



Physicae Organum

Instituto de Física - Universidade de Brasília

2021

Vol. 7

Número 1

Olavo Leopoldino da Silva Filho
Editor Gerente

Marcello Ferreira
Editor Associado

Leonardo Luiz e Castro
Editor Associado

Palton Lima Alves
Editor Júnior

Fábio Luís de Oliveira Paula
Conselheiro Editorial

Nota editorial

A presente edição teve sua composição final realizada posteriormente à sua publicação original, com o objetivo de padronização editorial e atribuição de identificadores digitais (DOIs) aos artigos. Esse processo não alterou o conteúdo dos trabalhos originalmente publicados.

A equipe desta edição foi composta por Olavo Leopoldino da Silva Filho como editor gerente, Marcello Ferreira e Leonardo Luiz e Castro como editores associados, Palton Lima Alves como editor júnior, e Fábio Luís de Oliveira Paula como conselheiro editorial.

A equipe editorial agradece à Biblioteca Central da Universidade de Brasília (BCE/UnB) pelo apoio na configuração e no registro dos DOIs da revista, especialmente à bibliotecária Luísa Chaves Café.

— Leonardo Luiz e Castro, responsável pela composição final, 2026

Editorial Note

This issue had its final composition prepared after its original publication, with the aim of editorial standardization and the assignment of digital object identifiers (DOIs) to the articles. This process did not alter the content of the originally published works.

The editorial team for this issue consisted of Olavo Leopoldino da Silva Filho (Managing Editor), Marcello Ferreira and Leonardo Luiz e Castro (Associate Editors), Palton Lima Alves (Junior Editor), and Fábio Luís de Oliveira Paula (Editorial Advisor).

The editorial team thanks the Central Library of the University of Brasília (BCE/UnB), especially librarian Luísa Chaves Café, for their support in configuring and registering the journal's DOIs.

— Leonardo Luiz e Castro, responsible for the final composition, 2026

Apresentação

Apresentamos aos leitores mais um número da *Physicae Organum*, reafirmando o compromisso da revista com a divulgação científica de qualidade e com a diversidade temática que caracteriza a pesquisa contemporânea em Física e áreas afins.

Nesta edição, os artigos reunidos percorrem diferentes enfoques teóricos, conceituais e aplicados. O volume inclui um estudo sobre a formulação de um termo tensorial geral para a expansão multipolar, uma reflexão filosófica sobre os conceitos de crença, razão, ciência e religião, além de uma análise do impacto do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itá no microclima do município de Concórdia. Complementam a coletânea uma investigação sobre os efeitos da introdução de impressoras 3D no ambiente escolar e um trabalho que aplica a abordagem de sistemas complexos a modelos epidemiológicos.

Esperamos que esta variedade de temas estimule o diálogo interdisciplinar e contribua para o fortalecimento da cultura científica entre estudantes, docentes e pesquisadores.

Atenciosamente,

Os Editores.

Sumário

1	Termo Tensorial Geral para Expansão Multipolar	1
2	Breve Ensaio acerca dos Conceitos de Crença e Razão Ciência e Religião	7
3	A influência do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itá no microclima da cidade de Concórdia	26
4	Estudo das consequências da aplicação de impressoras 3D no ambiente escolar	39
5	Sistemas Complexos aplicado a modelos epidemiológicos	59



Termo Tensorial Geral para Expansão Multipolar

General Tensorial Term for Multipole Expansion

L.S.F., OLAVO¹, M.R.R., LEANDRO²

¹Instituto de Física da Universidade de Brasília (IF-UnB).

Resumo

Neste trabalho estamos interessados em obter uma expressão geral para todos os termos de uma expansão multipolar do potencial elétrico. Isso deve ser visto como mais do que um simples exercício matemático, uma vez que muitos cálculos, principalmente aqueles relacionados a sistemas eletrônicos em Mecânica Quântica, podem se beneficiar dos resultados aqui obtidos.

Primeiramente, no entanto, faremos uma breve introdução à expansão multipolar derivando a expressão usual em termos dos polinômios de Legendre. Na seção seguinte, nós chegamos a uma expressão geral para um multipolo qualquer. A seção três é focada em mostrar que tal expressão se reduz aos casos simples dos multipolos comumente tratados (monopolo, dipolo, quadrupolo e octopolo). Por fim, fazemos uma breve conclusão dos resultados e suas implicações.

Palavras-chave: Física. Eletrostática. Expansão Multipolar. Tensor de Multipolo.

Abstract

In this work we are interested in obtaining a general expression for all terms of a multipole expansion of the electric potential¹. This should be seen as more than a mathematical exercise, since many calculations, mainly those in the realm of electronic systems in Quantum Mechanics, can profit from the results to be shown.

Before anything, we will make a brief introduction to multipole expansion deriving the usual expression in terms of the Legendre polynomials. In the next section we find the general expression for any multipole term. Section three is devoted to the show that this general expression reduces to the usually known multipole terms (monopole, dipole, quadrupole and octopole). We then make a brief conclusion of our results and their implications.

Keywords: Physics. Electrostatics. Multipole Expansion. Multipole Tensor.

¹This problem was suggested in a class on Electromagnetic Theory, at Universidade de Brasília, UnB, by professor L.S.F. Olavo

I. INTRODUCTION

Consider a continuous arbitrary charge distribution. If each infinitesimal charge element is in figure a position given by the vector \mathbf{r}' , as illustrated in figure 1,

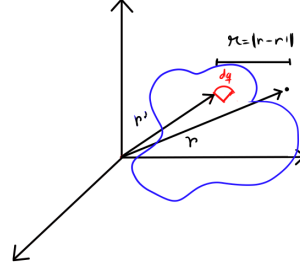


Figure 1

the potential it attributes to a point defined by \mathbf{r} is given by Gauss's law as:

$$\Phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \frac{\rho(\mathbf{r}')}{r} dv', \quad (1)$$

where $\rho(\mathbf{r}')$ is the position dependent charge density, and r is the distance between the charge element and the point where the potential is evaluated. By definition

$$r^2 = |\mathbf{r}|^2 + |\mathbf{r}'|^2 - 2|\mathbf{r}'||\mathbf{r}|\cos\theta = r^2 (1 + t^2 - 2t\cos\theta), \quad (2)$$

where $t = \frac{|\mathbf{r}'|}{|\mathbf{r}|}$, we have then

$$r = |\mathbf{r}| \sqrt{1 + t^2 - 2t\cos\theta}. \quad (3)$$

Considering now that, by the definition of the generating function of the Legendre polynomials

$$\frac{1}{\sqrt{1 + t^2 - 2tx}} = \sum_{n=0}^{\infty} P_n(x)t^n, \quad (4)$$

where $P_n(x)$ are the Legendre polynomials, making $x = \cos\theta$ we then have

$$\Phi(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{r^{n+1}} \int (r')^n P_n(\cos\theta) \rho(r') dv'. \quad (5)$$

II. MULTIPOLE TENSOR

Beginning with the Rodrigues' formula for the Legendre polynomials

$$P_n(\cos(\theta)) = P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n [(x^2 - 1)^n]}{dx^n}, \quad (6)$$

we can find the following expression for the n th polynomial

$$P_n(x) = \frac{1}{2^n n!} \sum_{k=0}^{n/2} C_k x^{n-2k}, \quad (7)$$

where we define

$$C_k = (-1)^k \binom{n}{k} \frac{[2(n-k)]!}{(n-2k)!}. \quad (8)$$

Considering the vector r' associated with the position of each element of charge dq , we can write down its components as

$$r^{i'} = |r'| u^{i'}, \quad (9)$$

where we define, using Einstein index notation,

$$|r'|^2 = r^{i'} r_{i'}. \quad (10)$$

As the modulus of the vector r' and $u^{i'}$ are the components of the unit vector parallel to $r^{i'}$.

Since the space treated here is simply the continuous 3-D Euclidean space we can define its metric as follows.

$$\eta_{ij} = u_i \otimes u_j = u_i u_j, \quad (11)$$

where \otimes denotes the tensor product between the bases (which in here are the components of u_i in the adopted coordinate system), and u_i is the 1-form associated with the unit vector in the direction of r^i , which is the position vector of the point in which the potential is evaluated.

Since x was defined as the cosine between the position vector of the charge element and r^i , it can be written as²

$$x = u_i u^{i'}, \quad (12)$$

we then have

$$\sum_{k=0}^{n/2} C_k x^{n-2k} = \sum_{k=0}^{n/2} (u_i r^{i'})^n C_k x^{-2k}, \quad (13)$$

and considering that

$$\frac{1}{x} = \frac{|r'|}{u_i r^{i'}}, \quad (14)$$

it is possible to write 8 as

$$\sum_{k=0}^{n/2} (u_i r^{i'})^n C_k x^{-2k} = \sum_{k=0}^{n/2} (u_i r^{i'})^{n-2k} |r'|^{2k}. \quad (15)$$

²Although i and i' are different symbols they denote components with respect to the same basis, the only difference being one represents the components of the position vector of the point analyzed and other the position of the charge element

Using 5 and 6 we can deduce the following:

$$\begin{aligned} |r'|^2 &= r'^i r'_i = r^i r_i = r^i u_i \eta_{ij} \eta^{ij} r^j u_j \\ &= u_i r^i r_i \eta^{ij} u_j = u_i |r'|^2 \eta^{ij} u_j, \end{aligned} \quad (16)$$

Now, using (9), (10) and (11) we arrive at

$$\sum C_k x^{n-2k} = \sum C_k (u_i r'^i)^{n-2k} (u_i |r'|^2 \eta^{ij} u_j)^k. \quad (17)$$

Noting that

$$(u_i)^n = u_{i_1} \otimes \dots \otimes u_{i_n}, \quad (18)$$

we can write the sum in (13) in terms of a tensor. Therefore defining the Generalized Multipole Tensor

$$\mathbf{L} = L^{i_1 \dots i_n} \otimes u_{i_1} \dots \otimes u_{i_n}, \quad (19)$$

where the components

$$L^{i_1 \dots i_n} = \frac{(-1)^k}{2^n n!} \int \rho(r') \sum_{k=0}^{\frac{n}{2}} C_k (r'^i)^{n-2k} (|r'|^2 \eta^{ij})^k d\tau', \quad (20)$$

are the n th term of the expansion and

$$(\eta^{ij})^k = \eta^{i_1 i_2 \dots i_{k-1} i_k}, \quad (21)$$

with (15) and (16) we then can write down the general term for the potential expansion.

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{r^{n+1}} L^{i_1 \dots i_n} e_{i_1} \dots e_{i_n}. \quad (22)$$

III. SOME SPECIFIC CASES

III.1. Monopole Potential

The derivation of the monopole contribution for the total potential is trivial. In this case \mathbf{L} is simply a scalar for which $n = 0$, we then have from (20) and (22).

$$\phi_0(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r} \int \rho(r') d\tau' = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (23)$$

III.2. Dipole Potential

For the dipole we have $n = 1$, therefore \mathbf{L} is a (1,0) tensor. We still have a single term in the sum on (20). From (8) we have

$$\frac{C_0}{2^n n!} = \frac{2}{2} = 1 \quad (24)$$

and, from (20)

$$L^i = \int \rho(r') r'^i dv' = p^i \quad (25)$$

and therefore

$$\phi_1(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} p^i e_i \quad (26)$$

Where p^i is the dipole momentum vector.

III.3. Quadrupole Potential

For this case we have something more interesting, this part of the contribution is a (2,0) tensor field for which $n=2$, the coefficients C_k are.

$$C_0 = \binom{2}{0} \frac{4!}{2!} = 12 \quad (27)$$

$$C_1 = \binom{2}{1} \frac{2!}{0!} = 4 \quad (28)$$

Therefore, L takes the form

$$L^{ij} = \frac{1}{2} \int \rho(r') \left[3r'^i r'^j - (|r'|^2 \eta^{ij}) \right] dv' = Q^{ij} \quad (29)$$

We then can write the potential as

$$\phi_2(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^2} Q^{ij} e_i e_j \quad (30)$$

III.4. Octopole Potential

At last, the deduction of the octopole contribution is similar to the past ones. For this case

$$C_0 = 120, \quad (31)$$

$$C_1 = -72, \quad (32)$$

$$L^{ijk} = \frac{1}{2} \int \rho(r') \left[5r'^i r'^j r'^k - 3|r'|^2 r'^i \eta^{jk} \right] dv', \quad (33)$$

the potential is therefore

$$\phi_3(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 r^3} L^{ijk} e_i e_j e_k, \quad (34)$$

reproducing, as expected, the tensors associated with such multipoles

IV. CONCLUSIONS

In this paper we have shown how one can arrive at a general tensorial term that enables a quick derivation of the n th order tensor associated with the 2^n th multipole of a charge distribution. This demonstration can be extended to any inverse square force law whose potential can be obtained from the Legendre equation and, as expected, shows that such multipoles fall at a rate proportional to d^n , meaning that at short distances their influence must be taken into account.

REFERÊNCIAS

(GRIFFITHS, 2005).

REFERENCES

GRIFFITHS, D. J. *Introduction to electrodynamics*. [S.l.]: American Association of Physics Teachers, 2005. 6



Breve Ensaio acerca dos Conceitos de Crença e Razão, Ciência e Religião

Brief Essay about the Concepts of Belief and Reason, Science and Religion

ANTONY M. M. POLITO*¹

¹Instituto de Física – Universidade de Brasília

*Se Deus está morto, então, tudo é permitido
Dostoievski.*

Resumo

Em caráter de ensaio didático, faço uma breve discussão acerca dos conceitos de crença, de fé, de razão, de ciência e de religião e das possíveis relações existentes entre esses conceitos. O mote que perpassa essa discussão é o debate entre religiosos e cientistas, envolvendo esses conceitos. Ao final, apresento outras também breves reflexões pessoais, de caráter episódico, sobre religião. A apresentação é informal e ensaística e o assunto é tratado de modo elementar, voltado para estudantes. As ideias apresentadas são fundamentadas, mas apenas na medida do estritamente necessário, em virtude de meus objetivos e do espaço restrito que, para um estudo completo, exigiria um livro. Embora a maior parte das ideias aqui discutidas não sejam novas já que todas podem ser encontradas no pensamento de muitos outros autores, de várias épocas, eu desenvolvo os temas no intuito de expressar uma visão pessoal. O tema básico, que perpassa todo o ensaio, tem a ver com a ideia de que as razões que separam ciência e religião são muito mais complexas do que a maioria dos cientistas e dos religiosos conhecem ou está disposta a admitir explicitamente, em qualquer debate sobre o assunto, em particular, sobre a possibilidade de sua conciliação.

Palavras-chave: Crença e Razão. Ciência e Religião.

Abstract

This text was writ in the format of a didactic essay. I make a brief disquisition about the concepts of belief, faith, reason, science and religion and about the possible relationships that can exist among these concepts. The motivation that run through this discussion is the debate between religious thinkers and scientists about these concepts. At end, I present other also brief personal thoughts whose character is episodic, about religion. This presentation is informal and the subject is treated in an elementary level, turned to students. The ideas I present are reasoned, but only as far as the strictly necessary, in virtue of my goals, and the limitation of space. The themes here

*antony.polito@gmail.com

discussed would require an entire book for a complete study. Even though the majority of the ideas are not original once all of them can be found in the thoughts of many other authors, of different epochs, I develop these themes in order to express them as a personal point of view. The basic theme, that run through all the essay, is related with this general idea: the very reasons that divide science and religion are a lot more complex than the majority of scientists and religious thinkers know or are willing to explicitly admit, in any debate about these issues, in particular, about the very possibility of their conciliation.

Keywords: *Belief and Reason. Science and Religion.*

I. INTRODUÇÃO: A DERROCADADA DO DOGMATISMO E O CONHECIMENTO COMO CONSTRUÇÃO

Seja no caso do pensamento científico, seja no caso do pensamento religioso, o fato é que, em ambos, sempre existe um pensamento filosófico de fundo, que lhes dá fundamento, muito embora isso nem sempre esteja completamente aparente ou seja reconhecido, por cientistas ou religiosos. Portanto, durante toda a nossa discussão, eu estarei fazendo menção a dois níveis diversos de pensamento: aquele em que se articulam ciência e/ou religião, em um patamar; e aquele em que se articula o pensamento filosófico, nos fundamentos.

É importante que se esclareça, já de início, que a prática filosófica contemporânea há muito abandonou a chamada postura *dogmática*. Isso significa que, dificilmente, os filósofos contemporâneos se expressam em termos de *verdades absolutas*, como faziam os filósofos do passado mais especificamente, até aproximadamente a primeira metade do século XIX. E isso é parte de uma série de transformações globais pelas quais o pensamento, desde os seus primórdios, passou, e que tem a ver também com mudanças no que eu vou passar a chamar de *padrões de racionalidade*.

Porém, é preciso muito cuidado com a afirmação de que o pensamento contemporâneo abandonou a busca por *verdades absolutas*, pois, o que eu passarei a discutir aqui nada tem a ver com uma postura que defenda qualquer forma de *relativismo epistemológico radical* que tende a defender a total *equivalência* de todas as opiniões. E, certamente, também não tem nada a ver com nenhuma crítica que conduza ao *cepticismo* que, no polo oposto, tende a defender a *suspensão* de todas as opiniões. Ainda que a busca por *verdades absolutas* já não faça mais parte de nosso padrão de racionalidade científica, isso não implica que tenhamos abandonado as investigações sobre a *realidade* o que quer que venhamos a entender, ainda que provisoriamente, como tal.

O que eu procuro defender é justamente a ideia oposta. Isso significa que eu não considero que todas os empreendimentos de investigação sobre a *realidade* são igualmente válidos ou igualmente bons. E que, por isso, vale a pena continuar a investigar sobre isso que denominamos *realidade*, porém, considerando que algumas formas de investigação, bem como os seus resultados, são, de fato, melhores, mais adequados, mais bem fundamentados e mais profícuos do que outros.

A meta dessas investigações sobre a *realidade* sempre é a construção de teorias. Sobretudo no caso do pensamento científico, um marco distintivo das melhores investigações é que

elas jamais se dão em isolamento mútuo, de modo que as teorias que elas produzem sempre podem ser articuladas, em alguma medida, com outras teorias que compõem o universo do conhecimento científico acumulado.

A propósito, como mencionamos acima, quaisquer investigações e reflexões sobre a natureza da *realidade* envolvem, como pano de fundo, também investigações e reflexões *filosóficas* sobre a *natureza do conhecimento* sobre a *realidade*. De acordo com a visão que compartilho, não apenas o próprio conhecimento, mas também as *teorias do conhecimento* só devem ser consideradas adequadas e válidas se dispuserem de suficiente fundamentação lógica, teórica e/ou técnica, em acordo com critérios claramente definidos.

Dizer que não cabe mais falar em *verdades absolutas* significa que, do mesmo modo como ocorreu com a ciência contemporânea, a maior parte da filosofia contemporânea ocidental também passou a trabalhar sob a perspectiva epistemológica de que a construção do conhecimento, a compreensão de seus significados e o valor dessa construção devem se dar sempre sob uma perspectiva *conjectural*. Ou seja, com base na ideia geral de que as teorias *filosóficas* e científicas são baseadas em *hipóteses*.

O princípio fundamental desse tipo de perspectiva é a de que *essas hipóteses não podem jamais aspirar a transformar-se em verdades absolutas*: elas sempre seguirão sendo *hipóteses*, ainda que o seu valor epistêmico possa mudar. Isso significa que as *hipóteses*, caso se sustentem, podem sempre se tornar mais robustas e dignas de confiança e aceitação.

De acordo com essa forma de compreender a estrutura do conhecimento, as teorias *filosóficas*, científicas, bem como os sistemas de pensamento, em geral, são sempre considerados produtos da *invenção* de algo essencialmente *novo*. É claro que as nossas invenções teóricas podem ser *inspiradas* por muitos elementos, com origens e naturezas bastante diferentes. Elas podem ser *inspiradas*, por exemplo, naquelas mesmas ideias gerais que já constituíam os fundamentos das teorias antigas seja para incorporá-las, seja para rejeitá-las. Ou elas podem ser *inspiradas* pela observação técnica ou ingenuamente conduzidas de fenômenos da natureza; ou pela observação de fenômenos sociais, culturais ou históricos; ou mesmo, pela pura reflexão sobre o próprio conhecimento já previamente acumulado.

O ponto fundamental, contudo, é que, segundo minha visão, *as nossas teorias são invenções*. São produtos intelectuais construídos por nós e, portanto, condicionados historicamente. Em consequência, eu destaco que a faculdade intelectual mais básica que entra em operação no processo de produzir conhecimento ou pensamento sobre o conhecimento é, precisamente, a *imaginação*. Devemos entender *imaginação*, no presente contexto, em sentido amplo, como a nossa capacidade de engendrar *novos* conceitos e novas estruturas conceituais.

É, portanto, a *imaginação* que *cria* os objetos (os entes), suas propriedades e as múltiplas relações que se quer que, supostamente, existam entre eles. Esses objetos de criação, em uma etapa posterior, poderão (e deverão) constituir os *fundamentos metafísicos* de uma teoria ou de um sistema de pensamento. Como é claro, não queremos apenas parar na etapa da criação ou o conhecimento não se diferenciaria da literatura ou da arte, de modo que, para aspirar a ser conhecimento, tais sistemas teóricos devem se dispor a fazer algo mais. E esse algo mais tem a ver, justamente, com o seu *compromisso com a investigação de uma realidade subjacente e independente de nós mesmos, que pensamos sobre ela*.

Evidentemente, não queremos (embora até possamos) dizer que os objetos concretos individuais, aos quais temos acesso perceptivo direto ou seja, essa cadeira, esse carro, essa

xícara de café são, eles próprios, objetos de nossa criação. Até porque, objetos concretos e singulares, tomados individualmente, não são e não podem ser objeto do que queremos entender como pensamento científico, filosófico e até mesmo, em certa medida, religioso.

De modo que a imaginação entra em cena não para criar a miríade de objetos concretos singulares que supomos existir, mas, para inventar uma classe bastante diferente de objetos: os *conceitos universais*. São os conceitos universais que subsumem esses objetos concretos *particulares* sob o escopo de objetos abstratos.

E essa ideia de invenção de objetos abstratos universais, com base na imaginação, se aplica a qualquer âmbito. Tais objetos abstratos podem ser conceitos de uma teoria científica como partícula elementar ou carga elétrica, mas também podem ser conceitos pertencentes a outros âmbitos intelectuais como beleza, justiça ou divindade.

Feitos esses primeiros esclarecimentos, podemos passar a tratar dos problemas que envolvem os conceitos de crença, de razão, de ciência e de religião. Vou procurar deixar bastante claro que existe um *erro categorial* que vem sendo eternamente repetido, pelo menos no âmbito das discussões que não envolvem filósofos, propriamente ditos. O erro categorial é pensar que esses termos se referem sempre a ideias *comensuráveis*, dentro de um determinado discurso.

A reflexão mais ampla sobre todas as controvérsias mais ácidas que se deram entre cientistas e religiosos, ao longo da história, claramente indica que ambos os lados da disputa incorreram em muitos equívocos, embora a natureza dos equívocos seja bastante diferente.

Indica, também, que a esperança de que cientistas e religiosos entrem em entendimento é praticamente vã por, no mínimo, dois motivos: primeiro, porque parte do debate é político: refere-se antes a disputas de poder que pouco ou nada tem a ver com pensamento científico, religioso ou filosófico. Em segundo lugar, porque ambos os lados da disputa são, em geral, bastante desqualificados para reconhecer e discutir as questões filosóficas que, na verdade, são o que está na base de suas controvérsias.

Assim, se muitos religiosos não entendem quase nada sobre o que são a ciência e a razão e muitos sequer entendem muito bem o que seja a própria crença religiosa, os cientistas também têm, na maioria dos casos, pouquíssimo entendimento de questões filosóficas (epistemológicas e metafísicas), de modo que raramente sabem discernir o que *realmente* está em jogo.

II. RAZÃO VERSUS CRENÇA?

Quase todos confundem a discussão entre *ciência e religião*, por um lado, com a discussão entre *razão e crença* ou entre *razão e fé*, por outro, e é bastante difícil fazer ver esse erro. Porém, o fato é que essas duas contraposições são de naturezas completamente distintas.

Os conceitos de razão e de crença são *ambos* articuláveis, *em certa medida* (a ser estipulada), tanto no pensamento científico, quanto no pensamento religioso. Isso se deve ao fato de que crença e razão são conceitos que pertencem a *categorias epistemológicas* completamente distintas e, portanto, não podem ser postos em contraposição. Não há, e não pode haver, portanto, qualquer debate que se utilize dos conceitos de crença e de razão como se eles fossem polos contraditórios de uma disputa.

Crença, em sentido técnico, é, antes de tudo, uma *atitude epistêmica* sobre o *valor de*

verdade de uma ou mais *proposições*. Ou seja, é um *estado cognitivo* pelo qual indivíduos se posicionam com respeito ao fato de serem verdadeiras ou falsas certas asserções sobre o mundo.

