

Physicae Organum

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 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 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

Estamos lançando mais uma edição de nossa Revista *Physicae Organum*. Com isso lançamos o quarto número da Revista, ou seja, quatro semestres consecutivos. Esse número, o segundo de 2016 marca, entretanto, um momento de amadurecimento. A Revista já solicitou e aguarda com otimismo, a inclusão de suas atividades como parte de um projeto de Extensão da Universidade de Brasília, ganhando assim, reconhecimento institucional. O doi (digital object identifier) está em vias de se tornar uma realidade também.

Do ponto de vista dos artigos, o presente número assinala uma inflexão positiva, uma vez que apresenta artigos advindos de outros estados e autores cuja origem não é o próprio Instituto. Também tem ampliado seu corpo de revisores, com membros de outras instituições que se apresentaram voluntariamente para contribuir com o processo de revisão dos artigos.

Artigos advindos do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física também começam a ser submetidos e são particularmente bem vindos, uma vez que a Revista passa a buscar uma articulação especial entre tais artigos e as Escolas de Ensino Médio e Fundamental, apresentando-se como um locus privilegiado de discussão acadêmica dos temas precípuos a tais Escolas.

Esperamos receber, cada vez mais, contribuições que engrandecem a Revista, exortando os professores do Instituto de Física da Universidade de Brasília e demais Universidades do Brasil, a incentivar seus alunos a publicar seus resultados aqui.

Olavo Leopoldino da Silva Filho Editor-Gerente, *Physicae Organum*

Sumário

- 1 **Ciência Tecnologia Governo e Objetivos Sociais e o Papel da Termodinâmica de Sistemas em Não Equilíbrio nas Tecnologias Avançadas Atuais** **I**
- 2 **Proposta de sequência didática aplicando um monocórdio e o uso de elementos musicais perceptuais como estruturantes para o ensino de conceitos de física ondulatória** **II**
- 3 **Força gravitacional exercida por uma casca esférica sobre um corpo acelerado dentro dela** **III**
- 4 **Expediente Physicae Organum** **IV**

Science, Technology, Government and Societal Goals, and The Role of Thermo-Statistics of Non-Equilibrium Systems in Present Day Advanced Technologies

CLÓVES G. RODRIGUES*

ANTÔNIO A. P. SILVA[†] CARLOS A. B. SILVA[‡]

ÁUREA R. VASCONCELLOS, JOSÉ GALVÃO RAMOS, ROBERTO LUZZI[§]

Abstract

In this contribution we present some general considerations on the question of the aspect and interrelationships of the quadruple “realms” of Science, Technology, Government and Society, and the role of Thermo-Statistics of non-equilibrium systems that are present in the nowadays highly sophisticated technologies and industrial processes that contribute to the wealth and well being of world society. In present days remarkable development of all the modern technology, essential for the welfare and progress of the global society, imposes an immense stress on basic Physics, and consequently on Thermo-Statistics. We do face situations like, for example: fluids with complex structures, in electronics and photonics involving systems out of equilibrium, nano-technologies, low-dimensional systems, non-linear and ultrafast processes in semiconductors devices, and soft matter. All these topics are important for technological improvement in industries like, for example: in medical engineering, petroleum, food, polymers, cosmetics, electronics and optoelectronics. The construction of a Non-Equilibrium Statistical Ensemble Formalism (NESEF for short) is briefly described, and we emphasize that the NESEF can deal, within a certain degree of triumph, with some of the situations above described

Palavras-chave: science, technology, semiconductors, statistical.

*Escola de Ciências Exatas e da Computação, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Caixa Postal 86, 74605-010 Goiânia, Goiás, Brazil e-mail: cloves@pucgoias.edu.br

[†]Departamento de Ciências Exatas, Universidade Federal de Lavras, 37200-000 Lavras, MG, Brazil

[‡]Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 12228-901, São José dos Campos, SP, Brazil

[§]Condensed Matter Physics Department, Institute of Physics “Gleb Wataghin”, University of Campinas-Unicamp, 13083-970, Campinas, SP, Brazil

I. INTRODUCTION: SCIENCE, TECHNOLOGY, SOCIETY, AND GOVERNMENT

The binomial *Science & Technology* (S&T) is inseparable. It is said, quite rightly, that Science is the mother of technologies, which, in a symbiotic process, are involved in a positive feedback mechanism. For example, in this context, Thermodynamics, a scientific discipline which deals with the connection between heat and mechanical work, can be considered an offshoot of the Industrial Revolution - initiated in the United Kingdom in the XVIII century for in continuation to get extended through most of the world - in the sense that technology propitiates or, better to say, forces the improvement of Science. It is also worth emphasizing that the binomial S&T is the locomotive of the world economy and therefore of the wealth of nations and the well being of world society. The economic growth of nations and therefore, as said, the corresponding well being of their societies, is expected to be enhanced when S&T is accompanied with what is dubbed as the "mantra" of *Innovation*. It has been stated that innovation should incorporate not just technological innovation, but social innovation and also nurturing innovative people, in what society has to become more conducive to innovation and provide opportunities for risk-taking, adventurous people. Also, that even though investments in science and technology provide the seeds for economic value, in this globalization age we have to compete and deliver the seeds of scientific discovery to the marked-place: That requires social encouragement of entrepreneurial activities, radically increasing the active participation of Universities [1]. This has to do with "Globalization", which is considered that has introduced both uncertainties and opportunities world wide. It is introduced an "innovation ecology" consisting of interrelated insti-

tutions, laws, regulations, and policies providing an innovation infrastructure that entails education, research, tax policy, intellectual property protection, among others [2].

