

Neste número:
**Filosofia natural
do espaço-tempo**

**Simulações numéricas e
fronteiras da realidade**

Lago Paranoá:
**uma alternativa
hidroviária para
Brasília**

CALIBRE

*Promovendo ciência
de qualidade*

INDICE

ARTIGOS ORIGINAIS

SOBRE A NATUREZA DO TEMPO E OUTRAS CONJECTURAS

Nilo Serpa 1-16

IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRANSPORTE HIDROVIÁRIO NO LAGO PARANOÁ-DF

Gabriel de Souza Santos 17-25

SIMULAÇÕES NUMÉRICAS E FRONTEIRAS DA REALIDADE:

Exemplos e Discussões em Física, Engenharia e Arquitetura

Nilo Serpa, Aline Santoro, Gisele Alves 26-34





Sobre a Natureza do Tempo e Outras Conjecturas

Nilo Serpa

Faculdades ICESP, Brasil

Received: 28 December 2017 ___ Accepted: 25 January 2018 ___ Published: 03 Apr 2018 ___.

Abstract: This paper aims to discuss the concept of quantum spacetime in the light of an in-depth philosophical analysis of the main ideas woven about time all along the centuries. From this analysis, reviewing some misconceptions in philosophy of science, a model of cosmological thermodynamics is presented.

Key words: quantum spacetime, philosophy of science, infinitesimal quantities, cosmology, thermodynamics, entropy.

Conceito-chave

Espaço-tempo quântico.

Simbologia

\mathcal{T} : temperatura

\mathcal{S} : entropia

\mathcal{V} : volume

\mathcal{P} : pressão

A : ação

P : probabilidade

1. Introdução

Mais do que nunca, agora mesmo, e sempre, o tempo parece correr pela linha dos seus próprios mistérios. Já

Autor correspondente: Nilo Sylvio Costa Serpa, Ph.D., professor, áreas de pesquisa: gravitação quântica, computação quântica, cosmologia e engenharia de sistemas termodinâmicos. E-mail: nilo.serpa@icesp.edu.br.

nesta oração se percebe sua natureza fugidia e paradoxal. Por milênios, tanto se tem falado sobre o tempo que não tenho intenção de desperdiçá-lo com revisões narrativas. Ainda que para muitos não seja um bom companheiro, dele mal não posso dizer; não há o que reclamar de sua diuturna presença, pois, generoso tem sido por tantos anos, alvorecendo para mim dias inesquecíveis que tenho passado como físico teórico e como mero cidadão, caminhando sobre as ruas deste mundo revolto pela incerteza. Até o momento, ele tem me consumido de maneira gentil, talvez porque eu o abrace de bom grado sem temê-lo. Mas, deste companheiro inseparável não mais falarei com romantismo. Pretendo sim extrair da história um punhado de considerações filosóficas e científicas que me possibilitem tão-somente estabelecer um elo conceitual útil entre as diversas noções de tempo que se tenham urdido, pelo menos as que eu conheço, para esclarecer o significado da duração na minha própria teoria quântica do espaço-tempo, e, quiçá, lançar alguma luz sobre a relação entre tempo e termodinâmica. Tentarei fazê-lo dentro da melhor acrobologia que me seja possível.

2. O idealismo e o cisma da filosofia da ciência

Sujeito versus objeto: um dilema morto

Estou plenamente convicto de que a filosofia é um instrumento poderoso para desanuviar pontos obscuros e corrigir falhas conceituais advindas de um abominável descaso com a natureza dos construtos que inventamos durante a elaboração das hipóteses. Noutras palavras, serve a filosofia ao propósito de aprimorar nossas ideias e representações do mundo. A primeira coisa a fazer para conduzir uma discussão produtora sobre o tempo é expurgar do tema os males de uma análise filosófica indigente. Refiro-me ao desperdício retórico da estéril disputa sujeito X objeto. Vai aqui uma admoestação que faço ao trabalho de Popper no que se refere à sua posição anti-idealista: é que o *desideratum* de eliminar o idealismo imaginacionista dos discursos sobre o tempo é, de per si, um arremedo do velho idealismo voluntarista, vez que o teor de tais discursos envolve considerável dose de conjecturalismo, e, portanto, de subjetividade. Segundo meu modo de ver, aquele que combate obstinadamente o idealismo fá-lo por se aferrar ao equívoco de considerá-lo, entendendo-o de modo acrítico e generalizado, a raiz da sistematização coxa de ideias a miúdo promovidas pelos irracionistas que pululam desde a inauguração do pós-modernismo. Com efeito, é a porção voluntarista do idealismo que, ao lado do imaginacionismo fantasioso, conduz a delírios filosóficos de fazer rir até o mais circunspecto pensador. Pois, o verdadeiro mal está no sectarismo cego; os exageros idealistas — como o de virar as costas para uma cadeira e ela deixar de existir —, as paixões desmedidas, o autoritarismo, estes sim são os grandes inimigos do conhecimento. Cabe, portanto, uma análise equilibrada dos processos mentais que nos conduzem a optar por determinadas construções e não por outras, e que tornam tão diversificada a criatividade científica.

Idealismo e flecha do tempo

Um típico exemplo daquele coxo idealismo é a associação entre diminuição de entropia e surgimento de novas complexidades a partir de um ponto de bifurcação na evolução de um sistema dinâmico. Como demonstrei em trabalhos anteriores [11, 12, 15], a entropia não pode diminuir — o que equivaleria a dizer que existe entropia negativa, e, conseqüentemente, uma brecha para se especular sobre a flecha do tempo invertida —, mas sim desacelerar. Quando a desaceleração atinge um valor determinado, de acordo com as particularidades do sistema, manifestam-se propriedades que até então não se verificavam, caracterizando um estado de ordem mais elevado que o anterior. Dessa forma, uma vez que inexitem sistemas fechados, e que, portanto, as trocas de energia e matéria continuam indefinidamente, parece mais razoável, diante da segunda lei da termodinâmica, supor, em tais circunstâncias, uma entropia desacelerada, não uma entropia idealisticamente negativa. Olhada sob este prisma, a evolução do universo implicaria, ao final e ao cabo, o desaparecimento do tempo, desde que no estado de entropia máxima não haveria nenhuma evolução possível. A essa altura eu gostaria de trazer à tona uma confusa objeção de Fahr, citada por Garrido-Maturano, segundo a qual a consideração do crescimento da entropia “*originariamente no tiene nada que ver con el tiempo ni con su curso marcado por un reloj, sino exclusivamente con la predicción de la consecución de estados probables de un sistema que se pueden representar arbitrariamente de modo temporal*” [5]. Ainda que possa ser verdade que em seus primórdios a teoria do crescimento da entropia não tenha assimilado de imediato a flecha do tempo, esta objeção é circular porque, de um lado, nega a relação entre tempo e entropia, mas, de outro, ressalta uma sucessão de estados, a qual é precisamente a base empírica da intuição do tempo e, por conseguinte, da própria segunda lei. E mais: a representação temporal arbitrária da

sucessão de estados se refere ao tempo cronológico artificial dos relógios, não ao tempo real que sucede. Demais disso, é preciso ter clareza quanto ao conceito de irreversibilidade do ponto de vista cósmico. Suponha que um determinado corpo passe do estado A para o estado B, e, em seguida retorne ao estado A. Diz-se, então, que o processo físico que modifica o estado do corpo de A para B é reversível. Entretanto, esta “reversibilidade” não é perfeita; os estágios da transformação completa ABA não implicam a inversão da flecha do tempo (como se tudo corresse para trás tal qual uma película exibida do fim para o começo), além de que, como inexistem sistemas reais fechados, não há maneira de determinar a índole e a intensidade das transformações deflagradas nas circunvizinhanças do corpo em questão, sem falar no desgaste natural sofrido pelo corpo ao longo do processo¹. Podemos apenas falar de uma reversibilidade local aparente embebida pela real e inexorável irreversibilidade cósmica.

As definições do tempo

Não há dúvida de que algumas obras da inteligência idealista são plausíveis e extremamente sedutoras. Eu mesmo sou fascinado pela ideia de um tempo que, por fim, é atemporal: só conseguimos perceber uma coisa de cada vez, mas na realidade tudo coexiste. É fato que sobrevive entre físicos e filósofos modernos ecos remotos desse tempo evocado por Parmênides (530 - 460 a.C.) como uma espécie de epifenômeno do processo de percepção, em última análise, não tendo mais realidade do que o tempo de Platão (427 - 348 a.C.)², para quem

¹ Por exemplo, uma placa de água congelada em um recipiente ao ar livre que se dissolve e volta a se solidificar. As perdas térmicas no processo completo estão associadas à quantidade total de água evaporada, uma vez que as trocas com o meio são inevitáveis.

² Vale lembrar que para Platão o tempo se originou da intervenção de um ser divino que teria conferido ordem e estrutura ao caos primitivo. Neste sentido, o tempo

essa enganosa categoria faz parte do mundo das sensações, formando uma sucessão irreal de imagens como num jogo de espelhos da própria realidade. E mais tarde, a negação do tempo em Spinoza (1632-1677) viria deixar indelével marca no pensamento einsteiniano. Em carta endereçada à irmã de seu grande amigo falecido, Michele Besso, leem-se as seguintes palavras de Einstein (também transcritas por Rovelli [9]): “*Michele verließ diese seltsame Welt, kurz vor mir. Das bedeutet nichts. Menschen wie wir, die an die Physik glauben, wissen dass der Unterschied zwischen Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft nur eine hartnäckige und stur Illusion ist*”³. Ainda em Kant (1724-1804), se bem que reconhecendo o tempo como essencial à experiência, nada de objetivo se atribui à duração, sequer a identidade de uma relação, tão-somente se a admite como resultante de uma condição subjetiva inerente à natureza do entendimento humano.

Desse modo, por semelhante viés, as transformações do mundo físico não passam de mera ilusão. Por mais que eu simpatize com esta hipótese, não posso ceder à emoção em detrimento da razão, mesmo avocando um ponto de vista fenomenológico; são muitas as considerações advindas da termodinâmica em favor de um tempo real que sucede. Precisariamos contradizê-las amplamente antes de adotar qualquer alternativa aceitável, uma vez que, embora tardiamente, a termodinâmica tenha sido reconhecida como uma ciência mais completa que a mecânica. Pode ser que a convicção de ilusão se deva ao fato assinalado por Bachelard, se bem me lembro, de que “*nous ne gardons*

platônico traz algo de cosmológico em seu conteúdo. Entretanto, há dúvidas quanto a se o tempo chegou verdadeiramente a ser um conceito bem desenvolvido em Platão. (nota do autor).

³ Michele partiu deste estranho mundo, um pouco antes de mim. Isso não significa nada. As pessoas como nós, que creem na física, sabem que a distinção entre passado, presente e futuro não é mais do que uma persistente e obstinada ilusão.

*aucune trace de la dynamique temporelle, de l'écoulement du temps*⁴. Com efeito, não captamos a dinâmica do tempo em si, apenas o movimento dos corpos. Nesse caso, Vogel teria razão em se restringir a um ponto de vista matemático, afirmando que *“le passé est un ensemble de points paramétrés par le temps, donc situés sur un arc de trajectoire”*⁵ [18]. Visto como parâmetro, o tempo prescinde de uma dinâmica própria, quando muito não passando de um marcador. No entanto, devíamos lembrar que, utilizando a matemática como linguagem de modelamento e transmissão do conhecimento físico, não precisamos confinar a análise por uma concepção paramétrica estática desde que adotemos para o tempo a perspectiva dinâmica do cálculo das fluxões. No dizer de Garrido-Maturano, “[...] *el tiempo que efectivamente sucede (y no el tiempo abstracto, construido y cronológico en el cual algo sucede) es inseparable del transcurso de la realidad efectiva y, por tanto, del constante proceso de transformación del universo*” [5]. Entendo que não captar a dinâmica do tempo em si é antes de tudo uma restrição dos modos da percepção humana, não tendo nada a ver com a realidade exterior efetiva.

Diante dessas reflexões, muitos hão de preferir a posição de Aristóteles, o gigante da cultura greco-romana, observando que tempo e movimento são assimilados em conjunto, e que mesmo na mais completa escuridão, através da qual não se notaria nenhum movimento, bastaria uma leve mudança de estado mental, um pequeno movimento na mente, para que alguém se apercebesse de que o tempo flui. Não obstante, devemos ir mais ao fundo com o extremo cuidado de evitar armadilhas retóricas ou psicofísicas acerca da verdadeira natureza da dimensão temporal.

⁴ Nós não mantemos nenhum traço da dinâmica temporal, da passagem do tempo.

⁵ O passado é um conjunto de pontos parametrizados pelo tempo, assim localizado em um arco de trajetória.

Dentre os clássicos da literatura científica, Laplace nos coloca diante de uma simples definição, a qual se nos parecerá perfeita combinação entre a inelutável subjetividade da inteligência e a impreterível objetividade da existência: *“Le temps est pour nous, l'impression que laisse dans la mémoire une suite d'événements dont nous sommes certains que l'existence a été successive”* [7]. Algo é, então, deixado no cérebro na forma de uma impressão, como um rastro, mas que é na verdade uma interpretação mental incompleta de uma sucessão real de acontecimentos. Passa-se, assim, ao seguinte raciocínio: as imagens mentais criadas a partir da observação das coisas exteriores são registros memorizados como reproduções abstratas de objetos e eventos reais que se dispõem em uma certa ordem de percepção; a representação imagética dos objetos e de suas relações espaciais é concomitante à representação anicônica das relações ocasionais destes objetos. É precisamente a ausência de imagens que representem as relações ocasionais que favorece a interpretação ilusória do tempo. Em conclusão, a inexistência de imagens representativas da duração não é argumento suficiente para refutar a realidade efetiva do tempo, a qual se afirmará *a fortiori* diante da termodinâmica.

A força da percepção de sucessão dos acontecimentos é presente na definição de tempo de Whitehead, porém, com o importante adendo da duração entre eventos:

“Je ne connais le temps que comme une abstraction tirée du passage des événements. Le fait fondamental qui rend cette abstraction possible, est l'écoulement de la nature, son développement, son avance créatrice, à quoi s'ajoute un autre caractère de la nature, je veux dire: la relation d'extension entre les événements” [19].

A expressão *“l'écoulement de la nature”* (boa tradução do original) é particularmente provocativa, pois, o fluir da natureza não é mais do que o resultado das fluxões do

próprio tempo. O significado físico de tais fluxões se tornará aos poucos mais claro conforme o andamento do presente ensaio, principalmente a partir da seção 3. De qualquer modo, o entendimento do que seja “fluxão” parece lançar luz sobre a raiz da dificuldade de conciliar a mecânica quântica com a relatividade geral. Este assunto foi examinado recentemente em meu artigo “*Quantum Gravity as a Theory of Quantum Spacetime*” [16], e na versão francesa “*Théorie Quantique de l'Espace-Temps: Principes Physiques et Philosophiques*” [17]. Como o considero uma peça científica satisfatória, remeto o leitor a essa referência como leitura complementar.