Portanto, a crença é uma atribuição de *valor epistêmico* a algo que está sendo afirmado. Quando um indivíduo crê, o que ele está fazendo é afirmar que considera a asserção, ou sistema de asserções, como uma expressão que condiz com o modo como a realidade é, independentemente da existência ou do pensamento do próprio indivíduo. (A propósito, se um indivíduo afirma a verdade de uma asserção que ele faz sobre algo que dependa apenas da sua realidade subjetiva, ele não crê: ele tem certeza e está sendo apenas tautológico.)

O termo crença é utilizado, pelo senso comum, quando a atitude epistêmica não é acompanhada de justificativas, ou o é, mas com justificativas relativamente frágeis, pouco convincentes ou publicamente inaceitáveis. Porém, o mais adequado, até por uma questão histórica, é que se passe a chamar esse último caso de *fé*. O termo *fé* pode, assim, ser compreendido como sendo o que chamamos de uma *crença cega*. Até aí, as distinções são quase triviais, mas agora se pode começar a sofisticar um pouco a discussão, para se ter um mínimo de noção sobre a complexidade das questões envolvidas.

Como a força das justificativas para as crenças pode ir de muito fraca a até muito forte, evidentemente, passa a existir uma escala contínua que vai do que estamos acostumados a chamar de *fé* (crença com grau zero de justificativa) até o que podemos chamar de *conhecimento* (crença com elevado grau de justificativa).

Nesse último caso, abandona-se o termo *fé*, mas, não a *definição* de *conhecimento como crença*. E isso é sumamente importante, dentro da visão conjectural, porque, por mais seguros que julgemos estar com relação ao nosso conhecimento, jamais poderemos atingir certezas absolutas. Porém, é óbvio que, se é fácil dizer quando o grau de justificativa de uma crença é nulo, não é fácil dizer quando se atingiu o estágio de conhecimento, pois não existem critérios absolutos para o que seja grau elevado de justificativa.

Os problemas não param por aí. A escala de força das justificativas tem que ser fornecida independentemente das próprias crenças a serem justificadas, e isso só pode ser feito usando-se uma *teoria de segunda ordem*, ou, mais propriamente, adotando-se critérios *epistêmicos* providos, implícita ou explicitamente, por alguma teoria filosófica de fundo.

Claro está que já começa a haver, além de complexidade, certa dose de arbitrariedade e de convencionalismo. A tentativa de recorrer a teorias de ordens ainda mais elevadas geralmente implica um processo infinito, o que, evidentemente, resolve pouca coisa. Portanto, ao invés de recorrer a essa estratégia tipicamente *fundacional*, é, na maior parte das vezes, mais frutífero recorrer ao que se denomina uma estratégia do tipo *hipotético-coerentista*.

É isso que está na base do abandono da atitude dogmática. Ao invés de falarmos em conhecimento como estar de posse da verdade absoluta sobre um campo da realidade, devemos passar a falar em conhecimento como a posse de uma *verdade relativa* ou *condicionada*: condicionada pela existência e pela natureza das justificativas que estão sendo fornecidas.

Simplificadamente, pode-se afirmar que, ao menos no caso do pensamento científico, *o conhecimento é sempre de natureza hipotético-relacional*, pois o que se deve dizer é que *acreditamos* que tais e tais coisas são verdadeiras se *também acreditamos* que outras tantas coisas (as justificativas) são verdadeiras.

Voltemo-nos para o conceito de razão. *Razão* é, ao menos no presente nível, um conceito

um pouco mais fácil de se tratar. Porque *ser racional*, segundo uma acepção técnica, mas bastante ampla, é ser capaz, através da atividade do pensamento, de extrair e de aceitar como verdadeiras as consequências *lógicas* provenientes de um conjunto qualquer de afirmações que se esteja disposto a assumir como sendo (mesmo hipoteticamente) verdadeiras. Nesse caso, verdade e falsidade não são valores epistêmicos de asserções, mas *valores lógicos* de proposições. É tão somente quando estão a serviço de um pensamento sobre a realidade, que os valores lógicos podem se converter em valores epistêmicos.

A razão, portanto, pode ser *definida* como a *faculdade intelectual* humana de produzir pensamento, mas, não quaisquer pensamentos. O *pensamento racional* é o pensamento que funciona a partir de um *instrumento* que determina como se dá o encadeamento argumentativo e lógico (dedutivo ou indutivo), que permite relacionar, entre si, as proposições de um sistema, de uma maneira não arbitrária. Essa não arbitrariedade está comprometida com certos princípios básicos, como são, por exemplo, os princípios da identidade, da não contradição e do terceiro excluído, típicos da maioria das teorias lógicas. Tais princípios garantem, entre outras coisas, que a razão nunca extrairá uma proposição falsa de uma proposição com valor lógico de verdade, nem, tampouco, uma proposição verdadeira de uma proposição com valor lógico de falsidade.

Porém, é preciso estar alerta para o fato de que existem outras lógicas, que funcionam com base em outros princípios, e isso implica mudanças na estrutura de funcionamento da razão. A lógica incorporada às ciências modernas é uma lógica tradicional, mais especificamente, aquela que foi originalmente desenvolvida para fundamentar a matemática. Não é por menos que os cientistas não se preocupam muito com lógica, já que, ao assumir as estruturas matemáticas no corpo das teorias, a lógica da matemática é implicitamente, também, assumida. Contudo, é fundamental que os cientistas compreendam que essa foi uma escolha, e que essa escolha é parte do padrão de racionalidade que fundamenta a ciência.

Portanto, a razão não é, *per se*, um instrumento que está a serviço exclusivo de nenhuma ciência, escola, doutrina, filosofia, religião ou o que quer que seja. A razão é um instrumento disponível e pouco utilizado, diga-se, de passagem para todos os indivíduos que desejam *pensar consistentemente* a respeito de qualquer coisa, o que requer, entre outras coisas, também a capacidade de articular e de expressar o pensamento em termos de uma *linguagem* seja ela natural (línguas vernáculas) ou artificial (científicas ou formais).

No que se segue, contudo, é muito importante *não confundir os conceitos de razão e de racionalidade*. O que eu chamo de racionalidade é algo mais restrito, que incorpora a razão no seio de um determinado tipo de pensamento filosófico. Isso implica a apropriação da razão por um conjunto de crenças de naturezas metafísica, epistemológica, ética, estética, etc. Como veremos, tanto o pensamento científico quanto o pensamento religioso podem ser racionais, embora suas racionalidades sejam completamente diferentes.

III. CRENÇA E RAZÃO DENTRO DA CIÊNCIA

Em qualquer teoria científica, existem proposições basilares, chamadas de postulados (ou axiomas). Costuma-se dizer que a verdade dos postulados é *assumida*.

No passado, axiomas eram proposições julgadas autoevidentes. Ou seja, por recurso

a algum tipo de intuição intelectual, aceitava-se que algumas asserções não podiam não ser verdadeiras. Porém, esse entendimento já está, em larga medida, ultrapassado, pelo menos, dentro da ciência e de grande parte da filosofia. E isso é parte do advento de uma *racionalidade contemporânea*. Atualmente, os postulados são aceitos apenas como *verdades provisórias*. E, mais importante ainda, eles só podem ser compreendidos como *verdades relativas*, ou seja, verdades que estão *condicionadas* por outros elementos. Portanto, os postulados de uma teoria científica são, em termos de uma denominação mais apropriada, *hipóteses*.

Se um *sistema teórico*, que se baseia em determinados postulados hipotéticos, permite a construção de *explicações sobre os fatos do mundo* e permite que muitos outros *fatos do mundo sejam previstos*, então ele é considerado *bem-sucedido*.

Porém, isso requer que se estabeleça, de antemão, um conjunto de *critérios* (lógicos, metafísicos, epistemológicos e metodológicos) que permitam decidir uma série de coisas. Primeiramente, determinar o que é um *fato do mundo*. Em seguida, definir o que deve ou não ser aceito como sendo *explicações* e *previsões*. Em seguida, ser capaz de discernir se as explicações fornecidas são boas e pertinentes, com base em critérios previamente estabelecidos. Por fim, determinar como e quando as previsões são alcançadas e com que grau de confiança, também com base em critérios previamente estabelecidos.

Se esse sistema teórico é considerado bem-sucedido, *de acordo com os critérios que foram impostos por ele mesmo, então ele é, geralmente, mantido, até que um sistema melhor apareça. A ciência e o conhecimento são, portanto, sempre condicionados, hipotéticos e, principalmente, provisórios.*

Em muitos casos, os postulados dos sistemas teóricos têm que, necessariamente, ser aceitos, ainda que provisoriamente, quase como se fossem artigo de fé. Isso porque nem sempre as teorias estão maduras o suficiente para produzirem as justificativas necessárias para as suas premissas com a força devida para alcançar o estatuto que convencionamos chamar de conhecimento.

Por outro lado, quando os sistemas teóricos resistem ao teste do tempo, eles se tornam cada vez mais fortes e o grau de fé que os cientistas neles depositam vai diminuindo. Esse estágio maduro é o que se convencionou, como já disse, chamar de *conhecimento científico*. Contudo, como o conhecimento absoluto não pode jamais ser alcançado, então, sempre será necessário que os cientistas *acreditem* nos seus postulados. Em estágios maduros de desenvolvimento de um sistema teórico, o que se passa a ter são *crenças qualificadas*, pois, agora, trata-se de crenças consideradas *suficientemente justificadas*.

Infelizmente, também há casos de crença cega (fé) que aparecem e persistem, dentro da própria comunidade científica, pois alguns cientistas podem se apegar a sistemas teóricos pouco sólidos ou já suficientemente ultrapassados, como se fossem a expressão de verdades definitivas sobre a realidade. Na maioria das vezes, o que ocorre é que esses cientistas falham em reconhecer o caráter hipotético e provisório do conhecimento, e isso viola os padrões do que entendemos como a *racionalidade científica contemporânea*.

Casos mais graves ocorrem quando cientistas querem introduzir, dentro de seus sistemas teóricos, elementos de outras naturezas (religiosos, políticos, éticos, etc.), mas que não cumprem qualquer papel relevante ou, pior, podem promover contradições. Nesse caso, é a própria razão, enquanto salvaguarda da consistência lógica, que é violada.

Outros casos envolvem a adesão acrítica e/ou extemporânea a algum tipo de ideia cujo princípio filosófico seja questionável. Um exemplo disso é o fetiche de certos cientistas em torno da noção de *observável*. Dessa ideia extraem, sem nenhuma fundamentação, como ato de pura fé, o princípio geral de que *o real é o observável*. Nesse caso, esses cientistas não se dão conta de que suas próprias teorias envolvem grande número de conceitos que se quer que sejam reais, mas não são observáveis. Ainda pior, tais cientistas não se dão conta de que a redução do real ao observável é equivalente à redução da física à psicologia, já que todo resultado de um processo de observação não é mais do que um ato cognitivo de percepção do próprio cientista.

Cabe à própria comunidade estabelecer a crítica e o debate que busquem minimizar o número desses casos.

Por seu turno, já deve estar claro que a razão, dentro da ciência, opera através de um *instrumento lógico* que permite a articulação das proposições dentro do sistema teórico, de tal modo que se pode, além de produzir explicações, fazer previsões bem-sucedidas sobre comportamentos futuros.

A razão, entendida dessa forma, é o *meio* pelo qual se aumenta a força da crença no sistema original de axiomas, pois ela produz proposições em geral, passíveis de algum tipo de controle e julgamento que podem fornecer as justificativas necessárias para se dar crédito ao sistema. E isso não é assim tão somente na física, na biologia e na química, mas também nas ciências sociais, como a economia, a sociologia e a história.

IV. CRENÇA E RAZÃO DENTRO DA RELIGIÃO

Tudo o que foi exposto a respeito de crença e de razão, no interior do pensamento científico, poderia ser repetido com mínimas alterações, no caso do pensamento religioso. Nele, comparece o conceito de crença agora, de modo familiar à interpretação do senso comum, mas também há espaço para a razão enquanto instrumento, pois, sejam quais forem eles, uma vez que se *aceite os princípios basilares que fundamentam um sistema de pensamento religioso*, é possível todo um universo de articulação racional. (*Entretanto, observe-se o que será dito mais abaixo, com relação às dimensões mística e afetiva das religiões.*)

Observe-se que a religião também é, como a ciência, uma forma de compreensão e de explicação da realidade. Uma crítica estrutural que pode ser movida contra a religião não é que ela seja, necessariamente, um empreendimento irracional, mas que os seus princípios basilares podem ser, eventualmente, frágeis e, por isso, pouco convincentes e questionáveis.

Porém, a verdadeira crítica filosófica que pode ser movida contra o pensamento religioso, em geral, é de outra natureza. De fato, do ponto de vista do pensamento científico e filosófico, o grande problema é que o pensamento religioso jamais se desligou da antiga concepção dogmática de conhecimento. Ou seja: *o pensamento religioso jamais aceitou as mudanças que a contemporaneidade produziu nos padrões até então vigentes de racionalidade.*

V. PRIMEIRA CONCLUSÃO: A RAZÃO NÃO SE COLOCA CONTRA A CRENÇA (EM GERAL) MAS, SIM CONTRA A FÉ

No que se refere às relações entre crença e razão, portanto, pode-se concluir que, além de serem termos de *categorias distintas* ou seja, não são pares conceituais opostos, pois articulam coisas completamente diferentes, dentro de qualquer campo, o objetivo da empreitada *racional* é sempre construir justificativas para diminuir ao máximo a *fé* com relação às proposições basilares do sistema. Portanto, *a razão não luta contra a crença, mas sim contra a crença cega.*

Embora seja algo relativamente desconhecido (ou ignorado), no seio da comunidade científica, em muitas épocas da história do pensamento, os pensadores religiosos também tiveram preocupações desse tipo. Também eles buscaram produzir um pensamento racional que permitisse diminuir o grau de fé nas proposições aceitas como verdadeiras geralmente, aquelas oriundas de seus textos religiosos. São particularmente famosas, por exemplo, as muitas provas ontológicas que foram (continuam a ser) produzidas com relação à existência de Deus. E essas provas, convincentes ou não, não são, necessariamente, irracionais.

A ideia aqui, portanto, não é denegrir o pensamento religioso, mas mostrar que, por razões de estrutura, *o pensamento religioso é irreconciliável com o pensamento científico.* E isso se deve ao fato de que a ciência moderna, no seu processo de evolução e desvinculação do tronco geral da filosofia, *mudou o padrão antigamente aceito de racionalidade.*

A título de exemplo das diferenças que se pode encontrar nos *padrões de racionalidade*, vejamos o caso do contraste entre uma teoria científica madura, na biologia, e uma alternativa rival, produzida no âmbito do pensamento religioso: o neodarwinismo e o *design inteligente.*

O neodarwinismo, do século XX, suplementou a teoria de variação e seleção naturais do darwinismo clássico com os mecanismos de mutação e hereditariedade da genética moderna. Essa teoria é considerada robusta e verdadeira, do ponto de vista científico, pois, além de produzir explicações sobre os fatos do passado, também faz previsões bem-sucedidas e é amplamente utilizada e corroborada em áreas tais como o selecionamento genético de espécies domesticadas, em laboratórios do mundo inteiro, ou o rastreamento das taxas de mutação e de adaptação de vírus, como os da AIDS.

O sistema teórico correlato, que foi produzido pelo pensamento religioso, é o *design inteligente.* Ele, na verdade, foi produzido para se adequar aos mesmos fatos básicos constitutivos do neodarwinismo biológico, porém, com uma diferença crucial. É essa diferença que torna o *design inteligente* cientificamente ruim (e até pernicioso). Porém, ele não é ruim porque é irracional. Não há, essencialmente, nada de contraditório com essa forma de pensamento. Ele é ruim porque viola os padrões contemporâneos de racionalidade científica.

Os indivíduos que defendem esse sistema procuram introduzir, à força, dentro da biologia, a ideia de um processo evolutivo que seja guiado por uma inteligência externa ao sistema, de modo a conferir-lhe um propósito.

Porém, os defensores de ideias como essas raramente se dão conta de que a *essência* de um processo evolutivo darwiniano é que ele *não pode ser guiado externamente.* Quando nós, humanos, nos consideramos as inteligências externas que guiam, por exemplo, um processo evolutivo de domesticação de uma espécie selvagem, o fato é que nós estamos,

sim, dentro do sistema, pois o processo também *nos* afeta e tem implicações para a *nossa* própria evolução. Porém, a inteligência externa para o processo que é vislumbrado pelo design inteligente não participa do processo.

Toda inteligência externa, na verdade, *viola as regras do jogo, sem, contudo, ser submetido a regra alguma, de modo que sequer é possível dizer como são as regras da própria violação*. E violar as regras do jogo, dessa forma, é um péssimo indicativo para uma teoria científica, como a compreendemos modernamente, porque viola um padrão de racionalidade. De fato, nenhuma teoria científica moderna pode permitir que um *deus ex machina* seja introduzido, porque ele, simplesmente, destrói a própria teoria.

Voltemos à razão. Como já dito, acreditamos, modernamente, que eliminar completamente as incertezas do conhecimento é, virtualmente, impossível. Portanto, a razão pode nos levar bastante longe, no sentido de diminuir o grau de crença injustificada, mas não será jamais capaz de dar subsídios para ir além de certos patamares. E isso significa que *a razão não é jamais capaz de eliminar a crença. E devemos entender, definitivamente, que esse não é o seu propósito*.

Muito pelo contrário, a razão pode (e deve) ser operada no sentido de fortalecer a posição de determinados sistemas teóricos maduros contra os ataques provenientes de sistemas menos maduros ou debilmente construídos, e, nesse sentido, é correto dizer *que o mais alto propósito da razão não é lutar contra a crença, mas, a favor de certas crenças*.

VI. CIÊNCIA VERSUS RELIGIÃO

Vou direcionar a discussão, agora, para iluminar mais especificamente o problema da conciliação entre ciência e religião. De acordo com o meu ponto de vista, seja o pensamento científico, seja o pensamento religioso, ambos são criações da mente humana e compartilham da mesma característica estrutural de poderem ser interpretadas como sistemas de conceitos e de proposições a respeito de uma determinada *realidade*. Ou seja, são construções teóricas sobre um mundo constituído por um certo conjunto de entes, de suas propriedades e das relações que podem guardar entre si. *A partir daqui, entretanto, ciência e religião já não se podem ser conciliadas com relação a mais nada*.

A primeira coisa que precisa ser entendida é que *sistemas de pensamento religiosos não são apropriados para discutir questões factuais e nem foram construídos exatamente para tais fins*. Isso é patente, porque, embora os textos religiosos quase sempre contenham muitos elementos factuais, jamais alguém fez qualquer uso prático bem-sucedido (técnico ou científico) de qualquer coisa expressa em qualquer texto religioso salvo, quem sabe, exceções esporádicas e fragmentárias, de pouco valor no que diz respeito à história da própria ciência.

Já vimos que, no que se refere à crença e à razão, não é exatamente com respeito ao seu *monopólio* que ciência e religião diferem. Enquanto formas de entendimento da realidade, *ciência e religião diferem, radicalmente, com relação a aspectos estruturais que são constitutivos de seus fundamentos metafísicos e metodológicos, ou seja, nos seus padrões de racionalidade*. Mais adiante, eu voltarei a discutir o problema metafísico.

No que diz respeito ao problema metodológico, ciência e religião diferem, estruturalmente, *com respeito a até onde estão dispostas a ir e a que métodos estão dispostas a utilizar para justificar os elementos basilares de suas crenças*. Aqui, ocorrem os seguintes fenômenos os quais,

aliás, possuem amplo respaldo histórico.

A religião, em virtude de sua estrutura, *deve*: (i) impor limites quanto à profundidade das justificativas e *deve* (ii) procurar relaxar ao máximo o rigor de seus métodos, pois é um sistema que opera no sentido estrito da sua autoconservação. A ciência, por seu turno, também em virtude de sua estrutura, *não deve*: (i) impor nenhuma limitação à profundidade das justificativas; mas *deve* (ii) selecionar criteriosamente os seus métodos, pois é um sistema que opera no sentido de sua superação.

O que quero deixar claro, portanto, é que essas diferenças decorrem de suas próprias naturezas, e isso não poderia ser de outra forma, pois *ciência e religião, muito embora sejam formas de pensamento sobre o real, são empreendimentos que não apenas não compartilham os mesmos padrões de racionalidade, mas, principalmente, visam alcançar objetivos muitíssimo diversos.*

Definir a empreitada religiosa não é coisa simples, principalmente porque toda religião é um amálgama que opera em estratos diversos. Cada sistema específico de crenças religiosas apresenta uma particular ponderação de aspectos históricos, culturais, políticos, sociais, éticos, factuais, ontológicos e aqui vem o que considero ser o elemento principal *afetivos*.

Daí a força das mitologias e das cosmogonias ancestrais. As religiões são, em geral, institutos que tem o poder de plasmar todo o caráter de uma comunidade ou mesmo, de todo um povo ou de uma civilização, porque seu apelo é o de um *vínculo emocional*: um vínculo que efetivamente orienta e dá sentido à existência, tanto coletiva, quanto individual.

Nada pode ser mais distante da empreitada científica, como a concebemos. A ciência não tem exatamente o que se denomina de *pathos* não está associada, fundamentalmente, a nenhuma afetividade e, por isso mesmo, não está preparada para instaurar o que se denomina de *ethos* ou seja, não está projetada para guiar existencialmente.

(A propósito, a ciência até pode ser utilizada, por exemplo, para o exercício do poder, mas isso pouco tem a ver com alguma similitude estrutural com relação à religião, pois trata-se de sua apropriação, como instrumento, por elementos que lhe são externos.)

No que diz respeito aos aspectos especificamente epistemológicos, portanto, o pensamento religioso está mais próximo dos *padrões de racionalidade* dos sistemas filosóficos que eram construídos até, aproximadamente, a metade do século XIX. Entretanto, mesmo na filosofia, a perspectiva *dogmática* foi abandonada é por isso que, hoje, a maior parte dos filósofos não se dedica à construção de grandes sistemas filosóficos, preferindo dedicar-se à análise e ao pensamento crítico.

Porém, a perspectiva *dogmática* não foi abandonada nas religiões, porque, por sua própria natureza, elas não têm essa flexibilidade e, volto a repetir, não foram engendradas para serem flexíveis, nesse sentido.

A ciência, por outro lado, é o que ao menos nós, cientistas consideramos ser a nossa maior criação, mas em um sentido completamente diverso do religioso e, eu diria, em um sentido quase *estético*. Com ela, construímos sistemas hipotéticos para especular sobre aqueles mecanismos que, presumivelmente, operam no mundo produzindo toda a gama possível de *fenômenos* (físicos, biológicos, sociais, históricos, etc.) ou seja, aquelas coisas que gostamos de chamar de *observáveis*, mas que, de fato, exigimos que sejam muito mais: que sejam *publicamente observáveis* e *intersubjetivamente comunicáveis*. E isso é parte inextricável do padrão de racionalidade científico.

Porém, mais do que apenas isso e a despeito da evolução nos padrões de racionalidade,

jamais podemos esquecer que *a ciência também é uma tradição e que possui uma história que a define*. Uma imagem poética que gosto de associar com a ciência é a de um grande recife de corais. Sua superfície é viva, mutável, colorida, diversa, perigosa e periclitante: ambiente de lutas e de adaptações que não apenas se dedicam a dar continuidade à sua própria sobrevivência, mas também produzem, inadvertidamente, beleza. Mas essa superfície só é viva e pode continuar a sobreviver porque se apoia sobre os *restos de si mesma*: o substrato fossilizado que, embora morto e cinzento, é *sólido*.

De todo modo, tais sistemas científicos não são estritamente apropriados para discutir nenhuma questão de natureza religiosa ou mesmo, filosófica, muito embora, nesse caso, eles possam fornecer muitos subsídios para o pensamento. Há, inclusive, um nome para a tentativa de cientificizar campos como a ética ou a estética, por exemplo. Chama-se *falácia naturalista*.

Por exemplo, se uma teoria biológica, como o neodarwinismo, se dispuser a *explicar* algo *contingente* a respeito do comportamento humano, do ponto de vista *factual* por exemplo, sobre as razões evolutivas que conduziram ao desenvolvimento da cooperação entre indivíduos, na espécie humana, não há problemas.

Porém, se se propuser a *valorar* o comportamento humano, do ponto de vista de uma *necessidade normativa* e, portanto, *contrafactual* ou seja, se quiser estabelecer o comportamento cooperativo como sendo um *fim, em sentido absoluto*, com valor ético superior ao do comportamento não cooperativo, em virtude exclusiva das condições contingentes que produziram as adaptações que resultaram no surgimento de *nossa* espécie, comete falácia naturalista.

VII. SEGUNDA CONCLUSÃO: CIÊNCIA E RELIGIÃO SÃO, EM GERAL, IRRECONCILIÁVEIS

De tudo o que foi dito, fica claro que ciência e religião, em larga medida, não colidem, e não exatamente porque possam concordar entre si, mas exatamente porque pouco ou nada têm em comum, salvo o fato de serem sistemas conceituais que nós mesmos criamos. Religião e Ciência são ambos *produtos culturais* humanos, mas que foram construídos para tratar de questões distintas, cujas respostas pretendem alcançar finalidades distintas e que se conduzem segundo padrões de racionalidade essencialmente distintos.