A fundamental pillar for *Science, Technology and Innovation* consists in the creation and diffusion of knowledge, and C.H. Brito Cruz [3] has noticed that knowledge is more and more becoming a main commodity for the generation of wealth and social well-being. The capacity of a nation to generate knowledge and transform it in prosperity and social development depends on the action of some institutional agents which originate and apply knowledge. The main agents are business, universities and government: In this Ref. [3] is discussed what in Brazil is the role that is to be played by them.

The role of governments was deeply analyzed by a panel of renowned people in the Carnegie Commission on Science, Technology, and Government (New York, USA), producing the Report *Science, Technology, and Government for a Changing World* (1993). In the Preamble, the distinguished professor Joshua Lederberg (deceased in 2008) wrote that:

"Government is the complex of institutions, laws, customs, and personalities through which a political unit exercises power and serves its constituencies. Science is the search for novel and significant truths about the natural world. These truths are usually validated by the prediction of natural phenomena and the outcome of critical experiments. Technology is the instrumental use of scientific knowledge to provide, for example, goods and services necessary for human sustenance and comfort and to support other, sometimes contradictory aims of the political authority. Scientific expertise and technology have always been valued by government. Weapons and medicines, maps and microprocessors: the products of science are indispensable to successful government. So, increas-

ingly, is scientific thinking. Where but to science can society turn for objective analysis of technical affairs? The science mind bring much to the political processes. But science and politics are a hard match. Truth is the imperative of science; it is not always the first goal of political affairs. Science can be, often should be, a nuisance to the established order, much as technology often bolsters it. Moreover, many scientists, lacking the policy skills needed to relate their expertise to social action, are uncomfortable dealing with the political machinery. A vital responsibility of the expert advisor is to clarify technical issues so that the essential policy questions become accessible to the judgment of the community at large. Yet expertise also has distortions, arising from conflicts of interest, differing levels of competence, peculiarly posed questions, and cultural biases. The discipline of the peer group is the main source of the authenticity of the scientific community. Science, in fact, cannot exist without a community of scientists, a forum for organized, relentless skepticism of novel claims. Science kept in confidence and inaccessible to colleagues' criticism is no longer authentic. The public rendering of advice and defense of conclusions is of the utmost importance. Nevertheless, advice within the political system must often be confidential. Herein lies another structural contradiction and challenge to the design of organization and decision making. We must thus establish institutions and processes that enable scientists both to be credible within politics and to remain worthy of the continuing confidence of the larger society. To achieve this dual goal the first social responsibility of the scientist remains the integrity of science itself. Scientists fear that a greater influence on policy will evoke more explicit political control of science. A healthy balance is in the interests of both science and government."

In that report it has also been noticed that more than half a century ago it was provided by Vannevar Bush, science advisor to President Franklin

Roosevelt, a so called visionary report, titled "Science - The Endless Frontier", on the future of science and technology. At the time it was published, the Second World War - the driving force behind many scientific and engineering accomplishments - has just ended and the United States faced fundamental questions about the interactions of universities, industry, and government in furthering science and technology. In Bush's words, "The government should accept new responsibilities for promoting the flow of new scientific knowledge and the development of specific talent". Science, Bush argued, should serve society, and in turn, society should provide the financial support to assure the advancement of science, particularly basic research. It may be added that the so-called Cold War was also a phenomenal driving force for an enormous development of science and technology. Suffice to notice, for example, the development of space satellites and the voyage to the Moon, and, of course, the Internet Network. On the role of governments John Marburger, Science and Technology Advisor to the USA presidency during the administration of George W. Bush, has noticed that science policy depends on the state of science itself, which evolves in response to new instrumentation, theoretical methods, and analytical tools, including digital computing. The growth of science and the course of science policy are undeniable progressive. Thus science policy necessarily depends to a great extent on the state of science itself, and not only on social conditions and the willingness of governments to fund research. The accumulation of knowledge (as noticed above when we cited Brito Cruz [3]) guarantees that science's future will differ from its past. Fields mature, saturate, and merge as the frontiers of discovery advance. Attitudes toward science and toward physics in particular, have been shaped by the immense fertile period when quantum mechanics was first seriously exploited in the decades after World War II. But that period is now behind us and

attitudes are necessarily changing [4].

It is certainly a truism to say that at present we are witnessing a tremendous development of technologies and, of course, the corresponding production of goods and materials that are fantastically benefiting large portions of people in the world.

