida como *criticalidade*, mínúsculas perturbações, que em qualquer outro estado só seriam sentidas localmente, podem se propagar sem limites

até mesmo por um sistema infinitamente grande. O sistema, portanto, parece exibir uma espécie de coordenação global, mas o faz na ausência de uma autoridade central. Nenhum centro é necessário quando se está em criticalidade, porque qualquer ponto, não apenas um centro, é capaz de afetar qualquer outro ponto. De fato, como cada ponto é, por definição, idêntico, e todos estão identicamente conectados, não há base para que um esteja encarregado de outros, e, assim, para que haja um centro. Em consequência, nenhuma medida de centralidade teria utilidade para se descobrir a causa inicial do comportamento observado. Em vez disso, [...] uma série de eventos randômicos – eventos que passariam despercebidos em condições normais – pode, no ponto crítico, empurrar o sistema para um estado organizado universal, dando a ele a aparência de ter sido dirigido para isso estrategicamente. (WATTS, 2009, p.38).

O que cada vez mais se acentua nas investigações científicas é que fenômenos emergentes de situações de não equilíbrio são muito mais comuns do que se pensava, sendo este o contexto no qual vem se desenvolvendo os estudos dos já citados sistemas complexos e evolutivos, identificados por Prigogine (1996) muito mais com o começo da aventura científica do que com seu fim:

Neste fim de século, a questão do futuro da ciência é muitas vezes colocada. Para alguns, como Stephen Hawking em sua *Breve história do tempo*, estamos próximos do fim, do momento em que seremos capazes de decifrar o “pensamento de Deus”. Creio, pelo contrário, que estamos apenas no começo da aventura. Assistimos ao surgimento de uma ciência que não mais se limita a situações simplificadas, idealizadas, mas nos põe diante da complexidade do mundo real, uma ciência que nos permite que se viva a criatividade humana como a expressão singular de um traço fundamental comum a todos os níveis da natureza. (PRIGOGINE, 1996, p. 14).

## 2.2 NA INTERLIGAÇÃO ENTRE AS CIÊNCIAS E OUTRAS ÁREAS

As conexões estabelecidas pela física quântica perpassam o campo conceitual da física e se estendem pelo conjunto das ciências da natureza. O estudo da composição química de uma estrela, identificada pela luz por ela emitida, assim como o estudo da síntese estelar dos elementos químicos estabelecem, por exemplo, um elo entre a física, a química e a astronomia. Conexão ainda mais abrangente é promovida pela análise das interações entre luz e matéria na atmosfera terrestre e sua extrapolação para outros astros. A ação dos filtros naturais terrestres e de outros astros sobre os raios infravermelhos emergentes e ultravioletas incidentes, bem como sobre outras radiações ionizantes e partículas cósmicas é assunto que interliga física, química, biologia e astronomia. Estes quatro campos de conhecimento também se interligam através das propriedades radiativas de alguns isótopos de elementos químicos, como o carbono-14 e o urânio-238, cujas taxas de meia-vida respectivamente de aproximados 5,7 milhares de anos e 4,5 bilhões de anos, associam-se às datações de múmias e telas de linho, no caso do carbono e da Terra e outros astros, no caso do urânio.

No Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), em Campinas, assim como em outros aceleradores de partículas espalhados pelo mundo, físicos, químicos e biólogos cooperam entre si no estudo da estrutura de proteínas e demais demandas do contexto da biologia molecular, campo de conhecimento que se desenvolveu a partir da descoberta da estrutura do DNA, protagonizada em 1953 por Watson e Crick a partir da técnica da difração de raios X. E se o assunto é vida, é claro que a investigação das características físicas e químicas do carbono, bem como da incidência da luz solar na superfície de plantas, ativando a fotossíntese, e na pele humana, provocando bronzeamento ou queimadura, são também exemplos do papel da física quântica na articulação dos conhecimentos físicos, químicos e biológicos.

Por sua vez, a extrema coerência associada à luz *laser* é feixe de importantes conexões entre a física e a biologia, haja vista o uso de pinças ópticas na manipulação de células e da holografia na investigação dos efeitos ambientais na germinação de sementes. No primeiro caso, faz-se uso de um feixe de luz que, embora de baixa potência, apresenta intensidade grande o suficiente para exercer forças sobre uma célula viva, sem danificá-la. No segundo caso, sequenciais holografias da semente submetida às condições ambientais a serem experimentadas são comparadas a fim de se perceber eventuais perdas de foco, caso em que se infere a movimentação da semente, na faixa de *angstroms*, causada pela ocorrência de reações químicas em seu interior, típicas do processo de germinação.

A figura 6 representa um mapeamento das conexões acima identificadas, além de também apresentar conexões mais estreitas entre a física e a química, tais como a questão da estrutura eletrônica dos elementos químicos, das sínteses e descobertas de novos materiais e elementos químicos e dos processos nucleares de fissão e fusão.

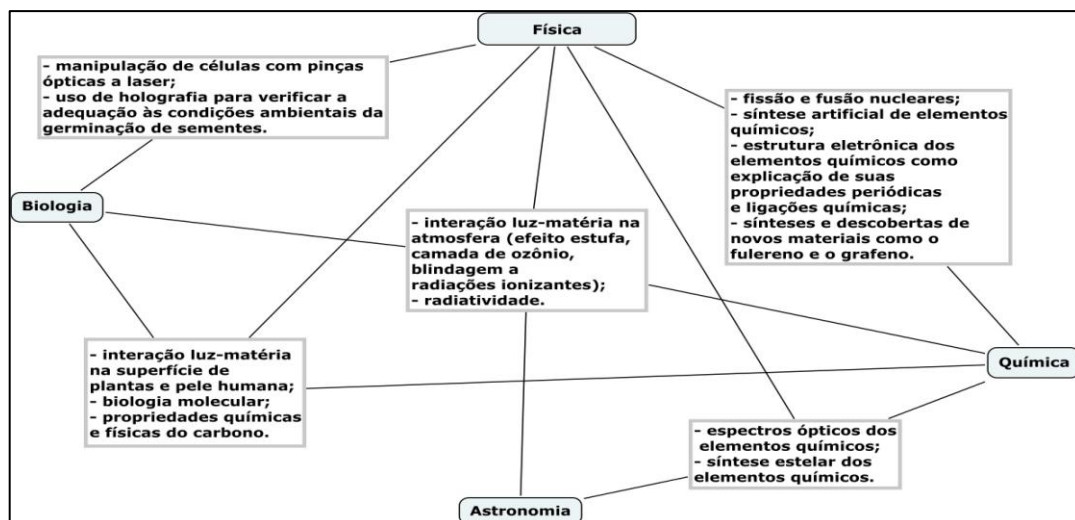


Figura 6 - A física quântica na interligação entre as ciências.