Por isso, quando, por exemplo, um cientista tenta forçar a ciência a se opor à religião ou quando um religioso tenta forçar a religião a se conciliar com a ciência, ambos, em geral, erram, ainda que, obviamente, por motivos distintos. Aliás, erram duas vezes, pois além de ambos desrespeitarem a natureza própria da ciência, também desrespeitam a natureza própria da religião, em particular, nas suas dimensões mística e afetiva.

Em particular, todas as vezes que os pensadores religiosos tentam fazer algum tipo de conciliação entre o pensamento religioso e o pensamento científico, o resultado são *deformações* profundas na natureza da ciência muitas vezes realizadas de forma também altamente desonesta. Esse é, por exemplo, o tipo de deformação que faz o chamado design inteligente, na biologia.

Por outro lado, as cruzadas antirreligiosas movidas por alguns cientistas (ateus ou não) carecem, muitas vezes, de sentido, pois, geralmente, erram o ponto: cientistas que não são

religiosos raramente compreendem ou aceitam *que a religião, muito embora não compartilhe dos mesmos padrões de racionalidade da ciência, não é um empreendimento necessariamente irracional e pode ser um instrumento tão legítimo quanto qualquer outro para indivíduos estruturarem suas vivências e suas existências* e a ciência tem relativamente pouco a dizer sobre isso.

VIII. O PROBLEMA METAFÍSICO: A TENTATIVA DE COMPATIBILIZAR CIÊNCIA E RELIGIÃO CONDUZ, VIA DE REGRA, À DESTRUIÇÃO DE PELO MENOS UMA DELAS

Portanto, já concluímos que, ainda que Ciência e Religião não cheguem propriamente a colidir entre si, isso não quer dizer que elas possam ser compatibilizadas. E isso acontece também por uma razão que tanto cientistas, quanto religiosos, muitas vezes, ignoram. Talvez, para muito além de não compartilharem dos mesmos padrões metodológicos, o maior obstáculo para que uma conciliação pudesse ser alcançada são as radicais diferenças que podem ser encontradas nos seus respectivos *fundamentos metafísicos*.

Diga-se, de passagem, que uma parte considerável dos cientistas senão a sua grande maioria desconhece ou despreza esse assunto. Porém, isso é apenas expressão de ignorância e de preconceitos herdados de uma etapa já ultrapassada da história do pensamento, melhor representada pelo empirismo lógico, que prosperou no início do século XX e influenciou sobremaneira o pensamento dos cientistas que construíram a mecânica quântica.

Embora muitos cientistas e alguns filósofos da ciência tenham se esforçado por eliminar a metafísica da base da ciência, essas tentativas nunca foram bem-sucedidas. E, por outro lado, muitos filósofos da ciência e alguns cientistas acreditam que isso sequer deva ser tentado, pois, para estes, a ciência é tal que necessita de uma base metafísica, ou ela não poderá jamais aspirar a ser uma teoria sobre a *realidade*: ou seja, uma teoria sobre uma instância que é independente dos próprios sujeitos que a pensam e teorizam sobre ela.

Quando falamos de base metafísica, o que queremos dizer é que tanto sistemas religiosos, quanto científicos, devem assumir ainda que hipoteticamente, no caso da ciência contemporânea a *existência de fato* não apenas de um certo conjunto de objetos, no mundo, mas, também, de uma estrutura hierárquica entre esses objetos ainda que seja o caso de não sabermos, a princípio, exatamente quais objetos são esses e qual a estrutura que os relaciona. Dizemos, assim, que a *base metafísica pressupõe não apenas a existência independente da realidade, mas também que ela possui uma estrutura independente (ainda que desconhecida), que nossas teorias procuram descobrir e descrever, ainda que de modo parcial*.

Dessa forma, *o compromisso metafísico básico é sempre um compromisso realista*, pois parte do pressuposto de que a estrutura da *realidade* existe e existiria, ainda que não houvesse um só ser humano para pensá-la. E esse é, precisamente, o *pressuposto ontológico* mais básico não apenas da maioria dos sistemas de pensamento religioso, mas também de todas as ciências.

A propósito, as categorias de objetos assumidos como existentes, bem como as diversas categorias que estabelecem suas múltiplas determinações e a estrutura hierarquizada segundo a qual essas categorias se relacionam entre si é o que se chama de uma *ontologia*. Porém, há muitas ontologias possíveis.

Na metafísica moderna, a maior parte das ontologias se define a partir de algumas categorias tradicionais de objetos e de conceitos: espaço, tempo, entes, propriedades,

relações, modalidades, causalidade, fatos, eventos, estados de coisas, etc. E esse é o tipo de metafísica que serve de base para a ciência moderna.

É nesse ponto que a incompatibilidade entre o pensamento religioso e o pensamento científico se torna verdadeiramente intransponível, pois, o verdadeiro problema está nas bases metafísicas: elas são radicalmente diferentes e as tentativas de torná-las as mesmas geralmente implicam a destruição das naturezas de, pelo menos, um dos sistemas.

Sempre houve muitos casos, ao largo de toda a história, de tentativas de se fazer aproximações entre as bases metafísicas de algum pensamento religioso e de algumas teorias científicas. E, *a priori*, isso até não parece ser completamente impossível, pelo menos não quando se reconhece a existência de muitos outros exemplos correlatos, ao longo da história, advindos da própria história da filosofia.

De fato, muitos elementos metafísicos pertencentes a *filosofias antigas* foram compartilhados e, posteriormente, completamente absorvidos por teorias científicas modernas. O problema é que isso nunca aconteceu sem alguma modificação de um dos sistemas e, a depender do caso, essas modificações podem conduzir a destruições. Os exemplos mais patentes que tenho em mente são as ontologias que fundamentavam o sistema aristotélico e o atomismo democritiano, cujos elementos foram, respectivamente, incorporados às mecânicas cartesiana e newtoniana, pelo menos em alguma medida.

No caso da mecânica newtoniana, as modificações na ontologia democritiana foram mínimas. Porém, essa ontologia era simples o suficiente para que grandes modificações não fossem necessárias. Contudo, no caso da ontologia aristotélica, que era um sistema muito sofisticado, a mecânica cartesiana simplesmente a destruiu, mantendo, dela, apenas alguns elementos estruturais, porém, profundamente redefinidos e ressignificados.

Vejam, agora, qual é o problema fundamental que resulta nas tentativas de compatibilizar ciência e religião. São dois os problemas principais. O primeiro problema se refere à forma. O segundo problema se refere ao *conteúdo*.

No que tange ao problema da forma, em geral, *as metafísicas que estão na base das teorias científicas têm rigidez e rigor (definicional e operacional) muito elevados*. Na física, esses elementos metafísicos sempre se apresentam representados (e, por vezes, escondidos) por estruturas matemáticas. Por outro lado, *as metafísicas dos sistemas religiosos são muito mais vagas e fluidas*. Na maior parte das vezes, muitas das categorias que compõem a sua ontologia não estão sequer bem definidas. Desse modo, a própria ontologia não é rigidamente estabelecida.

O problema do conteúdo é, contudo, o mais sério, e ele também vem sendo tratado no âmbito da filosofia há muitos séculos. Trata-se do problema de como articular a noção de espírito, entendido como sendo *um ente capaz de pensar, de ter vontade livre e de produzir juízos de natureza ética e estética*. Não nos assustemos com o termo espírito, que pode, sem quase nenhum prejuízo, ser trocado ao menos, no presente contexto pelo termo *mente*. Nesse caso, há um fosso intransponível entre ciência e religião, porque, enquanto o pensamento científico é, com respeito a isso, *monista*; o pensamento religioso é sempre *dualista*.

O pensamento científico, conforme o compreendemos, é incapaz de articular a mente sem, necessariamente, reduzi-la a categorias físicas, consideradas mais fundamentais. Um exemplo de como isso pode ser feito é conceber a mente como a atividade de processamento cognitivo realizada no cérebro. Portanto, reduzindo a mente a categorias neurofisiológicas. Daí o *monismo physicalista*, pois a mente é uma entidade que só pode ser concebida como fenô-

meno ou, no máximo, como uma *ordem emergente*, mas sempre ontologicamente *dependente* das estruturas físicas.

A metafísica do pensamento religioso, por outro lado, é, via de regra, *dualista*. Isso significa que a sua metafísica contém categorias físicas, mas sempre contém *a mente como uma entidade independente e irredutível a qualquer tipo de estrutura física*. Isso é essencial, dentro do pensamento religioso, para garantir, entre outras coisas, alguns princípios caros, tais como a *sobrevivência da mente*, independentemente do corpo; *a independência da mente* com relação ao corpo e, no que se refere à liberdade da vontade, *o comando do corpo fisiológico pela mente*. Vale dizer que não há nada de errado ou irracional, com relação a essas ideias.

Como é fácil de perceber, o pensamento científico resolve o problema da mente, de certa forma, eliminando-o. Porém, o pensamento religioso não o resolve e, pior, em geral, não tenta resolvê-lo, quase sempre sustentando a existência das duas categorias, sem nunca explicar exatamente como elas podem conviver e atuar uma sobre a outra e sem se preocupar com as muitas contradições que podem ser geradas. Ou seja, sustentam a concepção dualista como *um ato de fé*.

Vale ressaltar que, dentro do pensamento filosófico, esse problema tampouco foi solucionado, mas ambas as atitudes, seja a científica, seja a religiosa, são consideradas inadequadas. O pensamento filosófico considera a eliminação da mente, pela ciência, uma solução *simplória* que, em alguns casos extremos, pode ser considerada também *um ato de fé*; enquanto considera a sustentação da mente independente da matéria, sem nenhuma teorização adequada, uma atitude dogmática *inaceitável*.

Há, portanto, diferenças estruturais entre ciência e religião que vão muito além das suas diferenças metodológicas. Assim, do que foi exposto, conclui-se que o que se espera que aconteça, em uma tentativa de compatibilização entre sistemas de pensamento religiosos e científicos, é uma das duas situações seguintes. Ou a estrutura metafísica das teorias científicas é tornada demasiado vaga e/ou inconsistente, e *a própria teoria científica é desvirtuada*, em sua natureza; ou, então, a estrutura metafísica dos sistemas religiosos é tornada demasiado rígida e/ou simplificada, e *o próprio sistema religioso é que é desvirtuado*, em sua natureza.

IX. UMA REFLEXÃO BREVE (E AINDA MAIS) PESSOAL A RESPEITO DE RELIGIÕES

O tema principal das presentes reflexões a incompatibilidade estrutural entre o pensamento religioso e o pensamento científico já foi suficientemente esgotado, nos termos elementares em que me propus.

No que se segue, quero passar a refletir sobre alguns outros aspectos relacionados com as religiões em particular, contrastando-a mais especificamente com o pensamento filosófico, propriamente dito. As opiniões, contudo, tendem agora a ser mais pessoais.

É bastante óbvio que estudiosos isentos de fenômenos culturais não podem julgar se uma religião, enquanto pensamento, é *melhor* do que outra, pois, não há qualquer conjunto de critérios com base no qual isso pudesse ser feito. Afinal, do ponto de vista de suas estruturas narrativas, dão conta de situações históricas e culturais completamente diversas.

Mas, vou me dar a oportunidade de fazer um julgamento de outra natureza: um julgamento ético, não do pensamento religioso, *per se*, mas, sim, da prática de alguns religiosos. O objetivo é *criticar duramente certas tentativas de contrafação e de fraude* que,

sobretudo a partir do final do século XIX, proliferaram dentro de muitas religiões e seitas religiosas. Temos visto, ainda hoje, tentativas desse tipo serem conduzidas. Tais tentativas sempre têm a ver com a apropriação indevida do discurso e dos conceitos científicos para, pretensamente, justificar crenças de natureza religiosa.

Aliás, para mim, é sempre muito surpreendente que que tais tentativas sejam realizadas, pois, além de fadadas ao fracasso, são uma admissão quase explícita da falta de real compromisso desses indivíduos com as bases do seu próprio pensamento religioso. Felizmente, há também muitos pensadores religiosos que se dão conta perfeitamente desse fato e também se manifestam contrariamente a qualquer movimento desse tipo.

Essas contrafações são, em geral, realizadas por indivíduos que possuem algum grau de familiaridade com o conhecimento científico e, não raramente, vem acompanhadas por um discurso que apresenta também algum grau de sofisticação. Porém, por mais sofisticados que sejam os discursos e engenhosos que sejam os artifícios, não vejo como possam escapar dos argumentos que desenvolvi, acima. Na esmagadora maioria das vezes, essas tentativas são feitas no interior das grandes religiões monoteístas ou de correntes de pensamento místico e religioso de cunho espiritualista.

Nesse sentido, em minha opinião pessoal, acho muito mais belas e dignas de interesse precisamente as religiões consideradas mais *primitivas* no sentido de semelhantes ao ancestral e mais *puras* no sentido de menos sofisticadas intelectualmente.

Nelas, é possível sentir a *honestidade da admissão da relação mística*, sem pejo e sem necessidade de apelar para quaisquer justificativas que se utilizem de quaisquer instrumentos externos, sobretudo aqueles que condizem com a racionalidade científica moderna. Nesse sentido, para mim, *uma religião é tanto mais bela e honesta, quanto mais fundamentalmente for irracional*.

Para apreciar essa beleza o que envolve, fundamentalmente, também uma atitude de respeito é necessário despir-se de preconceções valorativas a respeito dos muitos padrões de racionalidade que se sucederam e convivem, na história do pensamento, ainda que nós, filósofos e/ou cientistas, jamais queiramos abrir mão de nossos próprios padrões.

X. UMA CONCLUSÃO (AGORA SIM) RADICAL

Sistemas religiosos são parte da cultura e da história dos povos, e como *tais* devem ser respeitadas e consideradas. Porém, é bastante óbvio que, reiteradamente, podem constituir um estorvo para a construção de sociedades mais livres, plurais, democráticas e justas. (Pode-se discutir sua importância relativa, quando considerados outros fatores, como sua atuação no âmbito da assistência social, mas o ponto é que as religiões, na maior parte das vezes, constituem mais parte dos nossos problemas do que de suas soluções.)

Dito de uma forma um pouco simplificada, mas não menos realística, parcelas substanciais da sociedade e dos governos de todos os países do mundo são presas diuturnas das tentativas de encarceramento mental impostas pelos adeptos de certas religiões e pela autoridade que seus sacerdotes estendem para muito além do âmbito das práticas exclusivamente religiosas. Toda a sociedade é vítima frequente da terrível interferência e dos grandes males que produzem esses indivíduos que, em geral, têm pensamento retrógrado e limitado, e se utilizam da religião, na maioria das vezes, apenas para impor a todos os demais seus

próprios padrões de conduta e de pensamento.

Infelizmente, há muitas ideias que foram apresentadas, mas não puderam ser suficientemente desenvolvidas, em todas as suas nuances, e muitas ideias que também tiveram que ficar de fora desse breve ensaio. Porém, de tudo o que foi discutido, facilmente depreende-se que eu considero a racionalidade científica moderna como superior. Seus métodos, sua lógica e sua metafísica são instrumentos mais afiados e poderosos para investigar e compreender a realidade. No fim, a racionalidade religiosa, pelo seu dogmatismo, acaba por ser um beco sem saída. Segundo o meu entendimento, a racionalidade científica é mais rica, mais poderosa e, no fim, mais bela do que a racionalidade religiosa, porque tem condições de avançar. Contanto que, ela também, não recaia em dogmatismos. Para tanto, é fundamental que não se perca de vista a visão filosófica. O empreendimento científico ainda possui muitas limitações, as quais só podem ser detectadas, analisadas e criticadas quando se coloca a ciência sob o escopo mais amplo do pensamento filosófico.

Esse ensaio é dedicado aos estudantes. Portanto, à guisa de conclusão, como professor e educador, quero expressar-me da seguinte forma.

Se algum jovem estudante me pedisse conselhos a respeito de religião e de sua relação com ciência, eu, lhe diria algo assim: *antes de mais nada, não aceite a autoridade absoluta de quem quer que seja sobre o seu pensamento, nem mesmo a minha. Porém, jamais esqueça que nenhum ser humano constrói seu entendimento a partir do nada e independentemente da comunidade dos outros seres humanos. E, que a única verdade aparentemente absoluta que já alcançamos é que tudo que nasce, morre, inclusive as nossas mais caras certezas... Por ora, o melhor seria que você esquecesse um pouco as preocupações com respeito à religião e iniciasse uma investigação sobre a realidade, sobre a natureza e sobre a história. Que estudasse o acervo intelectual da humanidade e pensasse criticamente sobre ele, evitando, tanto quanto possível, preconceitos de qualquer natureza e adotando uma atitude sempre cética, mas, também sempre positiva, propositiva, corajosa e otimista. E principalmente, uma atitude honesta e humilde, disposto sempre a corrigir seus próprios erros. Que serão muitos... E se, depois de alguns anos, você ainda acharse, necessário, aí sim, voltaríamos a discutir o assunto. De todo modo, saiba que conviver com a incerteza e a provisoriedade do conhecimento não será tarefa fácil... A verdadeira liberdade tem seu preço.*

REFERÊNCIAS

- ABRANTES, P. *Imagens de Natureza, Imagens de Ciência*. Papirus, 2ª ed. revista e ampliada, Rio de Janeiro: editora UERJ, 2016.
- ARENDT, H. *A Vida do Espírito: o Pensar, o Querer e o Julgar*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2000.
- ARISTÓTELES. *Metaphysics*. Sachs, J. (trad.). Oxford University Press, 2008.
- BARBOSA, P. V., POLITO, A. M. M., OLAVO, L. S. F. Espaço, Tempo e realidade: um estudo comparativo entre três concepções de mundo. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 31, n. 3: p. 571, 2014.
- BATTERMAN, R. (ed.) *The Oxford Handbook of Philosophy of Physics*. Oxford University Press, 2013.
- BIEZUNSKI, M. História da Física Moderna. *Instituto Piaget*, Lisboa, 1993.
- BUCHWALD, J. Z., FOX, R. (eds.) *The Oxford Handbook of The History of Physics*. Oxford University Press, 2013

- BUNGE, M. *Física e Filosofia*. Editora Perspectiva, São Paulo, 2000.
- BURTT, E. A. *As Bases Metafísicas da Ciência Moderna*. Editora UnB, Brasília, 1984.
- CHURCHLAND, P. M. *Matéria e Consciência: uma Introdução Contemporânea à Filosofia da Mente*. São Paulo: ed. UNESP, 1998.
- CUSHING, J. T. *Philosophical Concepts in Physics*. Cambridge University Press, 1998.
- DEWITT, R. *Worldviews: an introduction to the history and philosophy of science*. Wiley-Blackwell, USA, 2010.
- DUTRA, L. H. A. *Introdução à Teoria da Ciência*. Editora da UFSC, Florianópolis, 1998.
- FELDMAN, R. *Epistemology*. Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- GIERE, R. N. *Explaining Science: a cognitive approach*. University of Chicago Press, 1988.
- GODFREY-SMITH, P. *Theory and Reality: an introduction to the philosophy of science*. University of Chicago Press, 2003.
- GRANT, E. *Physical Science in the Middle Ages*. Cambridge University Press, 1977.
- HALL, M. B. *The Scientific Renaissance 1450-1630*. Dover Publications, New York, 1994.
- HANKINS, T. L. *Science and Enlightenment*. Cambridge University Press, 1985.
- HARMAN, P. M. *Energy, Force and Matter, the Conceptual Development of Nineteenth-Century*. Cambridge University Press, 1982.
- HOLTON, G., BRUSH, S. G. *PHYSICS, The Human Adventure: From Copernicus to Einstein and Beyond*. Rutgers University Press, New Brunswick, 2001.
- JAMMER, M. *Concepts of Space: The History of Theory of Spaces in Physics*. Dover, New York, 1993.
- JAMMER, M. *Concepts of Force: A Study in the Foundations of Dynamics*. Dover, New York, 1999.
- JAMMER, M. *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*. Dover, New York, 1997.
- JAMMER, M. *Concepts of Simultaneity: From Antiquity to Einstein and Beyond*. Johns Hopkins U.P., Baltimore, 2006.
- JAMMER, M. *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. American Institute of Physics, New York, 1989.
- KUHN, T. *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press, 1962.
- LINDBERG, D. C. *The Beginnings of Western Science*. University of Chicago Press, 2007.
- LONGAIR, M. S. *Theoretical Concepts in Physics*. Cambridge University Press, 1984.
- LONGAIR, M. S. *Quantum Concepts in Physics*. Cambridge University Press, 2013.
- LOWE, E. J. *A Survey of Metaphysics*. Oxford University Press, 2002.
- LOWE, E. J. *The Four-Category Ontology: A Metaphysical Foundation for Natural Science*. Oxford University Press, 2006.
- LOUX, M. J. *Metaphysics, a contemporary introduction*. Routledge, Nova York, 2002.
- MAUDLIN, T. *Philosophy of Physics: Space and Time*. Princeton University Press, 2012.
- MORTARI, C. A. *Introdução à Lógica*. 2ª ed revista e ampliada. São Paulo: ed. UNESP, 2016.
- NAGEL, T. *Mind and Cosmos: Why the Materialist Neo-Darwinian Conception of Nature is Almost Certainly False*. Oxford University Press, 2012.
- OLAVO, L. S. F. *Panorama do Desenvolvimento Histórico dos Conceitos da Física*, vols. 1 e 2. Não publicado.
- PINKER, S. *Como a Mente Funciona*. 2ª ed. São Paulo: Companhia das Letras, 1999.
- PLANTINGA, A. *Where the Conflict Really Lies: Science, Religion, Naturalism*. Oxford

University Press, 2011.

POLITO, A. M. M. *A Construção da Estrutura Conceitual da Física Clássica*. São Paulo: ed. Livraria da Física, 2016

POLITO, A. M. M., OLAVO, L. S. F. *A Filosofia da Natureza dos Pré-Socráticos*. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 30, n. 2: p. 323-361, 2013.

POLITO, A. M. M. *Galileu, Descartes e uma Breve História do Princípio de Inércia*. *Physicae Organum*, v. 1, n. 1, pag. 1, 2015.

POLITO, A. M. M. *A Metafísica e a Física de Aristóteles*. *Physicae Organum*, v. 1, n. 2, pag. 1 (2015).

POPPER, K. *Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge*. Routledge, London, 1963.

POPPER, K. R. *A Lógica da Pesquisa Científica*. São Paulo: Cultrix, 1993.

PURRINGTON, R. D. *Physics in the Nineteenth Century*. Rutgers University Press, New Jersey, 1997.

REALE, G., ANTISERI, D. *História da Filosofia*, vols.1,2 e 3. Ed. Paulus, São Paulo, 1990.

SCHURTZ, G. *Philosophy of Science A Unified Approach*. Routledge, New York, 2013.

SKLAR, L. *Philosophy of Physics*. Westview Press, Colorado (USA), 1992.

SKLAR, L. *Philosophy and the Foundations of Dynamics*. Cambridge University Press, 2013.

TORRETTI, R. *The Philosophy of Physics*. Cambridge University Press, 1999.

WESTFALL, R. S. *The Construction of Modern Science, Mechanisms and Mechanics*. Cambridge University Press, 1977.



A influência do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itá no microclima da cidade de Concórdia.

The influence of the Itá Hydroelectric Power Plant reservoir on the microclimate of the city of Concórdia

JUCIMAR PERUZZO*¹, FÁBIO LOMBARDO EVANGELISTA^{†1}

¹Instituto Federal Catarinense

Resumo

Neste trabalho estudaremos a influência no microclima da cidade de Concórdia provocada pelo reservatório da Usina Hidrelétrica de Itá. Para isso, serão utilizados os dados de temperatura, umidade relativa do ar e precipitação captados pela Estação de Dados Agrometeorológicos da Embrapa Suínos e Aves, de Concórdia, ao longo de 30 anos. A partir destes dados serão produzidos gráficos dos parâmetros meteorológicos em diferentes períodos de tempo, bem como será realizada uma análise estatística dos mesmos, de modo a verificar se houve alteração no microclima local, antes e após a formação do reservatório.

Palavras-chave: Microclima. Influência de reservatórios. Parâmetros meteorológicos.

Abstract

In this work we will study the influence on the microclimate of the city of Concórdia caused by the reservoir of the Itá Hydroelectric Power Plant. For this purpose, temperature, relative humidity and precipitation data collected by the Agrometeorological Data Station of Embrapa Swine and Poultry will be used over 30 years. From these data, graphs of meteorological parameters will be produced in different periods of time, as well as a statistical analysis of them, in order to verify if there was a change in the local microclimate, before and after the formation of the reservoir.

Keywords: Microclimate. Reservoir influence. Meteorological parameters.