Veza por outra, um impulso primitivo estimulado pela observação de tantos fenômenos recursivos resgata da Antiguidade a impressão de um tempo circular, de um cosmos repetitivo, contrariando a antiga concepção linear cristã dos eventos únicos. Seja como for, uma definição de tempo apenas não nos bastaria, a julgar pelos diferentes contextos nos quais ele se faz presente. Seria fora de propósito rever o tempo na história, algo que já foi feito com maestria por Whitrow [20]. Contudo, é possível identificar objetivamente um ponto comum entre todas as definições que se afigurem, pois, o tempo subsume-se à noção de ordenação. Esta maneira de ver, creio, é a chave para o que poderíamos toscamente chamar de “entendimento” do tempo, mas com a viva memória da máxima de Santo Agostinho (século IV): “se ninguém me perguntar, eu sei; se o quiser explicar a quem me fizer a pergunta, já não sei”.

Certa feita, defini tempo de modo algo subjetivo como “a dimensão ao longo da qual as recordações se ordenam segundo o grau de utilidade que carregam para as nossas ações e ocupações cotidianas”. Isto significa que, com o passar do tempo, aquelas lembranças vão

ocupando posições de maior ou menor relevância de acordo com a dinâmica das necessidades que pouco a pouco se impõem a partir das escolhas que fazemos e das ocorrências aleatórias que nos afetam. De certa forma, isto fora prenunciado por Bergson em sua identificação da dimensão mental do tempo a partir da experiência do presente. Há pouco, li num belo livro de Christian e Griffiths que “[...] existe uma sintonia perfeita do cérebro com o mundo, deixando disponíveis exatamente as coisas das quais mais provavelmente se vai precisar” [4]. Em suma, não há que dedicar muito esforço para perceber o caráter ordinal implicado nesta definição utilitária do tempo.

Construindo o tempo cósmico

Já sabemos que a ordenação está nos fundamentos da percepção do tempo, mas a junção de ordenação e evolução, necessária para uma descrição consistente da natureza, imerge o tempo numa trama heredo-entrópica, queiramos ou não associar entropia e flecha do tempo. Carecemos, então, de uma variável evolutiva, não de um tempo medido por régua de ponteiros, embora esta seja muito útil como escala de correspondência. Este tempo que precisamos para descrever a evolução do universo dizemo-lo “conformal”. De acordo com o que resumi recentemente,

“In cosmology, an interesting approach arises when one explores a peculiar property of de Sitter geometry, for which there is the possibility of a convenient choice of coordinates in such a way that the invariant geodetic path element is written as being proportional to that of Minkowski flat spacetime, let's say

$$g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu = \Omega^2(u, \chi) (-du^2 + d\chi^2). \quad (1)$$

A transformation of this kind is called ‘conformal’, and the corresponding coordinates (u, χ) are called ‘conformal coordinates’. So, u is the conformal time, and, in particular, it is very useful for quantum cosmological gravity, with the proviso that a restriction appears from the onset of inflation at $t=0$ connected with $u=1/H$, and at $t=\infty$ with $u=0$, being s^{-1} the SI unit of H . However, this restriction is in fact especially important when one associates the maximum entropy of the universe (thermal death or ‘Wärmetod’) with the finitude of time. Thus, conformal time is an evolutionary variable more suited to thermodynamical cosmology” [14].

Embeber um modelo cosmológico em um tempo conformal traz inegáveis vantagens. Uma delas é que a sucessão no tempo conformal tem o seu *non plus ultra* no fato da anulação final do tempo, a qual, na visão evolucionista termodinâmica, significa o limiar de entropia máxima; nenhuma evolução é possível, tendo o universo alcançado a morte térmica (*Wärmetod*). De acordo com o atual modelo de universo em expansão, a duração infinitesimal, embora permaneça um intervalo orientado, tão pequeno quanto se queira, se expande cada vez mais infinitamente menos, de tal modo que por último não haverá mais expansão. Nesse estado de entropia máxima, restará o caos absoluto, a indistinção, o nada eterno. Além disso, é muito mais razoável pensar em um tempo inicial diferente de zero associado ao universo em seu primeiro estado de efetiva existência⁶, deixando para traz de si um vazio de especulações sobre a física além desse limite. Por consequência, o tempo conformal é o candidato perfeito para o posto de tempo cósmico, o tempo que sucede e que se esvai juntamente com a energia e tudo que existe. Como Whitrow bem assinalou, a isotropia da radiação cósmica de fundo é um forte indicativo de que ao redor de cada galáxia o

universo é, em última análise, isotrópico, o que confirma a existência do tempo cósmico [20].

Purificando o idealismo

Depreende-se de tudo quanto tenho dito que podemos dispensar o idealismo voluntarista, tão bem como os delírios do idealismo imaginacionista, ficando apenas com as construções mentais que dizem respeito ao idealismo enquanto volição pela formulação de determinados sistemas de conjecturas baseadas na racionalidade, com o proviso de que tal racionalidade inclui intuição, criação, experimentação e observação. Querer livrar o pensamento científico de todo idealismo é querer negar a parcela de subjetividade criativa das construções explicativas, cujos efeitos elucidativos são resultantes do árduo trabalho de amalhar conceitos, representações e *insights*, coordenando-os de maneira sistêmica para produzir uma teoria compreensível e corroborável. É notável o desleixo com a acurácia literária que tantos cientistas manifestam ao falar sobre subjetividade e intuição. É o caso de Carl Sagan quando restringe o seu discurso sobre os aspectos subjetivos na atividade científica aos preconceitos individuais — sejam de origem religiosa, política ou até mesmo arquetípica por alguma longínqua tradição da qual nada mais há que recordar — e às vaidades pessoais que muitas vezes levam os seres humanos a agirem desonestamente [10]. Não; não são estes aspectos — predisposições emocionais acarretando vieses — que interessam aqui, mas aqueles inerentes dos atos humanos de pensar sobre algo, e, ao pensar, de intuir proposições constituintes de criações genuínas que façam sentido e que detenham claro propósito.

Antecipo-me aqui aos meus diletos opositores que poderiam objetar quanto a declarar a intuição como ingrediente necessário à atividade racionalista, haja vista que a mecânica quântica, *verbi gratia*, é quase na sua totalidade não-intuitiva. Esta objeção é baseada em uma

⁶ $\frac{1}{H} \simeq 4.35 \times 10^{17} s$.

análise perfunctória e, como demonstrarei, está longe de ser convincente. Em primeiro lugar porque se refere à intuição sensível imediata, e não à intuição intelectual, a qual consiste em trazer para si a essência do objeto considerado a partir da elaboração de elementos diversos de natureza figurativa e abstrata⁷; tal essência pode, inclusive, constituir uma unidade representacional “contraditória”, como é o caso da estrutura da matéria figurada no passado por construtos complementares. Em segundo lugar, a propósito desta última constatação, a intuição sempre esteve presente na física quântica, a começar pela genialidade de Louis de Broglie ao associar comprimento de onda e impulso, dando o primeiro passo para que se compreendesse a conexão entre as representações de ondas e corpúsculos não apenas tendo a luz como objeto de investigação, mas todas as formas de matéria. Em suas próprias palavras,

“J’avais alors remarqué que le quadrivecteur défini par le gradient de la phase d’une onde monochromatique pouvait être mis en relation avec le quadrivecteur énergie-impulsion d’une particule en introduisant la constante h de Planck et en posant

$$W = h\nu, \quad p = h / \lambda$$

J’étais donc amené à imaginer que la particule constamment localisée en un point de l’onde plane monochromatique possédait cette énergie W et cette quantité de mouvement p et qu’elle décrivait un des rayons rectilignes de l’onde plane” [1].

Que melhor exemplo de intuição poderia ser dado? Inútil dizer que, naquela época, ainda a física clássica exercia forte influência no pensamento, induzindo metáforas e analogias que acabariam por conduzir a décadas de

confusão entre os físicos e até mudanças de pontos de vista ao longo de uma carreira como a do próprio de Broglie. Importa o fato da realização em si e o quanto esta realização, guiada pela intuição, contribuiu durante muitos anos para o avanço da ciência.

Acerca da intuição e da imaginação pictórica: reflexos numa piscina

Graças ao teor filosófico do pensamento de Bohr, foi possível, em determinado período, melhorar a compreensão da realidade (ainda que de modo algo artificial), admitindo-se que ela se comporta tão bem sob a representação de um trem de ondas quanto sob a de um gás corpuscular, dependendo do tipo de interação em curso, muito embora a ideia de complementaridade — as faces mutuamente exclusivas de uma descrição dual da realidade, na qual o observador, admitido como sujeito cognoscente, tem papel fundamental nos resultados experimentais, embora as equações envolvidas não incluam uma variável sequer do sujeito — tenha caído hoje em desuso, seja pelas inconsistências que acarreta, seja pela ascensão da moderna teoria quântica de campos, para a qual as assim chamadas “partículas” não são mais do que quanta dos seus respectivos campos (desnecessário lembrar que pouco restou das antigas ondas na atual representação campista). Mais tarde, o conceito de emaranhamento quântico traria um enorme desafio à intuição intelectual física, levando a crer que seria, enfim, melhor declinarmos em definitivo do desejo de entender a mecânica quântica. Acredito que o grau de entendimento que detivermos sobre os fenômenos tipicamente quânticos decorrerá principalmente da disposição que manifestarmos em abrir mão de uma intuição estreita, muito condicionada ao senso comum e à física clássica, e em refletir profundamente acerca daqueles fenômenos. Em um capítulo recente, procurei dar uma ideia do que seja intuição aplicada ao

⁷ Pode-se aqui aproveitar algo do idealismo kantiano. Para Kant, conhecer o objeto pressupõe o conceito, pelo qual se o pensa, e a intuição, pela qual ele (objeto) é dado.

entendimento do emaranhamento quântico da seguinte maneira:

"It was pointed that quantum processing was born from "purely philosophically motivated questions" (Walther, 2006) on non-locality and completeness of quantum mechanics fomented mainly by Einstein from his collaborative work with Podolsky and Rosen in 1935. In fact, as once observed, it was Einstein whom restored in modern science the Cartesian metaphysical sense of philosophy, turning physics into a real theory of knowledge (Charon, 1967). This important note remembers to us that philosophy will always be present in the process of creation. It is precisely its absence that determines little creativity that prevails today in all fields. Thus, to understand what entanglement is it will be necessary a reflective process of reconstruction of the conceptual foundations of physics, which will lead to a comprehensive review of the applicability of the notion of causality.

The main controversies of quantum mechanics ever resided in the difficulty of the human mind to separate the physical fact from its perception or representation. Indeed, we always work with our perceptions; we took from them the full potential of human development and survival offered, creating representations for all we observe. There was a time when I was a follower of a kind of fruitless and paralyzing materialism that insisted to reify the world. Later, influenced by some physicists adepts of the operationalism, I came also to sympathize with the dresser and foolish idea that the only thing that matters is the calculation and not the ultimate nature of things. Thanks to my growing interest in quantum computing, I could deepen those controversial discussions and reach my own conclusions about them. Of course, long before the seventies there were eloquent speeches from the great thinkers of modern physics. Weizsäcker, for instance, in the Spanish version of 1974:

"El átomo no es inmediatamente perceptible para nuestros sentidos, y cualquier experimento lleva sólo una determinada propiedad del átomo al ámbito de una perceptibilidad mediata"⁸ (Weizsäcker, 1974). But that was still little; not just to observe a predicate and describe it by means of classical concepts. It was necessary a phenomenal texture made by the experimental apparatus from which one could then extract useful measurements (information). In this it would lie a deepening of the famous complementarity of Bohr: the ultimate hidden object and its accessible and inseparable image.

Inspired by those philosophical texts from the first half of the twentieth century and early second half, I could refine my ideas and reach an understanding which I consider acceptable, although limited by the nature of human thought. Now I believe that the understanding of the quantum entanglement, one of the most intriguing phenomena of the quantum world, rises, for happiness of the philosophers, in a reflection on the edge of a pool. One summer night, I sat in a chair right in front of a lighted lamp whose flickering light was reflected in the pool. The image of the lamp stretched like a rubber with the ripples of the water and sometimes came to double or even to quintuple depending on the swings of the water. Both, the lamp and its images in water, are real, belonging to the world of mater and perceptions. But imagine that we could not see the lamp, only their images reflected in the water. We would think that two objects born of a unique (duplicate picture) would be irrevocably united, although separated; any change in one of them would "cause" an instantaneous change in the other. With respect to the quantum world is passing up something similar. We have no direct access to the ultimate reality (as the hidden lamp), only to the images

⁸ The atom is not immediately perceptible to our senses, and any experiment takes only a specific property of the atom to the ambit of a mediated sensibility.

produced by our experiments. What we see are the "pictures in the pool" and these are as real as the object that produced them. Clearly, these images carry information from the ultimate object, which makes them tractable to control. Instead of using the ultimate object we use them with all their informational potential. This potential is the base of the teleport process, since we teleport physical states, not matter in itself. In short, the quantum world is so light and sensible to our presence that it would be impossible to get direct benefits from their objects. All we can do is work with "pools". As Weizsäcker said: "Todo experimento es un acto material que es simultáneamente un acto de percepción"⁹ (Weizsäcker, 1974)" [13].

Eis como a intuição pode ser expandida para unir, *a posteriori*, realidade e imaginação numa representação simples e acessível. Uma idealização, nascida de um sujeito, mantendo a perspectiva científica de descrever o fenômeno, torna-o inteligível aos demais sujeitos. Como físico, vejo que se a intuição perdeu força nas modernas teorias, isto certamente se deve a que a física tem deixado de ser “física” para restar uma disciplina de acrobacias matemáticas. Os físicos não são mais como os antigos gigantes da filosofia natural. Em particular, sobre a estranheza do século XX, nos disse Moscovici que “na sua primeira metade, mesmo os pigmeus eram gigantes; em comparação, os gigantes da segunda metade não passam de pigmeus”¹⁰.

⁹ Every experiment is a material act which is simultaneously an act of perception.

¹⁰ Alguns físicos discordam, chegando mesmo a se encolerizarem diante de tal afirmação. A razão para isso é uma confusão entre competência e genialidade, além da presença sufocante do ego entre os cientistas mais narcisistas. Como não tenho nenhum problema em conviver com essa realidade, e nunca duvidei da existência de muitos físicos competentes no mundo, principalmente italianos, reconheço e louvo o relativo progresso da física nas últimas décadas sem, no entanto, deixar de admitir que faltam quadros capazes de verdadeiramente revolucionar a física como o fizeram os físicos da primeira metade do século XX. Trata-se de um fato inegável, tão somente. E contra fatos não há contraditas.

Em suma, boa ciência não se faz sem reflexão profunda, paciência e resiliência. Pois, a filosofia é um método para a investigação científica, assim como a intuição é um método para a investigação filosófica. Por esta conexão, a intuição sempre poderá chegar ao nível do objeto investigado.