Vale observar que o mapeamento aqui identificado é apenas um conjunto de exemplos de diversas possibilidades alternativas. A abrangência dos assuntos envolvidos com a biologia molecular, por exemplo, justificaria identificá-la como um quinto campo de conhecimento, juntamente à física, à química e à astronomia. Similarmente, a astrobiologia e a astroquímica poderiam ser também explicitadas neste mapa.

Além da ampliação desse mapa focado nas ciências naturais, pode-se também explorar as conexões destas ciências para com outras áreas de conhecimento. É o que se faz no enredamento apresentado na figura 7, essencialmente tecido pelas técnicas e tecnologias direta ou indiretamente associadas à física quântica.

Como protagonistas de todo um feixe de conexões interno a esse mapeamento estão as tecnologias que se utilizam de decaimentos radiativos. De particular interesse à antropologia e arqueologia, o método de datação por carbono 14, por exemplo, é utilizado na identificação da idade de múmias e antigos artefatos, ao passo que isótopos de meia vida mais longa são utilizados na paleontologia, geocronologia e geofísica. Datações radiativas são também eficazes em muitos casos em que se necessita comprovar a autenticidade de quadros e esculturas artísticas. Na medicina são diversas as técnicas diagnósticas e terapêuticas baseadas na monitoração de substâncias radiativas injetadas no paciente. A ruptura da estrutura celular de bactérias em alimentos expostos a decaimentos radiativos vem sendo crescentemente explorada na engenharia de alimentos como técnica de melhor conservá-los. Na engenharia e na indústria em geral são inúmeros os usos de elementos radiativos, tais como traçadores radiativos na identificação de vazamentos na indústria química, medições da atenuação na penetração das emissões radiativas como controle de qualidade na determinação de espessuras na indústria de papel e esterilização não apenas de alimentos, mas também de materiais cirúrgicos, remédios e materiais de valor histórico.

As radiações eletromagnéticas emitidas por processos não nucleares também se constituem como importante feixe de conexões neste mapeamento. Radiografia, termografia, terapias com exposição a raios infravermelhos e ultravioletas, tomografia e ressonância nuclear magnética são alguns exemplos do amplo uso das radiações na medicina. Além de identificar anomalias em tecidos humanos, os raios X podem ser úteis em diversas outras aplicações técnicas, como na comprovação da autenticidade de uma obra de arte, na identificação de porte de armas em aeroportos, na caracterização da coloração das penas de fósseis de aves extintas na paleontologia e na percepção de fraturas em peças na indústria. Os raios ultravioletas também têm larga aplicação tecnológica para além da medicina, como na



ativação de certos tipos de cola, na secagem de tintas e vernizes, na esterilização de alimentos e bebidas e no tratamento de água de piscina ou mesmo água potável.

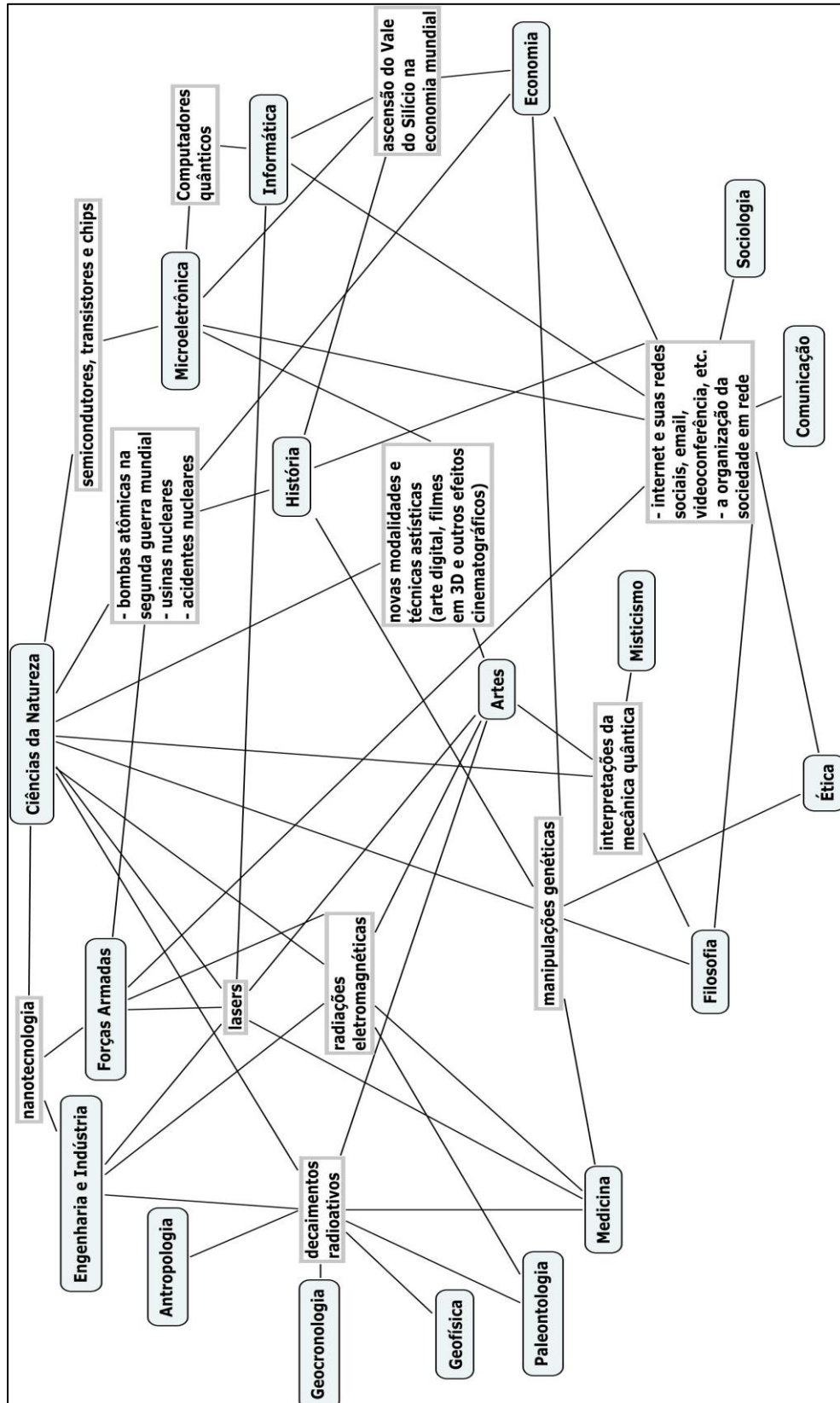


Figura 7 - A interligação das ciências com outras áreas.