*jucimar.peruzzo@ifc.edu.br

†fabio.evangelista@ifc.edu.br

I. INTRODUÇÃO

O estudo do tempo é tão antigo quanto à curiosidade do homem a respeito do seu meio ambiente. Através da observação do movimento dos astros e dos fenômenos meteorológicos, como o vento, as tempestades, as neves, as enchentes, etc., os povos antigos já faziam previsões do tempo. Define-se o tempo como o estado médio da atmosfera num determinado lugar e período. O clima refere-se às características da atmosfera observadas e medidas num lugar num intervalo de 30 a 35 anos. O clima local é definido por aspectos específicos de um determinado local, como uma cidade, uma floresta, etc. Já o microclima compreende o clima em áreas pequenas, com até 10 km de extensão [1, 2].

Atualmente, a eletricidade possui um papel fundamental para o desenvolvimento das nações e, no Brasil, a hidroeletricidade constitui a sua principal fonte de geração. Em relação aos aspectos ambientais, o alagamento de extensas áreas modifica o balanço de energia Sol-Terra e, conseqüentemente, pode alterar o clima local.

Nas últimas décadas, diversas Usinas Hidrelétricas (UHE) foram construídas ao longo dos principais rios brasileiros, entre elas a UHE de Itá. Esta localiza-se no Rio Uruguai, na divisa dos municípios de Itá (Santa Catarina-SC), e Aratiba (Rio Grande do Sul-RS). Seu reservatório foi formado no ano 2000, possui mais de 80 km de extensão, 141 km² de área inundada e atinge 11 municípios dos dois estados, incluindo Concórdia-SC. A construção da barragem da UHE fez com que o curso do Rio Uruguai, em toda a extensão que banha o município de Concórdia, na divisa com o RS, se transformasse numa grande represa, com uma largura média superior a 500 m. O represamento também provocou o alargamento das margens na parte final dos rios Rancho Grande, Queimados, Jacutinga e Fragosos, que cruzam ou delimitam o município [3, 4].

Apesar de existirem poucos trabalhos publicados sobre o tema, acredita-se que o reservatório de uma UHE possa também modificar o microclima local, como por exemplo, elevar a umidade relativa do ar e intensificar a formação de neblina, além de diminuir a amplitude térmica diária e alterar o índice de chuvas [5]. Alguns trabalhos, como [6], ao analisar certos dados meteorológicos, mostram que a temperatura próxima a um lago situado no meio de uma cidade, por exemplo, fica abaixo do valor em regiões impermeabilizadas (asfalto, calçamento, etc.). A umidade do ar próxima ao lago também foi maior que de outras regiões. Mas será que essas diferenças também estão presentes em regiões mais distantes do lago e tem este como a sua causa?

Os parâmetros climáticos como a temperatura, a umidade e a pressão são definidas pelos atributos físicos que representam as propriedades da atmosfera em um local. Esses elementos se manifestam por meio do vento, da precipitação, através das ondas de frio e calor, entre outros [7]. A temperatura do ar atmosférico varia com o tempo e com o lugar sobre o globo, além de depender da quantidade de radiação solar recebida, do tipo de superfície e de relevo, da natureza dos ventos e da distância a partir de massas de água. Para dois lugares de mesma latitude, porém com altitudes diferentes, a posição mais elevada tem sua temperatura diminuída em média 0,6 °C para cada 100 m de diferença. A variação da temperatura na superfície é menor nos dias com vento do que nos dias calmos [1, 2].

A temperatura de um corpo depende de suas características (constituição e cor) e da quantidade de energia que recebe. Denomina-se albedo a propriedade física dos corpos

caracterizada pela capacidade que eles apresentam de refletir a radiação solar que incide sobre eles, sendo a razão entre a quantidade de radiação refletida e a recebida. Se o albedo for elevado, menos radiação será absorvida pela superfície. Seu valor geralmente é dado em forma percentual e varia de 0 a 100, sendo máxima nos corpos brancos e mínima nos pretos. Como exemplo de albedos temos: solo nu: 7 - 20%; florestas: 3 - 18%, gramados: 15 - 30%; água (altura solar entre 5 e 30°): 6 - 40%, água (altura solar maior que 40°): 2 - 4%, cidades: 14 - 18%, asfalto: 5 - 10% [1, 2].

A quantidade de radiação solar incidente sobre o topo da atmosfera terrestre depende, principalmente do período do ano, da hora do dia e da latitude. Quanto menor a latitude, mais alto estará o Sol e maior será a energia recebida. Além disso, a energia total emitida pelo Sol tem variações entre 1 e 2%, devido à dinâmica interna, cuja periodicidade é de 11 anos [1, 7].

Os grandes reservatórios são importantes fontes para o vapor d'água na atmosfera, a qual, sob condições apropriadas, retorna para a superfície sob a forma de chuva. A umidade descreve a quantidade de vapor d'água contida na atmosfera, e está diretamente ligada ao potencial de condensação e de precipitação. Este vapor d'água se origina da superfície terrestre pela evaporação e transpiração e seu volume na atmosfera varia de 0 nas regiões áridas para até 7%, compondo em média 2% da massa total da atmosfera e 4% do seu volume. A forma de medida da umidade mais usada é a umidade relativa do ar, geralmente dada em forma percentual, sendo definida como a razão entre a quantidade de umidade de uma amostra de ar e a quantidade de umidade que o mesmo volume de ar pode conservar na mesma temperatura e pressão quando saturado [1].

O vapor d'água atua como absorvedor tanto de energia solar quanto da radiação infravermelha terrestre, funcionando como um agente termorregulador, impedindo que a camada de ar junto ao solo se aqueça muito durante o dia e esfrie demais durante a noite [7]. A quantidade de vapor d'água na atmosfera também influencia a taxa de evapotranspiração (perda de água das plantas por transpiração e perda de água do solo por evaporação), determinando o conforto térmico (temperatura sentida pela pele humana) [1].

Devido ao albedo e ao seu calor específico, em média a água absorve 5 vezes mais calor do que o solo, em iguais quantidades, para um igual aumento da temperatura. Consequentemente, a água se aquece e se resfria mais lentamente que o solo. De maneira geral, as variações sazonais da temperatura aumentam com a latitude e com o grau de continentalidade. Elas são menores nas áreas equatoriais e próximas das superfícies hídricas [1, 2].

As alterações causadas no meio ambiente no entorno ou próximo aos reservatórios de UHEs tem sido tema de estudos de diversas pesquisas científicas no Brasil. No entanto, este assunto é difícil de ser analisado por diversos fatores, entre os quais a dificuldade de se encontrar registros de dados meteorológicos locais antes e depois da construção das represas, bem como a simultaneidade de outros fatores ambientais que interferem e também produzem efeitos climáticos [8]. Em grandes reservatórios d'água, as oscilações de temperatura tendem a ser menores que em áreas continentais, além de ter uma maior evaporação, podendo ocasionar uma formação mais intensa de cerração na região.

Neste trabalho queremos investigar a seguinte questão: Qual a influência do reservatório da UHE de Itá no microclima na cidade de Concórdia, mais especificamente no entorno da

Embrapa?

A Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) Suínos e Aves, localizada na Rodovia BR 153, km 110, no distrito de Tamanduá possui uma estação de dados agrometeorológicos, situado na altitude 548 m (cerca de 215 m acima do nível do reservatório), latitude $27^{\circ} 18' 48'' 71'' S$ e longitude $51^{\circ} 59' 34'' 07'' O$, cujos dados estão disponíveis on-line desde o ano de 1987 [9]. Esta estação está distante cerca de 3 km do reservatório da UHE (Rio Uruguai), e de aproximadamente 40 km da barragem em Itá. Serão utilizados e analisados os dados de temperatura, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica desta estação ao longo de 30 anos, com o intuito de verificar se houve alguma modificação após a formação do reservatório.

O clima influencia diretamente o homem em todas as suas atividades, principalmente a agropecuária. Dessa forma, sendo o município de Concórdia fortemente dependente deste setor, é importante saber se houve mudanças significativas no microclima local causado pela construção do reservatório da UHE de Itá. Além disso, esses resultados serão de grande valia na prevenção dos impactos ambientais causados pela construção de novas UHEs.

O município de Concórdia possui, além da estação da Embrapa, no mínimo outras cinco estações meteorológicas vinculadas a Epagri/Ciram, em diferentes pontos do município [10]. Neste trabalho utilizaremos apenas os dados da estação da Embrapa, pois as outras estações são mais recentes, não possuindo dados anteriores à formação do reservatório.

II. METODOLOGIA

Para o andamento desta pesquisa, primeiramente analisou-se os dados de temperatura, umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica, velocidade de vento e insolação registrados pela Estação de Dados Meteorológicos da Embrapa Concórdia. Na sequência, foi realizada uma análise estatística dos valores médios, máximos e mínimos, em períodos anuais e mensais, dos parâmetros citados anteriormente. Em seguida, comparou-se os dados meteorológicos antes e após a formação do reservatório da UHE de Itá. Por fim, confrontou-se os resultados dos dados locais com os dados meteorológicos dos municípios próximos de Concórdia, no mesmo período.

Foram tabelados no software Excel os dados meteorológicos de interesse, e a partir deles foram gerados os gráficos, determinado as médias e os valores de máximo e de mínimo da temperatura, umidade relativa do ar e precipitação, em diferentes períodos. A interpretação dos gráficos resultou nas conclusões quanto à variação ou não de alterações significativas nos períodos anterior e posterior a formação do reservatório.

Na próxima etapa foi pesquisado a influência de outros fatores, como os fenômenos meteorológicos regionais ou globais. Isso ocorreu através da pesquisa e análise de dados meteorológicos dos municípios próximos à Concórdia.

Por fim, foi verificado se a formação do reservatório causou mudanças nos elementos climáticos locais em função da formação de uma extensa da lâmina d'água. A dificuldade maior está na interpretação correta dos dados, bem como em conseguir excluir outros fatores de influência. Por isso, a análise se restringiu em apenas três parâmetros meteorológicos oriundos de dados de uma mesma estação por um período de cerca de 30 anos.

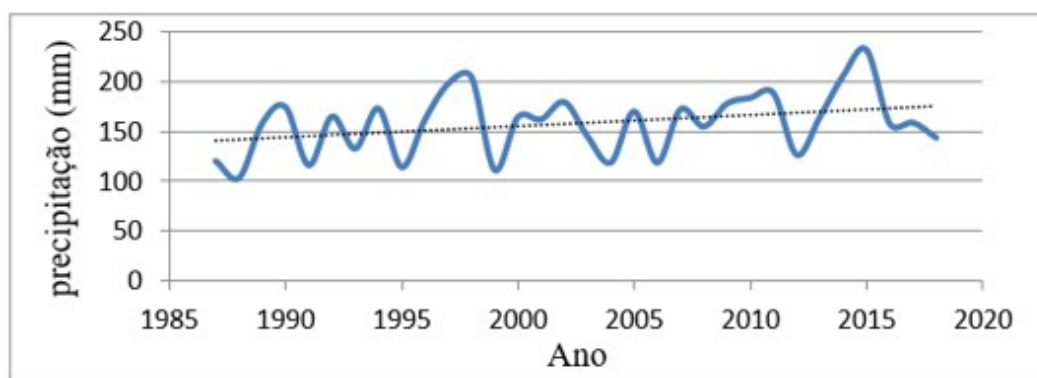
III. RESULTADOS E ANÁLISES

Área do reservatório da UHE é de 141 km². O enchimento do reservatório iniciou no final de 1999 e foi completado no início de maio de 2000. A primeira turbina da usina passou a funcionar no final de maio de 2000. Em vários momentos dividimos os dados em antes (até final de 1999) e após a formação do lago (após início de 2000).

III.1. Precipitação

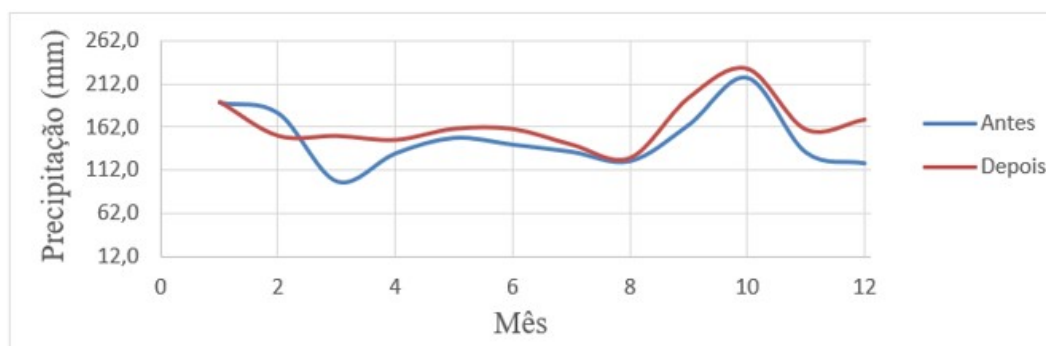
Na Figura 1 temos um gráfico da precipitação média mensal do ano de 1987 a 2018. A média de precipitação mensal de 1987 até 1999 foi de 149 mm, e de 2000 a 2018 foi de 164 mm.

Figura 1: Precipitação média mensal entre 1987 e 2018.



Analisando as médias mensais antes e depois do ano 2000, constata-se que a precipitação pluviométrica diminuiu apenas nos meses de janeiro e fevereiro, aumentando em todos os demais, como pode ser verificado no gráfico da figura 2.

Figura 2: Precipitação média mensal antes e depois do enchimento do lago.

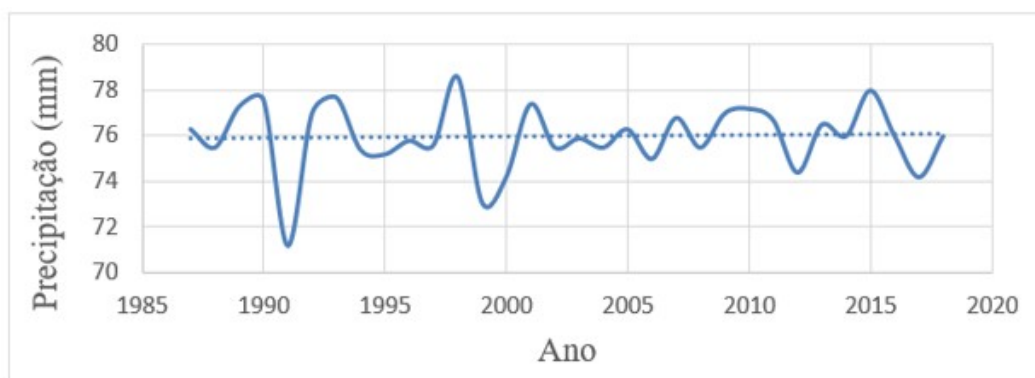


O desvio padrão da precipitação (calculado mês a mês - 384 pontos= 32 anos x 12 meses) foi de 88,9 no período de 1987 a 1999, e de 91,2 no período de 2000 a 2018. Isso significa que houve uma maior variação na precipitação mensal média após a formação do reservatório.

III.2. Umidade Relativa

Na figura 3 temos o gráfico da umidade relativa média mensal entre 1987 e 2018. Percebe-se que ao longo dos anos a umidade relativa média praticamente não se alterou. O desvio padrão da umidade relativa média (calculado mês a mês) foi de 6,0 de 1987 a 1999 e 5,1 de 2000 a 2018. Isso significa que teve uma menor variação da umidade relativa média após a formação do lago. As umidades relativas máximas e mínimas também não se alteraram ao longo dos anos, ficando a máxima em torno de 97% e a mínima em 35%.

Figura 3: Umidade relativa média mensal entre 1987 e 2018.



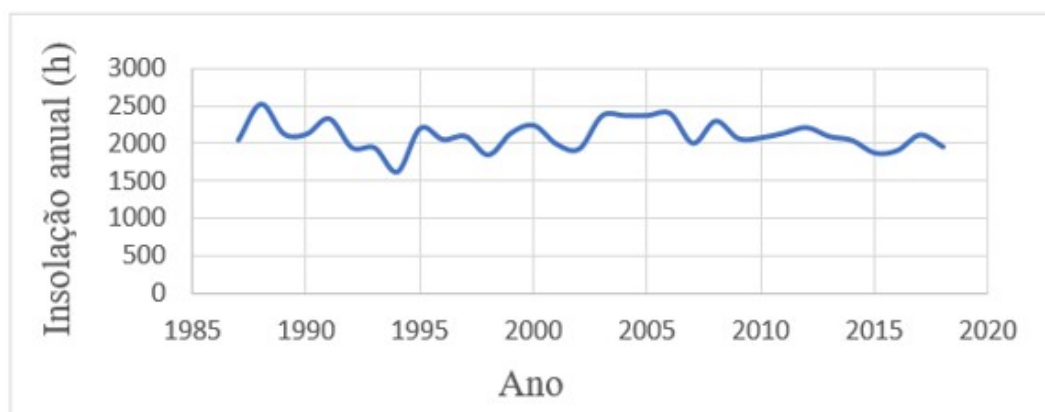
O desvio padrão da umidade relativa máxima (calculado mês a mês) foi de 0,91 no período de 1987 a 1999 e 0,8 entre 2000 a 2018, o que mostra que as oscilações da umidade relativa máxima foram levemente menores após a formação do reservatório. O desvio padrão da umidade relativa mínima foi de 6,6 entre 1987 a 1999 e 7,2 entre 2000 e 2018. Dessa forma, constata-se que as oscilações da umidade relativa mínima foram maiores após a formação do reservatório.

III.3. Velocidade do vento e insolação

A estação meteorológica da Embrapa de Concórdia possui medidas de velocidade e direção do vento somente a partir de 1990. Nos anos de 1990 a 1995 não há registros completos. Por isso, trabalhamos com os dados somente a partir de 1996. Entre os anos de 1996 e 2018 constatamos que a velocidade média do vento foi de 1,5 m/s (5,4 km/h), não apresentando variações significativas ao longo dos anos.

Na figura 4 temos o gráfico da insolação média anual entre os anos de 1987 e 2018. Percebe-se que a insolação aumentou um pouco ao longo dos anos. A média de horas anuais de insolação de 1987 a 1999 foi de 2072 h e de 2000 a 2018 foi de 2124 h. Constata-se que houve uma média de 50 h a mais de insolação por ano a partir do ano 2000, o que equivale a uma diferença de 2,5%.

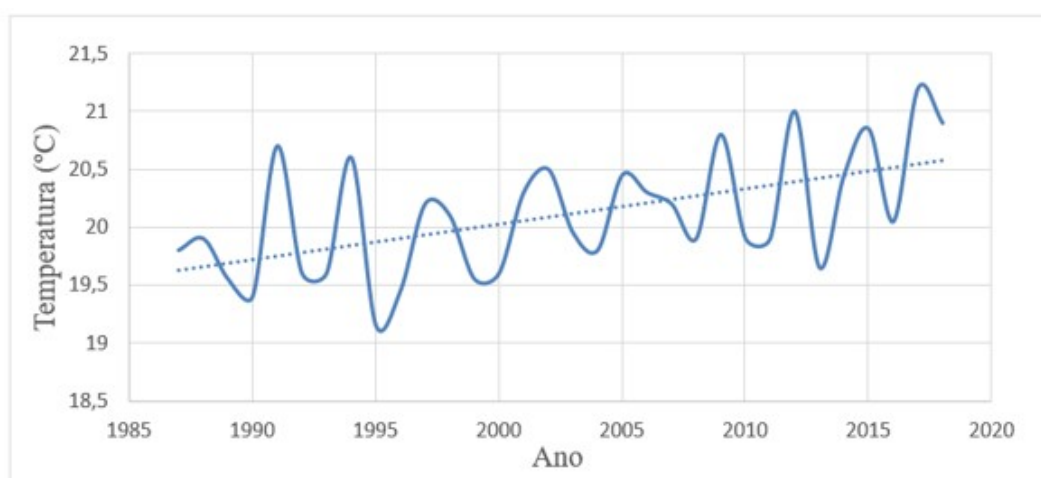
Figura 4: Umidade relativa média mensal entre 1987 e 2018.



III.4. Temperaturas

A seguir analisaremos a evolução da temperatura média anual entre 1987 e 2018. Este valor é obtido pela média entre a média da temperatura máxima e a média da temperatura mínima. Na figura 5 temos o gráfico da temperatura média anual, bem como a linha de tendência linear.

Figura 5: Temperatura média anual entre 1987 e 2018.



A temperatura média de 1987 a 1999 foi de 19,8 °C e de 2000 a 2018 foi de 20,3 °C. O desvio padrão da temperatura média (calculado mês a mês) foi de 3,9 no período de 1987 a 1999 e 3,8 de 2000 a 2018. Isso significa que teve uma menor variação da temperatura (média mensal) após a formação do lago.

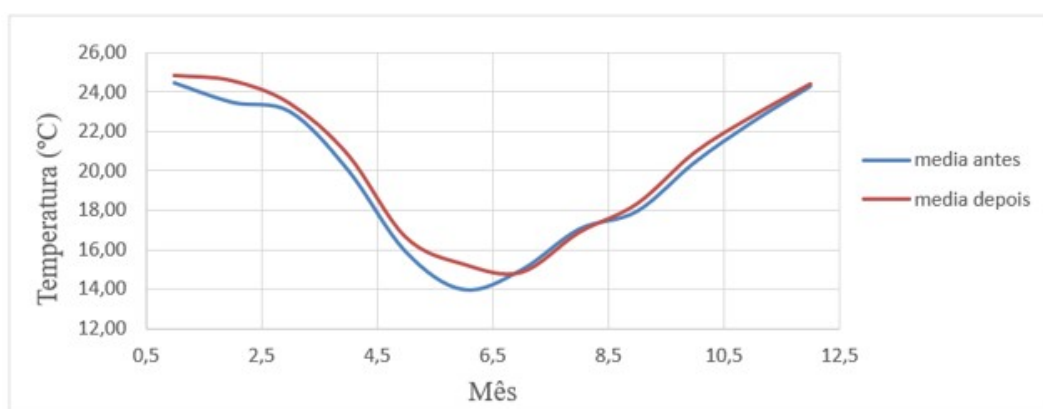
As temperaturas médias mínimas e máximas, antes da formação do lago, foram 15,9 e 23,8 °C, respectivamente. Após a formação do lago, tais temperaturas foram 15,9 e 24,7 °C, respectivamente. Percebe-se que a temperatura mínima permaneceu constante, e a temperatura máxima sofreu um pequeno aumento (0,9 °C).

O desvio padrão da temperatura média máxima (calculado mês a mês) foi 3,9 de 1987 a 1999 e 4,0 entre 2000 e 2018. O desvio padrão da temperatura média mínima (calculado mês

a mês) foi 4,1 de 1987 a 1999 e 3,9 de 2000 a 2018. Isso significa que teve uma maior variação da temperatura média máxima e uma menor variação da temperatura média mínima após a formação do lago.

No gráfico da figura 6 temos a variação da temperatura ao longo do ano, fazendo uma média de cada mês, antes e depois da formação do lago. Percebe-se que a temperatura média após a formação do lago foi menor somente entre os meses de julho e agosto. Isso significa que os invernos ficaram mais rigorosos.

Figura 6: Temperatura ao longo do ano.



III.5. Correlação entre as Variáveis

Na sequência verificaremos se existe uma correlação entre as variáveis temperatura, umidade relativa do ar e precipitação pluviométrica. Existe uma correlação entre duas ou mais variáveis quando as alterações sofridas por uma delas são acompanhadas por modificações nas outras. No caso de duas variáveis x e y , os aumentos (ou diminuições) em x correspondem a aumentos (ou diminuições) em y . O coeficiente está sempre entre 1 e -1. Se está próximo de 1, há uma forte correlação positiva; se está próximo a -1, há uma forte correlação negativa; se está próximo de 0, não há correlação. O coeficiente de correlação não mede a relação causa-efeito entre duas variáveis, apesar de essa relação poder estar presente.

Na figura 7 temos um gráfico da temperatura média e da umidade relativa de 1987 a 2018 e na figura 8 um gráfico da correlação entre umidade relativa média e a temperatura média. Para isso foram utilizados os valores mensais (384 pontos).

Figura 7: Temperatura média e umidade relativa média.