3. Uma breve digressão a respeito do movimento dos corpos macroscópicos e do espaço-tempo quântico

A teoria quântica do espaço-tempo que defendo não se fundamenta no conceito de partícula, mas numa microestrutura dinâmica espaço-temporal, de uma só vez, perecedoura e inapagável (creio que Carnot apreciaria essa construção literária). Semelhante estrutura constitui, se assim se preferir, o substrato das próprias partículas, caso se queira insistir neste tosco modelo¹¹. Eu gostaria de transcrever um parágrafo do belo livro de Rovelli, “A realidade não é o que parece”, para que o leitor entenda o ponto nevrálgico do meu discurso. Em alusão à existência de um limite para a divisibilidade do espaço, Rovelli inicia sua apreciação do problema da seguinte maneira:

“Mas agora vamos lembrar a teoria de Einstein. A energia faz com que o espaço se curve. Muita energia significa curvar muito o espaço. Se concentro muita energia em uma região muito pequena, o resultado é que curvo demais o espaço, e este mergulha em um buraco-negro, como uma estrela que colapsa. Mas se a partícula mergulha em um buraco-negro, não a vejo mais. Não posso mais usar a partícula para marcar uma região do espaço, como eu desejava. Em suma, não tenho condições de medir regiões arbitrariamente pequenas de

¹¹ Entenda o leitor que quando emprego termos como “partícula” e “onda”, faço-o apenas a título de força de expressão, pois não creio que tais conceitos possam ter grande utilidade atualmente.

espaço, porque, se tento fazê-lo, essas regiões desaparecem dentro de um buraco-negro” [9].

Essa argumentação, suponho, é compreendida pelo autor como o resultado concludente de que a relatividade geral e a mecânica quântica juntas implicam um limite de divisibilidade do espaço. Primeiramente, o espaço não “mergulha” em um buraco-negro, mas se configura como buraco-negro de maneira reentrante, deformando-se para dentro de si mesmo numa espécie de contorção topológica. Em segundo lugar, Rovelli passa inopinadamente de “espaço” que “mergulha” para “partícula” que “mergulha” no buraco-negro, um salto conceitual prodigioso sobre um abismo de indefinições (espaço=partícula??). Finalmente, a confusão típica do idealismo imaginacionista radical: não ter condições para medir regiões arbitrariamente pequenas significa que a realidade não pode transcender essa limitação. Não acredito ser possível sustentar uma afirmação tão antrópica como essa, senão pela via do velho positivismo lógico; a estrutura última do cosmos nada tem com a truculência dos nossos aceleradores e com a rudeza dos nossos instrumentos, permanecendo sutil e arbitrariamente pequena. É a natureza antrópica dos meios de que dispomos que estabelece os limiares da experiência, as lindes que delimitam nossos horizontes. Portanto, o que melhor se poderia dizer sobre tais argumentos é que se desconhece a física para além de uma pequenez limite dada por

$$l = \frac{\sqrt{\hbar G}}{c^3}.$$

Resumindo, ainda que eu possa incorrer em erro, a obscuridade da física contemporânea parece advir de um descompasso entre imaginação e linguagem. O próprio Rovelli reconhece isso a seu modo:

“Penso que a obscuridade da teoria não seja culpa da mecânica quântica, e sim da nossa limitada capacidade de imaginação” [9].

Um ponto fundamental a ser esclarecido na teoria em pauta é a conexão, se é que existe, entre a estrutura quântica dinâmica do espaço-tempo e o movimento macroscopicamente entendido. Esse movimento, eu o prefiro descrito como transferência de matéria, o que aliás é o que de fato fazemos a todo instante. Em todas as nossas ações do dia-a-dia realizamos transferência de massa de um lugar para outro. Assim, minha escolha tem explicação na tentativa de aproximar transferência de massa à transferência de energia térmica, e, dessa forma, estabelecer um discurso mais distanciado da orientação mecanicista do pensamento clássico. À primeira vista, isto pode parecer um mero jogo retórico, mas, como se verá, sob o prisma de uma aproximação termodinâmica, vale a pena lidar com somente um conceito dinâmico-evolucionário.

Como já disse, não existe significado físico para o ponto geométrico estático. Tendo tomado emprestado do grande Newton a noção de fluxo como construção explicativa aqui redefinida, mais adequada às necessidades do modelamento teórico, passo a enunciar um princípio basilar:

Ao longo de um determinado intervalo de espaço-tempo, a transferência de massa se dá por uma infinidade de transferências desta massa em intervalos ínfimos dentro do primeiro.

Trata-se de um princípio elementar de continuidade, embora amplamente ignorado. Quanto às razões desse desprezo, desconheço quais sejam, mas o princípio é de uma lógica irresistível. Este princípio encontra forte respaldo no raciocínio que se seguirá após as seguintes proposições:

- 1- A gravidade (o campo gravitacional) não é mais que o efeito da curvatura do próprio espaço-tempo.
- 2- O espaço-tempo se expande em todas as direções.
- 3- O universo é praticamente isotrópico ao redor das galáxias.

Agora bem, se admitimos que o espaço-tempo não é absoluto (proposição 1), como de há muito se sabe após a relatividade geral, então temos que convir que tudo é feito do próprio espaço-tempo (o campo gravitacional e a matéria). Nesse caso tudo se expande (proposição 2) — isotropicamente já que a radiação cósmica de fundo aponta para uma isotropia na vizinhança de cada galáxia (proposição 3) —, de modo que as proporções entre os corpos permanecem as mesmas. Daí que o *quantum* de espaço-tempo é na verdade um volume infinitesimal em contínua expansão, isto é, tão pequena quanto se deseje imaginá-la. Portanto, a transferência macroscópica de matéria de um local para outro é um processo que tem lugar tão-somente porque se dá continuamente, e tal continuidade só é possível porque o elemento de volume infinitesimal de espaço-tempo se expande continuamente, “afastando” de si, suavemente (isto é, tão pouco quanto se queira) e em todas as direções, as suas vizinhanças. Se estivéssemos falando de pontos estáticos como na geometria, teríamos que retornar ao conceito de espaço absoluto, mero receptáculo da matéria que dentro dele seria transferida.

Não que eu seja um entusiasta das analogias, mas, talvez auxilie o leitor um experimento muito simples. Imagine uma tira elástica em repouso. Espetemos uma agulha em sua superfície de modo a atravessá-la. O furo criado introduz uma singularidade na superfície da tira. Por simplicidade, admitamos somente uma dimensão na direção ortogonal à agulha, ao longo da qual esticaremos a tira elástica, o que nos faz selecionar, como observadores, apenas a interseção da agulha com a tira. Nosso “ser” acicular encontra-se, nessa dimensão,

confinado ao furo pelo qual transpassa a variedade correspondente ao elástico, sem poder ir para frente ou para trás. Contudo, se esticarmos suficientemente a tira veremos que o furo se amplia na direção do estiramento, permitindo que a nossa agulha adquira um grau de liberdade cada vez mais extenso quanto mais o elástico seja alongado¹². Em resumo, ganha-se capacidade de transferência de massa a partir da expansão. Essa imagem admite variantes conjecturais diversas, ganhando aplicabilidade na medida da sua adequação aos experimentos mentais da física. Uma delas parte da ideia de um *loop* infinitesimal, em expansão igualmente infinitesimal, como o anel mais externo de um conduto de espaço-tempo também em expansão infinitesimal, sendo o *loop* apenas um quantum da expansão (Figura 1).

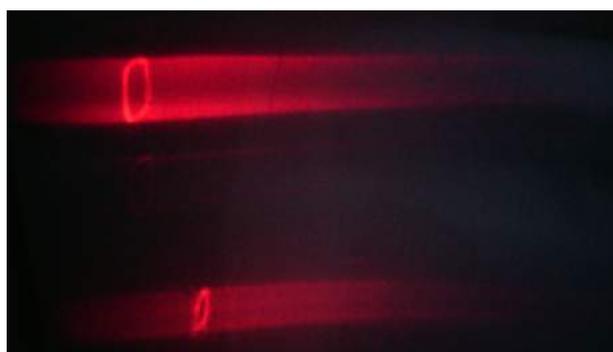


Figura 1 – *Loops* cósmicos como quanta de expansão (arte do autor).

Dessarte, a transferência macroscópica de matéria é um fato decorrente da condição dinâmica de expansão do *quantum* de espaço-tempo. Um corpo é transferido de A para B porque o espaço-tempo está a se expandir em todas as direções ao redor de A e de B. Ora, uma vez que na física não existe a abstração do ponto estático, senão como metáfora, mas sim fluxo — a expansão (ou

¹² Na verdade, pode-se imaginar que o universo seja um “buraco” em uma variedade exterior, mas isto seria mera especulação pela via mais frágil da metafísica idealista, de modo que não desejo aqui engrossar as fileiras dos prosélitos do idealismo radical.

contração) infinitesimal do espaço-tempo —, a factibilidade da transferência de massa é uma decorrência das fluxões isotrópicas.

A intuição do quantum de espaço-tempo

Minha principal inspiração veio da leitura de um livro formidável de Lazare Carnot, quem descreveu com brilhante intuição a perfeita aplicabilidade da matemática infinita à filosofia natural. Carnot exortava a análise infinitesimal como uma descoberta verdadeiramente revolucionária, fornecendo meios eficazes de penetrar no conhecimento das leis da natureza: “*En décomposant, pour ainsi dire, les corps jusque dans leurs éléments, elle semble en avoir indiqué la structure intérieure et l’organisation*” [3]. Entendia as quantidades infinitesimais como seres singulares, ora desempenhando o papel de quantidades verdadeiras, ora devendo ser tratadas como absolutamente nulas, vivendo em uma espécie de mundo médio, entre a existência e o nada (Carnot, 1797). Pois, são essas quantidades que permitem imaginar uma parte do espaço-tempo que se contraia continuamente a um tamanho tão pequeno quanto se deseje. Por outro lado, podemos pensar que a mesma parte se expanda em uma região tão pequena quanto queiramos. Seja qual for o tamanho desta porção, podemos pensar que é ainda menor. Não importa o quanto essa parte seja ampliada, sempre podemos pensá-la menor e menor, *ad infinitum*. A pequena amplitude de sua expansão é adicionada a um número infinito de outras expansões vizinhas infinitamente pequenas, de modo que ocorre uma expansão global observável. Assim, esses seres únicos, com tamanho tão pequeno quanto se queira, às vezes tratados como quantidades verdadeiras, às vezes como absolutamente nulas, trazem sua ambiguidade intrínseca para constituírem a essência dinâmica do espaço-tempo: expansão ou contração contínuas.

Infelizmente, na época de Carnot não existia a cosmologia avançada de hoje para que ele, em seu brilhantismo, pudesse abraçar as discussões que fazemos agora. Mas, revivendo o mestre, será preciso retomar com cautela a profundidade de seus ensinamentos para que não se incorra numa contemplação ingênua do tempo como substância que escorre entre os dedos, que escoia como a areia numa ampulheta. Pois, não há fluxos de tempo, mas fluxões de tempo, isto é, quantidades infinitesimais de tempo que se definem por sua essencial instância naquele “mundo médio, entre a existência e o nada”.

Tempo, calor e entropia

Um dos maiores pensadores do século XX, certamente, foi Mário Augusto Bunge (digo foi, embora ainda vivo, por terem sido suas principais contribuições todas desenvolvidas e difundidas no século passado). Sua crítica filosófica é, de uma só vez, devastadora e construtiva. Reconheço ter sido muito influenciado por ele sobretudo quando era estudante de mecânica quântica. Concordo com Bunge quando observa que a direção da flecha do tempo tem que estar embutida no processo como um todo, e não em partes do processo. Concordo também que o tempo deve ser construído como “o passo do vir-a-ser”. Contudo, provavelmente mais preocupado em desconstruir a ideia de fluxo, o que aliás é certo, não deixou lugar para a materialização do tempo como integrante físico real dos objetos e dos fenômenos que os afetam. Assim, não pude perceber muita física em sua discussão do tempo [2]; outra vez o tempo que de fato sucede parecia subjugado pela cronometria ingênua.

Reichenbach afirmava que de certa forma a termodinâmica se havia tornado ociosa diante da estatística, sendo que, em última análise, os fundamentos da primeira poderiam ser descritos em termos da segunda [8] e, assim, de novo o mecanicismo triunfaria com suas

partículas e impulsos em dispersão; por traz da estrutura macroscópica da ciência do calor subjaz, assim, um modelo mecanicista grumoso. Não obstante, como ele mesmo observou, seria descabido tentar abarcar uma série de aplicações da termodinâmica às custas de métodos estatísticos. Penso que as objeções vão muito mais longe agora, a partir do fato de que é possível, como demonstrei, modelar o calor por meio de uma representação campista (teoria clássica de campos). A partir do momento em que o calor passa a ser representado por um campo escalar cuja evolução registra a sua própria entropia, a ideia de agitação de partículas perde força tanto mais quanto menor for a escala de abordagem microscópica. Da mesma forma que a teoria quântica de campos obsoletou os construtos de onda e partícula, também a termodinâmica como teoria de calibre torna remota a imagem corpuscular sobre a qual a miúde se constrói o espalhamento e a movimentação frenética das partículas. A visão grumosa da realidade conforme às velhas teorias estatísticas está superada, pelo menos no contexto da termodinâmica enquanto teoria de gauge do chamado “campo calórico”.

Em busca de uma concepção menos mecanicista do universo, minha intuição levou-me a combinar a equação termodinâmica fundamental que deduzi em trabalho anterior [8], relacionando entropia (\mathcal{S}), volume (\mathcal{V}), pressão (\mathcal{P}) e temperatura (\mathcal{T}), com a formulação microfísica estabelecida por De Broglie [1], porém, procurando manter-me no plano de um energetismo térmico. Assumindo um volume infinitesimal portador de energia calorífica própria decorrente de irradiação interna sobre sua fronteira, em determinada frequência, é lícito inferir uma pressão de radiação de dentro para fora. A partir da referida equação fundamental [11],

$$\tilde{c} \frac{\partial^2 \mathcal{V}}{\partial \mathcal{S} \partial \mathcal{P}} = - \frac{1}{\mathcal{P}} \frac{\partial \mathcal{T}}{\partial \mathcal{P}}, \quad (2)$$

podemos escrever, substituindo $\mathcal{T} = h\nu / k$,

$$\frac{\partial^2 \mathcal{V}}{\partial \mathcal{S} \partial \mathcal{P}} = - \frac{1}{\mathcal{P}} \frac{h}{\tilde{c} k} \frac{\partial \nu}{\partial \mathcal{P}}, \quad (3)$$

onde h é a constante de Planck e k é a constante de Boltzmann,

$$h = 6.55 \times 10^{-27} \text{ erg.s,}$$

$$k = 1.346 \times 10^{-6} \text{ erg / } ^\circ \text{K.}$$

O parâmetro $\tilde{c} > 0$ caracteriza o processo, se isentrópico, isobárico, isocórico ou isotérmico.