Rodger Doyle [5] has noticed that these recent inventions are sometimes hailed as a "Third Industrial Revolution". The "First Industrial Revolution" (~1770's to ~1860's) saw the development of the steam engine, steamboat, locomotive, telegraph, cotton gin, steel plow among others. The "Second Industrial Revolution" (~1870's to ~1910's) witnessed the invention of the telephone, internal combustion engine, the electric light bulb, germ theory of disease, linotype, motion picture, radio, air conditioning, airplane, indoor-flush toilet among others. R. Doyle advance the conclusion that the first and second Industrial Revolutions led to fundamental changes in human affairs, which have been not rivaled by this so-called "Third Industrial Revolution", which then is "Not So Revolutionary" (see also Ref. [6]).

Leaving this point aside, Mary L. Good, USA Undersecretary of Commerce in the administration of Bill Clinton, noticed that nowadays much of the world is waking up to the economic promise of technology in the present-day globalization scenery: Technology is directly linked to the economic growth of nations. The globalization of technology poses difficult challenges for policymakers, not just in technology policy, but in others such as trade and regulatory policy [7].

On this, the 1992-Report of the Carnegie Commission *Enabling the Future: Linking Science and Technology to Societal Goals* [8], begins the Executive Summary with a citation of Antoine de Saint-Exupéry (in *The Wisdom of the Sands*): "As for the Future, your task is not to foresee, but to enable it".

It is also stated that: "Basic scientific research is

a voyage of discovery, sometimes reaching the expected objective, but often revealing unanticipated new information. Some might say that setting long-range goals may harm basic researchers by over-centralizing and removing flexibility from the system. Long-range S&T goal setting certainly should not hamper, but rather encourage, this freedom to discover. Knowledge resulting from basic research must be exploited to improve the efficiency and effectiveness with which applied research and technological development are directed to societal goals". On the latter, in page 24 of the Report are listed examples of major societal goals to which S&T contribute: They are subsumed in 4 general groups, namely,

1. Quality of Life, Health, Human Development, and Knowledge;
2. A Resilient, Sustainable, and Competing Economy;
3. Environmental Quality and Sustainable Use of Natural Resources;
4. Personal, National, and International Security.

The Commissioners also noticed that: Policy questions will not be resolved by citizens, scientists, business executives, or government officials working alone; addressing them effectively will require the coordinated effort of all sectors of society. As President John Kennedy said: "*Scientists alone can established the objectives of their research, but society, in extending support for science, must take account of its own needs*".

Recently C.H. Brito Cruz [9] called the attention to the question of S&T in the Brazilian State of São Paulo, Brazil, enormously pushed forward by the creation of the São Paulo State Research Foundation (FAPESP). In that article it is cited the

beginning of the document "Science and Research" prepared in 1947 for the advice of the members of the Assembly preparing the Constitution of the State; in a tentative translation it reads: "*Science assumes a function more and more preponderating in the destiny of Humankind [...] In peace, it is Science that provides orientation to economy and industry and promotes the greatness and well-being of nations.*"

Brito Cruz notes that the actuality of the argument is flagrant; and its efficacy was modular: from it was born the idea to create FAPESP. It is worth noticing that at the Brazilian federal level, in the decade of the 1950's and beginning of the 1960's, the National Research Council (CNPq), under recommendations of, in particular, Profs. Mario Schenberg and Jayme Tiommo, takes initiatives as, for example, the development of the Solid State Physics Laboratories of the São Paulo State University (USP). It can also be mentioned the important development in further introducing laboratories involving condensed matter physics, by Sergio and Yvone Mascarenhas in USP-SC. A decisive improvement followed after the second half of the 1960's with, within the context of the so-called "pluriannual plans" - through the action in the Ministry of Planning of ministers Roberto Campos, Helio Beltrão and João Paulo dos Reis Veloso - the government decision to create Graduate Centers of Excellence in Science and Technology with the help of the financing agency Finep. Presently, a Brazilian government pluriannual plan for improvement of Science, Technology & Innovation can be consulted at www.mct.gov.br.

We noticed that nowadays, let it be the "Third Industrial Revolution" or a large evolution of the "Second Industrial Revolution", the remarkable development of the "advanced modern technologies" and intense "research and development", ask for Physics to bring to the forefront the *Physics of Systems out of Equilibrium* [10-13] and the *Physics of*

Non-Linear Processes [14-16]. Currently it is necessary to also consider, among other disciplines, the mesoscopic physics [17-24], the physics of fractal structures, soft matter [25-27], ultrafast processes [28-32], synergetic and self-organization associated to complex systems [33-36].

In present days remarkable development of all the modern technology, essential for the welfare and progress of the global society, imposes an immense stress on basic Physics, and consequently on Thermo-Statistics. We do face situations like, for example: fluids with complex structures, in electronics and photonics involving systems out of equilibrium, nano-technologies, low-dimensional systems, non-linear and ultrafast processes in semiconductor devices, and soft matter. All these topics are important for technological improvement in industries like, for example: in medical engineering, petroleum, food, polymers, cosmetics, electronics and optoelectronics. It is then required to introduce a thermo-hydrodynamics going well beyond the classical thermo-hydrodynamics. In the situations above mentioned there often appear difficulties of description, which impair the proper application of the conventional ensemble approach used in general, for example, the Boltzmann-Gibbs statistics. One way, to partially overcome such difficulties, is to use a non-conventional approaches.