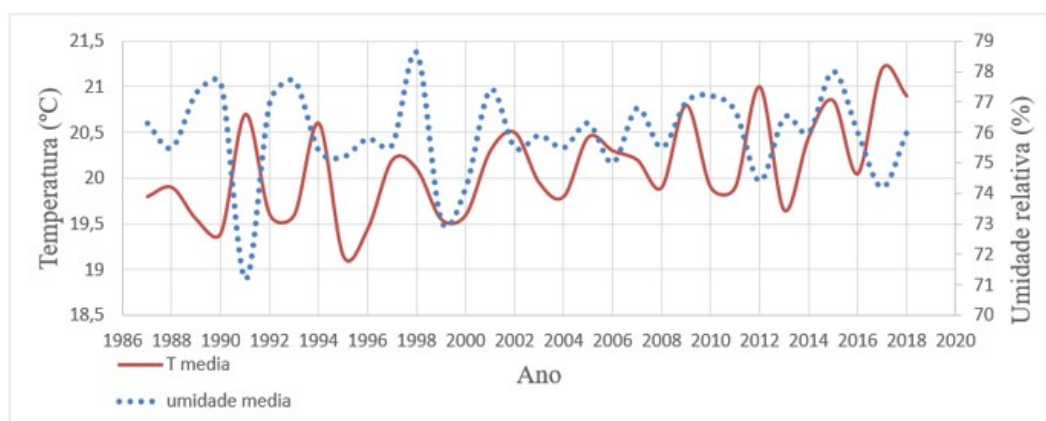
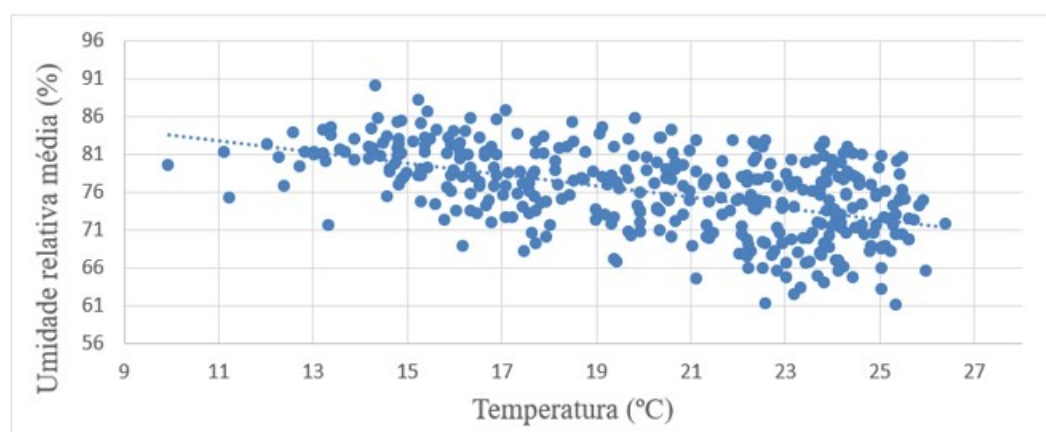


Figura 8: Correlação entre umidade relativa média e temperatura.



Percebe-se uma relação inversa entre a temperatura média e a umidade relativa do ar, de modo que o aumento da temperatura provoca a diminuição da umidade relativa do ar, e vice-versa. O coeficiente de correlação encontrado foi 0,52, o que significa que a correlação entre a umidade relativa média e a temperatura média é moderada.

Na figura 9 temos a precipitação e a temperatura ao longo dos anos e na figura 10 um gráfico da correlação entre as mesmas, utilizando os valores mensais. Não se consegue perceber, em todo o período, uma correlação entre a precipitação e a temperatura. O coeficiente de correlação é 0,029, o que significa que a correlação entre a precipitação média e a temperatura média é muito fraca.

Figura 9: Precipitação e temperatura.

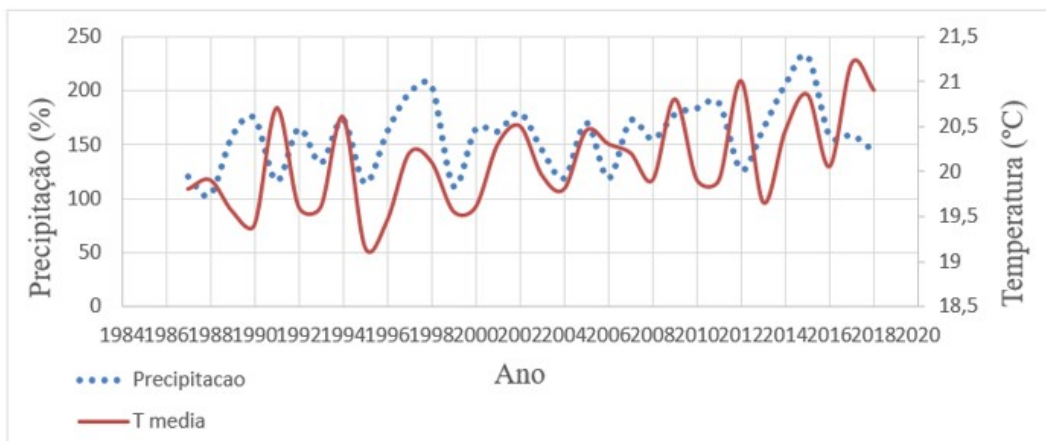
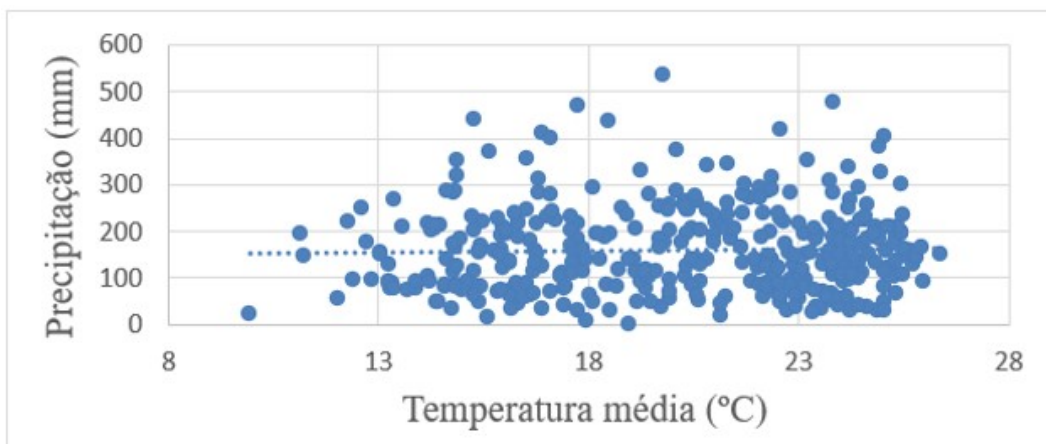


Figura 10: Correlação entre precipitação e temperatura média.



Na figura 11 temos o gráfico da precipitação média e da umidade relativa média de 1987 a 2018 e na figura 12 o gráfico da correlação entre as mesmas. O coeficiente de correlação encontrado foi de 0,34, o que significa que a correlação entre a umidade relativa média e a precipitação média é fraca.

Figura 11: Precipitação média e umidade relativa média.

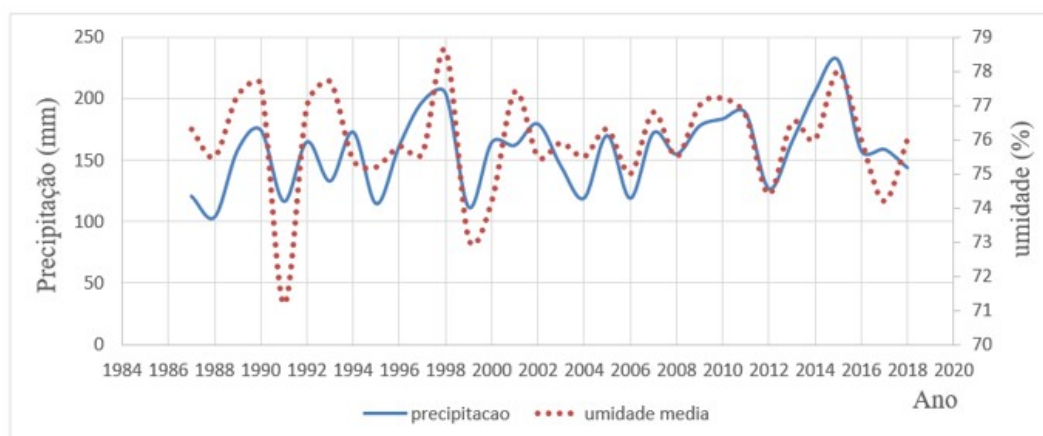
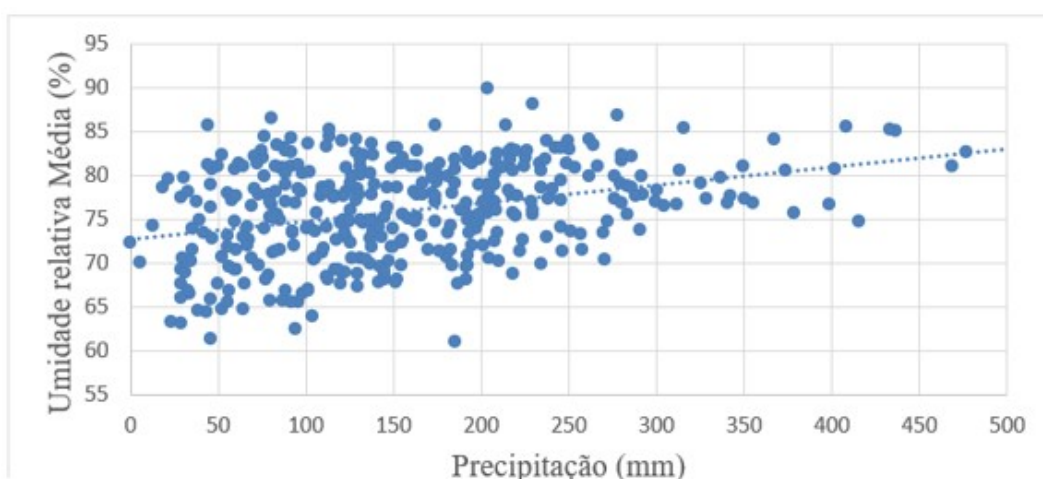


Figura 12: Correlação entre precipitação média e umidade relativa média.



III.6. Análise de dados de estações de municípios da região

A seguir comparamos também os dados meteorológicos de Concórdia com os da região no entorno, de modo a verificar alguma influência externa. Analisamos os dados das estações meteorológicas de Chapecó (SC), Irai (RS), Passo Fundo (RS) e Campos Novos (SC), as quais estão dispostas num raio de 120 km de Concórdia. Após fazer uma análise estatística dos dados dessas estações, de 1986 a 2018, antes e após a formação do reservatório, os quais estão disponíveis no site do Instituto Nacional de Meteorologia [11], elaboramos a tabela 1.

Tabela 1: Dados de estações meteorológicas próximas e comparação com a estação de Concórdia.

	Chapecó	Campos Novos	Passo Fundo	Irai	Média das Estações ⁴	Concórdia
Precipitação média	-30 mm	-21 mm	+22 mm	-3,9 mm	-8,2 mm	+16 mm
Temperatura máxima média	+0,3 °C	+0,1 °C	-0,1 °C	+0,8 °C	+0,3 °C	0 °C
Temperatura mínima média	+0,3 °C	-0,2 °C	-0,8 °C	+0,4 °C	-0,1 °C	+0,9 °C
Temperatura média	+0,3 °C	+0,1 °C	-0,4 °C	+0,4 °C	+0,1 °C	+0,5 °C
Umidade relativa média	+0,1 %	+0,1 %	+1,6 %	0 °C	+0,5 %.	0 °C

Analisando a tabela constatamos que, após a formação do reservatório da UHE, em relação ao período anterior, em Concórdia: A precipitação anual aumentou 16 mm, enquanto a média dos municípios da região diminuiu 8,2 mm; A temperatura máxima média não se alterou e na região aumentou 0,3 °C; A temperatura mínima média aumentou 0,9 °C, enquanto na região diminuiu 0,1 °C; A temperatura média aumentou 0,5 °C, enquanto na região aumentou 0,1 °C; A umidade relativa média não se alterou, enquanto na região aumentou 0,5 %.

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho buscamos verificar a influência no microclima da cidade de Concórdia devido à criação do reservatório da Usina Hidrelétrica de Itá, o qual foi concluído no início do ano 2000. Para isso utilizamos dados meteorológicos da estação da Embrapa em Concórdia, de 1987 a 2018 e comparado com dados de estações de cidades vizinhas.

A partir de uma análise dos dados foi possível verificar que, após a formação do reservatório, houve um pequeno aumento na precipitação pluviométrica em Concórdia (16 mm por ano), enquanto na região diminuiu 8,2 mm, bem como aumentou a variação na precipitação mensal média. As umidades relativas máximas e mínimas médias não se alteraram ao longo dos anos, ficando a máxima em torno de 97% e a mínima em 35%, de maneira semelhante com os valores regionais. Constatou-se uma menor variação da umidade relativa média e da umidade relativa máxima e um pequeno aumento na variação da umidade relativa mínima. A temperatura média em Concórdia aumentou 0,5 °C após a formação do reservatório, enquanto na região aumentou em média 0,1 °C. A temperatura máxima média permaneceu constante em Concórdia, enquanto na região aumentou 0,3 °C, e a temperatura mínima média sofreu um aumento de 0,9 °C, enquanto na região houve uma redução de 0,1 °C. Constatou-se também uma redução na variação da temperatura média mensal, um aumento na variação da temperatura média máxima

e uma diminuição da variação da temperatura média mínima. Observou-se também uma correlação moderada entre a temperatura média e a umidade relativa do ar, de modo que o aumento da temperatura provoca a diminuição da umidade relativa do ar, e vice-versa.

Concluindo este trabalho podemos afirmar que, se existente, a influência do reservatório da UHE de Itá no microclima da cidade de Concórdia é pequena. Entre os parâmetros analisados, o que podemos destacar é que, nas proximidades da Estação Agrometeorológica da Embrapa houve um pequeno aumento da precipitação pluviométrica e da temperatura mínima média.

REFERÊNCIAS

- [1] AYOADE, J. O. *Introdução à Climatologia para os Trópicos*. 12 ed. Tradução de Maria J. Z dos Santos. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007.
- [2] MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês M. *Climatologia: noções básicas e climas no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- [3] Disponível em: <<http://www.tractebelenergia.com.br/wps/portal/internet/parque-gerador/usinas-hidreletricas/uhe-ita>>. Acesso em: 02 out. 2018.
- [4] Disponível em: <<http://www.consorcioita.com.br/uhe.html#infoTecnicas>>. Acesso em: 02 out. 2018.
- [5] Disponível em: <<https://cienciaclima.com.br/impactos-das-mudancas-climaticas-na-producao-hidreletrica/>>. Acesso em: 15 out. 2018.
- [6] MASIERO, E.; SOUZA, L. C. L. de. *Variação de umidade absoluta e temperatura do ar intraurbano nos arredores de um corpo d'água*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 25-39, jul./set. 2013.
- [7] VIANELLO, Rubens L.; ALVES, Adil R. *Meteorologia Básica e Aplicações*. 2. Ed. Viçosa, MG: UFV, 2012.
- [8] SOUZA, Marcos B. de; GALVANI, Emerson. *Influência da formação de reservatórios no microclima: estudos preliminares de Presidente Epitácio (SP)*. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/52009300_Influencia_da_formacao_de_reservatorios_no_microclima_estudos_preliminares_de_Presidente_Epitaicio_SP> Acesso em: 02 out. 2018.
- [9] Disponível em: <<http://www.cnpsa.embrapa.br/meteor/>>. Acesso em: 27 set. 2018.
- [10] Disponível em: <http://circam.epagri.sc.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=98&Itemid=285>. Acesso em: 27 set. 2018.
- [11] Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 27 set. 2018.



Estudo das consequências da aplicação de impressoras 3D no ambiente escolar

Study of the consequences of the application of 3D printers in the school environment

FÁBIO LOMBARDO EVANGELISTA*¹, LINCOLN MOURA DE OLIVEIRA^{†2}

¹Instituto Federal Catarinense

²Petrobras

Resumo

Este estudo tem o objetivo de captar e analisar algumas das diversas experiências de aplicação de impressão 3D na área da educação, buscando identificar também projetos que possam ser diretamente utilizados no processo de ensino nas mais diversas áreas. Busca-se acima de tudo sintetizar algumas das diversas possibilidades que inaugura-se com a aplicação desta tecnologia no ensino, mostrando o potencial e o impacto inovador de sua utilização no processo ensino-aprendizagem.

Palavras-chave: Impressão 3D. Educação. Ambiente Escolar. Inovação.

Abstract

This study aims to capture and analyze some of the diverse experiences of applying 3D printing in the area of education, seeking also to identify projects that can be directly used in the teaching process in the most diverse areas. Above all, it seeks to synthesize some of the several possibilities that are inaugurated with the application of this technology in teaching, showing the potential and the innovative impact of its use in the teaching-learning process.

Keywords: 3D printing. Education. School Environment. Innovation.

*fabio.evangelista@ifc.edu.br

†lincolnsobral@yahoo.com.br

I. INTRODUÇÃO

Algumas tecnologias possuem o poder de causar rupturas na forma como as pessoas relacionam-se entre si e em suas relações com o mundo, basta para tanto observar a forma como as pessoas se comportavam antes e depois dos Smartphones. Estas pequenas peças carregadas de tecnologia, possuem a capacidade de comandar desde os eletrodomésticos de uma casa até proporcionar meios para que muitas pessoas se relacionem predominantemente de forma virtual com outras pessoas.

Dimensionar o exato impacto da incorporação de uma nova tecnologia na sociedade é praticamente impossível de ser feita, porém, podem-se observar os sinais que estas aplicações vão apresentando com o tempo, tentando-se identificar tendências, conforme as difusões das aplicações vão ocorrendo e novas ideias vão sendo conduzidas para melhorar suas finalidades ou propor novas implementações.

Para alguns especialistas a impressão 3D apresenta-se como uma destas tecnologias transformadoras. Conforme THE OFFICE OF JEREMY RIFKIN (2016) o economista e escritor Jeremy Rifkin, autor de vários best-sellers sobre o impacto da ciência e tecnologia na economia mundial, a impressão 3D faz parte de um processo chamado por ele de Terceira Revolução Industrial, onde cada pessoa será capaz de ser potencialmente um fabricante de seus próprios produtos, além de detentor dos próprios meios de geração de energia e internet.

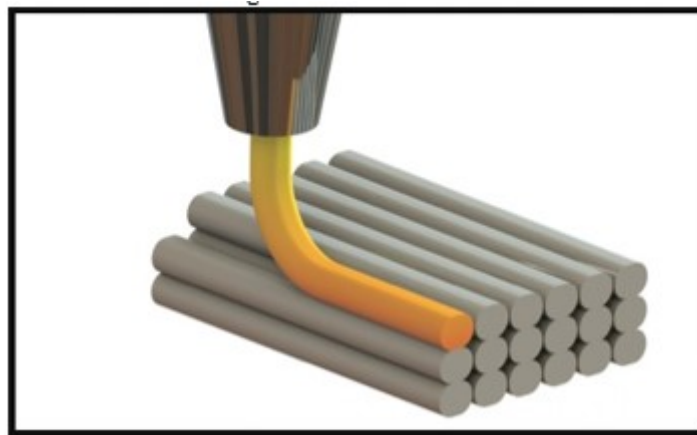
De uma forma ou de outra, este trabalho desenvolve a seguinte problemática: Quais trabalhos estão sendo desenvolvidos com impressão 3D que possam inovar o processo ensino-aprendizagem e quais as iniciativas que estão sendo desenvolvidas com esta tecnologia no âmbito escolar? Como metodologia a realização deste trabalho se utilizou de pesquisas bibliográficas.

Tem-se como objetivo principal mapear algumas iniciativas em que se utiliza da impressão 3D e que produzam resultados potenciais para serem utilizadas na educação, além de buscar tratar iniciativas que já estejam sendo desenvolvidas no âmbito escolar.

II. TECNOLOGIA DE IMPRESSÃO 3D

De acordo com Canessa (2013) as tecnologias de impressão 3D de baixo custo ainda estão na sua infância, porém em rápido desenvolvimento. Iniciou-se no final dos anos 80, porém, estavam disponíveis no mercado apenas equipamentos com alto custo, limitando a sua utilização a algumas empresas. Ainda de acordo com o autor, a expansão da tecnologia ocorreu a partir do fim dos direitos autorais das patentes e em especial para a tecnologia FDM (Fused Deposition Modeling) que é a tecnologia utilizada na maioria das tecnologias de baixo custo.

A tecnologia FDM foi inventada por Scott Crump, fundador de uma das maiores empresas especializadas em impressão 3D no mundo, chamada Stratasys. Esta tecnologia produz peças camadas por camada, utilizando um filamento termoplástico aquecido que é empurrado por meio de um furo de pequeno diâmetro, cujo mecanismo é chamado extrusor, e inserido em uma bandeja de baixo para cima (STRATASYS, 2016). A figura 1 mostra uma demonstração da tecnologia:

Figura 1: *Processo FDM.*

Fonte: <<https://www.3dapplications.com.br/wp-content/uploads/2018/02/fdm-desenho-basico.jpg>> Acesso em: 27/06/2020

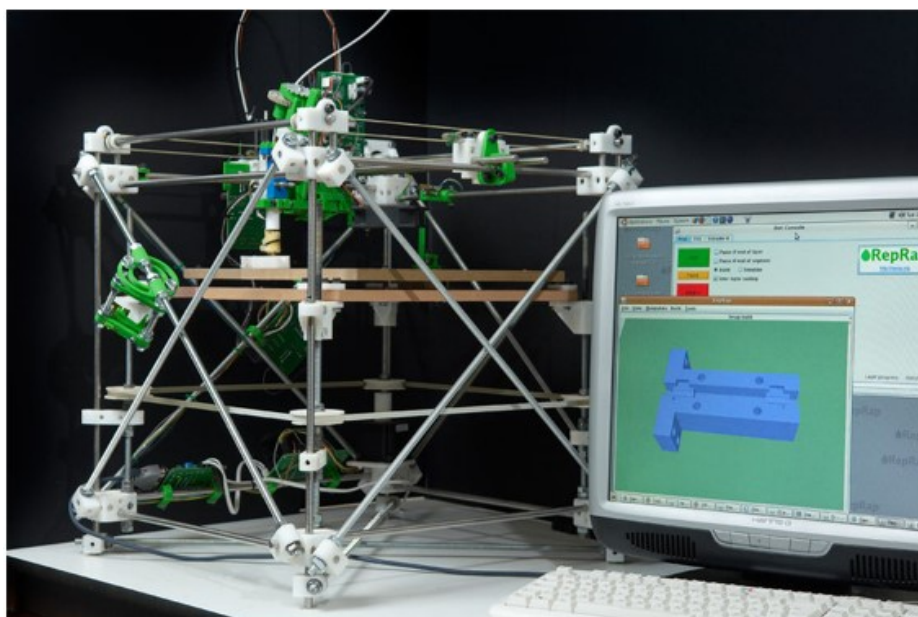
A popularização da tecnologia iniciou-se em 2004 com a ideia do professor Adrian Bowyer da Universidade de Bath em produzir algum equipamento novo, menor e mais barato (FONDA, 2013). A sua ideia era produzir algum tipo de impressora que pudesse se auto reproduzir, ou seja, que fossem capazes de produzir todo ou parte de sua estrutura de forma mais simples possível.

A ideia deu origem ao projeto RepRap, inicialmente desenvolvida por um pequeno grupo de profissionais, conforme Ranellucci (2013). Entre 2006 e 2008 foi desenvolvido o primeiro protótipo, capaz de imprimir algumas de suas partes, chamada RepRap Darwin (mostrada na figura 2). Outros modelos foram lançados, como a Mendel e a Huxley, porém a partir de 2010 já existia uma grande comunidade envolvida no projeto por meio da internet. Várias experiências e modelos foram desenvolvidos e atualmente o projeto já não opera dependente do grupo inicial, não possuindo assim, uma direção bem definida.

Ainda é observado por Ranellucci (2013) a participação em 2011 de Josef Prusa, que publicou seu projeto de impressora 3d chamado Prusa Mendel. A grande inovação foi a grande simplificação proporcionada na estrutura das máquinas, que foram sugeridas baseadas em materiais mais simples de serem adquiridos, tornando-se rapidamente o modelo mais famoso.

Estes foram os primeiros passos para o que se chama de impressora 3D pessoal e de baixo custo, uma referência a similaridade com os computadores pessoais (PCs). Este projeto se desenvolveu sem barreiras, ou seja, livre, em código aberto e como resultado da criação de impressoras mais baratas e vários modelos foram e estão em constante desenvolvimento e melhoria.

Figura 2: *RepRap I: Darwin impressora 3D.*



Fonte: <<http://reprap.org/wiki/Darwin>> Acesso em: 27/06/2020

Atualmente outras iniciativas de impressoras em código aberto são desenvolvidas e novas empresas, interessadas em explorar o mercado de impressoras 3D de baixo custo, tem sido criadas. Este mercado tem ofertado basicamente 2 tipos de configurações onde o primeiro é a venda dos componentes da impressora, onde o comprador é o responsável pela montagem e ajuste. O outro modelo seria a impressora montada e calibrada, ou seja, a impressora é comprada pronta para ser utilizada (FIOR, 2013).

Ainda de acordo com Fior (2013), embora a impressora já montada e calibrada seja a mais indicada para um usuário que não possui grandes conhecimentos técnicos, ele provavelmente necessitará de instruções sobre como manipular os ajustes da impressora, pois será necessário. Do outro lado, a impressora que necessita ser montada pelo usuário, necessita de bom conhecimento técnico, porém, este já será capaz de ajustar e garantir a manutenção do equipamento e terá melhor domínio sobre o equipamento.