Após pouco mais de 50 anos de sua invenção, o *laser* tem uma presença tão significativa no conjunto dos campos de conhecimento que merece destaque especial no mapeamento aqui explorado. Alguns exemplos de suas aplicações: cortes precisos em peças industriais, cirurgias de correção de defeitos de visão, precisão na mira de armamentos militares, shows de projeção, maior precisão em gravuras sobre joias, transmissão e armazenamento de informações via CDs, DVDs ou fibras ópticas, além das já citadas holografias e pinças ópticas com usos que em muito extrapola os limites das ciências da natureza.

A manipulação genética, inserida no contexto da biologia molecular e, portanto também já identificada no mapa anterior como uma ponte entre as ciências da natureza, abrange uma dimensão filosófica e ética, com as questões da técnica da clonagem e da produção de alimentos transgênicos sendo alvos de enorme impacto econômico assim como de grande polêmica social. Polêmicas à parte, fato é que o cultivo mundial de transgênicos já atingiu 160 milhões de hectares em 2011 e a cada ano são anunciados diversos novos investimentos em pesquisas referentes a clonagens de embriões, células tronco e modificações genéticas de animais, um caminho que não parece ter volta e cuja influência é cada vez maior na economia mundial, sendo, pois, um marco na história humana.

As destruições de Hiroshima e Nagasaki e acidentes nucleares como o de Fukushima, também se constituem como marcos históricos associados a tecnologias possibilitadas pelo desenvolvimento da física quântica. Longe de uma questão já esquecida na história humana, a energia nuclear continua, ainda que controversa, sendo uma das alternativas concretas à futura extinção do petróleo e do carvão, permanecendo com amplo uso em diversos países como França, Bélgica, Japão, Alemanha e Estados Unidos e representando cerca de 17% da geração mundial de energia elétrica.

A manipulação dos semicondutores e a conseqüente construção de transistores e *chips*, base de toda a microeletrônica, transformaram para sempre e de forma radical as técnicas de comunicação, inaugurando as práticas simultâneas a distância e as interações assíncronas e provocando uma estruturação da sociedade baseada na constituição de redes globais. A ascensão do Vale do Silício, nos Estados Unidos, bem como de toda a indústria de *hardwares* e *softwares* na economia mundial, são também destacados aspectos da história humana.

Além das técnicas e tecnologias direta ou indiretamente associadas à física quântica, há também desenvolvimentos teóricos e conceituais a ela vinculados que interligam as ciências da natureza com outros campos de conhecimento. Exemplo disso é a enorme margem para a emergência de questões filosóficas relacionadas à sua própria interpretação, fonte de

alimentação para “misticismos quânticos” e imaginação de novos super-heróis, como o enigmático *Dr. Manhattan*, de *Watchmen*, com poderes para controlar os átomos do seu próprio corpo, mudar de tamanho, se teleportar, ocupar simultaneamente vários lugares e viajar no tempo.<sup>3</sup>

Da mesma forma que apontado para o caso das ciências da natureza, aqui também vale indicar a possibilidade de expansão do mapeamento apresentado com a incorporação de áreas recentemente acopladas ao conhecimento humano, tais como a nanobiotecnologia e a nanomedicina, indicando, aliás, que a própria nanotecnologia poderia ter modificado seu *status* neste mapa, passando a nele figurar como um novo nó e não apenas uma conexão entre dois nós.

### 2.3 NA VIVÊNCIA CONTEMPORÂNEA

É notável como a evolução tecnológica tem provocado intensa aceleração na modificação dos utensílios e materiais que utilizamos no cotidiano, algo muito bem representado pela seguinte análise feita pela NASA (1960 apud BUCHANAN, 2010) em meados do século XX:

800 ciclos de vida podem durar mais de 50000 anos. Mas destas 800 pessoas, 650 passaram suas vidas em cavernas ou em um local pior, e apenas 70 delas conseguiram algum meio real e efetivo de se comunicar com as outras. Destas 70, apenas as últimas 6 chegaram a ver a mídia impressa ou conseguiram algum meio para medir a temperatura, das quais apenas 4 conseguiram calcular o tempo com alguma precisão. Destas, apenas as 2 últimas usaram um motor elétrico, e a grande maioria dos artigos que compõem nosso mundo material foram desenvolvidos no ciclo da vida da 800ª pessoa. (NASA, 1960 apud BUCHANAN, 2010, p. 88).

Uma atualização dessa análise decerto revelaria que nem mesmo uma geração inteira é mais necessária para perceber uma renovação de boa parte, senão da maioria, dos artigos que compõem nosso mundo material. Como diria minha finada avó, “*alcancei um tempo*” em que era comum o uso de uma tela de faixas coloridas na frente dos televisores preto e branco constituídos de canhão e válvula eletrônicos. Hoje, assisto minha *LED-TV* de imagem incrivelmente nítida e colorida e que de tão fina, pode ser pendurada na parede como um quadro. Infelizmente, tendo sido comprada já há três anos, ela não veio acoplada com a tecnologia que permite assistir “canais” de *internet*, como a *NetFlix*, me obrigando a nela conectar via cabo *HDMI* um *notebook* que, sintonizado em minha rede *Wi-Fi*, roda o filme

---

<sup>3</sup> Interessante artigo de Pessoa Jr. a esse respeito encontra-se disponível em <[http://www2.uol.com.br/vyaestelar/fisicaquantica\\_quadrinhos.htm](http://www2.uol.com.br/vyaestelar/fisicaquantica_quadrinhos.htm)> (Acesso em 31 Mar. 2014).

desejado. A próxima TV a ser comprada não apenas contará com essa e outras funcionalidades, como também deverá ter imagem em três dimensões. Aliás, já adiantando assunto a ser mais à frente explorado no contexto da discussão do processo de ensino-aprendizagem, faz-se curiosa e preocupante a popularização de termos como *LED* (*Light-Emitting Diode*), *HDMI* (*High-Definition Multimedia Interface*) e *Wi-Fi* (marca registrada comumente utilizada como sinônimo de redes *wireless*), sem que alunos e mesmo boa parte dos próprios professores da escola média tenham noção de seus significados.