Nowadays, the commercial interests of the technology industry claims for miniaturization of electronic devices, and then this rises the question if our understanding of the physics of electronic devices and their functioning can be extrapolated to the ultra-short time and ultra-small space [28-32].

The Statistical Mechanics can provide the basic scientific foundations for answering some of the questions above, more precisely, "Nonequilibrium Statistical Mechanics" whose evolution we describe in next Section. The construction of a Non-Equilibrium Statistical Ensemble Formalism (NESEF for short) is briefly described in Section 3,

and we emphasize that the NESEF can deal, within a certain degree of triumph, with some of the situations above described. The NESEF was applied, with a great success, in the following cases: non-linear thermo-hydrodynamics (including terms of highest order) in fluids under driven flow, in normal solutions and in complex situations as in solutions of microbatteries, DNA, micelles, and in polymers [35-43]; transport and optical processes in low-dimensional complex semiconductors [46-51]; ultrafast optical spectroscopy [52,53]; non-linear transport in doped and in photoexcited polar semiconductors under electric fields [54-69].

II. THE EVOLUTION OF THE NONEQUILIBRIUM STATISTICAL MECHANICS

Oliver Penrose noted that statistical mechanics has conceptual problems with difficult questions to give a good answer [70]. However, the Gibb's ensemble algorithm provides a precise description for large physical systems in equilibrium. However, in the case of systems out of equilibrium, the Gibb's ensemble algorithm is not accurate.

The Statistical Mechanics is a theoretical construction that superseded the kinetic theory of the century XIX [71]. The theory of Gibbs looks for the physical and the conceptual aspects and has a fundamental foundation, with microscopic basis of phenomenological thermodynamics. But, the theory of Gibbs went beyond that, trying to describe all the macroscopic physical properties of the systems from a microscopic level by also providing basic foundations to response function theory. The construction of the Gibbs method is described in the textbooks in a scheme orthodox: deterministic and reversible mechanics associated with ad hoc hypotheses.

We point out that to describe phenomena at the

macroscopic level, the Probability Theory appears to be an *indispensable necessity*. R. Feynman noted that, it is not our ignorance of the *internal mechanisms* that makes nature has probabilistic character: it seems to be intrinsic [72]. In this sense, J. Bronowski noticed:

"The future does not already exist: it can only be predicted" [73].

Several scientists have emphasized that the concept of probability is fundamental to the development of the science, including the scientific study of dynamic systems, let it be physical, biological, archeological, chemical, economic, ecological, social, historical, etc. According to J. Bronowski: "... *The statistical concept of chance may come as dramatically to unify the scattered pieces of science future ...* " [73].

The main objective of Statistical Mechanics of many-body systems out of equilibrium is to determine their dynamical evolution and the thermodynamic properties of their macroscopic observables, in terms of the dynamical laws which govern the motion of their constitutive elements. This implies in:

1. to build an irreversible thermodynamics;
2. to build a response function theory and a generalized nonlinear quantum kinetic theory, which are fundamental to connect theory with experiment [74].

Oliver Penrose noted that statistical mechanics has conceptual problems with difficult questions to give a good answer [70], for example: How can we justify the standard ensembles used in equilibrium theory? What is the physical significance of a Gibbs' ensemble? What are the correct ensembles for systems out of equilibrium? How can we reconcile the irreversibility of macroscopic behavior with the reversibility of microscopic mechanics?

R. Kubo announced that: “*the statistical mechanics of nonlinear systems is in its infancy, and further progress can only be hoped by closed cooperation with experiment*” [75]. Moreover, the study of the systems out of equilibrium is more difficult than those in equilibrium. This difficulty is mainly due that a more detailed analysis is necessary to determine the temporal dependence of macroscopic properties, and also to calculate transport coefficients which are time- and space-dependent. According to R. Zwanzig the objectives of nonequilibrium statistical mechanics are:

1. to obtain transport equations and to understand their structure;
2. to obtain the temporal evolution and instantaneous values of the macroscopic quantities of the system;
3. to obtain the properties of the steady state, and
4. to understand how the approach to equilibrium occurs in natural systems [11].

Furthermore, Robert Zwanzig pointed out that for the purpose to face these questions there exist many approaches. These approaches can be classified as:

1. generalizations of Gibbs’ ensemble,
2. expansions from an initial equilibrium ensemble,
3. techniques based on the generalization of the “theory of gases” or
4. on the “theory of stochastic processes”,
5. intuitive techniques.

The Generalizations of Gibbs’ ensemble formalism and Computational Modeling Methods are nowadays the most favorable approaches for providing satisfactory techniques for dealing with systems out of equilibrium.

The “Monte Carlo Method” and the “Nonequilibrium Molecular Dynamics” (NMD, for short) are part of what is known as *Computational Physics* or *Numeric Simulation Methods* [76,79]. The Nonequilibrium Molecular Dynamics is used for the study of properties of matter (in general, many-body systems) in which the direct integration of the dynamic equations of motion is done. B. J. Alder and T. E. Wainwright were the first to perform numerical simulation, done for a system of hard spheres [80]. Seven years later the case of molecules interacting through a Lenard-Jones potential was solved by A. Rahman [81]. Years later, R. Car and M. Parrinello improved the approach so-called as “*ab initio molecular dynamics*” [82,83].