O refinamento e aprimoramento dessa tecnologia é algo que ganha impulso com a gama de possibilidades de aplicações. Lacaze e Murphy (2020) desenvolveram um método usado para pulverizar e moldar metais e cerâmicas. Desta forma, os autores afirmam que é obter uma peça resultante muito semelhante à original, tanto esteticamente quanto fisicamente.

Ao adentrarmos as inovações no campo técnico da impressão 3d, Shen et al, (2019) afirma ter criado um método que controla tanto a velocidade quanto a precisão, já Wang et al, (2018) trabalha visando diferentes ângulos de rotação do bico de extrusão, e nas direções das áreas de impressão, ajustando a área de secção transversal de um filamento pulverizado. Gong et al, (2017), trás a tona uma outra aplicação e inovação, a impressora 3D com novo processamento em uma resina de baixo custo, projetada para atingir secções transversais de canal de fluxo tão pequenas quanto 18 μ m a 20 μ m.

Por fim, Baden et al, (2020) salienta que para pandemia causada pelo novo coronavírus,

descoberto em dezembro de 2019, nomeado SARS-CoV-2 (sigla em inglês que significa coronavírus 2 da síndrome respiratória aguda grave), cuja doença recebeu a denominação pela Organização Mundial da Saúde (OMS) de COVID-19 (do inglês coronavirus disease 19) as máscaras feitas em 3D contém uma porosidade que pode deixar passar o vírus, mas há outros exemplos de desenvolvimento necessários que a impressão pode auxiliar, como na confecção imediata de peças sobressalentes para ventiladores manuais, servindo para o reparo dos equipamentos existentes e os que encontram-se fora de uso.

III. APLICAÇÕES DE IMPRESSÃO 3D COM IMPACTO NA EDUCAÇÃO

De acordo com Fonda (2013) a impressão 3D é um processo onde é feito um objeto tridimensional a partir de um modelo computacional. Este modelo computacional pode ser desenhado por meio de softwares, frequentemente chamados CAD, e/ou os arquivos podem ser adquiridos prontos em repositórios de modelo 3D disponíveis na internet.

Há necessidade de instrumentalizar as salas de aula, em conjunto às novas práticas, trazendo a oportunidade de os alunos experimentarem em seu cotidiano acadêmico essas tecnologias, aproximando sua realidade acadêmica ao máximo da prática (JÚNIOR et al, 2020). Ele ainda afirma que o ambiente pedagógico é reforçado quando o estudante é envolvido pela tecnologia e sua aplicabilidade rotineira, tornando-o mais confiante, seguro e preparado.

Uma terceira via é realizada por meio do escaneamento em 3 dimensões de objetos físicos (LEAKEY; DZAMBAZOVA, 2013) para a digitalização de fósseis pré-históricos. Este tópico trabalha com algumas iniciativas que foram desenvolvidas para diversos fins, porém, que possuem alto potencial de aplicação na educação no estudo de matérias específicas como física, matemática, história etc.

III.1. Arquivos 3D disponibilizados pela NASA

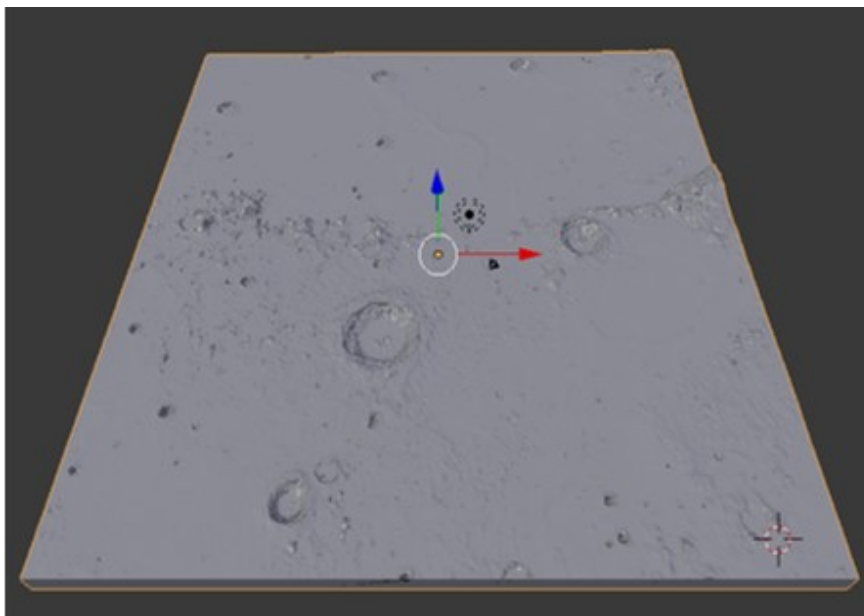
O espaço é sempre fonte de muitos questionamentos e dúvidas quando trabalhado em sala de aula e ainda quando inserimos as tecnologias utilizadas pelo homem para explorá-lo. Porém, existe uma relação muito abstrata com o tema quando exposto durante a abordagem de um assunto.

A americana National Aeronautics and Space Administration, mais conhecida pela sua sigla NASA, disponibiliza em seu site mais de 280 modelos 3D de modelos de aeronaves, sondas, cometas, texturas de superfícies e imagens de forma livre para download e uso de acordo com NASA (2016).

Uma possibilidade com a aplicação da impressão 3D é utilizar os modelos 3D disponíveis para gerar as impressões e isto proporciona uma aproximação concreta para o aluno tocar e explorar os assuntos relativos ao espaço de forma mais concreta. Um exemplo que observa-se na figura 3 é o arquivo que disponibiliza a visualização da superfície da lua do lado mais próximo da Terra e do lado mais distante, numa área de cerca de 400 km² numa escala de 5 milhões para um, numa peça de 8 cm² (1 cm = 50 km). Com estes modelos muitos questionamentos podem ser levantados para os alunos discutirem como, por exemplo a

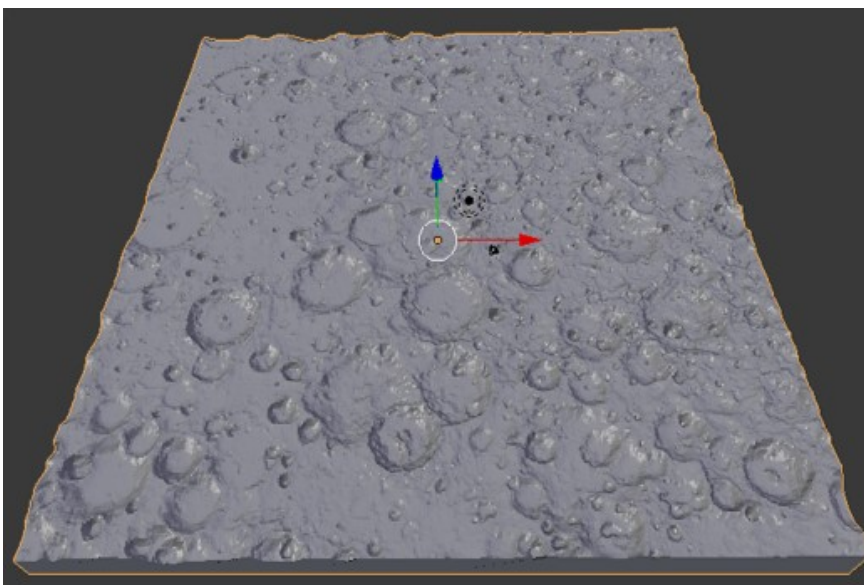
razão pela qual o lado mais próximo da lua em relação a terra seja mais suave, como mostrado nas figuras a seguir.

Figura 3: a) Superfície da lua mais próximo da Terra.



Fonte: <<https://nasa3d.arc.nasa.gov/detail/moon-nearside-farside>> Acesso em: 04/12/2019

Figura 3: b) Superfície da lua mais distante da Terra.



Fonte: <<https://nasa3d.arc.nasa.gov/detail/moon-nearside-farside>> Acesso em: 04/12/2019

De acordo com o site Earth & Space Science News (EOS, 2015), no artigo publicado em 2015 intitulado 3-D Models Put Scientists, Students in Touch with Planets, atualmente,

existem alguns pesquisadores utilizando-se da impressão 3D para analisar a geografia das superfícies de outros planetas e esta mesma ferramenta dá a educadores e estudantes uma nova ferramenta para o engajamento dos alunos no aprendizado sobre o espaço.

A própria NASA está testando a tecnologia FDM no espaço. A bordo da estação espacial internacional foi embarcada uma impressora 3D com a finalidade de proporcionar aos astronautas a confecção de peças e ferramentas necessárias a manutenção das instalações (NASA, 2014).

Citando a dificuldade em enviar materiais de reposição da terra para a estação espacial, a tecnologia consiste numa promessa para diminuir o tempo de manutenção e os custos de operação do sistema, além de ser uma grande promessa para missões espaciais onde seria praticamente impossível a utilização de suprimentos vindos da terra, como seria o caso de uma missão a marte.

Além disso, a NASA tem desenvolvido desafios a estudantes dispostos a apresentar ideias inovadoras, utilizando impressão 3D, voltadas para projetos que possam garantir a saúde dos astronautas no espaço (NASA, 2016). O questionamento realizado no desafio está relacionado a identificar os itens que o estudante imagina que um astronauta precisar em uma viagem espacial para mantê-lo saudável, assim como o porquê destes itens dependerem da impressão 3D.

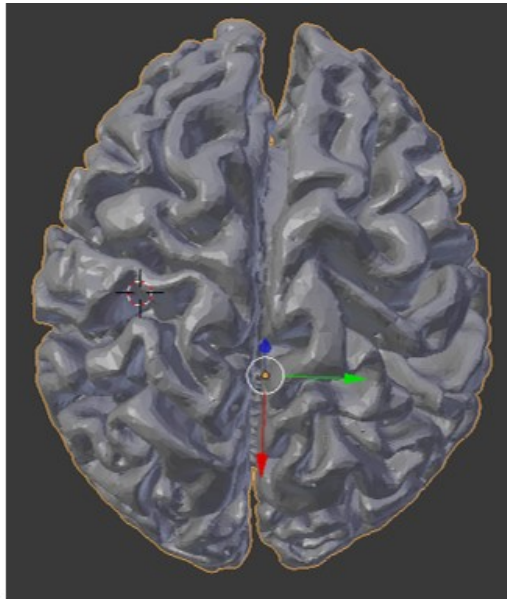
III.2. Modelos 3D produzidos pela Biomedicina

De acordo com Rossi e Campana (2013), modernos laboratórios de radiologia são capazes de produzir digitalizações das estruturas ósseas e realizar análises tridimensionais para estudos morfológicos. Este é apenas uma das formas de digitalização que estão sendo atualmente aplicados na área biomédica.

Por iniciativa do Instituto Nacional de Energia e Doenças Infecciosas dos Estados Unidos em colaboração com o Instituto Nacional Eunice Kennedy Shriver para a Saúde da Criança e Desenvolvimento Humano e a Biblioteca Nacional de Medicina desenvolveram o NIH 3D Print Exchange que é um site que disponibiliza diversos arquivos 3D para a área da biomedicina, assim como diversos tutoriais de modelamento e para a educação para a criação de arquivos em 3D (NIH 3D PRINT EXCHANGE, 2016).

Diversos modelos proteínas, bactérias, células, organismos, proteínas, pequenas moléculas, órgãos e estruturas ósseas humanas. O site disponibiliza uma grande variedade de arquivos que podem ser utilizados para a impressão 3D. A figura 4 apresenta o modelo de um cérebro e a figura 5 mostra o modelo de um coração no momento da diástole.

Figura 4: Cérebro.



Fonte: <<https://3dprint.nih.gov/discover/3dpx-002386>> Acesso em: 04/12/2019

Figura 5: Coração.



Fonte: <<https://3dprint.nih.gov/discover/3dpx-002636>> Acesso em: 04/12/2019

Os arquivos disponibilizados pelo site podem ser utilizados como ferramentas para o ensino em matérias como biologia e química. Torna-se importante acentuar a aproximação

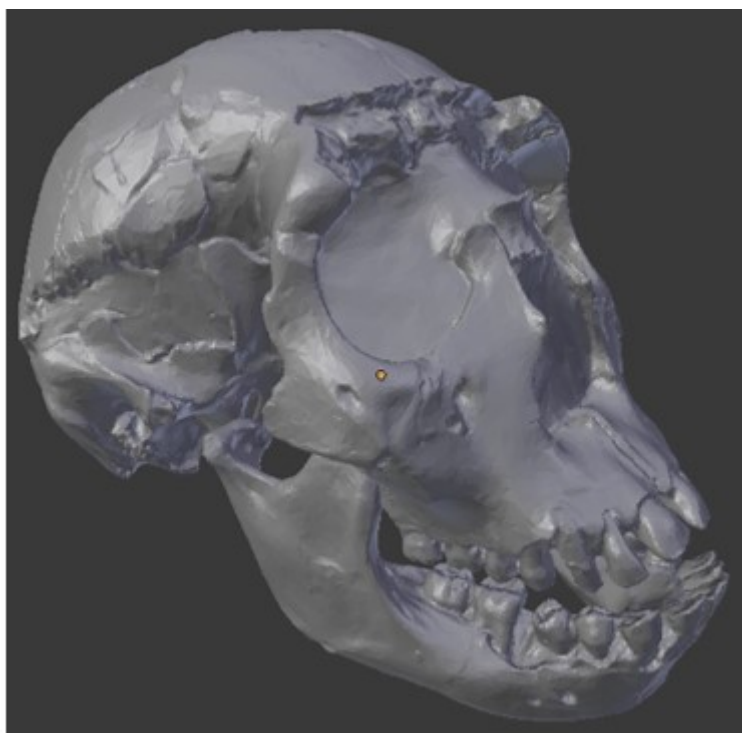
com a realidade, dando a oportunidade ao professor lançar mão destas para a criação de ferramentas em 3D que tornem o ensino em sala de aula mais concreto.

III.3. Coleções Pré-históricas Digitalizadas em 3D

Leakey e Dzambazova (2013) apresentam em seu trabalho o projeto fóssil africano. As expedições iniciaram-se em 1968 no nordeste do Kenya, numa região chamada Turkana Basin. Nesse período, inúmeras descobertas de espécimes hominídeos e de fauna foram realizadas, geralmente armazenadas no Museu Nacional do Kenya ou no Instituto de Turkana Basin. Ultimamente, utilizando tecnologias de escaneamento 3D, eles têm realizando a digitalização 3D destas coleções e disponibilizados por meio de seu site, com a intenção de estudantes e professores possam explorar o passado.

A figura 6 mostra o exemplo da caveira e mandíbula que pertencem ao esqueleto do *Homo erectus* de cerca de 1,6 milhões de anos encontrado em Nariokotome no lado oeste do lago Turkana no Kenya, descoberto por Kamoya Kimeu em 1984. Muitos outros exemplos de modelos 3D de outros hominídeos, animais e ferramentas podem ser visualizados no site do projeto African Fossils.

Figura 6: Esqueleto de 1,6 milhões de anos.



Fonte: <<http://africanfossils.org/hominids/knmwt-15000-c?o=1>> Acesso em: 04/12/2019

IV. PROJETOS DE ENSINO COM O USO DE IMPRESSORAS 3D

Existem inúmeros projetos, no mundo, voltados para a aplicação de experimentos utilizando impressão 3D nas escolas. De acordo com a Sculpteo (2015), introduzindo esta

tecnologia nas escolas, mudam-se ambas as maneiras como estudantes aprendem e como professores ensinam. Além disso, proporciona um balanço entre as formas de teoria e prática, trazendo uma diferenciação da aplicação de ambientes virtuais.

A Sculpteo utiliza-se da seguinte filosofia Melhor uma ideia na mão que 10 ideias na cabeça. A impressão 3D exige do aluno a sua capacidade de resolver problemas, pensamento crítico e desenvolver habilidades de executar os projetos.

A seguir serão apresentadas algumas possibilidades de ensino com esta tecnologia por área de ensino.

IV.1. Aplicações em alguns Cursos

IV.1.1 Aplicações em Cursos de Geografia

Os mapas são intensivamente utilizados nos livros de geografia para representar os mais diversos tipos de dados, seja sobre a população, morfologia de terrenos ou mostrarem as delimitações físicas de países, de uma forma ou de outra, eles são ferramentas poderosas de comunicação, que simplificam a forma de entender e resumir uma grande quantidade de informações.

Imaginemos que possamos construir nossos próprios mapas, baseados em dados coletados por centros regionais de pesquisas e trazê-los ao mundo real. Conforme Sculpteo (2015) isto é totalmente possível. A figura 7 apresenta um mapa que utiliza-se de escala própria e mostra o potencial de modificar a cor e a altura da peça para demonstrar dados diferentes. A figura 8, por sua vez, mostra as divisões do Brasil por regiões.

Figura 7: Mapa personalizado impresso em 3D.



Fonte: <<https://www.sculpteo.com/blog/2015/11/17/3d-printing-in-education-from-elearning-to-emaking>>
Acesso em: 04/12/2019

Figura 8: Regiões do Brasil em 3D.

Fonte: <<https://www.myminifactory.com/object/regions-of-brazil-8858>> Acesso em: 04/12/2019

IV.1.2 Aplicações em Cursos de Matemática

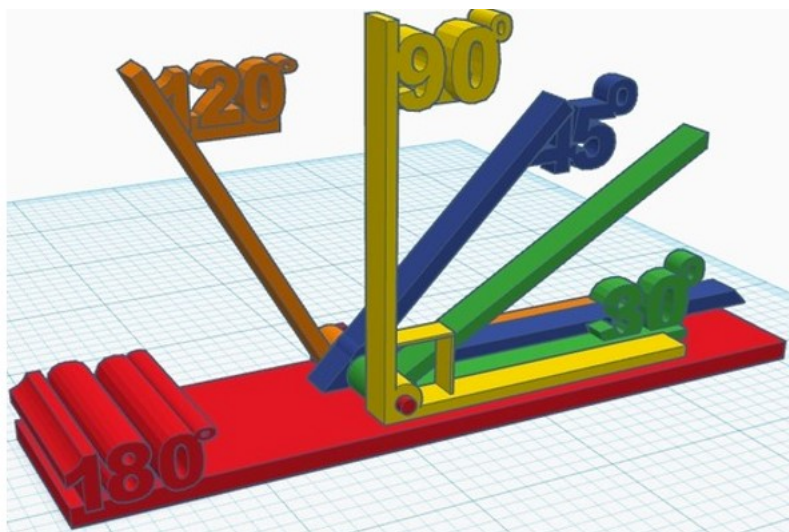
Knill e Slavkovsky (2013) afirma que a visualização sempre é um importante ingrediente para comunicar a matemática, seja por meio de figuras ou modelos, é muito importante que exista uma forma de expressar as ideias mesmo antes da apresentação formal da matemática. A visualização é crucial na formação de novas ideias e principalmente para a educação.

Como explanado por Sculpteo (2015), estudantes de matemática tem a possibilidade de imprimir seus problemas para explaná-los, explicá-los e ajudar a buscar um melhor entendimento dos conteúdos. Devido à essência abstrata, a matemática dificilmente é ensinada utilizando objetos, porém, a impressão 3D permite explorar esta possibilidade, diferentemente das tecnologias virtuais atualmente disponibilizadas.

Modelos impressos podem expressar vários tipos diferentes de questões como geometria e cálculo, além de poder ser possível construir e propor diversos tipos de desafios matemáticos. Uma escola com uma impressora seria capaz de construir um repositório de modelos 3D cada vez maior, construído pelos próprios alunos e professores, de forma a constantemente oferecer mais ferramentas para o ensino.

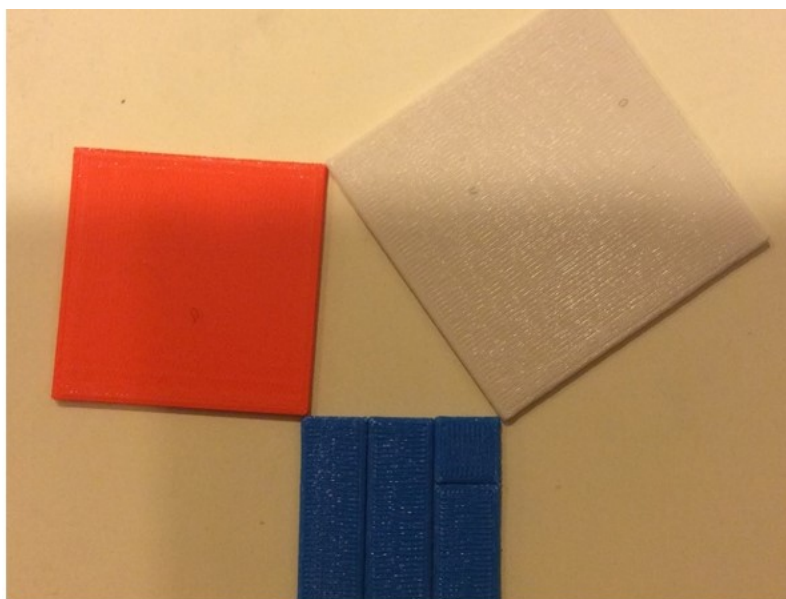
As figuras 9 e 10 a seguir apresentam alguns exemplos de aplicações que podem auxiliar o professor no ensino de conceitos. O primeiro caso é referente ao ensino de ângulos, enquanto o segundo caso sobre o teorema de Pitágoras.

Figura 9: Ângulos de 0 a 180 graus em 3D.



Fonte: <<http://www.thingiverse.com/thing:1736691>> Acesso em: 07/12/2019

Figura 10: Teorema de Pitágoras em 3D.



Fonte: <<http://www.thingiverse.com/thing:1696676>> Acesso em: 07/12/2019

IV.1.3 Aplicações em Cursos de História

A capacidade da impressão 3d em reproduzir réplicas baseadas em artigos únicos da história da humanidade como artefatos e fósseis, sem dúvidas, abre um horizonte de ricas possibilidades a educação, como apontado por Sculpteo (2015). Esta tecnologia dá a possibilidade aos estudantes de materializar objetos digitalizados em museus de todo o mundo, o que de outra forma, a maioria não teria acesso.

Incentivar os alunos a pesquisar sobre determinados eventos históricos e enviá-los em missão para a descoberta de itens que possam representar estes eventos, sem dúvidas, torna-se no mínimo um exercício da criatividade e da curiosidade, nada mais oportuno que duas das maiores qualidades de um investigador.

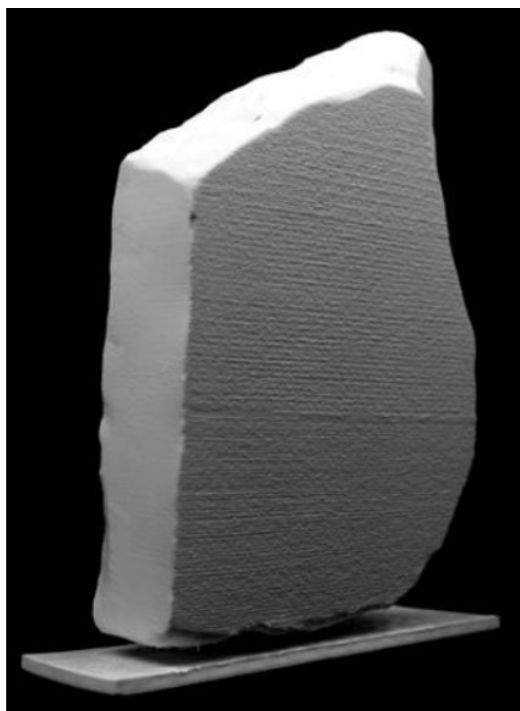
Atualmente existem inúmeras projetos de digitalização de esculturas famosas ao redor do mundo. Na figura 11 apresenta-se a figura digitalizada da famosa Pietà, escultura renascentista criada por Michelangelo e que está atualmente localizada na Basílica de São Pedro na Cidade do Vaticano. Na figura 12 está representado uma réplica da Pedra de Rosetta (The Rosetta Stone) que foi uma peça crucial para a compreensão moderna dos hieróglifos egípcios.

Figura 11: *A Pietà.*



Fonte: <<https://www.myminifactory.com/object/pieta-in-st-peter-s-basilica-vatican-3796>> Acesso em: 07/12/2019

Figura 12: *Pedra de Rosetta.*



Fonte: <<https://www.myminifactory.com/object/rosetta-stone-at-the-british-museum-london-4537>> Acesso em: 07/12/2019

IV.1.4 Aplicações em Cursos de Química e Tecnologias

A versatilidade da impressão 3D impulsiona a criatividade dos alunos na resolução de problemas. Especialmente para a física e química, onde a visualização de conceitos é essencial para o progresso intelectual dos alunos.

Seja criando a visualização de um conceito, ou seja, utilizando-se de arquivos disponíveis na internet para reproduzir experimentos, o aluno pode ser constantemente desafiado ao envolvimento ativo no desenvolvimento da disciplina.