E quanto à produção de textos? Guardo até hoje meu certificado de datilografia conquistado em 1979 após 6 meses de curso. A sensação, de então, eram as máquinas de escrever elétricas e portáteis, leves e bem mais sensíveis ao toque. As fitas de duas cores, preta e vermelha, já eram comuns e apagava-se o texto letra a letra, trocando a fita de escrever por uma fita branca. Após a máquina de escrever veio o computador acoplado a telas pretas com letras verdes, disquetes magnéticos de 3,5 ou 5,25 polegadas, impressora matricial e ... nada raras dores de cabeça associadas à perda de horas de digitação devido ao esquecimento da necessária ação não automatizada de salvar o texto. Hoje digito este texto em meu *notebook* conectado via rede *Wi-Fi* à impressora jato de tinta multifuncional e com os dados não apenas sendo salvos automaticamente no disco rígido do aparelho, como também em meu disco virtual do *Google Drive*. A próxima aquisição talvez seja um *ultrabook* “2 em 1”, *notebook* mais fino, leve e de maior velocidade de processamento, cuja tela sensível ao toque pode ser desacoplada do teclado e funcionar como *tablet*.

A essa percepção da rapidez com que a tecnologia tem mudado nossas vidas, pode-se acoplar o exercício de investigar a extensão de sua presença em nosso cotidiano. O retrato do início de um dia de trabalho de uma secretária de telemarketing é assim apresentado no texto *Toda a Física: hoje e através de sua história* (MENEZES et al., 2003, p. 5-7):

Ela acorda com um relógio despertador, que mede o tempo pela contagem de pulsações de um cristal de quartzo, feita por um chip eletrônico, que é um microcircuito integrado a um cristal semicondutor. Vai direto ao banheiro, onde ralos, pia e vaso sanitário são providos de sifões hidráulicos, para reter odores. Toma um banho, com água que vem de um reservatório dotado de bóia e registro e que passa por um chuveiro elétrico, um resistor sob uma tensão de 220 V, mas que, no apartamento vizinho, circula por um aquecedor de passagem, um tubo metálico sobre um queimador a gás.

Em dúvida sobre que roupa vestir, procura se informar da previsão do tempo, no noticiário das 7 horas. Se fosse assinante de TV a cabo, poderia ver um canal especializado, cujo sinal lhe chegaria por uma rede de fibras ópticas; como não é, a antena coletiva do prédio leva até seu receptor o sinal, em frequência modulada, transmitido pelas ondas eletromagnéticas a partir da emissora de TV aberta. Ela aciona e desliga o aparelho usando um controle remoto de raio infravermelho.

Prepara então seu café, fervendo a água em fogão a gás, com botijão de GLP (gás liquefeito de petróleo) protegido por válvula de segurança, sensível a variações

abruptas de pressão. Tira o pacote de leite UHT (tratado em ultra-alta temperatura) do refrigerador, cujo ciclo térmico usa motor-compressor elétrico e tem controle automático de degelo. Põe uma fatia de pão na torradeira, outro simples resistor como o do chuveiro, mas com tensão de 110 V e provido com termostato de par metálico. Esquenta um pouco de leite na própria xícara, colocando-a em um forno que só esquenta alimentos úmidos, pois faz uso de um feixe de microondas, com frequência de oscilação igual à das moléculas de água. No visor, de cristal líquido, registra o tempo de somente 40 segundos, para evitar a ebulição e o derramamento do leite.

Pronta para sair, pega seus óculos, com lentes que combinam correção esférica para miopia e cilíndrica para astigmatismo; abre e fecha a porta do apartamento com sua chave, uma alavanca de latão temperado, que se encaixa e faz girar o fecho mecânico, cujo segredo está registrado em um pequeno tambor de cobre. Chama o elevador acionando um botão, que fecha o circuito de um relê, o qual liga um potente motor elétrico, que ergue até seu andar a grande caixa de estrutura metálica; outro motor, menor, também acionado por relê automático, abre a porta do elevador. Prepara-se então para sair à rua, para o incrível desafio do trânsito urbano, com seus automóveis e caminhões, movidos pelos ciclos Otto e Diesel de seus motores a combustão interna, e com os semáforos automáticos orientando o fluxo do trânsito a partir de informações computadas por um sistema central de processamento de dados. Sirenes ensurdecidas anunciam a emergência das ambulâncias. Lembra-se de ter visto o interior de uma delas, uma verdadeira UTI móvel, onde medidores de pressão arterial, de pulsação cardíaca e de outros dados vitais do paciente estão ligados a um radiotransmissor, que informa o hospital de destino, o qual dá retorno, por teleprocessamento, com instruções sobre os procedimentos médicos durante o trajeto.

Por sorte, nossa personagem não está na ambulância, mas fora dela, e, por mais sorte ainda, pode encurtar parte de seu trajeto usando o metrô. Seu bilhete magnético de trechos múltiplos permite-lhe passar pela catraca eletrônica. Diferentes motores elétricos movem a escada rolante, as portas automáticas dos vagões e o próprio trem, com suas dezenas de toneladas. Para cada motor e cada porta há relês, acionados por sensores mecânicos ou por fotocélulas. Algo ou alguém obstrui o fechamento de uma porta e, automaticamente, o condutor recebe um sinal para que impeça a partida da composição. Os alto-falantes anunciam o problema, e encontra-se uma sacola no vão de uma das portas.

Enfim, ela chega a seu destino, um moderno prédio comercial; câmaras de vídeo controlam o acesso, monitoradas desde a sala de segurança – “Sorria, você está sendo filmado”. Um detector magnético de metais evita que se entre armado. Tem havido protestos, pois até molhos de chave travam a porta giratória, mas já há proposta de instalar raios X para controlar pastas e pacotes, como nos aeroportos. A luz azulada, de vapor de mercúrio, domina os corredores, enquanto a luz mais amarelada, de vapor de sódio, ilumina os escritórios. Senta-se, enfim, em seu posto de trabalho; com uma alavanca controla o mecanismo de altura e inclinação de sua cadeira, adapta fone de ouvido e microfone e cumprimenta, por mensagem de voz, as demais operadoras da central de telemarketing: “Meninas, cheguei!”.

Liga seu computador, conectado a uma rede local e a uma fonte no break, que substituiu os antigos estabilizadores de tensão, protegendo a continuidade do trabalho e evitando interrupções no fornecimento de eletricidade. Antes de tudo, é preciso abrir o e-mail e responder às mensagens da noite anterior, no correio eletrônico. Não importa a distância, as respostas chegam em segundos, à velocidade da luz, a mesma com que chegam, pela Internet, as notícias dos jornais diários ou as conversas nos espaços de chat. Logo tem de atender a duas chamadas ao mesmo tempo, uma no telefone fixo e outra no celular, seu minúsculo transmissor-receptor pessoal de rádio. No celular é uma colega, que a viu chegar pelo circuito fechado de TV, pedindo emprestado o DVD daquele filme de que falaram na véspera; no outro, é o primeiro cliente do dia, querendo saber quanto custaria instalar, em seu sistema, um gravador de CDs. As duas ligações, no mesmo instante, têm a ver com o mesmo assunto: o registro e a reprodução de informações de imagem e som usando feixes

de laser. Mais outra ligação, de outro cliente: seu notebook, comprado pela Internet, acaba de chegar, mas está faltando o transformador-retificador para ligá-lo na rede elétrica. Ela lhe explica que não falta nada, pois, no modelo que comprou, a fonte de corrente contínua já está embutida no aparelho.