Different kinetic theories were used to deal with the great variety of physical phenomena in nonequilibrium systems, in the absence of a Gibbs-style ensembles approach. An approach to the construction of a Non-Equilibrium Statistical Ensemble Formalism is briefly described in next Section. This formalism has an accompanying response function theory for nonequilibrium systems, a nonlinear quantum transport theory, a statistical thermodynamics plus a higher-order thermo-hydrodynamics. The Non-Equilibrium Statistical Ensemble Formalism (NESEF for short) is very powerful to deal with systems arbitrarily away from equilibrium. The present structure of the NESEF consists in a vast generalization and extension of earlier pioneering approaches. In this sense, we can cite the works of: J. G. Kirkwood [84], M. S. Green [85], H. Mori [86,87], I. Oppenheim and J. Ross [86], and R. Zwanzig [88]. The NESEF was improved and systematized by the Russian School of statistical physics, where we highlight the names of: Nicolai

Nicolaievich Bogoliubov [89], Nicolai Sergeievich Krylov [90], Dimitrii Zubarev [10,91], and Sergei Peletminskii [92,93]; in Refs. [12,13,94,95] we present a systematization, generalizations and conceptual discussions of the NESEF.

We point out that these different approaches to the Non-Equilibrium Statistical Ensemble Formalism can be brought together under a unique variational principle. This procedure has been originally done by D. N. Zubarev and V. P. Kalashnikov [96], and later on reconsidered in Ref. [12]. We briefly describe in next section the foundations and construction of the NESEF.

III. THE NON-EQUILIBRIUM STATISTICAL ENSEMBLE FORMALISM: A BRIEF REVIEW

In this section we provide a brief review of the foundations of the Non-Equilibrium Statistical Ensemble Formalism [10,12,13,86,91-93]. We point out that for nonequilibrium systems important points need to be taken into account: 1) The choice of the basic variables [11-13,97]; 2) The question of irreversibility [98], and that 3) historicity needs be introduced [84-88].

Concerning the choice of the basic variables, immediately after the open system of N particles has been driven out of equilibrium it would be necessary to describe its state in terms of all its observables. This is equivalent to have access to the one-particle dynamical operator \hat{n}_1 , and two-particle dynamical operator \hat{n}_2 . This is so, because all observable quantities and their variances can be expressed (at the microscopic mechanical level) in terms of these particle dynamical operators (see the classical article by U. Fano [99]).

The one-particle dynamical operator \hat{n}_1 and the two-particle dynamical operator \hat{n}_2 , in classical me-

chanics, are given by

$$\hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}) = \sum_{j=1}^N \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) \delta(\mathbf{p} - \mathbf{p}_j), \quad (1)$$

$$\hat{n}_2(\mathbf{r}, \mathbf{p}, \mathbf{r}', \mathbf{p}') = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^N \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) \delta(\mathbf{p} - \mathbf{p}_j) \times \delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_k) \delta(\mathbf{p}' - \mathbf{p}_k), \quad (2)$$

where \mathbf{r}_j is the coordinate and \mathbf{p}_j the linear momentum of the j -th particle in space phase. The quantities \mathbf{r} and \mathbf{p} are called field variables: the continuous values of position and momentum, respectively. Here, for question of simplicity, we take only the case of a single class of particles.

The one-particle dynamical operator \hat{n}_1 and the two-particle dynamical operator \hat{n}_2 , in quantum mechanics, are given by

$$\hat{n}_1(\mathbf{r}, \sigma, \mathbf{r}', \sigma') = \Psi_{\sigma}^{\dagger}(\mathbf{r}) \Psi_{\sigma'}^{\dagger}(\mathbf{r}'), \quad (3)$$

$$\hat{n}_2(\mathbf{r}_1, \sigma_1, \mathbf{r}_2, \sigma_2, \mathbf{r}'_2, \sigma'_2, \mathbf{r}'_1, \sigma'_1) = \Psi_{\sigma_1}^{\dagger}(\mathbf{r}_1) \Psi_{\sigma_2}^{\dagger}(\mathbf{r}_2) \Psi_{\sigma'_2}(\mathbf{r}'_2) \Psi_{\sigma'_1}(\mathbf{r}'_1), \quad (4)$$

where σ label for the spin index and Ψ (Ψ^{\dagger}), in second quantization formalism, are single-particle field operators [100]. The non-equilibrium statistical operator $R_{\epsilon}(t)$ is dependent on the quantities \hat{n}_1 and \hat{n}_2 .

The macro-variables $f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)$ and $f_2(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2; t)$ are given by

$$f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) = \text{Tr}\{\hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}) R_{\epsilon}(t)\}, \quad (5)$$

$$f_2(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2; t) = \text{Tr}\{\hat{n}_2(\mathbf{r}_1, \mathbf{p}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{p}_2; t) R_{\epsilon}(t)\}, \quad (6)$$

where Tr stands for performing the trace operation (in classical mechanics an integration in the over phase space). The quantity describing the non-equilibrium thermodynamic state of the system has the role of a generalized Boltzmann distribution function.