Seria aparatoso introduzir explicitamente a velocidade como índice de alusão corpuscular, uma vez que a natureza interior do elemento infinitesimal de volume é definida pela noção de radiação (frequência). Esta é, supostamente, isotrópica, com base nas observações do *background* cósmico, estando, é claro, relacionada a este último a partir de uma temperatura característica em Kelvins equivalente à frequência da radiação contida no volume infinitamente pequeno. Um cuidado: a mencionada frequência não deve ser lida dentro dos limites de uma analogia substancial com as ondas mecânicas de qualquer espécie; tal frequência está mais próxima do ritmo de um relógio do que do número de cristas de uma onda plana monocromática. Isto explica o porquê de não se começar por uma abordagem relativista, por modo de tentar instigar uma intuição primeira mais essencial a partir da fase associada à vibração interna, escrita sob a expressão geral da ação como

$$\frac{A}{h} = - \int_0^\tau \frac{k}{h} \mathcal{T} d\tau, \quad (4)$$

onde $d\tau$ é o elemento infinitesimal de tempo cosmológico (aqui entendido como tempo próprio), dado que, considerando-se sensivelmente constante a

temperatura (e, portanto, a frequência) dentro do pequeno volume em fluxo¹³ (compreendido no intervalo de integração), tão ínfimo como se queira, a variação da fase é

$$\partial\varphi = k\mathcal{I}\partial\tau = h\nu\partial\tau.$$

Sabemos que o mínimo da ação A corresponde ao máximo da entropia \mathcal{S} (esta é a razão do sinal negativo), o que permite escrever, a partir da expressão de Boltzmann, uma probabilidade associada ao volume em análise

$$P = e^{\int_0^{\tau} \frac{k}{h} \mathcal{S} d\tau}. \quad (5)$$

Vejam como essa abordagem nos aproxima de uma solução para o problema das emissões térmicas de corpos massivos. Há consenso sobre que a expansão é dominante no atual estado do universo. Não obstante, existem regiões onde a contração é nitidamente predominante. Em buracos-negros, por exemplo, a contração pouco a pouco inviabiliza a transferência de massa de dentro para fora, quanto mais próximos estivermos do horizonte, justificando a fama desses objetos de que nada lhes escapa, nem mesmo a luz. No entanto, como Hawking observou, buracos-negros parecem emitir radiação térmica [6]. Como, então, é possível associar tal radiação com as fluxões do contínuo?

De acordo com Hawking, na linguagem corpuscular, pares de partículas e antipartículas virtuais podem ser desfeitos nas imediações de um buraco-negro; uma partícula ou antipartícula desgarrada desapareceria além do horizonte de eventos, mas não o seu par, o qual,

por não ter ocorrido aniquilação mútua, se apresentaria como radiação emitida pelo buraco-negro, a chamada “radiação Hawking”. De modo equivalente, segundo a teoria quântica do espaço-tempo que defendo, a radiação térmica adicional ao *background* isotrópico “gerada” pelo buraco-negro não seria mais do que o resultado do conflito entre fluxões de contração e de expansão ao longo do horizonte de eventos. A radiação Hawking ainda não foi comprovada, mas imagino quão infrutífera seria a tentativa de entendê-la completamente pela via do modelo corpuscular (repare que Hawking fala de uma partícula ou antipartícula que se “apresentaria” como radiação!). A miúde, é mesmo o que os físicos costumam fazer: fala-se de radiação e partícula, passando-se de uma para outra noção sem muita preocupação com a clareza do que se está dizendo.



4. Outras intuições

Em seminários e palestras de física correm soltas teorias de dez e onze dimensões. Curiosamente pouco é dito sobre a natureza dessas dimensões. Como se não bastassem as dificuldades para se dar conta de um universo quadridimensional, eis que nos vemos diante das dimensões extras. Eu mesmo, em minhas pesquisas sobre supergravidade, cheguei a construir um modelo em nove dimensões, porém, sempre com o cuidado de explicar o sentido físico de tais dimensões. O questionamento sobre os modelos multidimensionais advém da dúvida sobre se são realmente necessários e, em caso afirmativo, da interrogação mais óbvia a se deixar no ar: por que não percebemos essas dimensões? Quanto à dúvida, em que pesem belas descrições formais, estamos longe de afirmar categoricamente que

¹³ Entendendo-se fluxo como expansão ou contração de um volume tão pequeno quanto se queira. Ao contrário do que se poderia pensar no mais das vezes, não se trata de conceber o tempo como algo que flui, mas como uma dimensão física (não coordenada matemática) sujeita a contração e expansão. Assim, não há que se confundir a noção de fluxo com a de fluxão.

modelos com muitas dimensões são necessários. Com respeito à indagação, há uma resposta nitidamente intuitiva: não as percebemos porque a luz não viaja por elas. Da minha parte, fico com a conclusão à que cheguei durante os estudos em supergravidade: não as percebemos porque são determinadas pelos geradores do grupo das transformações supersimétricas da teoria. É claro, portanto, que uma vez definidas assim não se pode deduzir de modo inequívoco que constituam “passagens” naturais para a luz, ou qualquer tipo de matéria, ao contrário dos geradores de translação que operam para produzir deslocamentos congruentes com segmentos no espaço de três dimensões. Estão de alguma forma embutidas no contínuo quadridimensional. Seja como for, pela minha experiência, ainda prefiro a inesgotável problemática que se nos afigura a quatro dimensões, mas admito não ter perdido o interesse em explorar teorias com mais de quatro ou cinco dimensões.

Conclusão

Estou certo de que este trabalho introdutório traz mais perguntas do que respostas. Bem sei que a pouca prática da filosofia no atual meio científico será responsável por muitas críticas que terei pela frente. Contudo, entendo que se existe uma abordagem racional para o que supomos ser o *quantum* de espaço-tempo, esta não poderá jamais ser restrita às possibilidades observacionais do sujeito cognoscente, o que seria uma postura por demais antrópica para responder pela realidade última do universo. Creio que podemos partir daqui para um olhar mais desprendido dos aparatos de medição. Estamos acostumados a forçar a mão sobre a natureza com altas energias, acreditando que assim nos aproximamos da realidade final. Ao contrário, é mais provável que estejamos sim criando artefatos, tal como fazem as estrelas e os buracos-negros. Entretanto, tais artefatos, se naturais ou artificiais, permanecem feitos de espaço-tempo, não nos esqueçamos. Por traz de tanta

turbulência natural ou truculência experimental, há um contínuo indiferente ao que se faça, à espera da eternidade.

Referências

- [1] Broglie, L. de 1976. *Recherches d'un Demi-Siècle*. Albin Michel, Paris, 411 p.
- [2] Bunge, M. 2015. Física e Filosofia. Perspectiva, São Paulo, 343 p.
- [3] Carnot, L. 1970 (reprint). *Réflexions sur la Méthaphysique du Calcul Infinitesimal*. Albert Blanchard, Paris.
- [4] Christian, B., Griffiths, T. 2017. *Algoritmos para Viver*. Editora Schwarcz, São Paulo, 529 p.
- [5] Garrido-Maturano, A. 2010. Los Tiempos del Tiempo. Editorial Biblos, Buenos Aires.
- [6] Hawking, S. 2017. *Buracos Negros: Palestras da BBC Reith Lectures*. Intrínseca, Rio de Janeiro, 63 p.
- [7] Laplace, P. 1984. *Exposition du Système du Monde*. Fayard, Paris.
- [8] Reichenbach, H. 1996. *Objetivos y Metodos del Conocimiento Fisico*. Fondo de Cultura Económica, México, 224 p.
- [9] Rovelli, C. 2015. *Sete Breves Lições de Física*. Editora Schwarcz, Rio de Janeiro, 91 p.
- [10] Sagan, C. 2002. *O Mundo Assombrado Pelos Demônios*. Companhia das Letras, São Paulo, 442 p.
- [11] Serpa, N. 2014. “Sur L’Entropie Contrôlée des Systèmes.” Ph.D. Thesis, L’Université Libre des Sciences de L’Homme de Paris, 127p.
- [12] Serpa, N. 2016. “A Thermal System Based on Controlled Entropy for Treatment of Medical Waste by Solar Energy.” *IFIP Advances in Information and Communication Technology* 488: 789-797.
- [13] Serpa, N. 2017. “Clouds of Quantum Machines.” *Encyclopedia of Information Science and Technology* Fourth Edition: 1040-1062.
- [14] Serpa, N. 2017. “Conformal Time in Cosmology.” In: https://www.researchgate.net/post/What_exactly_is_conformal_time. Acesso em 20 de Janeiro de 2018.
- [15] Serpa, N. 2017. “Controlled Entropy and Gauge Theory in Recycling Condensed Matter by Solar Energy.” *Journal of Physical Science and Application* 7(6): 6-14.
- [16] Serpa, N. 2017. “Quantum Gravity as a Theory of Quantum Space-Time.” *International Journal of Current Research* 9(11): 61290-61293.
- [17] Serpa, N. 2017. “Théorie Quantique de l’Espace-Temps: Principes Physiques et Philosophiques.” *CALIBRE* –

Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada 2(3):
22-27.

- [18] Vogel, T. 1973. *Pour une Théorie Mécaniste Renouvelée*. Gauthier-Villars, Paris.
- [19] Whitehead, A. 1998. *Le Concept de Nature*. J. Vrin, Paris.
- [20] Whitrow, G. 1988. *O Tempo na História*. Zahar, Rio de Janeiro, 242 p.

A Stephen Hawking
In memoriam

Implantação de um Sistema de Transporte Hidroviário no Lago Paranoá-DF

Gabriel de Souza Santos
Engenharia Civil, UNIP, Brasil

Received: 28 December 2017 ___ Accepted: 25 January 2018 ___ Published: 03 Apr 2018 ___.

Abstract: This article deals with a waterway alternative for the surroundings of Lake Paranoá, Brasília-DF. The project aims to create options for population displacement, easing traffic in the region and offering opportunities for tourism exploration, as well as providing convincing arguments about the need to implement three intermodal terminals in different locations around the lake.

Keywords: Paranoá Lake, tourism, intermodal terminal, waterway.

1- Introdução

O Lago Paranoá situa-se em Brasília, Distrito Federal, capital do Brasil. É conhecido pela sua origem artificial e por ter sido idealizado antes mesmo da construção da então metrópole do Planalto Central.

De acordo com Monteiro [8], no dia 12 de setembro de 1959, Juscelino Kubitschek, Presidente do Brasil à época, fez descer as comportas da barragem do Lago Paranoá, pela primeira vez. Nascia, assim, um dos principais cartões postais da cidade, que com suas águas abraça e encanta Brasília. Naquele mesmo dia, Juscelino completava 57 anos; renascia o Lago Paranoá, uma vez que, segundo relato do botânico e engenheiro francês Auguste Glaziou, integrante da 2ª Missão Cruls, liderada pelo astrônomo belga Luís Cruls e realizada no período de julho de 1894 a dezembro de 1895, no mesmo leito teria existido um outro lago no passado.

O Instituto do Meio ambiente e dos Recursos Hídricos do Distrito Federal/IBRAM [14], autarquia vinculada à Secretaria de Estado do Meio Ambiente/SEMA, relata em seu acervo que o Lago Paranoá é uma área de proteção ambiental desde 14 de dezembro de 1989, pelo Decreto nº 12.055, possuindo plano de manejo e zoneamento ambiental.

De acordo com o IBRAM [14], a extensão do Lago Paranoá contempla as Regiões Administrativas de Brasília – R.A I, Paranoá – R.A VII, Lago Sul – R.A XVI e Lago norte R.A – XVIII. Ao sul, possui como limite a divisa com a APA Gama e Cabeça de Veado;

ao norte, tangencia a APA de Cafuringa; a noroeste, aproxima-se do Parque Nacional de Brasília; a leste, limita-se com a APA do rio São Bartolomeu; a oeste, limita-se com o Plano Piloto. Os acessos se dão pela Estrada Parque Paranoá (EPPR) DF-005, Estrada Parque Dom Bosco (EPDB) DF-025, Estrada Parque Guará (EPGU) DF-051, Rodovia Radial DF-002, Estrada Parque Torto (EPTT) DF-007, Estrada Parque Contorno (EPCT) DF-001 [20].

Não obstante, dados geográficos do Lago são necessários para o aproveitamento efetivo de toda a riqueza que ele oferece. O IBRAM [14] aferiu que o Lago Paranoá tem uma área de 16.000 hectares e um perímetro de aproximadamente 69.000 metros, oferecendo atrativos para a sociedade local e rotas turísticas para visitantes.

O levantamento do Observatório do Turismo no Distrito Federal relata que dentre as opções de lazer disponíveis no Lago Paranoá estão os passeios de barco, a prática de desportos aquáticos, o turismo em geral, as regatas e competições, o *windsurf*, o iatismo, o esqui aquático e a pesca amadora, além das áreas públicas para banho [18].

2- Turismo Local

Brasília é um destino turístico completo, tanto em infraestrutura e serviços para o turista, como em atrativos e equipamentos. O Anuário Estatístico do Distrito Federal [4] aponta o turismo em Brasília como um setor promissor e em crescimento. As principais

Autor correspondente: Gabriel de Souza Santos, formando, áreas de pesquisa: hidrovias e modais urbanos. E-mail: gabrielsouzabsb@hotmail.com.

atividades que sustentam o turismo apresentam resultados positivos ano após ano, o que torna a capital brasileira um polo em grande ascensão.

A revista “Experimente o Brasil”, promovida e publicada pelo Ministério do Turismo [19], relata que pontos turísticos como o alto da Torre de Televisão, o Plano Piloto e o Eixo Monumental apresentam-se grandiosos aos visitantes, pois dali conseguem contemplar a Praça dos Três Poderes, o Congresso Nacional e o Palácio do Planalto, entre outras atrações memoráveis da Capital Federal. Para a Revista, o desenho característico de Oscar Niemeyer, autor dos projetos destas e de outras importantes obras da cidade, aparece também nas linhas curvilíneas da Catedral Metropolitana, referência da arquitetura moderna brasileira. Grande parte dos prédios públicos é aberta aos turistas gratuitamente, em dias e horários determinados, exibindo grande variedade de obras de arte, como painéis de Athos Bulcão e Burle Marx, esculturas de Bruno Giorgi e Alfredo Ceschiatti, além dos famosos vitrais de Marianne Peretti [19].

Conforme a revista supracitada, para os turistas é fundamental um passeio no circuito histórico e artístico que compõe Brasília, assim como apreciar uma das melhores áreas de lazer: o Parque da Cidade, com pistas e *cooper*, áreas para piquenique e parque de diversões infantil. A visita ao Lago Paranoá não pode faltar aos fãs dos esportes náuticos, disponíveis em diversos pontos do lago. Após a prática de esportes, ainda é possível admirar a magnífica vista oferecida pelo Pontão do Lago Sul ou pelos diversos clubes e restaurantes que circundam o lago [19].