Com foco nos campos e conceitos da Física, a sequência de atividades narradas neste texto fictício vai ao encontro do real cotidiano de nossa época, marcada pelo uso de inúmeras tecnologias e utensílios tecnológicos que tecem uma rede entre as mais diversas áreas de conhecimento. Parte dessa rede, centrada nas conexões direta ou indiretamente associadas à física quântica, é realçada na figura 8.

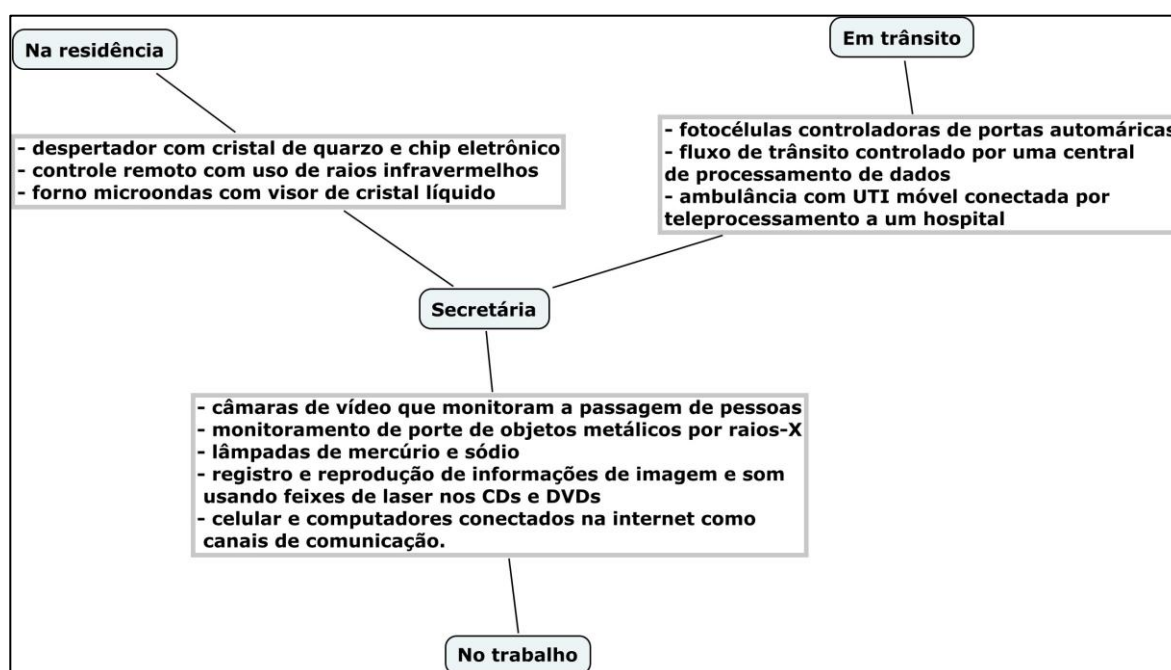


Figura 8 - Física quântica e vivência moderna.

De volta à vida real, tomo como estudo de caso problema já enfrentado de perto: diagnóstico e terapia de neoplasia maligna de ureter. Ao longo do processo, foram três os tipos de exames diretamente relacionados com a física quântica: *Ressonância Magnética Nuclear (RNM)*, *Tomografia Computadorizada (TC)* e *Cintilografia Óssea* pelo processo da *Tomografia Computadorizada com Emissão de Fótons (SPECT, do inglês Single-Photon Emission Computed Tomography)*. Diretamente, pois uma investigação de maior extensão certamente detectará a presença indireta de processos quânticos em boa parte, senão em todos os demais exames realizados, haja vista a ultrassonografia com suas ondas sonoras clássicas sendo emitidas e captadas por instrumentos essencialmente quânticos. De qualquer forma, restrinjo o estudo aos exames que se utilizam das interações entre radiação e matéria.

De início, note-se uma semelhança entre *RNM*, *TC* e *SPECT*: fornecem imagens a partir do escaneamento de fatia a fatia do corpo sendo, portanto, tomografias, palavra derivada dos termos gregos *tomé* (cortar) ou *tomos* (parte, seção) e *graphein* (escrita). Como essencial diferença destacam-se as radiações empregadas: radiofrequência na *RNM*, raios X na *TC* e raios gama na *SPECT*.

Na *RNM*, o paciente é inicialmente submetido a um campo magnético de alta intensidade que alinha a orientação magnética dos prótons dos átomos de hidrogênio presentes nas moléculas de água do organismo. Em seguida, um pulso eletromagnético na faixa de radiofrequência é aplicado apenas na região a ser escaneada. Sendo a frequência desse pulso ressonante à frequência natural de vibração dos prótons, estes oscilam e passam a emitir seus próprios pulsos eletromagnéticos que, detectados pelo equipamento, formam a imagem. A *RNM* é, assim, mais comumente utilizada na investigação de anomalias dos tecidos moles, de maior concentração de moléculas de água. A fim de melhor controlar o ritmo de vibração dos prótons e dar melhor contraste à imagem produzida, é comum aplicar no paciente uma substância intravenosa à base de gadolínio, elemento paramagnético.

Tal qual na radiografia, a *TC* utiliza feixes de raios X que incidem sobre o paciente e são parcialmente absorvidos por seus tecidos. Porém, em vez de uma única imagem formada pela incidência dos raios não absorvidos sobre uma chapa radiográfica, na *TC* feixes de raios X emitidos em diferentes direções atravessam o paciente e projetam múltiplas imagens em detectores que, combinadas, geram a imagem final. Tecidos mais grossos, de maior densidade e compostos por elementos químicos de maior número atômico apresentam maior capacidade de absorção, com a *TC* sendo mais indicada para regiões do organismo que apresentem tecidos com variações nestas características. Na imagem final, as diferentes capacidades de absorção são inferidas pelas diversas tonalidades de cinza, as mais escuras correspondendo aos tecidos mais moles.