N. S. Krylov argues that there always exists a physical interaction between the measured system and the external world that continuously “shakes”

the system out of its exact microstate [90]. So, the unavoidable finite interaction with the outside would and the instability of trajectories guarantee the working of a “crudely prepared” macroscopic description. Thus, in the absence of a proper way to introduce such effect, one needs to resort to the *interventionist’s approach*. In NESEF this intervention consists into introducing in the Liouville equation of the statistical operator a particular source in the form

$$\frac{\partial}{\partial t} \ln R_\varepsilon(t) + \frac{1}{i\hbar} [\ln R_\varepsilon(t), \hat{H}] = -\varepsilon (\ln R_\varepsilon(t) - \ln \bar{R}(t, 0)) \quad (7)$$

where \hat{H} is the Hamiltonian of the system and \bar{R} represents an instantaneous quasi-equilibrium condition. After the calculations of average values has been performed the quantity ε is taken to go $+0$. The Equation (7) consists of a usual Liouville equation with a “source”. This source provides Bogoliubov’s symmetry breaking of time reversal and is accountable for ignoring the advanced solutions [10,91,101]. The solution of Equation (7) is

$$R_\varepsilon(t) = \exp \{ -\hat{S}(t, 0) \} \times \exp \left\{ \int_{t_0}^t dt' e^{\varepsilon(t'-t)} \frac{d}{dt'} \hat{S}(t', t'-t) \right\}, \quad (8)$$

where

$$\hat{S}(t, 0) = -\ln \bar{R}(t), \quad (9)$$

$$\hat{S}(t', t'-t) = e^{-(t'-t)\hat{H}/i\hbar} \hat{S}(t', 0) e^{1(t'-t)\hat{H}/i\hbar}. \quad (10)$$

The initial condition is

$$R_\varepsilon(t_0) = \bar{R}(t_0, 0). \quad (11)$$

The initial time is taken in the remote past, that is: $t_0 \rightarrow -\infty$. The integration in the interval t_0

to t in Eq. (8) is weighted by the kernel $e^{\varepsilon(t'-t)}$, which introduces a kind of “evanescent history” [10,12,86,91-93,100,102]. We consider the system as composed of the system of interest in contact with a thermal bath (ideal reservoirs). Therefore, we wrote

$$R_\varepsilon(t) = \rho_\varepsilon(t) \times \rho_R, \quad (12)$$

where $\rho_\varepsilon(t)$ is the statistical operator of the nonequilibrium system of interest and ρ_R the stationary statistical operator of the thermal bath (ideal reservoirs). The statistical operator of the nonequilibrium $\rho_\varepsilon(t)$ is given by

$$\rho_\varepsilon(t) = \exp \{ -\hat{S}(t, 0) \} \times \exp \left\{ \int_{-\infty}^t dt' e^{\varepsilon(t'-t)} \frac{d}{dt'} \hat{S}(t', t'-t) \right\}, \quad (13)$$

having the initial value $\bar{\rho}(t_0, 0)$, and

$$\hat{S}(t, 0) = -\ln \bar{\rho}(t, 0), \quad (14)$$

$$\hat{S}(t', t'-t) = e^{-(t'-t)\hat{H}/i\hbar} \ln \bar{\rho}(t', 0) e^{(t'-t)\hat{H}/i\hbar}. \quad (15)$$

The auxiliary statistical operator $\bar{\rho}(t, 0)$ defines an instantaneous distribution at time t [91,103-106], given by

$$\bar{\rho}(t, 0) = \exp \left\{ -\phi(t) + \int d^3 r \int d^3 p \times F_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) \hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}) - \int d^3 r \int d^3 p \int d^3 r' \int d^3 p' \times F_2(\mathbf{r}, \mathbf{p}, \mathbf{r}', \mathbf{p}'; t) \hat{n}_2(\mathbf{r}, \mathbf{p}, \mathbf{r}', \mathbf{p}') \right\}, \quad (16)$$

where F_1 is the nonequilibrium thermodynamic variable associated to the dynamical variable \hat{n}_1 and F_2 is the nonequilibrium thermodynamic variable associated to the dynamical variable \hat{n}_2 . Moreover, $\phi(t)$ ensuring the normalization of $\bar{\rho}$, and playing the role of a kind of a logarithm of a partition function $\bar{Z}(t)$, with $\phi(t) = -\ln \bar{Z}(t)$. Retaining only