Em química, pode-se citar como exemplo a aplicação em desenhos de modelos moleculares tridimensionais. Neste campo há possibilidades na criação de uma ampla variedade de estruturas. É possível criar modelos com uma representação precisa das moléculas, incluindo tanto os ângulos de ligação quanto a geometria (BERNARD e MENDEZ, 2020)

IV.2. Aplicações em Cursos de Física

Um exemplo de aplicação onde os conceitos físicos podem ser implementados foi apresentado por Lütolf (2013), onde alunos entre 14 e 15 anos foram envolvidos na preparação e impressão de uma cidade. Os alunos participaram de 16 aulas de 90 minutos, em que abordaram uma revisão sobre impressão 3D, noções básicas de desenho e foram dadas as regras para a criação da cidade. Uma apresentação final foi realizada para os pais dos alunos (figura 13). Neste exemplo podem ser explorados conceitos de clima, sustentabilidade, ciclo das águas, produção e consumo energético.

Figura 13: Cidade Desenvolvida e Impressa 3D por alunos entre 14 e 15 anos.



Fonte: LÜTOLE, G. Using 3D Printers at School: the Experience of 3drucken.ch. In: CANESSA, E.; FONDA, C.; ZENNARO, M.; *Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development*. Trieste, Italy, 2013. p.149-158.

O projeto High School Maker (<http://www.highschoolmaker.com/category/physics/>) trabalha com perspectiva metodológica do aprender fazendo e compartilhando. Em suas atividades discentes se beneficiaram da inclusão da impressão 3D. Essa iniciativa além de oportunizar a criação de equipamentos, ajuda os alunos na elaboração de objetos para resolução de problemas, como por exemplo a velocidade de um arco rolando uma rampa ou o tempo de voo de um projétil lançado no vácuo. Na figura 14 é possível experimentar conceitos de movimento rotacional num sistema de polias empilhadas de diâmetros decrescentes e barras de metal com diferentes pesos permitindo variar o momento de inércia.

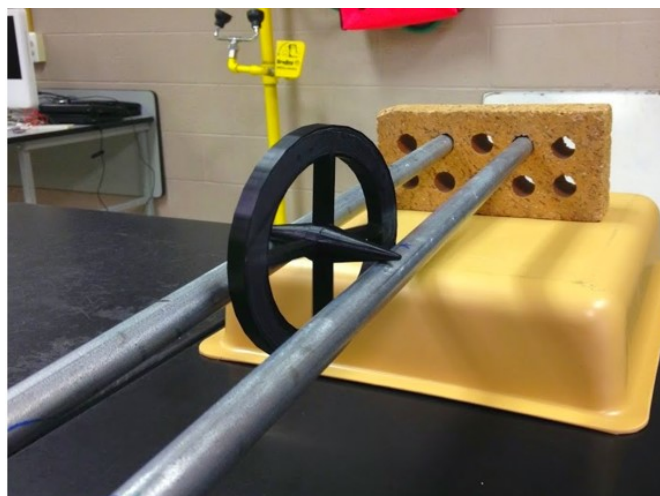
Na figura 15 há um aparelho construído para coletar dados de aceleração. Trata-se de um disco que rola um par de trilhos, sua descida é lenta o suficiente para perceber e obter dados para investigar a inércia e a energia rotacionais.

Figura 14: Sistema de polias empilhadas de diâmetros decrescentes.



Fonte: <<http://www.highschoolmaker.com/category/physics/>> Acesso em: 01/07/2020

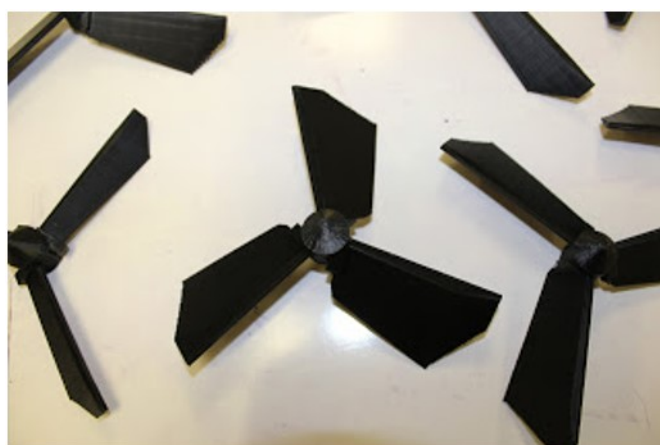
Figura 15: Disco que rola um par de trilhos.



Fonte: <<http://www.highschoolmaker.com/category/physics/>> Acesso em: 01/07/2020

Na figura 16 observamos um modelo de hélice para construção de uma pequena turbina eólica.

Figura 16: Hélices.



Fonte: <<http://www.highschoolmaker.com/category/physics/>> Acesso em: 01/07/2020

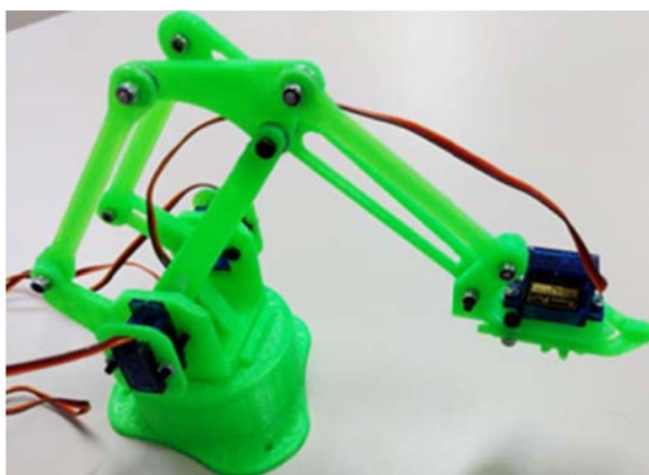
Na figura 17 é possível ver a impressão de um duplo cone, na atividade em que o cone sobe a rampa, e pode-se estudar as relações intrínsecas ao centro de massa.

Figura 17: *Duplo cone.*

Fonte: Aguiar, 2006

Ainda existem vários trabalhos que procuram criar equipamentos favoráveis ao ensino de física, como sistemas solares, protótipos para o estudo da aerodinâmica, aviões no intuito de verificar a força e o peso necessários para o lançamento e ganho de tempo de voo, assim como a velocidade para mantê-los no ar, rotações com polias engrenagens, máquinas simples, planos inclinados (<https://www.thetechedvocate.org/3d-printing-activities-try-classroom/>).

Com relação ao Ensino Fundamental, o estudo do momento de alavanca foi aplicado a doze participantes procedentes do 5º ao 9º ano (EVANGELISTA, 2019). As aulas foram instrumentalizadas por um braço robótico (Figura 18) construído em impressora 3D e controlado pela tecnologia Arduino.

Figura 18: *Braço Robótico.*

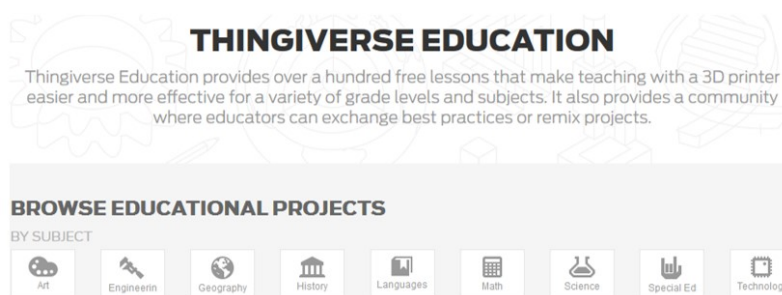
Fonte: Evangelista, 2019.

As impressoras 3D possibilitam a fabricação de objetos tridimensionais com detalhes complexos, isso sem o criador necessitar de habilidades de manufatura e fazer o uso de inúmeras ferramentas e recursos. Por essas características, a impressão 3D possibilita que os educadores facilmente consigam criar e produzir seus modelos físicos.

IV.2.1 Sites da Internet com Arquivos 3D Voltados para Educação

Existem diversos sites que disponibilizam gratuitamente arquivos com ideias de objetos que podem ser utilizados em sala de aulas em diversas matérias. Um dos mais utilizados é o Thingiverse que, embora disponibilize arquivos dos mais variados tipos, possui uma seção dedicada a experimentos e objetos voltados para a educação.

Figura 19: *Thingiverse*.



Fonte: <<http://www.thingiverse.com/education>>

O site é mantido pela MarketBot que é uma fabricante de impressoras 3D no EUA, porém, comporta projeto de entusiastas da tecnologia 3D do mundo inteiro que compartilham seus projetos de forma livre e gratuita. Os objetos estão divididos por áreas, como: história, geografia, matemática, artes, ciências etc (figura 14).

IV.3. Impacto da Impressão 3D no Ambiente Escolar

A partir do exposto neste trabalho, podemos ter uma pequena noção do tamanho do impacto que esta tecnologia proporciona no ambiente escolar estudando outros planetas ou os achados arqueológicos, ou seja, desde o estudo do universo a pré-história, podemos contar com a capacidade desta tecnologia em concretizar as digitalizações 3D, com o máximo de proximidade com os assuntos abordados pela possibilidade de adquirir os arquivos diretamente das principais agências das respectivas áreas, como a NASA ou a partir do Projeto Fóssil Africano por exemplo.

Acredita-se que a qualidade desta tecnologia que se sobrepõe a capacidade de causar curiosidade nos alunos é a de oferecer um meio para desenvolver a criatividade. A impressão 3D é um campo fértil para a criatividade, pela sua flexibilidade em produzir objetos com as mais variadas formas, tamanhos e aplicações. Utilizar-se desta flexibilidade para promover o exercício da criatividade é sem dúvidas elevar o desenvolvimento cognitivo dos alunos para outro patamar, principalmente, quando atrelado ao estudo das matérias aplicadas em sala de aula.

Pode-se afirmar que diante do exposto trabalhado neste artigo, a problemática levantada por este torna-se respondida por meio dos projetos apresentados e suas possíveis aplicações em sala de aula.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho apresentou-se um breve resumo sobre a tecnologia de impressão 3D, com um breve resumo sobre a história das impressões REPRAP de baixo custo. Em seguida foi apresentado alguns projetos que possuem possibilidade de impacto direto no desenvolvimento de várias matérias, como os arquivos disponibilizados pela NASA.

Por fim foram exploradas diversas possibilidades de aplicações correntes no mundo, da utilização da impressão 3D no ensino de matérias abordadas no ensino básico, como geografia, matemática e física. Torna-se importante observar que a maior qualidade desta tecnologia é a possibilidade dos estudantes transformarem os objetos em estudos em realidade e principalmente a capacidade de desenvolver sua criatividade.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Leonardo De Conti Dias. *Um processo para utilizar a tecnologia de impressão 3d na construção de instrumentos didáticos para o ensino de ciências*. 2016.
- BADEN, Tom et all, *Leveraging Open Hardware to alleviate the burden of COVID-19 on global health systems*. 2020.
- BERNARD, Pawe; MENDEZ, James D. Drawing in 3D: Using 3D printer pens to draw chemical models. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 2020.
- CANESSA, E. *Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development*. In: CANESSA, E.; FONDA, C.; ZENNARO, M.; *Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development*. Trieste, Italy, 2013. p.13-18.
- Eath & Space Science News (EOS)*. Disponível em: <<https://eos.org/articles/3-d-models-put-scientists-students-in-touch-with-planets>>. Acesso em: 4 dez. 2019.
- EVANGELISTA, F. L. ; OLIVEIRA, L. M. ; SOUZA, M. M . Relato do ensino de momento de alavanca e lógica de programação no Ensino Fundamental por meio de plataformas eletrônicas Download. *A Física na Escola (Online)*, v. 17, p. 35-42, 2019.
- FIOR, G. *Plugnplay, do-it-yourself kits and pre-assembled 3D printers*. In: CANESSA, E.; FONDA, C.; ZENNARO, M.; *Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development*. Trieste, Italy, 2013. p.67-74.
- FONDA, C. *A practical guide to your first 3D print*. In: CANESSA, E.; FONDA, C.; ZENNARO, M.; *Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development*. Trieste, Italy, 2013. p.25-60.
- GONG, Hua et all, *Custom 3D printer and resin for 18 mCE 20 m microfluidic flow channels*. *Lab on a Chip*, v. 17, n. 17, p. 2899-2909, 2017.
- JÚNIOR, Adauri Silveira Rodrigues et all, Um material potencialmente significativo para o ensino da engenharia civil utilizando impressora 3D e realidade aumentada: uma experiência com alunos do ensino médio e do ensino superior/A potentially significant material for the teaching of civil engineering using 3D printer and augmented reality: an experience with students of high school and higher education. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 3, p. 10855-10868, 2020.
- KNILL, O. SLAVKOVSKY, E. *Illustrating Mathematics Using 3D Printers*. In: CANESSA, E.;

- FONDA, C.; ZENNARO, M.; Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development. Trieste, Italy, 2013. p.93-118.
- LACAZE, Alberto Daniel; MURPHY, Karl Nicholas. *Handheld 3D printer*. U.S. Patent n. 10,569,459, 25 fev. 2020.
- LEAKEY,L.; DZAMBAZOVA, T. *Prehistoric Collections and 3D Printing for Education*. In: CANESSA, E.; FONDA, C.; ZENNARO, M.; Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development. Trieste, Italy, 2013. p.25-60.
- LÜTOLF, G. *Using 3D Printers at School: the Experience of 3drucken.ch*. In: CANESSA, E.; FONDA, C.; ZENNARO, M.; Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development. Trieste, Italy, 2013. p.149-158.
- NASA. Disponível em: <<https://nasa3d.arc.nasa.gov/>>. Acesso em: 4 dez. 2019.
- NASA. *NASA Challenges Students to Create 3-D Designs for Astronaut Health*. 2016. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/feature/nasa-challenges-students-to-create-3-d-designs-for-astronaut-health>>. Acesso em: 4 dez. 2019.
- NASA. *Space Tools On Demand:3D Printing in Zero G*, 2014. Disponível em: <https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/3D_Printing-v3.pdf>. Acesso em: 4 dez. 2019.
- NIH 3D PRINT EXCHANGE. Disponível em: <<https://3dprint.nih.gov/>>. Acesso em: 4 dez. 2019.
- ROSSI, P. CAMPANA, C. *3D Printed Anatomic Replicas for Medical and Educational Purposes in Dental Surgery: Practical Projects from a Sustainable Development Point of View*. In: CANESSA, E.; FONDA, C.; ZENNARO, M.; Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development. Trieste, Italy, 2013. p.183-189.
- SCULPTEO, 2015. *3D Printing in education: from eLearning to eMaking*. Disponível em: <<https://www.sculpteo.com/blog/2015/11/17/3d-printing-in-education-from-elearning-to-emaking/>>. Acesso em: 4 dez. 2019.
- SHEN, Zhen et all, *3D printer spray nozzle structure and method thereof for controlling speed and precision*. U.S. Patent n. 10,500,778, 10 dez. 2019.
- STRATASYS. *Tecnologia FDM*. Disponível em: <<http://www.stratasys.com/br/impressoras-3d/technologies/fdm-technology>>. Acesso em: 3 dez. 2019.
- THE OFFICE OF JEREMY RIFKIN. Disponível em: <<http://www.foet.org/JeremyRifkin.htm>>. Acesso em: 3 dez. 2019.
- WANG, Feiyue et all, *3D printer spray nozzle capable of adjusting cross section areas of extruded materials and method for controlling printing speed and precision of the 3D printer spray nozzle*. U.S. Patent n. 10,016,929, 10 jul. 2018.



Sistemas Complexos aplicado a modelos epidemiológicos

Complex Systems applied to epidemiological models

JOÃO PAULO DE OLIVEIRA LIMA*¹

¹Instituto de Física – Universidade de Brasília

Resumo

Este trabalho visa discutir sobre sistemas complexos a partir dos modelos epidemiológicos SIR, SIRS, SEIR e SEIRS. É esperado que fique demonstrado a importância do estudo dos sistemas complexos, uma vez que este nos ensina também a reconhecer as limitações de modelos e mesmo de previsões via equações diferenciais. Esta área de estudo poderia ser tratada com outras abordagens, considerando que é uma área multidisciplinar, mas devido a esse momento histórico da pandemia do COVID-19, entender como modelos epidemiológicos funcionam é de suma importância.

Palavras-chave: *Sistemas Complexos, Modelos epidemiológicos, Sistemas dinâmicos.*

Abstract

This work aims to discuss about complex systems based on the epidemiological models SIR, SIRS, SEIR e SEIRS. It is expected that the importance of studying complex systems will be demonstrated, since it also teaches us to recognize the limitations of models and even predictions via differential equations. This study area could be treated with other approaches, considering that it is a multidisciplinary area, but due to this historical moment of the COVID-19 pandemic, understanding how epidemiological models work is of paramount importance.

Keywords: *Complex Systems, Epidemiological Models, Dynamic Systems.*

I. INTRODUÇÃO AOS SISTEMAS COMPLEXOS

O estudo sobre sistemas complexos abrange muitas áreas, tais como sociologia, economia, biologia, física, sistemas nervosos e claro, epidemiologia. O que essas áreas tem em comum é que são sistemas ditos dinâmicos. Isso significa que existem eventos que podem ser descritos por uma função a qual descreve a dependência temporal em um espaço de estados.

*joaopaulo.olima06@gmail.com

Na natureza e na sociedade vemos diversas vezes que fenômenos inesperados ou difíceis de entender acontecem, e isso se deve ao fato de que existe uma quantidade de agentes interagentes muito grande agindo localmente e que são capazes de gerar resultados não locais, em outras palavras, é o famoso efeito borboleta. Segundo (MITCHELL, 2009), um sistema complexo é "um sistema com um grande número de agentes interagentes que exhibe comportamentos emergentes não triviais e auto organizados". Vale dizer que emergentes significam efeitos de larga escala e auto organizados, se referindo a um comportamento organizado sem uma liderança. Um ótimo exemplo é o comportamento das formigas, que apesar de não possuírem um líder, são dotadas de grande organização e eficiência.

Talvez o ponto principal seja entender que o conhecimento não é fragmentado, mas compartilhado. Para isso é necessário aprender a olhar para os problemas de maneira global gerado pelas interações locais. Para entender sistemas complexos, várias ferramentas matemáticas podem e devem ser usadas quando possível. Como ressalta (MELOTTI, 2009), "O estudo de sistemas complexos tenta explicar o comportamento que esses sistemas (sistemas difíceis de descrever) produzem sem a necessidade de obter equações."

Neste trabalho, trataremos dos modelos epidemiológicos SIR, SIRS, SEIR e SEIRS, veremos a seguir o que cada um significa. Cada tipo de infecção viral terá um modelo mais apropriado, de modo que o objetivo aqui não será tratar de uma doença específica, mas apenas mostrar o comportamento para a curva de indivíduos suscetíveis, infectados, recuperados etc, para cada modelo.

II. EPIDEMIOLOGIA

A epidemiologia busca estudar como as doenças se difundem entre os seres humanos. Portanto, é um campo da ciência que inevitavelmente terá que lidar com diferentes variáveis, como fatores sociais, ambientais e genéticos. Logo, vemos aqui implicitamente que se trata de um sistema complexo, pois não há uma relação clara de causa e efeito, na verdade, poucas coisas tem.

No momento de escrita deste trabalho o mundo passa por uma pandemia (COVID-19), e a epidemiologia ganhou espaço na mídia e calorosas discussões a respeito. Pouco tempo atrás, houveram sérias preocupações com a gripe suína e há aproximadamente 100 anos o mundo foi assolado pela pandemia da gripe espanhola que matou milhões de pessoas. Podemos notar que surtos epidemiológicos não são eventos escassos, e com o aumento da população mundial, degradamento do meio ambiente, desequilíbrio ecológico e a alta desigualdade social em grande parte dos países, as quais geram situações de extrema pobreza, fazem com que essas situações tendam a acontecer com maior frequência.

A dinâmica do texto seguirá a seguinte lógica. Primeiramente trataremos explicações acerca de cada modelo, bem como suas equações diferenciais e os respectivos gráficos. Ao final, temos um apêndice no qual será fornecido o código do programa para o modelo SIR sem dinâmica vital na linguagem *Python*, uma vez que ele é o programa base para todos os outros. Logo, para os gráficos dos outros modelos, as mudanças são muito simples de serem implementadas.

III. MODELO EPIDEMIOLÓGICO SIR E SIRS

Para o desenvolvimento sobre os modelos epidemiológicos, a principal referência foi o site (Bill & Melinda Gates Foundation, 2021).

Veremos agora como funciona o modelo SIR (Suscetível, Infectado, Recuperado) e SIRS (Suscetível, Infectado, Recuperado, Suscetível). O primeiro modelo considera que os indivíduos recuperados ganham imunidade total contra o vírus adquirido. Em contrapartida, o segundo permite a reinfecção, pois considera que a imunidade vai reduzindo com o tempo.

O diagrama abaixo visa mostrar de maneira esquemática como os dois modelos funcionam, sendo que a linha tracejada representa a reinfecção (SIRS).

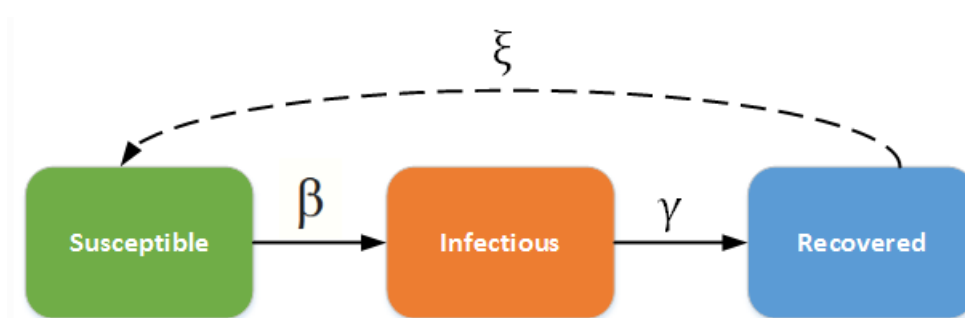


Figure 1: Representação esquemática dos modelos epidemiológicos SIR e SIRS. Fonte:(Bill & Melinda Gates Foundation, 2021)

- β : Taxa de infecção. Quanto maior for o beta, maior a probabilidade de transmissão entre um ser infectado e um suscetível.
- $\gamma = \frac{1}{D}$: Taxa de recuperação. Por isso é definida como sendo o inverso do tempo da infecção (D).
- ξ : Taxa de reinfecção para o modelo SIRS.

Há uma consideração muito importante que deve ser feita ao formular um modelo epidemiológico, ou que seja para a implementação de um específico para uma determinada doença. É preciso reconhecer se a doença tem potencial para durar por muito tempo, ou se possui uma taxa de morte elevada, pois, caso afirmativo, deve se levar em consideração o número de mortes e nascimentos no período ativo da doença. Chamamos isso de *dinâmica vital*. Isso é relevante pois a modelagem via equação diferencial será diferente.

III.1. SIR sem dinâmica vital

Aqui teremos o vínculo $N = S + I + R$, em que N é a população total. Vemos abaixo o comportamento previsto possível para uma epidemia seguindo esta modelagem. Vale lembrar, que para todos os exemplos aqui tratados, mesmo nos que consideram dinâmica vital, considerarei a taxa de mortalidade igual a de nascimento. Sabendo disso, podemos

colocar as equações diferenciais como:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\frac{\beta SI}{N}, \\ \frac{dI}{dt} &= \frac{\beta SI}{N} - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I. \end{aligned} \quad (1)$$

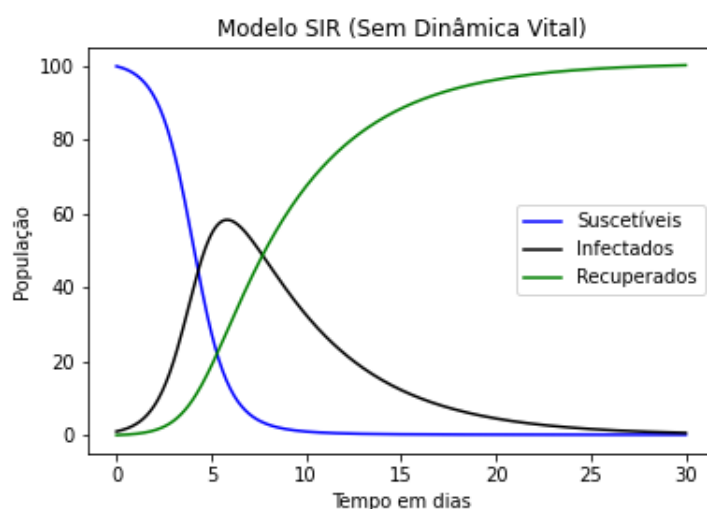


Figure 2: Dinâmica epidemiológica do modelo SIR sem dinâmica vital. Fonte: Autoral.