De acordo com o Observatório do Turismo do Distrito Federal [18], no Aeroporto Juscelino Kubitschek/JK, situado em Brasília, há diariamente 262 voos, sendo eles 36 voos nacionais com escala em Brasília, 216 voos diretos nacionais e 10 voos internacionais. O Gráfico 1 se refere aos dados levantados no ano de 2016 pelo Observatório [18].

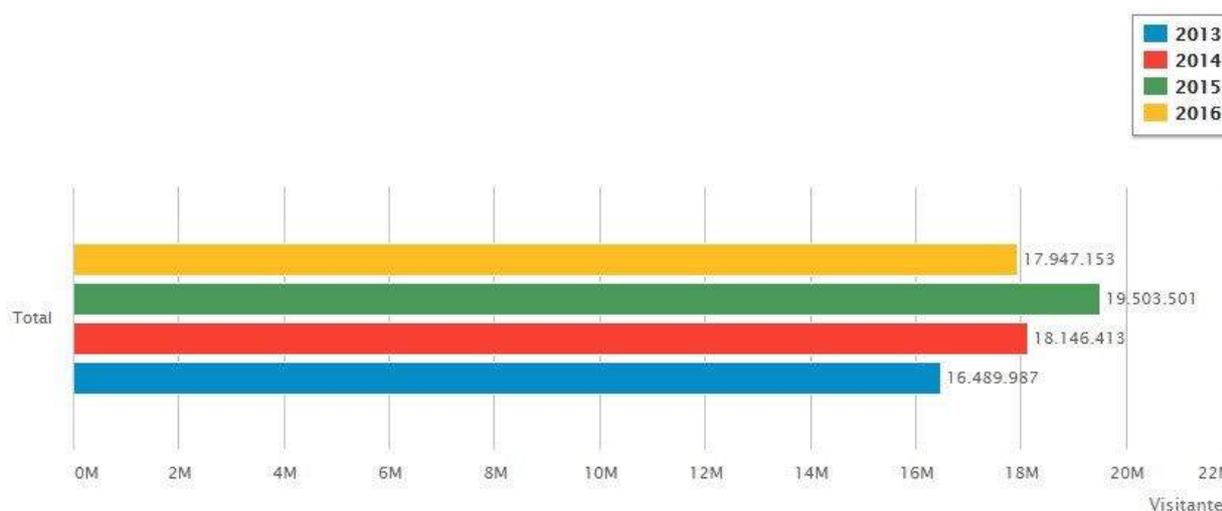


Gráfico 1: Dados Gerais – Fluxo de Passageiros no Aeroporto. (Fonte: Observatório do Turismo do Distrito Federal, 2016).

A Inframérica [18] publicou dados do fluxo de passageiros no Aeroporto JK dos anos de 2011 a 2014,

Tabela 1: Fluxo de passageiros no Aeroporto JK.

2011	15.398.737
2012	15.398.737
2013	16.489.987
2014	18.146.403

conforme a Tabela 1. Houve um aumento considerável de 2.747.666 passageiros, equivalente ao percentual aproximado de 18% num período de três anos. Vale lembrar que 2014 foi o ano da Copa do Mundo no Brasil, e Brasília foi uma das cidades-sede, regozijando-se com o Estádio Nacional Mané Garrincha, cartão postal da Capital Brasileira.

Já no sistema modal rodoviário da Capital, segundo o Observatório do Turismo do DF [17, 18], há uma movimentação de aproximadamente 4,6 mil passageiros por dia e 140 mil por mês entre embarques

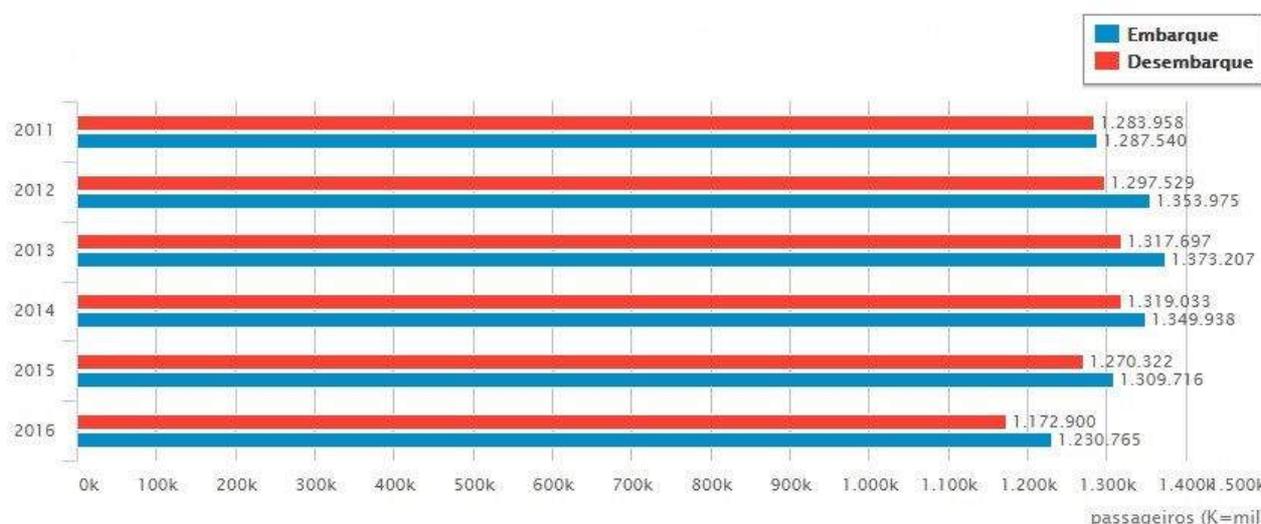


Gráfico 2: Evolução do fluxo da Rodoviária Interestadual de Brasília. (Fonte: Observatório do Turismo do Distrito Federal, 2016).

e desembarques. O Gráfico 2 apresenta a evolução do fluxo de passageiros na Rodoviária Interestadual de Brasília. Com base nesses dados, percebe-se que Brasília tem uma grande movimentação diária de pessoas, tanto no sistema modal aeroportuário como no rodoviário. O IBGE [13] em seu levantamento concluiu que a capital possui 3.039.444 de habitantes, ocupando no *ranking* nacional de cidades a quarta posição em população [11].

3- Sistema de Transporte Hidroviário no Brasil

De acordo com o site Nova Cana [16], desde 1799 vêm se apresentando ideias e projetos de integração do território brasileiro por meio das hidrovias. A primeira ideia de que se tem notícia foi a do cientista alemão Alexander von Humboldt, quem, ao visitar a América do Sul, anteviu que o continente poderia ser ligado de norte a sul por uma “grande hidrovía”, que poderia unir as bacias do Prata, Amazonas e Orinoco (esta última na Venezuela) através do canal do Cassiquiare, um canal natural entre os rios Negro e Orinoco.

O Brasil tem mais de 7 mil quilômetros de costa atlântica navegável e milhares de quilômetros de rios [12], fato que revela o potencial nacional para expansão do seu sistema hidroviário. Economicamente falando, esta circunstância beneficiaria o Brasil, tendo em vista que, além do transporte de passageiros, poder-se-ia escoar as riquezas de cada região, aliviando os modais rodoviários, os quais, por não serem de boa qualidade, acarretam grandes perdas para os produtores e para as indústrias.

O Brasil possui também grandes lagos espalhados por diversas regiões, dentre eles, o objeto de estudo deste artigo, o Lago Paranoá, que hoje detém uma das maiores frotas navegáveis do país.

4- Implantação de um Sistema de Transporte Hidroviário em Brasília

Segundo a Diretoria de Portos e Costas [7], o Distrito Federal possui a quarta maior frota náutica brasileira, atrás apenas do Rio de Janeiro, São Paulo e Paraná. Mesmo com tamanha quantidade de embarcações, não existe atualmente nenhuma voltada para o transporte de passageiros, sendo todas ou particulares ou de locadoras.

Diante do exposto, surge a ideia da implantação de um sistema de transporte hidroviário no Lago Paranoá, explorando assim suas dimensões em prol da população, buscando agilidade, conforto no transporte público e, por consequência, em futuro próximo, navegação voltada ao público turístico.

Inicialmente, o objetivo é implantar apenas três terminais intermodais para ligar o transporte hidroviário do Lago Paranoá ao transporte rodoviário. O primeiro terminal, na coordenada 15°49'12.1"S 47°50'06.3"W, localizado nas proximidades da Ponte Juscelino Kubitschek, um dos principais pontos turísticos do DF, próximo à área central da Capital Federal, facilitaria o acesso à Rodoviária do Plano Piloto [10], um dos pontos de maior movimento no centro de Brasília.



Figura 1: Local de implantação do Terminal Intermodal 1 (foto livre de direitos autorais, 2017) [9].

O segundo terminal, na coordenada 15°45'28.6"S 47°51'50.3"W, localizado nas proximidades do Centro Olímpico (CO), teria a função de simplificar o acesso à Universidade de Brasília/UnB [10].



Figura 2: Local de implantação do Terminal Intermodal 2 (foto livre de direitos autorais, 2017) [9].

O terceiro terminal a ser implantado, na coordenada 15°47'09.4"S 47°48'23.4"W, beneficiaria a vizinhança das RA VII Paranoá, RA XVIII Lago Norte e diversos condomínios localizados na região norte do DF [10, 20]. Tal implantação facilitaria a vida de milhares de pessoas, com mais uma alternativa de acesso a vários pontos da cidade.

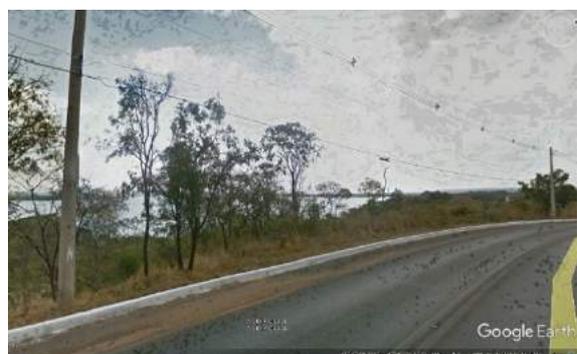
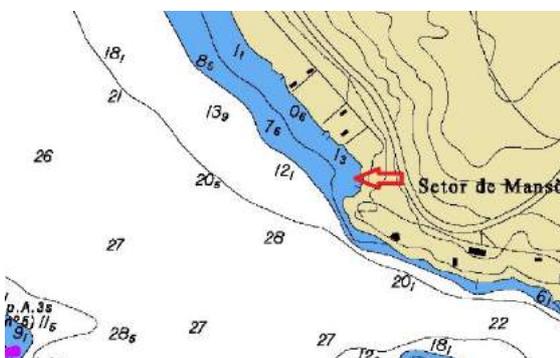
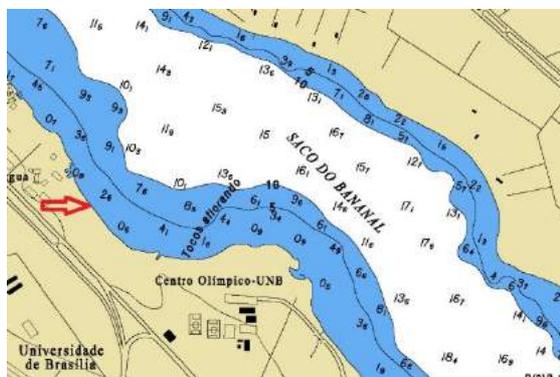


Figura 3: Local de implantação do Terminal Intermodal 3 (foto livre de direitos autorais, 2017) [9].

Definidos os locais de implantação dos três terminais, faz-se necessária a consulta da carta náutica (representação cartográfica de uma área náutica) [21], de cada um dos pontos, para obtenção de informações essenciais para a implantação de qualquer modal hidroviário.

Analisando a carta náutica, pode-se de início definir diversas necessidades para a execução do projeto, entre elas a dragagem, que segundo Fadda [6] é o serviço de desassoreamento, alargamento, remoção ou escavação de material de fundo de rios, lagoas, mares, baías e canais de acesso a portos, por meio de equipamento denominado “draga”, geralmente uma embarcação ou plataforma flutuante equipada com mecanismo necessários para efetuar a remoção do solo assoreado, causado principalmente pela erosão, desmatamento e práticas agrícolas inadequadas.



Figuras 4, 5 e 6: Cartas Náuticas dos locais de implantação dos Terminais Intermodais 1, 2 e 3. (Fonte: Ministério da Defesa – Marinha do Brasil, 2017) [15].

4.1- Terminal Intermodal

Segundo a Agência Nacional de Transportes Aquaviários/ANTAQ [2], terminal é a parte do sistema de transporte onde se realiza a interface entre dois ou mais modos de transporte ou entre duas diferentes rotas do mesmo modo.

O Terminal Intermodal é aquele que requer transbordo entre duas ou mais modalidades de transporte [5]. Há quatro possibilidades de combinações de serviços intermodais relacionados com o aquaviário: (1) ferroviário e aquaviário; (2) rodoviário e aquaviário; (3) aquaviário e dutoviário; (4) aquaviário e aéreo [5]. A combinação adotada para o presente estudo é a de número (2), rodoviário e aquaviário.

O estudo e o planejamento detalhado de implantação de um terminal intermodal são indispensáveis, tendo em vista a eficiência de atendimento à população. A preservação da natureza é também algo de suma importância, uma vez que a água do Lago Paranoá, além de proporcionar lazer e mitigar a secura do ar do Planalto Central, ainda tem como destino parte do abastecimento da população local, sem contar as normas regidas pela ANTAQ.

É importante ressaltar que a ANTAQ é uma entidade que integra a Administração Federal indireta, de regime autárquico especial, com personalidade jurídica de direito público, independência

administrativa, autonomia financeira e funcional, vinculada ao Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil [2]. Dedicar-se a tornar mais econômica e segura a movimentação de pessoas e bens pelas vias aquaviárias brasileiras, em cumprimento a padrões de eficiência, segurança, conforto, regularidade, pontualidade e modicidade nos fretes e tarifas [2].

O projeto do Terminal Intermodal está baseado na construção de:

- Dois galpões, o primeiro para a área de embarque e desembarque do modal rodoviário, com área de espera, bilheteria e salas administrativas; o segundo para o embarque e desembarque do modal aquaviário, com área de espera, praça de alimentação e salas administrativas.
- Área verde, destinada ao plantio de árvores, minimizando a degradação causada pela construção do terminal e praça para momentos de recreação e/ou convivência.
- O projeto não exigirá a construção de píer, tendo em vista que será executado corte no terreno, aproveitando o barranco já existente, fazendo necessário apenas um muro de arrimo.
- Estacionamento público, voltado a atender aqueles que trabalham no local e a população com algum interesse particular no local.
- Projeto de captação de água no telhado para manutenção de limpeza e irrigação do jardim.



Figura 7: Modelo de terminal intermodal a ser empregado no projeto (arte do autor, 2017).

A Figura 8 mostra o esquema de rotas a ser adotado pela implantação. O sistema hidroviário implantado terá três rotas, todas interligadas aos três terminais intermodais.