\hat{n}_1 as basic dynamical variable the nonequilibrium thermodynamic variable F_1 takes the form

$$\begin{aligned}
 F_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) = & F_n(\mathbf{r}; t) + \\
 & + \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \mathbf{F}_n(\mathbf{r}; t) \\
 & + \frac{p^2}{2m} F_h(\mathbf{r}; t) + \\
 & + \frac{p^2}{2m} \frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \mathbf{F}_h(\mathbf{r}; t) + \\
 & + \sum_{r \geq 2} F_h^{[r]}(\mathbf{r}; t) \otimes \frac{p^2}{2m} u^{[r]}(\mathbf{p}) + \\
 & + \sum_{r \geq 2} F_n^{[r]}(\mathbf{r}; t) \otimes u^{[r]}(\mathbf{p}), \quad (17)
 \end{aligned}$$

where $u^{[r]}$ is a r -rank tensor consisting of the tensorial product of r -times the velocity \mathbf{p}/m , that is

$$u^{[r]}(\mathbf{p}) = \left[\frac{\mathbf{p}}{m} \cdots (r - \text{times}) \frac{\mathbf{p}}{m} \cdots \right], \quad (18)$$

where the symbol \otimes stands for fully contracted product of tensors. After disregarding the contribution $F_2 \hat{n}_2$, the equation (16) acquires the form

$$\begin{aligned}
 \bar{\rho}(t, 0) = & \exp \left\{ \phi(t) + \right. \\
 & - \int d^3 r [F_h(\mathbf{r}; t) \hat{h}(\mathbf{r}) + F_h(\mathbf{r}; t) \hat{n}(\mathbf{r}) + \\
 & \mathbf{F}_h(\mathbf{r}; t) \cdot \hat{\mathbf{I}}_h(\mathbf{r}) + \mathbf{F}_n(\mathbf{r}; t) \cdot \hat{\mathbf{I}}_n(\mathbf{r})] + \\
 & \sum_{r \geq 2} [F_h^{[r]}(\mathbf{r}; t) \otimes \hat{I}_h^{[r]}(\mathbf{r}) + \\
 & \left. F_n^{[r]}(\mathbf{r}; t) \otimes \hat{I}_n^{[r]}(\mathbf{r}) \right\}, \quad (19)
 \end{aligned}$$

where \hat{h} is the density of energy, \hat{n} is the density of particles, $\hat{\mathbf{I}}_h$ and $\hat{\mathbf{I}}_n$ are the vectorial fluxes of energy and particles, respectively, $\hat{I}_h^{[r]}$ and $\hat{I}_n^{[r]}$ are the tensorial fluxes of energy and particles, respectively, with $r \geq 2$. These quantities are given by:

$$\hat{h}(\mathbf{r}) = \int d^3 p \frac{p^2}{2m} \hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}), \quad (20a)$$

$$\hat{n}_1(\mathbf{r}) = \int d^3 p \hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}), \quad (20b)$$

$$\hat{\mathbf{I}}_h(\mathbf{r}) = \int d^3 p \frac{\mathbf{p}}{m} \frac{p^2}{2m} \hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}), \quad (21a)$$

$$\hat{\mathbf{I}}_n(\mathbf{r}) = \int d^3 p \frac{\mathbf{p}}{m} \hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}), \quad (21b)$$

$$\hat{I}_h^{[r]}(\mathbf{r}) = \int d^3 p u^{[r]}(\mathbf{p}) \frac{p^2}{2m} \hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}), \quad (22a)$$

$$\hat{I}_n^{[r]}(\mathbf{r}) = \int d^3 p u^{[r]}(\mathbf{p}) \hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}). \quad (22b)$$

These quantities have as the conjugated nonequilibrium thermodynamic variables set

$$\left\{ F_h(\mathbf{r}, t), F_n(\mathbf{r}, t), \mathbf{F}_h(\mathbf{r}, t), \right. \\
 \left. \mathbf{F}_n(\mathbf{r}, t), \{F_h^{[r]}(\mathbf{r}, t)\}, \{F_n^{[r]}(\mathbf{r}, t)\} \right\}. \quad (23)$$

These quantities are related to the set of macrovariables by the expressions [22-28,91,92]

$$\begin{aligned}
 I_h^{[r]}(\mathbf{r}, t) = & \text{Tr} \{ \hat{\mathbf{I}}_h(\mathbf{r}) \bar{\rho}(t, 0) \} = \\
 = & - \frac{\delta \Phi}{F_h^{[r]}(\mathbf{r}, t)} = - \frac{\delta \ln \bar{Z}(t)}{F_h^{[r]}(\mathbf{r}, t)}, \quad (24)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_n^{[r]}(\mathbf{r}, t) = & \text{Tr} \{ \hat{\mathbf{I}}_n(\mathbf{r}) \bar{\rho}(t, 0) \} = \\
 = & - \frac{\delta \Phi}{F_n^{[r]}(\mathbf{r}, t)} = - \frac{\delta \ln \bar{Z}(t)}{F_n^{[r]}(\mathbf{r}, t)}, \quad (25)
 \end{aligned}$$

where the symbol δ stands for functional differential [107]. In Eqs. (24) and (25) $r = 0$ for the densities of energy or particles, $r = 1$ for vector fluxes of energy or particles, and $r \geq 2$ for the higher-order tensor fluxes of energy or particles. It can be noticed that ρ_ϵ and $\bar{\rho}$ define the same average values, at each time t , for the basic variables only [10,91]. For more details and for a complete description of the Non-Equilibrium Statistical Ensemble Formalism foundations for Irreversible Thermodynamics see Refs. [18] to [24].