Para entender as equações aqui apresentadas, deve-se refletir sobre o que é esperado que ocorra com o sistema dado um tempo para cada grupo de indivíduos. Dito isso, em um conjunto de indivíduos suscetíveis a uma doença, é esperado que os suscetíveis decresçam com o tempo ao ser multiplicado pela taxa de infecção β , por isso o sinal negativo. A taxa de variação dos infectados, em contrapartida, aumenta com o número de infectados e cai quanto maior for a taxa de recuperação γ , isso explica a alternância entre os sinais. Por último, a taxa de recuperados irá depender apenas dos indivíduos que já tiveram a doença, por isso a dependência única à taxa de recuperação.

Pode-se notar que como estamos falando de uma epidemia não letal, os suscetíveis, bem como os recuperados atingem valores estáveis muito rápido.

III.2. SIR com dinâmica vital

Quando consideramos a chamada dinâmica vital, a descrição do sistema passa a ser mais completa, e conseqüentemente mais complexa. Uma vez que teremos indivíduos nascendo, o que implica em um aumento no número de seres suscetíveis à doença e temos indivíduos morrendo, de modo que ao considerar um intervalo de tempo grande, a tendência é que a doença atinja um estado estacionário e não seja extinta. Sendo assim, as equações 1 podem

ser modificadas para:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \mu N - \frac{\beta SI}{N} - \nu S, \\ \frac{dI}{dt} &= \frac{\beta SI}{N} - \gamma I - \nu I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \nu R. \end{aligned} \quad (2)$$

Aqui temos μ e ν como sendo as taxas de nascimento e morte respectivamente. Essas modificações são consistentes, pois para o grupo dos suscetíveis, estamos contabilizando os novos indivíduos introduzidos no sistema μN bem como a morte de pessoas suscetíveis à doença νS . Deve-se contabilizar agora as mortes para os infectados e os recuperados, o que explica o sinal negativo nas duas últimas expressões.

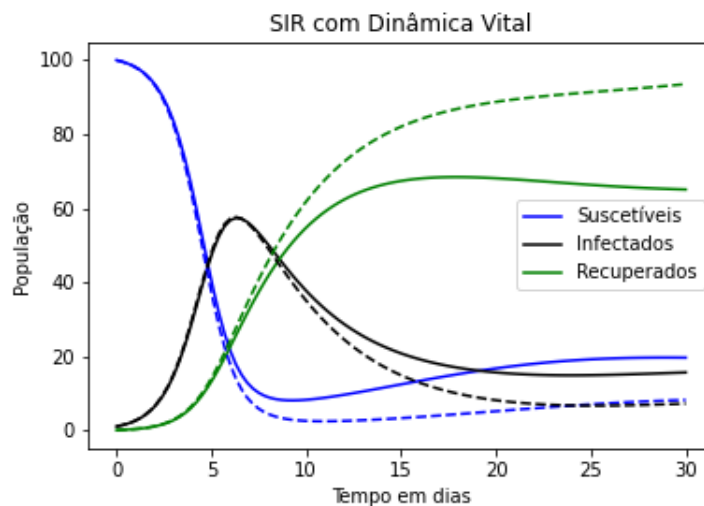


Figure 3: Dinâmica epidemiológica do modelo SIR com dinâmica vital. Fonte: Autoral.

Para a produção desta simulação, foram adicionadas ao código 1 os termos referentes a morte e nascimento dentro da estrutura de repetição *for*. A linha contínua representa uma taxa de mortalidade e de nascimento igual a 0.05 e a tracejada 0.01 (valores arbitrários).

III.3. SIRS sem dinâmica vital

Como já dito anteriormente, este modelo considera a taxa de reinfecção ζ . Sendo assim, a modelagem matemática pode ser simplesmente modificada em relação ao caso SIR, adicionando os indivíduos recuperados que agora passam a ser suscetíveis ζR e subtraindo este mesmo termo dos recuperados

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= -\frac{\beta SI}{N} + \zeta R, \\ \frac{dI}{dt} &= \frac{\beta SI}{N} - \gamma I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \zeta R. \end{aligned} \quad (3)$$

No gráfico 4 há uma abordagem diferente, pois os indivíduos suscetíveis a reinfecção foram considerados separadamente. Na imagem, esse grupo de pessoas está na cor vermelha.

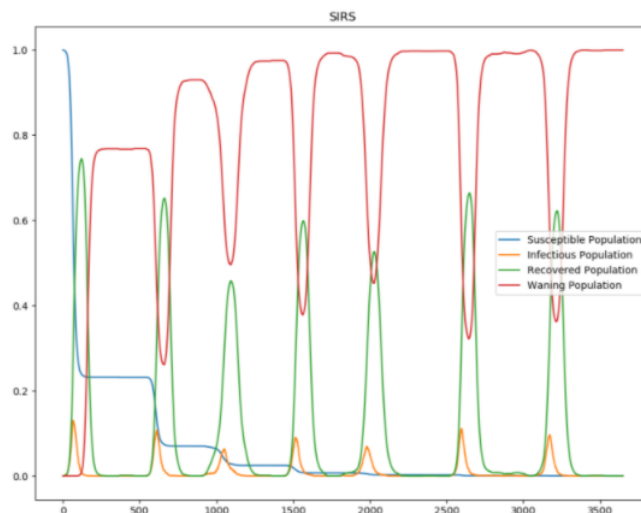


Figure 4: Dinâmica epidemiológica do modelo SIRS sem dinâmica vital. Fonte: (Bill & Melinda Gates Foundation, 2021).

No próximo gráfico, foi utilizado o código 1 adicionando o termo $\xi = 1/500$. A diferença com relação ao último apresentado, é que os indivíduos que perdem a imunidade ao vírus são reintroduzidos ao grupo dos suscetíveis.

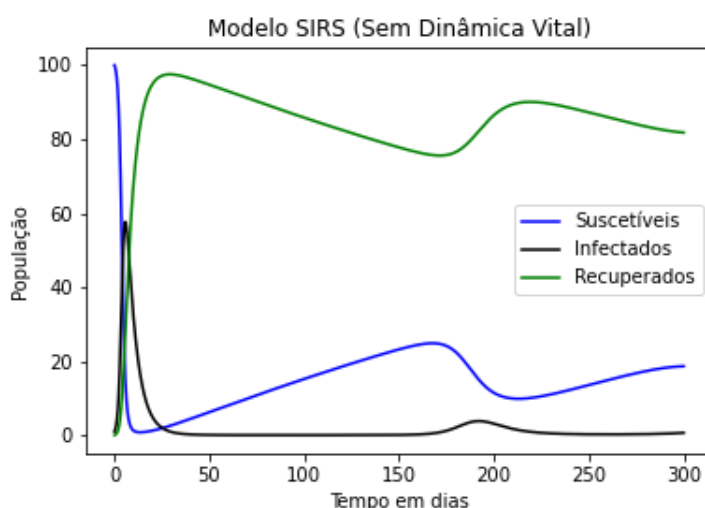


Figure 5: Dinâmica epidemiológica do modelo SIRS sem dinâmica vital. Fonte: Autoral

III.4. SIRS com dinâmica vital

Novamente, adicionamos os termos correspondentes a taxa de mortalidade ν e natalidade μ :

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= \mu N - \frac{\beta SI}{N} + \zeta R - \nu S, \\ \frac{dI}{dt} &= \frac{\beta SI}{N} - \gamma I - \nu I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \zeta R - \nu R.\end{aligned}\tag{4}$$

Para gerar esta figura, foi utilizado $\mu = \nu = 0.005$ para o traço contínuo e para o tracejado 0.001. É interessante comparar com a figura 5 e notar a diferença de comportamento, apesar dos suscetíveis e recuperados tenderem para mais ou menos os mesmos valores.

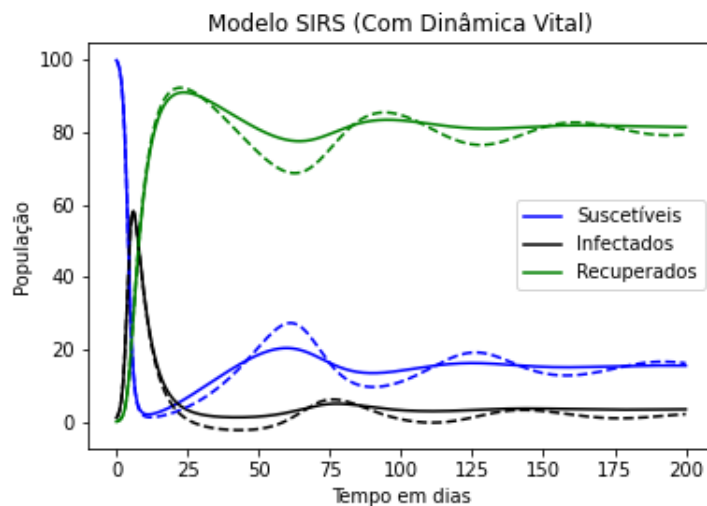


Figure 6: Dinâmica epidemiológica do modelo SIRS com dinâmica vital. Fonte: Autoral

IV. MODELO EPIDEMIOLÓGICO SEIR E SEIRS

Para este tipo de modelagem, a grande diferença com relação ao sistema SIR, é que agora possuímos um tempo de incubação. Ou seja, o sujeito que é infectado não necessariamente transmite o vírus, só o fará caso esteja com o vírus há mais tempo que o período de incubação, que é quando o vírus já se replicou o suficiente para que haja o contágio. Novamente, faremos a diferença entre os modelos em que há mortes e nascimentos e os que não há.

O diagrama seguinte contém basicamente as mesmas informações do modelo anterior, com a diferença do termo σ . Esse termo representa a taxa de incubação, ou seja, ele representa a taxa com a qual indivíduos infectados se tornam infecciosos.

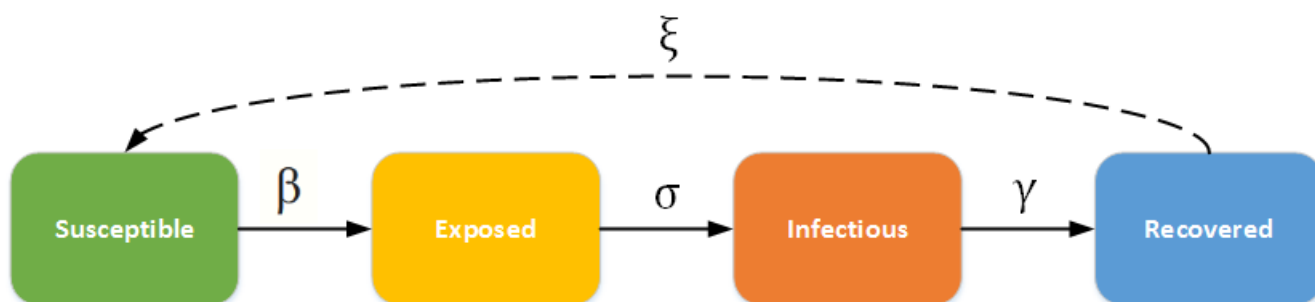


Figure 7: Representação esquemática dos modelos epidemiológicos SIR e SIRS. Fonte: (Bill & Melinda Gates Foundation, 2021)

IV.1. SEIR sem dinâmica vital

Vemos que o conjunto de equações são iguais ao do modelo SIR, com excessão agora do grupo de *expostos*. A sua modelagem consiste em considerar os indivíduos infectados mas não transmissores do vírus, menos aqueles que excederam o período de incubação. Logo, ficamos com as equações;

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= -\frac{\beta SI}{N}, \\
 \frac{dE}{dt} &= \frac{\beta SI}{N} - \sigma E, \\
 \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I, \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I.
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

As implicações diretas ao considerar um período de latência da doença, é que a doença irá demorar mais tempo para se disseminar entre a população. Compare a figura 2 em que o pico de infectados foi por volta do sexto dia, e neste caso da figura 8, temos o pico por volta do dia 20.

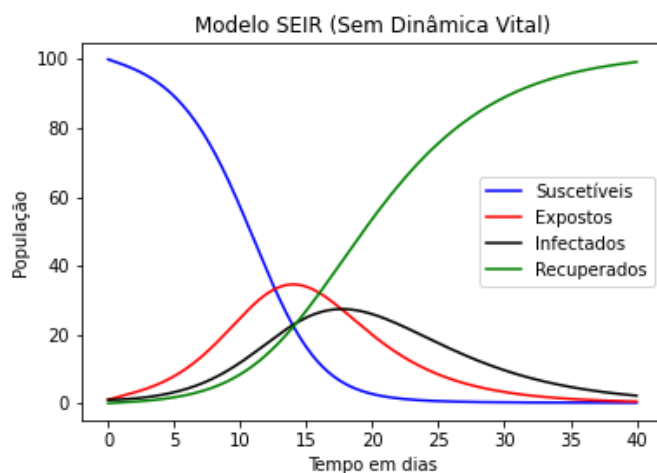


Figure 8: Dinâmica epidemiológica do modelo SIRS com dinâmica vital. Fonte: Autoral

Aqui foi utilizado $\sigma = \frac{1}{5}$ e foi adicionado à estrutura de repetição *for* do código 1 o vetor para os indivíduos expostos, iniciando com o valor 1.

IV.2. SEIR com dinâmica vital

Tal como vimos para o modelo SIR, habilitar a dinâmica vital (nascimentos e mortes) pode prolongar a ocorrência de uma epidemia, pois o estoque de suscetíveis é sempre renovado. Sendo assim, as equações podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \mu N - \nu S - \frac{\beta SI}{N}, \\ \frac{dE}{dt} &= \frac{\beta SI}{N} - \sigma E - \nu E, \\ \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I - \nu I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \nu R. \end{aligned} \tag{6}$$

No gráfico 9 temos a linha contínua que representa uma mortalidade de 0.5% e a tracejada igual a 0.2%.

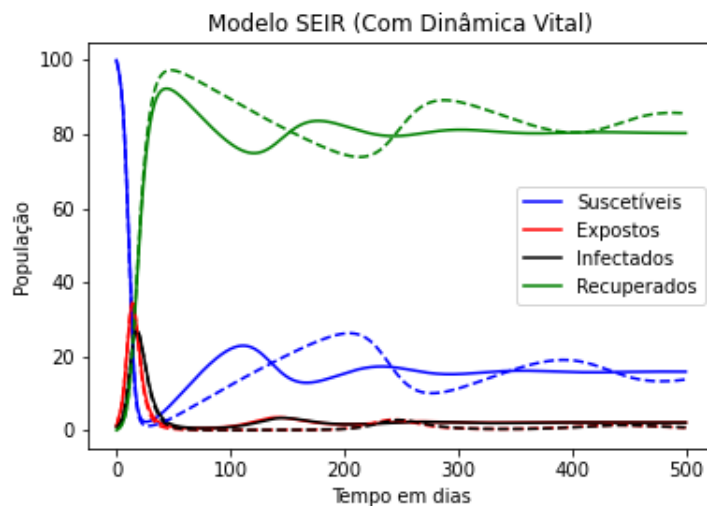


Figure 9: Dinâmica epidemiológica do modelo SEIR com dinâmica vital. Fonte: Autoral

Assim como foi explicado sobre a imagem 4, ficamos com a seguinte representação.

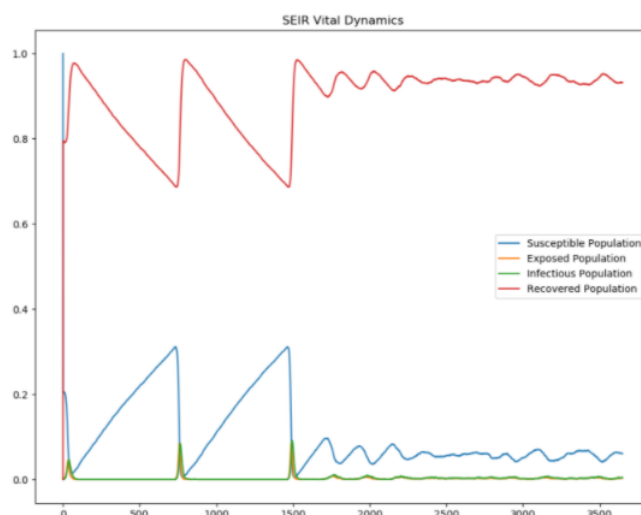


Figure 10: Dinâmica epidemiológica do modelo SEIR com dinâmica vital. Fonte: (Bill & Melinda Gates Foundation, 2021)

IV.3. SEIRS sem dinâmica vital

Considerando a possibilidade de reinfeção, como foi feito para o caso SIRS, ficamos com o seguinte conjunto de equações diferenciais e gráfico:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= -\frac{\beta SI}{N} + \zeta R, \\
 \frac{dE}{dt} &= \frac{\beta SI}{N} - \sigma E, \\
 \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I, \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \zeta R.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

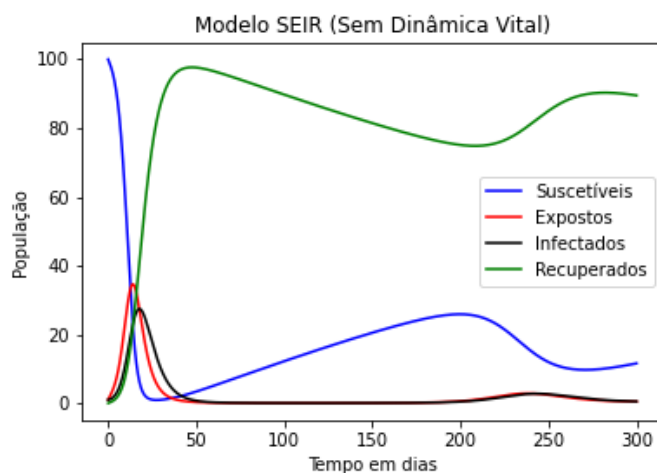


Figure 11: Dinâmica epidemiológica do modelo SEIRS sem dinâmica vital. Fonte: Autoral

A figura obtida é muito semelhante à correspondente do modelo SIRS, o que era de se esperar visto que as equações diferem apenas por termos parte da população infectada, porém não infecciosa, e é isso que vemos no gráfico. Percebe-se também que o pico de expostos ocorre antes do pico de infectados, o que é natural de se esperar.

IV.4. SEIRS com dinâmica vital

De modo análogo ao caso SIRS, temos o seguinte conjunto de equações diferenciais e gráfico:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dt} &= \mu N - \frac{\beta SI}{N} + \zeta R - \nu S, \\ \frac{dE}{dt} &= \frac{\beta SI}{N} - \sigma E - \nu E, \\ \frac{dI}{dt} &= \sigma E - \gamma I - \nu I, \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma I - \zeta R - \nu R. \end{aligned} \tag{8}$$

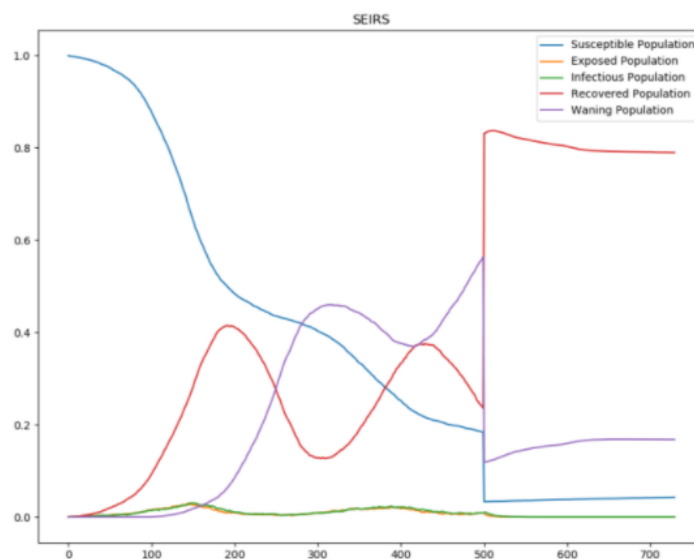


Figure 12: Dinâmica epidemiológica do modelo SEIRS com dinâmica vital. Fonte: (Bill & Melinda Gates Foundation, 2021)

O gráfico, bem como o 5, considera o grupo de pessoas reinfectadas como um conjunto separado das pessoas suscetíveis. Já a última representação foi feita de acordo com um código similar ao 1 com mudanças triviais. Nota-se a relação entre expostos e infectados é coerente, pois o pico do primeiro é maior em intensidade e ocorre um pouco antes do segundo.

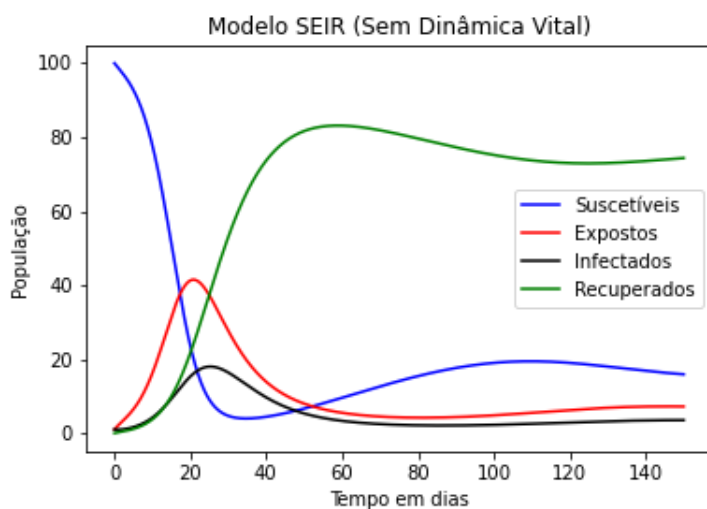


Figure 13: Dinâmica epidemiológica do modelo SEIRS com dinâmica vital. Fonte: Autoral

V. CONCLUSÃO

Foi discutido neste trabalho a relação entre modelos epidemiológicos e sistemas complexos. Pode-se notar que há uma correspondência entre aquilo que se esperava obter graficamente e teoricamente, com o obtido com um código simples. É interessante perceber que comportamentos curiosos foram obtidos, sendo estes fáceis de serem ignorados se não prestamos atenção nos parâmetros utilizados, bem como o tempo da doença, o que evidencia uma característica de sistemas com algum grau de complexidade.

Deve-se dizer que como o teor deste artigo é ilustrativo, a quantidade de dias representado no eixo das abcissas foi aquele no qual o comportamento interessante se verificava. Por fim, o estudo de sistemas complexos é uma vasta e promissora área, que permeia grande parte do nosso dia a dia, sem mesmo que percebamos. Estudar sistemas complexos nos faz lembrar que ser um cientista não é necessariamente saber com exatidão as respostas para os diversos problemas propostos. Antes disso, é extremamente necessário conhecer os modelos, variáveis e as aproximações com as quais de fato estamos lidando.

REFERENCES

Bill & Melinda Gates Foundation. *SIR and SIRS models*. Institute for Disease Modeling (IDM), 2021. Disponível em: <<https://docs.idmod.org/projects/emod-hiv/en/latest/model-sir.html>>. Acesso em: 05 jan. 2021. 61, 64, 66, 68, 69

LINGE SVEIN; PETTER LANGTANGEN, H. *Programming for computations-MATLAB/Octave*. [S.l.]: Springer Nature, 2016. 71

MELOTTI, G. *Aplicação de autômatos celulares em sistemas complexos: Um estudo de caso em espalhamento de epidemias*. [S.l.: s.n.], 2009. 60

MITCHELL, M. *Complexity: A guided tour*. [S.l.]: Oxford University Press, 2009. 60

VI. APÊNDICE

O código em Python abaixo representa a seguinte situação hipotética. Supõe-se uma população isolada de 101 habitantes, no qual 1 está infectado e os outros 100 estão suscetíveis a adquirir a enfermidade. Os parâmetros β e γ foram calculados considerando que ao analisar a dinâmica da propagação do vírus, notou-se que a diferença entre dois levantamentos estatísticos diários apresentou um aumento de 25 infectados. Logo o número de suscetíveis foi reduzido em 25 pessoas. O gamma nos diz que dentre as 25 pessoas infectadas, 5 se recuperaram em um dia. O modo do cálculo bem como o esqueleto do programa foi baseado no livro (LINGE SVEIN; PETTER LANGTANGEN, 2016).

```

from numpy import zeros, linspace
import matplotlib.pyplot as plt
beta = 25/(75*25)
gamma = 5/25
h = 0.1
df = 30
dn = int(df/h)
t = linspace(0, dn*h, dn+1)
S = zeros(dn+1)
I = zeros(dn+1)
R = zeros(dn+1)
S[0] = 100
I[0] = 1
R[0] = 0
for n in range(dn):
    S[n+1] = S[n] - h*beta*S[n]*I[n]
    I[n+1] = I[n] + h*beta*S[n]*I[n] - h*gamma*I[n]
    R[n+1] = R[n] + h*gamma*I[n]
fig = plt.figure()
plt.plot(t, S, color='blue', label='Suscetíveis')
plt.plot(t, I, color='black', label='Infectados')
plt.plot(t, R, color='green', label='Recuperados')
plt.xlabel('Tempo em dias')
plt.ylabel('População')
plt.title('Modelo SIR (Sem Dinâmica Vital)')
plt.legend()
plt.savefig('SIR_sem_DV.png')

```

Listing 1: Código PYTHON do método de Euler de integração, aplicado ao modelo epidemiológico SIR