A utilização de meios de contraste tem estendido o uso da *TC* mesmo a situações como a análise da circulação da corrente sanguínea ou da urina. Substâncias de boa solubilidade em água e formada com base a elementos químicos de alto número atômico, geralmente iodo ou bário, são introduzidas no paciente a fim de “tingir” o fluido, tornando-o opaco aos raios X. Várias imagens tiradas rápida e sequencialmente permitem detectar o traçado e velocidade do fluido pelo corpo, detectando eventuais pontos de bloqueio, como tumores e cálculos presentes no trato urinário.

A cintilografia, seja em sua forma mais simples ou com base à técnica *SPECT*, consiste na administração ao paciente de uma substância emissora de radiação gama. Maior a

absorção da substância por determinada região do organismo, mais raios gama são emitidos desde ali, emissão detectada por câmaras posicionadas ao redor do paciente e que funcionam por cintilação, isto é, por emissão de luz visível ou infravermelha a partir da colisão dos raios gama com elétrons do cristal que reveste a câmara. A *SPECT* corresponde à aplicação desta mesma técnica com uso de um par de “câmaras-gama” que girando ao redor da pessoa formam múltiplas imagens posteriormente combinadas por computadores.

Para maior precisão na detecção de anomalias no organismo, é comum combinar *SPECT* e *TC* em um mesmo exame, pois assim podem ser analisadas de uma só vez tanto a função dos órgãos, associada à sua dinâmica funcional, como sua anatomia, associada à constituição de seus tecidos. No caso da cintilografia óssea realizada com *SPECT/TC*, um radiofármaco normalmente utilizado é o  $^{99m}\text{Tc-MDP}$ , composto por metileno difosfonato e pelo isótopo metaestável 99 de tecnécio, com tempo de meia vida de 6 h e fótons de 140 keV. Enquanto o tecnécio garante a emissão dos raios gama, o metileno difosfanato tem boa absorção pela matriz óssea.

Realizados todos os exames e identificado com boa aproximação a localização e o volume do tumor, o diagnóstico indicava necessidade de uma nefroureterectomia, ou seja, extração de rim e do ureter direito. Algo que há algum tempo atrás se fazia a partir de grandes incisões abdominais e que hoje pode ser realizado por videolaparoscopia, procedimento pelo qual um dispositivo *charge-coupled device (CCD)* e um cabo de fibra óptica são acoplados à extremidade de um laparoscópio, tubo de milímetros de espessura, exigindo apenas incisões de centímetros de espessura. A imagem gerada pelo *CCD* é transmitida por cabo ou rede sem fio a um monitor de tela plana e alta resolução, permitindo a visualização ampliada do contato entre o laparoscópio, pinças e outros dispositivos que se façam necessários com os órgãos do paciente. Por fim, a patologia da peça extraída não indicava a necessidade de complemento quimioterápico, restando apenas necessidade de controle periódico.

A evolução na medicina associada ao desenvolvimento e uso de modernos equipamentos diagnósticos e terapêuticos como os acima descritos é um dos fatores que explicam a emergência de novas profissões como a de físico-médico, biotecnólogo, bioinformata, nanotecnólogo e farmacoeconomista. Claro que essa percepção não é restrita a campos direta ou indiretamente ligados à medicina. Em todos os ramos do mercado, inovações tecnológicas têm fomentado o surgimento de novas profissões, de profundas modificações naquelas já existentes ou mesmo de extinção de antigas ocupações.

Com isso já se estabelece um diálogo com o próximo tópico em que se apresentarão algumas análises sociais que apontam a microeletrônica como fator condicionante das



recentes transformações sociais. Antes disso, um último exemplo do enredamento tecido pela física quântica, desta vez soando como seu efeito colateral. Refiro-me às pseudociências associadas ao misticismo quântico, tais como a propalada cura quântica que tem até mesmo proporcionado o oferecimento de cursos com direito a diploma de terapeuta ou médico quântico. Há também no mercado promessas de emagrecimento quântico que, baseado na alteração de um suposto padrão de entrelaçamento das ondas cerebrais, poderia levar à rápida perda de peso. É bem verdade que a coerência teórica de algumas interpretações subjetivistas da física quântica dá sustentabilidade ao desenvolvimento do *naturalismo espiritualista quântico*, termo cunhado por Pessoa Jr (2010) como referência a visões de mundo como a de Roger Penrose e sua teoria da consciência como fenômeno essencialmente quântico. Mas daí a justificar práticas de uma medicina ou terapias “quânticas”, “conscientes” e “holísticas” há uma grande distância. Mas ainda que um professor possa ser avesso a tais deturpações teóricas, é bom que ele não fique surpreso caso venha a se deparar com alunos já formados em “medicina quântica”.

## 2.4 NA CATÁLISE DA EVOLUÇÃO SOCIAL E TECNOLÓGICA

Em *A Estrutura das Revoluções Científicas*, Kuhn (1998) analisa que em tempos normais, a comunidade científica exerce suas atividades em base a paradigmas, princípios que consistentemente aplicados com sucesso na solução dos principais problemas contemporâneos, são por ela aceitos como verdades universalmente estabelecidas. Nesse contexto, a tendência da prática científica é aplicar tais princípios com o máximo detalhamento e abrangência, desencorajando eventuais elaborações de teorias alternativas na explicação de fenômenos que pareçam fugir ao paradigma vigente. Eis que, ao longo desse processo, alguns enigmas que teimam em não se encaixar na explicação padrão, originam o desenvolvimento de um novo conjunto de ideias que desestrutura a prática vigente e provocam uma revolução científica com a adoção de um paradigma alternativo, em torno do qual se desenvolverá novo período de normalidade nas atividades científicas.

De forma análoga, Pérez (2004) analisa os longos ciclos de desenvolvimento capitalista como sucessivas revoluções tecnológicas, cada qual associada ao surgimento de um novo paradigma técnico-econômico caracterizado por uma constelação de inovações tecnológicas e princípios organizativos indutores de um “salto quântico da produtividade potencial para a imensa maioria das atividades econômicas”. Nessa perspectiva, identificam-se as cinco revoluções tecnológicas descritas no quadro 1.

Quadro 1 – Características centrais das 5 revoluções tecnológicas

Revolução tecnológica	Nome popular	Núcleo	“Big-Bang” da revolução	Ano
Primeira	Revolução Industrial	Inglaterra	Abertura da fábrica de fiação de Arkwright em Cromford.	1771
Segunda	Era do vapor e das estradas de ferro	Inglaterra (difundindo-se para a Europa e EUA)	Prova da locomotiva Rocket para a estrada de ferro Liverpool-Manchester.	1829
Terceira	Era do aço, da eletricidade e da engenharia pesada	EUA e Alemanha ultrapassando a Inglaterra	Inauguração da fábrica de aço Bessener de Carnegie em Pittsburg, Pensilvânia.	1875
Quarta	Era do petróleo, do automóvel e da produção em massa	EUA e Alemanha (rivalizando no início a liderança mundial e com difusão para a Europa)	Saída do primeiro modelo T da planta Ford em Detroit, Michigan.	1908
Quinta	Era da informática e das telecomunicações	EUA (difundindo-se para a Europa e Ásia)	Anúncio do microprocessador Intel em Santa Clara, Califórnia.	1971

FONTE: PÉREZ, 2004, p.35, tradução nossa.