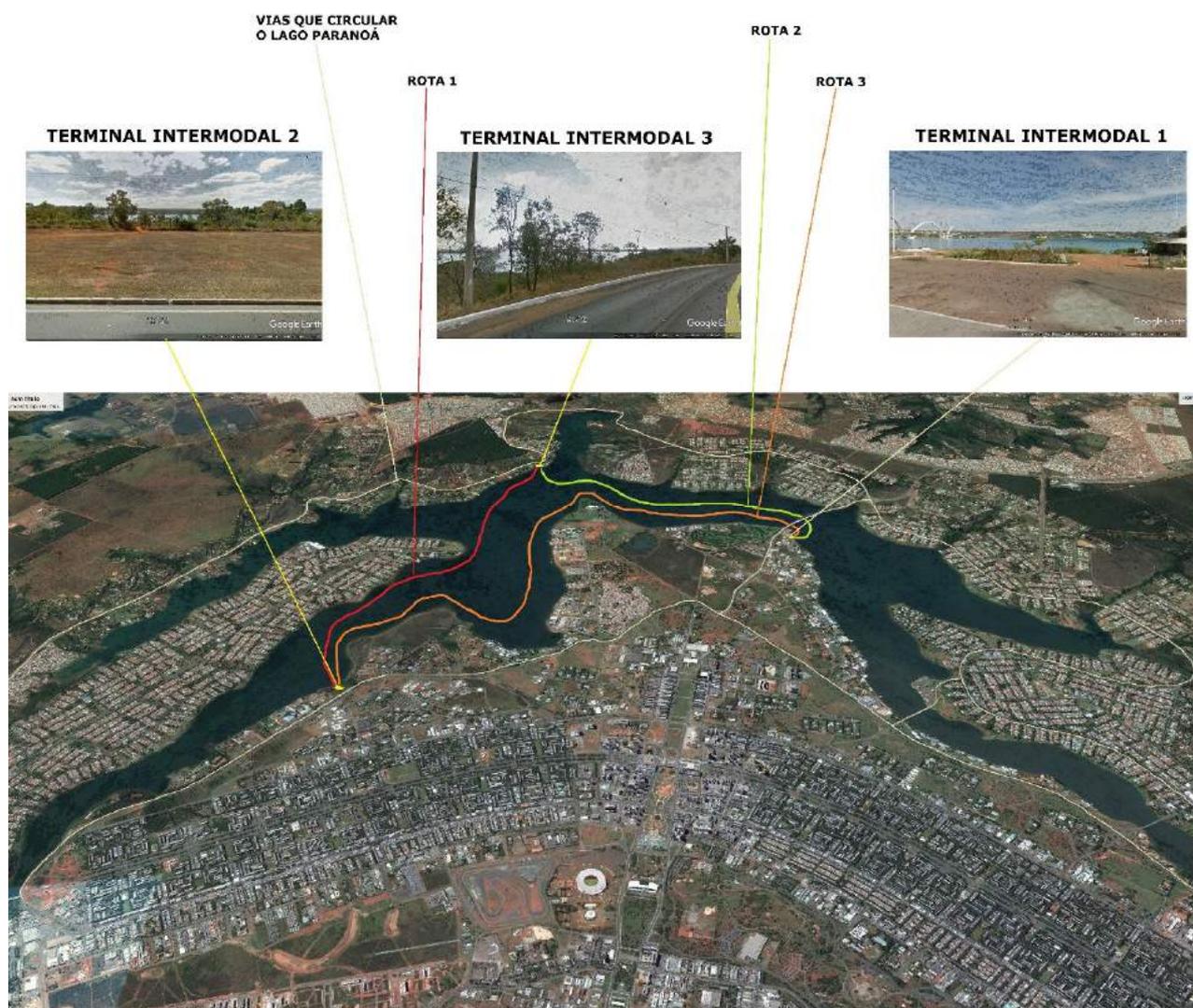


Figura 8: Esquema de rotas (adaptação do autor sobre mapas obtidos do Google Maps e do Google Earth, 2017).

4.2- Embarcações

O mercado oferece diversos modelos de embarcações voltadas para o transporte de passageiros. Após várias pesquisas em busca das melhores opções, de acordo com a demanda registrada, um projeto de transporte hidroviário em funcionamento em Joinville/SC chamou atenção. É utilizada uma embarcação conhecida no Brasil pelo nome *Jet Bus*, a qual é produzida e vendida pela empresa Argentina Astillero Benavidez [3].

A empresa Astillero Benavidez fabrica embarcações para variados propósitos, tanto logístico-comerciais, como pesca, ambulância, carga e combate a incêndio, quanto de transporte de passageiros. Dentre os modelos disponíveis destinados ao transporte de passageiros, três deles, ilustrados nas próximas figuras,

podem atender satisfatoriamente aos requisitos do modal aquaviário deste estudo: Benavidez 980, Benavidez 1300 e o Benavidez 2000, com diferentes capacidades de transporte de passageiros [3].

O modelo Benavidez 980 (Figura 9), transporta entre 12 e 15 pessoas. Encontra-se disponível com ou sem WC. A embarcação possui 9,72m de comprimento [3].





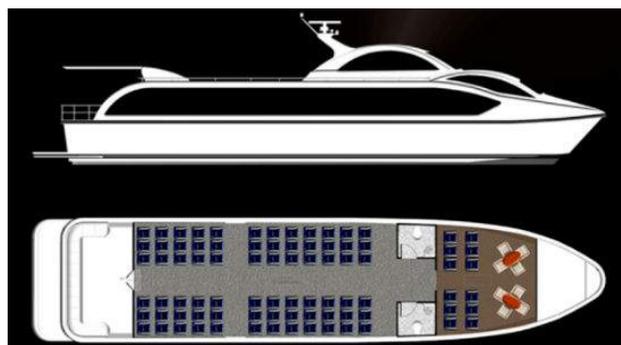
Figuras 9 e 10: Modelo Benavidez 980. (Fonte: Empresa Astillero Benavidez, 2017).

O modelo Benavidez 1300 tem motor com potência de 500HP, podendo transportar até 48 passageiros, dependendo da legislação vigente no país comprador. A versão representada nas Figuras 11 e 12 tem 12,25m de comprimento [3].



Figuras 11 e 12: Modelo Benavidez 1300. (Fonte: Empresa Astillero Benavidez, 2017).

O terceiro modelo Benavidez 2000 (Figuras 13 e 14) tem capacidade entre 50 e 80 passageiros, oferecendo alguns opcionais, como banheiros, bar, ar condicionado quente/frio, luzes dicroicas, porta-bagagens, sala VIP e assentos de couro. A embarcação possui 19,5m de comprimento [3].



Figuras 13 e 14: Modelo Benavidez 2000. (Fonte: Empresa Astillero Benavidez, 2017).

Além das opções de embarcações apresentadas, é possível verificar a viabilidade de uso futuro de embarcações de tipo anfíbio. O modelo anfíbio já existe em vários países, na maioria deles para o transporte turístico. A implantação desse modelo no transporte intermodal possibilitaria uma economia apreciável em relação à infraestrutura necessária para um terminal completo, já que o veículo anfíbio dispensaria alguns investimentos, dentre eles a dragagem e a construção de píer. A Figura 15 apresenta um modelo em operação na cidade de Rotterdam/HOL. A cidade tem o modal implantado desde 2010 [22].



Figura 15: Ônibus Anfíbio. (Fonte: Zeit Online, 2010).

5- Considerações Finais

Motivado pela convivência do autor com a ineficiência do transporte público de Brasília/DF, o presente artigo buscou descrever uma alternativa que

de algum modo possa melhorar a qualidade de vida de quem habita os arredores do Lago Paranoá, propondo a implantação de um sistema de transporte hidroviário no local com três terminais intermodais às margens do lago, em diferentes pontos, ligando as hidrovias ao transporte rodoviário.

A Agência de Notícias CNI [1], disponibilizando dados de investimentos do Governo Federal em infraestrutura de transporte, deixa clara a diferença de valores investidos entre os modais de transporte. Enquanto os investimentos federais em estradas chegaram a R\$ 8,6 bilhões em 2016, em hidrovias não ultrapassaram R\$ 300 milhões, no mesmo ano.

Em resumo, o país tem grande potencial para o pleno desenvolvimento do modal hidroviário, o que certamente dinamizaria o transporte de passageiros e de carga, impulsionando a economia e contribuindo para o desenvolvimento social da nação.

Agradecimentos

O autor agradece à equipe editorial da CALIBRE pelo suporte prestado à revisão do artigo.

Referências

- [1] Agência de Notícias CNI. *Investimentos Federais em Hidrovias e Ferrovias Caem Mais de 70% nos Últimos Seis Anos*. Disponível em: <<http://www.portaldaindustria.com.br/agenciacni/noticias/2017/03/investimentos-federais-em-hidrovias-e-ferrovias-caem-mais-de-70-nos-ultimos-seis-anos/>>. Acesso em: 05 out. 2017.
- [2] Agência Nacional de Transportes Aquaviários – ANTAQ. *A ANTAQ. Informações Institucionais*. Disponível em: <<http://portal.antaq.gov.br/index.php/institucional/a-antaq/>>. Acesso em: 03 nov. 2017.
- [3] Astillero Benavidez. *Transporte de Passageiros*. Disponível em: <<http://www.astillerobenavidez.com/web/transporte-de-pasajeros/>>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- [4] Anuário do DF. Turismo e Desenvolvimento. *Projeções Otimistas para o Mercado do Turismo Brasileiro*. Disponível em: <<http://www.anuariododf.com.br/turismo/turismo-e-desenvolvimento/>>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- [5] Brilhante, P., Campos, M., Paes, M., Cavalcante, N., Kuwahara, N., Santos, J. 2015. *Problemas de Alocação de Berços em Terminais Hidroviários*. 9º Seminário de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior. Manaus, 6 a 8 out. 2015.
- [6] Cerqueira, E., Bonfim, F., Carvalho, F., Santos, M., Costa, R. 2017. “Terminal de Uso Privado para a Cidade de Cameté – PA”. *Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada* 2(1): 1-10.
- [7] Diretoria de Portos e Costas MARINHA DO BRASIL. *Frota Náutica Brasileira*. Disponível em: <http://www.dpc.mar.mil.br/sites/default/files/csocia/dpc-media/1.g1_fiscalizacao_copa_-_19-02-14.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- [8] Extra Pauta – O canal Capital. *História do Lago Paranoá Guarda Segredos Submersos*. Disponível em: <<http://extrapauta.com.br/historia-do-lago-paranoa-guarda-segredos-submersos/>>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [9] Google Earth. *Imagens dos Locais de Implantação dos Terminais Intermodais*. Disponível em: <<https://www.google.com/intl/pt-PT/earth/>>. Acesso em 02 nov. 2017.
- [10] Google Maps. *Coordenadas*. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em 02 nov. 2017.
- [11] Governo de Brasília – GDF. *População - Gente de Brasília*. Disponível em: <<http://www.brasilia.df.gov.br/populacao>>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [12] Hidrovias Brasil. *Principais Hidrovias do Brasil*. Disponível em: <<http://hidroviasbrasil.blogspot.com.br/2014/11/principais-hidrovias-do-brasil.html>>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [13] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. *Estimativas da População Residente no Brasil e Unidades da Federação com Data de Referência em 1º de Julho de 2017*. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2017/estimativa_dou_2017.pdf>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [14] Instituto Brasília Ambiental – IBRAM. *APA do Lago Paranoá*. Disponível em: <<http://www.ibram.df.gov.br/component/content/article/257-unidades-de-conservacao/266-apa-do-lago-paranoa.html>>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [15] Ministério da Defesa – Marinha do Brasil. *Cartas Raster*. Disponível em: <http://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [16] Nova Cana. *Hidrovias como Alternativa para o Transporte de Etanol*. Disponível em: <<https://www.novacana.com/etanol/hidrovias-como-alternativa-transporte/>>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [17] Observatório do Turismo – Distrito Federal. *Relatório da Oferta Turística do Distrito Federal – 2015*. Disponível em: <http://observatorio.setur.df.gov.br/files/4614/5201/2580/Relatorio_da_Oferta_-_Final.pdf>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [18] Observatório do Turismo – Distrito Federal. *Transporte e Infraestrutura*. Disponível em: <<http://observatorio.setur.df.gov.br/index.php/transpo/transporte-aquaviario/>>. Acesso em: 30 out. 2017.
- [19] Revista Experimente o Brasil. *Conheça o País de Norte a Sul*. Disponível em: <http://www.turismo.gov.br/images/pdf/REVISTA_COMPLETA_Partiu_Brasil_2017_B.pdf>. Acesso em: 30 out. 2017.

- [20] Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habitação – SEGETH. *Relação de contato das Regiões Administrativas*. Disponível em: <<http://www.segeth.df.gov.br/relacao-de-contatos-das-regioes-administrativas.html>>. Acesso em: 02 nov. 2017.
- [21] Universidade Federal do Amapá – UNIFAP. *Cartas Náuticas Histórico e Noções de Navegação*. Disponível em: <http://www2.unifap.br/alexandresantiago/files/2012/03/Aula-02_Cartas-Nauticas_PDF.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2017.
- [22] Zeit Online. *Rotterdam - Auf Spritztour*. Disponível em: <<http://www.zeit.de/2010/16/Rotterdam-Splashtour>>. Acesso em: 10 nov. 2017.



Simulações Numéricas e Fronteiras da Realidade

Exemplos e Discussões em Física, Engenharia e Arquitetura

Nilo Sylvio Costa Serpa

GAUGE-F Scientific Researches, Brazil; Faculdades ICESP.

Aline Santoro

UnB, Brazil.

Gisele Alves

Faculdades ICESP.

Received: 12/Feb/2018 _____ / Accepted: 20/Mar/2018 _____ / Published: 03/Apr/2018 _____.

Abstract: This article aims to discuss the applicability of computational simulations, showing its utility especially in the engineering of reinforced concrete structures. After going through an overview of simulation techniques with some examples in physics and engineering, the authors discuss the predictive scope of the simulations in the study of the behavior of structural pieces made of reinforced concrete. Present work is part of an ongoing research sponsored by Faculdades ICESP, Brasília –DF, Brasil.

Key words: computational simulations, modeling, reinforced concrete, civil engineering.

Nomenclatura

u, v, w : dissimilaridades dinâmicas no balanço de empresas e empregados no modelo Lotka-Volterra

D_A : distância por diâmetro angular (área radial)

Símbolos e expressões especiais

$\langle x - l \rangle^n$: *bracket* de Macaulay

$-\int q_0 l \left[\iint x^{-1} \langle x - l \rangle^1 dx \right] dl$: integral da flecha

1. Introdução

A capacidade de construir simulações numéricas computacionais colocou a comunidade científica sob uma poderosa perspectiva de modelagem ao longo das últimas décadas. O valor agregado à pesquisa pela velocidade de processamento de enormes quantidades de dados e a possibilidade de reproduzir condições de contorno estabelecidas em ambientes ou situações às quais não teríamos acesso direto não apenas deu novo impulso à busca de soluções técnicas para problemas reais, como também tornou viável a realização de testes rápidos, aumentando consideravelmente o alcance preditivo das nossas representações. Dessa maneira, as simulações numéricas nos permitem testar resultados anteriores da análise matemática, dando-nos a chance de encontrar padrões que possam ajudar a interpretar

Autor correspondente: Nilo Sylvio Costa Serpa, Ph.D., professor, áreas de pesquisa: gravitação quântica, computação quântica, cosmologia e engenharia de sistemas termodinâmicos. E-mail: nilo.serpa@icesp.edu.br.

realisticamente os aspectos formais do modelo aplicado em termos das observações registradas. Demais disso, novos *insights* podem surgir a partir de

simulações, ou mesmo fatos elucidativos até então desconhecidos.

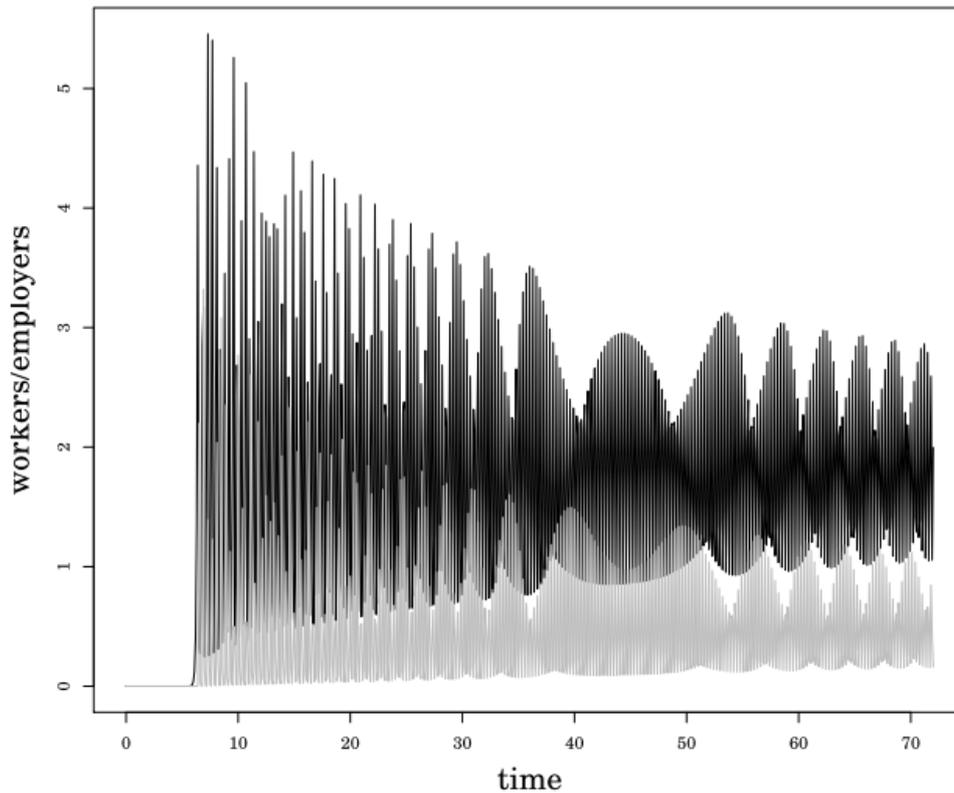


Figura 1 – Simulação realizada a partir do modelo predador-presa aplicado ao mercado de trabalho.

Não obstante, há, sem dúvida, um efeito colateral indesejável, qual seja o do abandono da busca de soluções analíticas para os problemas mais complexos. Semelhante abandono reflete uma espécie de letargia intelectual provocada pelo excesso de tecnologia. Não queremos aqui desmerecer um instrumento certamente muito valioso, e que tanto nos tem ajudado a melhor compreender uma imensa gama de fenômenos, tão somente alertar para o necessário cuidado quando se trata de representar o comportamento de sistemas físicos. Embora sejam ferramentas fundamentais para a evolução da moderna ciência e, conseqüentemente, da tecnologia, as simulações computacionais devem ser encaradas como recursos de apoio ao entendimento quando da ausência de factibilidade laboratorial, ou na

total impossibilidade de tratamento de problemas em que a não-linearidade natural se manifeste em termos de muitas variáveis cujas inter-relações funcionais sejam em parte obscuras. Neste último caso, procura-se simplificar o formalismo a ser submetido aos procedimentos numéricos, estabelecendo-se hipóteses iniciais e restrições de fronteira que ao menos nos forneçam um desenho aproximado do comportamento do sistema em questão.

Feitas as advertências acima, o objetivo deste artigo é mostrar com alguns exemplos o valor das simulações, sem excessivo entusiasmo, concentrando maior foco sobre o assunto das estruturas de concreto em engenharia civil. Sempre que necessário, chamaremos

atenção para os percalços semânticos e técnicos que poderiam afetar a simulação descrita.

2. Simulações: aplicações gerais

Uma simulação computacional é um programa ou *worksheet* (folha de tarefas ou sub-rotinas) que procura imitar (arremedar, semelhar, parodiar ou macaquear) aspectos-chave de um determinado sistema. As simulações variam em completeza e precisão, dependendo do propósito, dos recursos de processamento disponíveis, e da perícia de quem programa os simuladores. Espera-se, portanto, que simulações para as quais importa o grau de risco de vidas humanas sejam mais precisas do que simulações destinadas, por exemplo, ao desenvolvimento de jogos. Isto, porém, não significa que simulações que não importem em riscos humanos não devam ser precisas. Pelo contrário, inúmeras simulações dizem respeito à investigação de fenômenos notáveis que não ameaçam a integridade dos indivíduos, e, no entanto, necessitam ser precisas para dar conta de boas aproximações à realidade. De qualquer maneira, é a dificuldade em lidar analiticamente com um problema — quer pela natureza das funções envolvidas, quer pelo volume de dados que precisam ser cruzados via funções pouco tratáveis — que nos leva às simulações mais específicas.

A Figura 1 resulta de uma simulação econofísica da evolução do mercado de trabalho no Brasil entre 1996 e 2008, a partir de um modelo tipo predador-presa [3], onde o predador é a empresa que “captura” a mão-de-obra (oscilações claras), e a presa é o trabalhador que se submete à exploração da empresa (oscilações escuras). As oscilações devem ser entendidas como decorrentes das flutuações de oferta e de demanda. Essa dinâmica foi representada por um sistema Lotka-Volterra modificado por Serpa em 2012, após estudos realizados sobre oscilações forçadas e atratores estranhos, cujas equações diferenciais são

$$\begin{cases} a.u.u_0 - \alpha_1 \cdot u.u_0.v.v_0 = 0 \\ -b.v.v_0 + \alpha_1.u.u_0.v.v_0 - \\ -\alpha_2.v.v_0.w.w_0 = 0 \\ -c.(w.w_0 - w^\dagger) + \alpha_2.v.v_0.w.w_0 = 0, \end{cases} \quad (1)$$

no qual a mescla das variáveis dinâmicas u, v, w com u_0, v_0, w_0 determina a geometria final do sistema de acordo com os dados registrados (para maiores detalhes sobre o modelo, veja referência [3]). Vislumbra-se com nitidez uma fase inicial mais caótica (entre 1996 e 2000), com grandes flutuações de mercado, e uma fase intermediária de transição (entre 2000 e 2002), culminando esta na fase subsequente dos anos de prosperidade mundial do início do século (entre 2002 e 2008), apresentando um padrão de atenuação e maior equilíbrio. Ainda que a representação seja consistente com os fatos históricos, cabe lembrar que o modelo se limita a uma análise anterior ao cenário conturbado em que se encontra a sociedade brasileira, de modo que o sistema de equações precisaria ser testado à luz do panorama presente para ser efetivamente generalizado. O mesmo conjunto de equações também foi usado por Serpa em outro contexto [5, 6], demonstrando a versatilidade do modelo.

Simulações são fundamentais em cosmologia astrofísica. Grosso modo, cosmologia é a parte da astronomia que se ocupa do estudo da gênese e da evolução do universo em larga escala. Exerce papel crítico na cosmologia uma classe de extensões no espaço profundo denominadas <<distâncias cosmológicas>>. Uma delas é conhecida como distância por diâmetro angular (ou área radial), de especial interesse para as investigações sobre aglomerados de galáxias [4].

Normalmente, a distância por diâmetro angular é avaliada em função do desvio para o vermelho (z), considerando o parâmetro de desaceleração (q_0) e a constante de Hubble (H_0),

$$D_A = \frac{c}{H_0 q_0^2} \left(\frac{q_0 z + (q_0 - 1) (\sqrt{1 + 2q_0 z} - 1)}{1 + z^2} \right). \quad (2)$$

A Figura 2 mostra uma simulação para aglomerados conhecidos até $z = 1,0$. Como se percebe, as incertezas são grandes, muito embora se possa afirmar que a distribuição de aglomerados de galáxias acompanha, aproximadamente, a curva teórica obtida.

3. A série de Macauley-Serpa e a modelagem de carregamentos em uma viga prismática qualquer: afinal, o que é simular?

É preciso cautela ao se usar o termo <<simulação>>. Obviamente, o que o computador sempre faz é simular, já que os cálculos cibernéticos

não são contínuos, e sim finitos. Parece, portanto, redundante falar de simulações numéricas se tudo que a máquina pode fazer é simular. Contudo, tomemos um exemplo de aproximação por séries em um cálculo manufaturado e entreguemo-lo ao computador.

Em cálculo estrutural necessitamos modelar o carregamento que incide sobre uma viga por modo de medir-lhe as reações nos apoios. No conjunto de toda a estrutura, com tantas peças e tantos carregamentos, a tarefa pode ser enfadonha se caminharmos pelas vias tradicionais. Explorando ao máximo o emprego das funções de singularidade [1, 2], semelhante tarefa se torna muito mais simples e formalmente elegante. Por que razão este método não foi difundido no Brasil com a devida atenção permanece, para mim, um fato incompreensível.

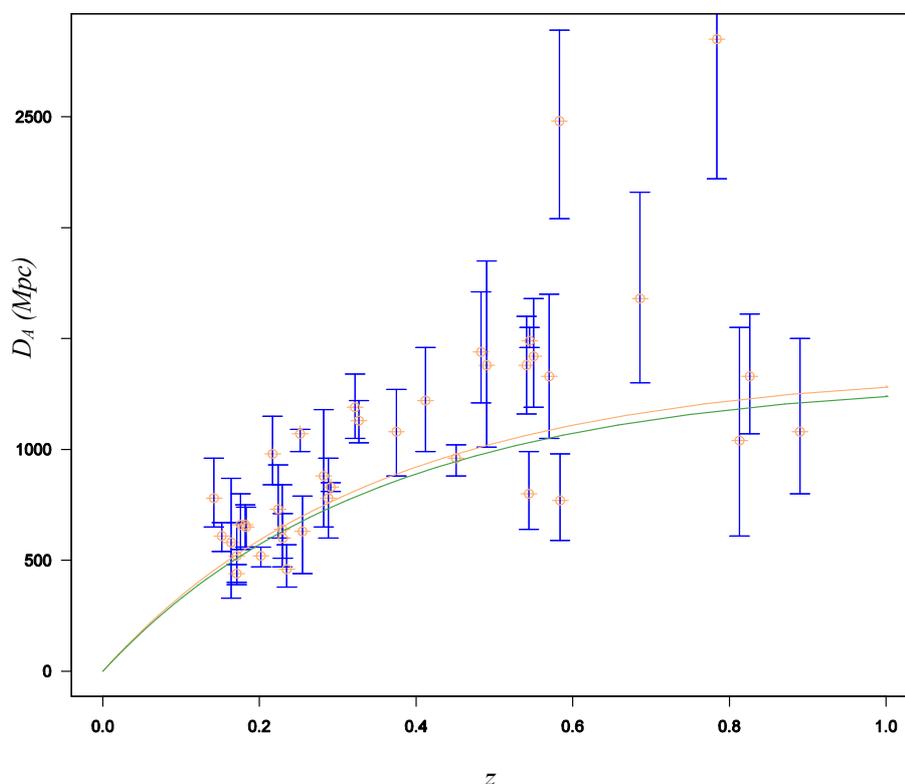


Figura 2 – Curvas teóricas da distância por diâmetro angular (laranja considera desvio provocado por inhomogeneidades na distribuição de matéria) e aglomerados mapeados com as respectivas barras de erro referentes ao cômputo das distâncias [4].

Tomemos, pois, uma carga distribuída em rampa sobre uma viga prismática de concreto armado (Figura 3). No modelo em *kets* de Macaulay, a expressão da parcela da flecha correspondente a esta carga assume, a partir da integral dupla dos momentos, a seguinte forma:

$$-\int q_0 l \left[\iint x^{-1} \langle x-l \rangle^1 dx \right] dl, \quad (3)$$

onde l é a extensão da viga sobre a qual se distribui a carga, e x um ponto qualquer ao longo da viga.

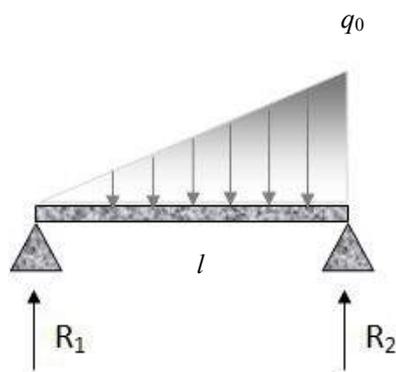


Figura 3 – Carregamento em rampa.

Serpa demonstrou que, combinando-se as regras operacionais dos *kets* com a manipulação das funções ordinárias, a integral dupla entre colchetes se expande numa série infinita de integrações por partes, tal como

$$\begin{aligned} \iint x^{-1} \langle x-l \rangle^1 dx &= \\ &= x^{-1} \frac{\langle x-l \rangle^3}{6} + x^{-2} \frac{\langle x-l \rangle^4}{12} + x^{-3} \frac{\langle x-l \rangle^5}{20} + \\ &+ x^{-4} \frac{\langle x-l \rangle^6}{40} + \frac{1}{10} \int \langle x-l \rangle^6 x^{-5} dx + \int \dots \end{aligned}$$

Esta série ficou conhecida como série de Macaulay-Serpa. Para todos os efeitos práticos, uma

boa aproximação é truncar a série no termo de quinta ordem, de modo que

$$\begin{aligned} \iint x^{-1} \langle x-l \rangle^1 dx &\approx \\ &\approx x^{-1} \frac{\langle x-l \rangle^3}{6} + x^{-2} \frac{\langle x-l \rangle^4}{12} + x^{-3} \frac{\langle x-l \rangle^5}{20} + \\ &+ x^{-4} \frac{\langle x-l \rangle^6}{40}. \end{aligned}$$

Esta aproximação é possível em primeiro lugar porque a série converge, o que é fácil de demonstrar da seguinte maneira:

Por simplicidade, tomemos a integral dupla até o terceiro termo,

$$A = x^{-1} \frac{\langle x-l \rangle^3}{6} + x^{-2} \frac{\langle x-l \rangle^4}{12} + x^{-3} \frac{\langle x-l \rangle^5}{20}.$$

Definamos as quantidades

$$a = x^{-1} \frac{\langle x-l \rangle^3}{6};$$

$$b = x^{-2} \frac{\langle x-l \rangle^4}{12};$$

$$c = x^{-3} \frac{\langle x-l \rangle^5}{20}.$$

A Tabela 1 mostra nas linhas o valor total << A >> da série truncada e, lado a lado, o valor dos termos << a >>, << b >> e << c >>, separadamente, variando-se, nas colunas, o ponto << x >> de referência na viga. Foi considerado um comprimento de viga de 20 unidades de extensão, e de 10 unidades de extensão para o comprimento << l >> do carregamento em rampa.