Alternativamente, os quatro primeiros períodos apresentados no quadro podem ser agrupados dois a dois de forma a melhor dialogarem com a comum categorização das duas primeiras revoluções industriais, a inglesa e a alemã, ficando o 5º período associado a uma *Terceira Revolução Industrial* ou, como sugere Castells (1999), à *Primeira Revolução Tecnológica*, cujo paradigma tecnológico teria, segundo esse mesmo autor, os aspectos centrais apresentados no quadro 2.

A *Revolução da Tecnologia da Informação* teria, então, fornecido a base material para a reestruturação capitalista desde o industrialismo (produtividade essencialmente vinculada à introdução de novas fontes de energia e na capacidade de descentralização do uso de energia ao longo dos processos produtivos e de circulação) para o informacionalismo (produtividade centrada na tecnologia de geração de conhecimentos, de processamento da informação e de comunicação de símbolos). Tal é a análise que leva Castells (2009) a identificar o surgimento de uma nova economia informacional, global e em rede ou, sinteticamente, *Sociedade em Rede*, marcada pelo estabelecimento de imenso número de conexões entre os mais diferentes domínios, elementos e agentes das atividades humanas:

As atividades básicas que configuram e controlam a vida humana em cada rincão do planeta estão organizadas em redes globais: os mercados financeiros; a produção, gestão e distribuição transnacional de bens e serviços; o trabalho muito qualificado; a ciência e a tecnologia, incluída a educação universitária; os meios de comunicação; as redes de internet de comunicação interativa multiobjeto; a arte, a cultura, os espetáculos, o esporte; as instituições internacionais que fazem a gestão da economia global e das relações intergovernamentais; a religião; a economia criminal; as ONGs transnacionais e os movimentos sociais que fazem valer os direitos e valores de uma nova sociedade civil global. (CASTELLS, 2009, p. 25, tradução nossa).

Quadro 2 – Características centrais arroladas por Castells (1999) para a *Revolução Tecnológica da Informação* (1).

Características	Descrição
A informação como matéria prima	Pela primeira vez na história, a mente humana é uma força direta de produção, não apenas um elemento decisivo no processo produtivo; computadores, sistemas de comunicação, codificação e programação genética são todos amplificadores e extensões da mente humana; são tecnologias para agir sobre a informação, não apenas informações para agir sobre as tecnologias; a tecnologia da informação é para esta revolução o que as fontes de energia foram para as Revoluções Industriais.
Penetrabilidade dos efeitos das novas tecnológicas	Como a informação é parte integral de toda atividade humana, todos os processos de nossa existência individual e coletiva são diretamente moldados pelo novo meio tecnológico.
Lógica de redes	A lógica de redes de qualquer sistema ou conjunto de relações utilizando essas novas tecnologias da informação.
Flexibilidade e capacidade de reconfiguração	Organizações e instituições podem ser modificadas e mesmo fundamentalmente alteradas pela reorganização de seus componentes.
Crescente convergência de tecnologias específicas para um sistema altamente integrado	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Integração da microeletrônica optoeletrônica, telecomunicações e computadores em um único sistema de informação.</li> <li>• Distinção cada vez mais tênue entre fabricantes de <i>chips</i> e programadores de <i>softwares</i>, haja vista que muitos programas são inscritos no próprio <i>chip</i>.</li> <li>• O desempenho dos computadores depende em grande parte do poder do <i>chip</i> nele utilizado, mas tanto o projeto como o processamento paralelo dos microprocessadores dependem da arquitetura do computador.</li> <li>• As telecomunicações são agora apenas uma forma de processar informação; as tecnologias de transmissão e conexão estão, simultaneamente, cada vez mais diversificadas e integradas na mesma rede operada pelos computadores.</li> <li>• O desenvolvimento da internet está fazendo com que nas tecnologias da comunicação a transmissão de dados se torne a forma predominante e universal.</li> <li>• As revoluções em biologia e microeletrônica tornam-se crescentemente interdependentes tanto em materiais como métodos com as pesquisas sobre o seguimento do DNA humano e identificação de genes humanos só avançando por causa do grande poder da informática.</li> <li>• A nanotecnologia pode vir a permitir inserção de minúsculos microprocessadores em órgãos de organismos vivos, ao passo que o uso de materiais biológicos na microeletrônica é uma realidade cada vez mais presente com moléculas sintéticas de DNA podendo ser utilizadas como material básico da computação.</li> <li>• A teoria da rede neural artificial aplicada no desenvolvimento de interfaces cerebrais adaptáveis tem alcançado êxito em experimentos em que pessoas se comunicam por meio do controle consciente do pensamento.</li> <li>• O desenvolvimento da teoria das redes complexas com ênfase na dinâmica não linear como método para entender o comportamento de sistemas vivos, tem permitido um elo teórico entre diversos campos das ciências, tais como economia, neurociência e estudos da origem da vida.</li> </ul>

(1) Dados sistematizados no formato de quadro pelo próprio autor com base no texto de Castells (1999, p. 108-113).

Como condicionante dessa estruturação social em rede, Castells (1999, 2009) identifica o desenvolvimento da microeletrônica que, tornando possível a digitalização da informação e respectiva presença virtual em qualquer nó da rede em que estiver contida, configura uma nova relação com o espaço e o tempo, possibilitando a emergência de práticas simultâneas à distância e interações assíncronas. Opera-se em tempo real em um mercado de

ações local desde qualquer computador conectado à *internet*. Mesmo operações cirúrgicas a distância têm sido possibilitadas pelo uso da biorrobótica. Correios eletrônicos, torpedos, *twits*, fóruns e *blogs* permitem flexibilidade quanto a local e horário para prosseguir com uma determinada interação interpessoal.