Como se observa, a coluna << c >> justifica um bom limite de aproximação.

Agora bem, uma vez aceita a série truncada como solução aproximada da integral dupla, não estamos fazendo mais do que reproduzir um procedimento finito, o qual está na base do cálculo computacional, isto é, das simulações cibernéticas. Assim, a série truncada e cada termo isolado evoluem de acordo com as colunas da Tabela 1 em exponenciais de domínio cada vez menor conforme avançamos aos termos mais distantes da série (Figura 4).

Tabela 1 – Evolução dos termos da série de Macaulay-Serpa.

A	a	b	c
11.04166667	8.33333333	2.0833333333	6.250000e-01
8.33972882	6.39473684	1.5145429363	4.304490e-01
6.07517147	4.74074074	1.0534979424	2.809328e-01
4.22612118	3.36274510	0.6923298731	1.710462e-01
2.76679687	2.25000000	0.4218750000	9.492188e-02
1.66666667	1.38888889	0.2314814815	4.629630e-02
0.88940719	0.76190476	0.1088435374	1.865889e-02
0.39162494	0.34615385	0.0399408284	5.530269e-03
0.12129630	0.11111111	0.0092592593	9.259259e-04
0.01587779	0.01515152	0.0006887052	3.756574e-05
0.00000000	0.00000000	0.0000000000	0.000000e+00

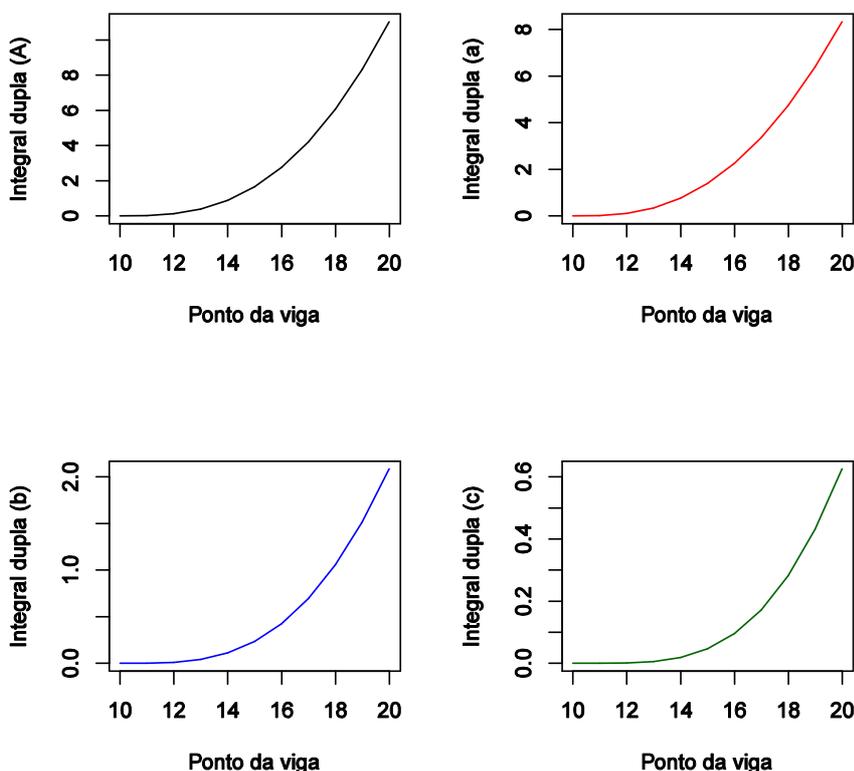


Figura 4 – Evolução ponto-a-ponto da série truncada e de cada termo isoladamente.

Portanto, neste caso em que a expansão em série é uma consequência direta da natureza peculiar da integração dupla em questão, nossa simulação começa antes mesmo de irmos ao computador. Logo, ao usar o computador estamos emulando a emulação!

Em resumo, estamos sempre imitando a realidade, quer usemos ou não um computador. Simular é, por um

lado, atividade libertadora, já que nos permite alcançar alguma compreensão onde essa parecia impossível; por outro lado, é o eterno símbolo da finitude de nossas capacidades intelectivas, e, portanto, do nosso acesso à realidade.

3. As curvas da arquitetura

As imagens coordenadas aos objetos que se quer representar ganham expressão inteligível por intermédio das mãos, seja em esculturas, em desenhos, ou em pinturas. Infelizmente, por um descuido do sistema de ensino-aprendizagem, alunos de arquitetura e urbanismo, disciplina onde a forma desempenha papel relevante, estão se distanciando cada vez mais desse princípio básico de funcionamento do cérebro enquanto centro criativo na tola expectativa de que se tornarão arquitetos somente aprendendo a montar representações assistidas por computador. Esses jovens, nascidos no conforto superficial de uma civilização apática e imediatista, creem que o computador é a solução para as suas deficiências cognitivas e inabilidades gráficas. Graças à extinção da geometria descritiva na maioria dos cursos existentes, associada à falta de leitura clássica e à ausência de humanismos antigos e contemporâneos, a pobreza do grafismo e a frieza projetiva tomaram conta da discência, formando uma barreira comportamental quase inexpugnável.

Contudo, não se ganhou Zamora em uma hora. A luta docente continua, ainda que a duras penas. Uma forma produtiva de trazer a tecnologia para si como aliada, de modo adjunto, é procurar despertar o interesse pelo estudo criativo das formas. Nessa direção, o Rhinoceros, *software* de modelagem tridimensional baseado na tecnologia NURBS (*Non Uniform Rational Basis Spline*), permite a representação de curvas e superfícies complexas, processando polinômios de baixo grau, isto é, expressões algébricas mais simples. A Figura 5 mostra a simulação pelo Rhinoceros do Palanque Monumental de Oscar Niemeyer, visto em seguida na Figura 6. Com esse exemplo ilustra-se de que modo a tecnologia torna possível emular e entender as formas complexas de maneira a podermos aplica-las oportuna e corretamente nos croquis que antecedem o projeto executivo propriamente dito.

Enfim, é como sempre digo: desenhos computadorizados não constituem projetos arquitetônicos; excetuando-se aquele emprego industrioso para o estudo das formas, não são mais do que expressões frias da burocracia e da falta de engenho projetual.

4. Conclusão

As modernas ferramentas de *software* têm contribuído para a descoberta e predição de novos fenômenos e comportamentos sistêmicos, além de agilizarem o trabalho investigativo da ciência. Ninguém o nega. Não obstante, tais ferramentas também são responsáveis por um considerável grau de ociosidade mental, levando estudantes, professores e pesquisadores ao sedentarismo intelectual operacionalista, o qual resume o trabalho racional à mera eficiência de uso dos aplicativos e dos *frameworks*. A linde que separa o trabalho analítico criativo da automação consumada é tênue, pois, como vimos, as representações científicas são baseadas em emulações pela própria finitude do entendimento. Devido a essa condição limitada, é fácil confundir a simulação criativa da simples imitação robótica, tanto mais que a presente reflexão raramente é feita. A dominância da tecnologia sobre o potencial imaginativo humano marcou a nítida diferença entre a atividade racionalista da primeira metade do século XX e a vacuidade do modernismo e do pós-modernismo, prevalente na segunda metade e nos dias atuais. A busca pela inovação, em que pesem aspectos mercadológicos, reflete de certa forma o atual predomínio das colagens de artefatos já existentes apresentadas como novidades; como se diz, “mais do mesmo”.

Esperamos que esse estudo alerte os leitores para a importância de compreender o que é simular, mantendo o bom-senso no emprego dos emuladores tecnológicos sem que estes nos tornem servos da automação e, conseqüentemente, criaturas incapazes de mínima faísca criativa.

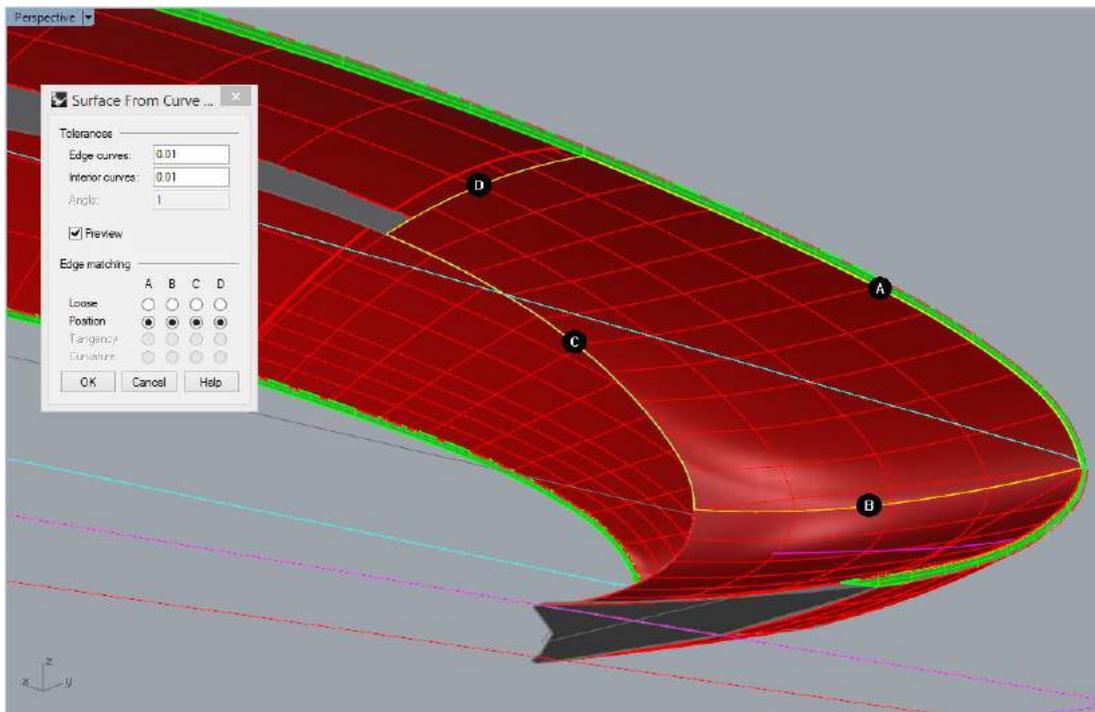


Figura 5. Criação do Palanque Monumental por meio de formas NURBS no Rhinoceros (cortesia de Santoro, 2017).

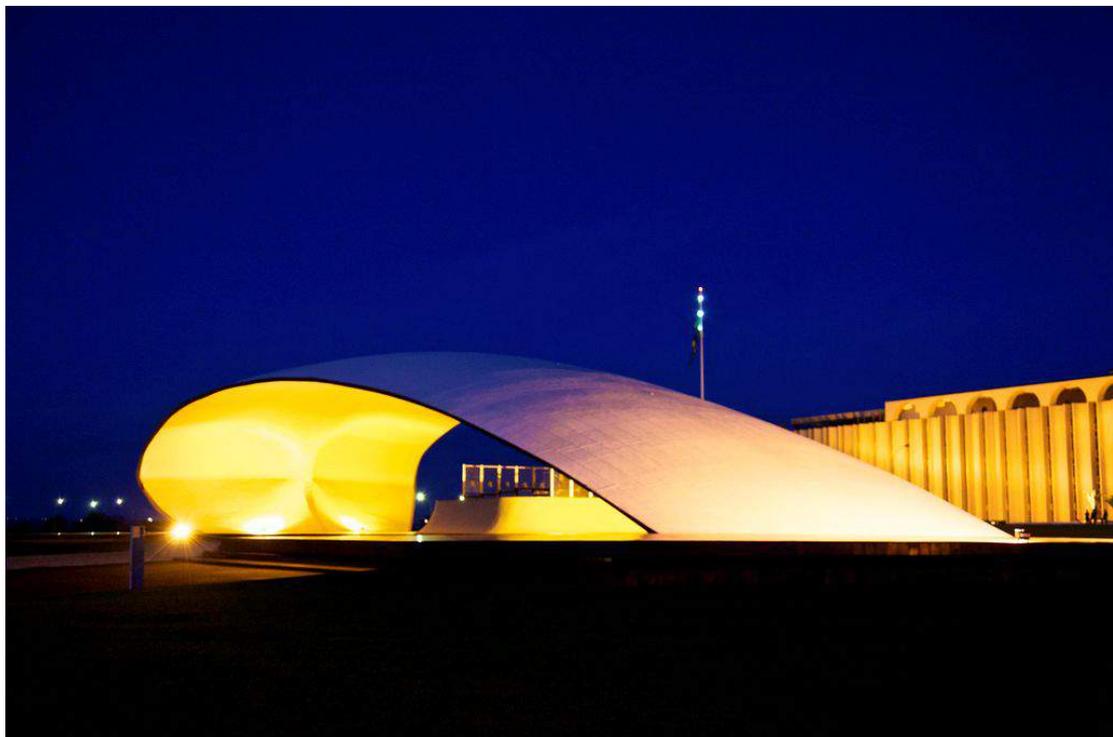


Figura 6. Vista noturna do Palanque Monumental (foto livre de direitos autorais).

Referências

- [1] Clebsch, A. 1862. *Theorie der Elasticität Fester Körper*. B.G. Teubner, Leipzig.
- [2] Macaulay, W. 1919. "A Note on the Deflection of Beams." *Messenger Math* XLVIII.
- [3] Serpa, N. 2012. "Computational Simulations and Science: Advanced Lotka-Volterra Modeling in Economics." *Int. J. of Data Analysis & Information Systems* 4(2): 69 – 80.
- [4] Serpa, N. 2016. "Reviewing Redshift and Cosmological Distances: The Sunyaev-Zel'dovich Effect and the LTB Perspective." *CALIBRE - Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada*, 1: 12.
- [5] Serpa, N., Alcântara, M., Cruz, E. 2017. "Construction of Dynamic Academic Systems: A Preliminary Modeling." *Journal of Education, Society and Behavioural Science* 23: 1-9.
- [6] Serpa, N., Alcântara, M., Cruz, E. 2017. "Encáostica, a Engenharia do Caos: Construindo Sistemas Acadêmicos Dinâmicos." *CALIBRE - Revista Brasileira de Engenharia e Física Aplicada* 2: 12.