Há controvérsias, seja quanto às características da sociedade contemporânea, seja quanto à identificação das revoluções tecnológicas ou industriais. Wonglimpiyarat (2005), por exemplo, caracteriza que desde a virada do século XXI já vivemos sob uma sexta onda de desenvolvimento capitalista marcada pelo paradigma tecnológico da nanotecnologia, uma área de pesquisa interdisciplinar, com grande penetração em muitas aplicações e vista por diversos países como elemento chave para revigorar ou mesmo reconstruir suas economias. Concordando quanto à ocorrência de uma sexta onda capitalista, mas discordando tanto de sua periodização como de seu fator tecnológico chave, Adams (2010) entende que desde o início da década de 90 vivemos sob o paradigma do “*acesso ubíquo à Internet como uma superestrada da informação e canal para a inovação social e tecnológica*”. Mais cautelosa, a equipe da Allianz (2010) sugere que essa nova onda de ascensão econômica estaria apenas em seu início, sendo diversas as tecnologias com potencial para cumprir papel de destaque em seu desenvolvimento (figura 9).

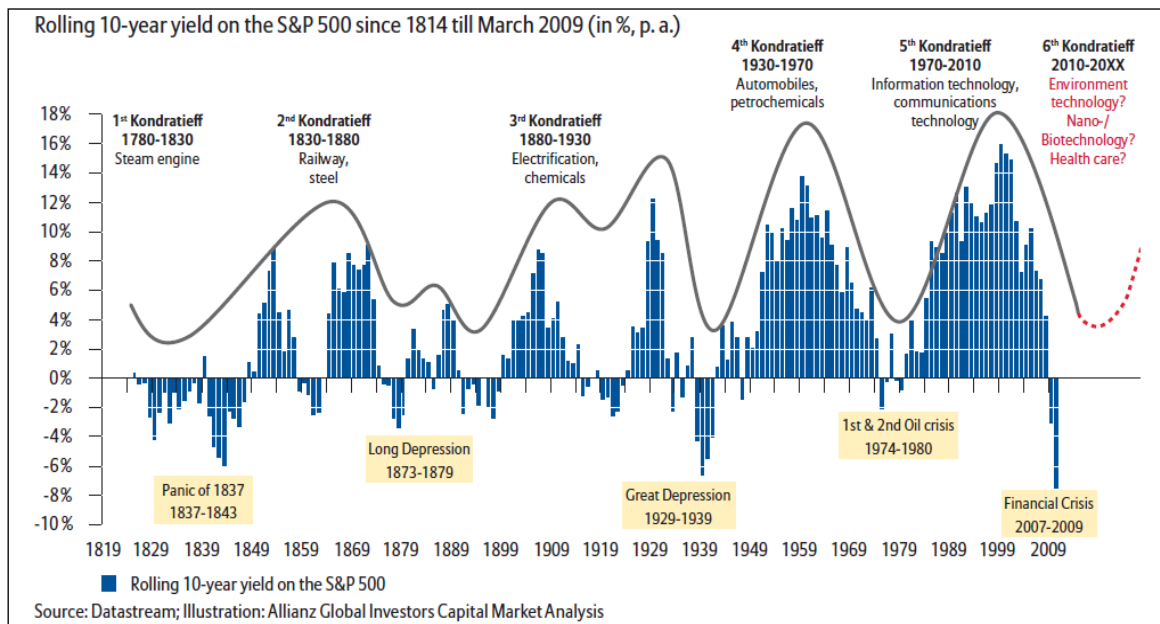


Figura 9 – Os ciclos de desenvolvimento capitalista identificados, em referência ao papel pioneiro do economista soviético Nikolai Dimitrievich Kondratieff, como “*ondas de Kondratieff*”, com a 6ª onda ainda em ascensão e sem definição quanto às tecnologias que lhe serão preponderantes (ALLIANZ, 2010).

Entendendo as transformações presentes na sociedade contemporânea como algo muito mais profundo do que uma revolução tecnológica associada a um ciclo de desenvolvimento capitalista, Toffler (1980, p.24) indica que após o impacto das revoluções agrícola e industrial, a “*humanidade enfrenta um salto de um quantum para a frente*”, a terceira onda. Caracterizando a década de 50 nos EUA como ponto de inflexão, Toffler (1980) aponta que essa nova de onda de transformações sociais teria como uma de suas principais marcas o desenvolvimento de tecnologias voltadas ao uso de fontes de energia diversificadas e renováveis, com provável destaque de quatro ramos industriais interconectados: eletrônica e computadores; indústria espacial; exploração oceânica; engenharia genética.

Outra análise abrangendo toda a evolução das sociedades humanas é apresentada por Beniger (1986) que defende que os microprocessadores e demais tecnologias da comunicação e informação devem ser percebidos como fruto da *Revolução de Controle*, um processo que estaria em curso desde o final do século XIX em resposta à crise de controle provocada pela *Revolução Industrial*. Com as locomotivas, barcos a vapor e outras máquinas térmicas, mercadorias podiam, pela primeira vez na história, ser transportadas à plena velocidade da produção industrial através de todo o continente e mesmo ao redor do mundo. Para controlar a crise que esse fluxo acelerado produzia, requeriam-se inovações tecnológicas em crescente complexidade, processo pelo qual a coleta, armazenamento, processamento e comunicação de informação ganhou progressiva importância. Reflexo disso seria o contínuo deslocamento da força de trabalho para o setor de informação, fenômeno social percebido desde o final do século XIX. A convergência das mais diversas tecnologias de informação para sistemas integrados seria, portanto, o nível de controle mais alto até então conseguido desde o início da *Revolução de Controle*. Mais que isso, Beniger (1986) caracteriza esta revolução como o máximo nível de controle conseguido pela própria vida que pode ter sua evolução associada a 4 níveis de controle: (a) surgimento da programação molecular no processo de origem da vida, presente em todos os seres vivos; (b) surgimento da cultura no processo de aprendizagem por imitação, presente nos vertebrados superiores (pássaros e mamíferos); (c) surgimento da burocracia no processo de organização das sociedades da Mesopotâmia e Egito Antigo; (d) surgimento das tecnologias mecânicas, elétricas e eletrônicas na *Revolução de Controle* e origem da *Sociedade da Informação*. Em caso desse processo não sofrer retrocesso a partir do contínuo desenvolvimento e proliferação de armas nucleares, Beniger (1986) sugere que a engenharia genética poderá promover uma nova descontinuidade, gerando vida sintética e, talvez, sua evolução por aqueles mesmos quatro níveis de controle.

A caracterização da sociedade contemporânea é, pois, palco de intensos debates nos círculos acadêmicos e um panorama mais completo da literatura referente ao assunto exigiria razoável extensão da bibliografia até o momento analisada. O recorte aqui apresentado parece, no entanto, suficiente para o resgate do discutido no início desse capítulo acerca do papel desempenhado pela microeletrônica e, portanto pela física quântica, na catálise da evolução social e tecnológica.