IV. THE NESEF-BASED NONLINEAR KINETIC THEORY

The NESEF-based Nonlinear Kinetic Theory consists into taking the average over the nonequilibrium ensemble of Heisenberg equations of motion of the dynamical operator for an observable $A(\mathbf{r}, t)$, that is

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}A(\mathbf{r}, t) &= \frac{d}{dt}\text{Tr}\{\hat{A}(\mathbf{r})\bar{\rho}_\varepsilon(t)\} = \\ &= \text{Tr}\left\{\frac{1}{i\hbar}[\hat{A}(\mathbf{r}), \hat{H}]\bar{\rho}_\varepsilon(t)\right\}. \end{aligned} \quad (26)$$

For more details about this NESEF-based Nonlinear Kinetic Theory see Refs. [10,86,91,102,108-111].

We noticed that the Markovian limit is valid when the interactions involved are weak. E. B. Davies [112] has shown that (by means of a different approach) the Markovian approach can be validated in the weak coupling limit. For a set of quantities (with $j = 1, 2, \dots$) the Markovian equations in the NESEF-based Nonlinear Kinetic Theory are

$$\frac{\partial}{\partial t}A_j(\mathbf{r}, t) = J_j^{(0)}(\mathbf{r}, t) + J_j^{(1)}(\mathbf{r}, t) + J_j^{(2)}(\mathbf{r}, t), \quad (27)$$

and for the Hamiltonian $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{H}'$:

$$J_j^{(0)}(\mathbf{r}, t) = \text{Tr}\left\{\frac{1}{i\hbar}[\hat{A}_j(\mathbf{r}), \hat{H}_0]\bar{\rho}(t, 0)\rho_R\right\}, \quad (28)$$

$$J_j^{(1)}(\mathbf{r}, t) = \text{Tr}\left\{\frac{1}{i\hbar}[\hat{A}_j(\mathbf{r}), \hat{H}']\bar{\rho}(t, 0)\rho_R\right\}, \quad (29)$$

where \hat{H}_0 stands for the kinetic energy and \hat{H}' contains the interaction potential energies, and $J_j^{(2)}(\mathbf{r}, t) = IJ_j^{(2)}(\mathbf{r}, t) + IIJ_j^{(2)}(\mathbf{r}, t)$, with

$$\begin{aligned} IJ_j^{(2)}(\mathbf{r}, t) &= \frac{1}{(i\hbar)^2} \int_{-\infty}^t dt' e^{\varepsilon(t'-t)} \times \\ &\text{Tr}\{[\hat{H}'(t'-t)_0, [\hat{H}', \hat{A}_j(\mathbf{r})]] \times \\ &\bar{\rho}(t, 0)\rho_R\}, \end{aligned} \quad (30)$$

$$\begin{aligned} IIJ_j^{(2)}(\mathbf{r}, t) &= \sum_k \frac{1}{i\hbar} \int_{-\infty}^t dt' e^{\varepsilon(t'-t)} \times \\ &\text{Tr}\{[\hat{H}'(t'-t)_0, [\hat{H}', \hat{A}_k(\mathbf{r})]] \times \\ &\bar{\rho}(t, 0)\rho_R\} \frac{\delta J_j^{(1)}(\mathbf{r}, t)}{\delta A_k(\mathbf{r}, t)}. \end{aligned} \quad (31)$$

The terms $J_j^{(0)}$ and $J_j^{(1)}$ are called precession terms [87], are related to the non-dissipative part of the motion, while dissipative effects are accounted in the term $J_j^{(2)}$. The subindex "0" indicates evolution in the interaction representation, and the symbol δ stands functional differentiation [107].

The generalized kinetic equations for far-from-equilibrium systems (with many-body) can be obtained by using the NESEF-based nonlinear kinetic theory [113]. In general, the kinetic equations for dynamical processes in many-body systems are dealt within certain approximations, for example, Vlasov equation for a plasma, Focker-Planck equation for a Brownian particle, Boltzmann equation for a dilute gas, the diffusion equation, Euler and Navier-Stokes equations for a compressible fluid, Landau equation for a weakly interacting gas, etc. [114]. Their common characteristic is that they all involve the dynamics of single-particle distributions. A question central of nonequilibrium statistical physics is the one of giving solid foundations to kinetic equations from microscopic dynamics and understanding their approximate validity. We also note that one of the complicated problems of the theory of nonequilibrium transport processes in liquids and dense gases is the fact that their hydrodynamics and kinetics are coupled and must be treated simultaneously (see Ref. [115]). The microscopic descriptions of hydrodynamics, related to derivation of the kinetic equations from quantum or classical mechanics containing kinetic transport coefficients in terms of correlation functions, is a

problem of long standing. The principal aspect is the derivation of constitutive laws which express thermodynamic fluxes, as those of energy and matter, in terms of thermodynamic forces. These laws (in their most general form) are non-instantaneous in time and non-local in space.

Moreover, a satisfactory construction of a “non-linear kinetic theories” is very desirable for obtaining a deep physical insight on the physical phenomena governing these processes, which are fundamental to the development of nowadays modern technologies with economic and industrial relevance. These theories should allow to deal with: ultra-small systems, nanometric scale, low dimensional systems, nonlinear behavior, and ultrafast relaxation processes. In this case are involved the technologies for oil industry, cosmetics, food engineering, micelles, polymers, soft-matter engineering, electronic and opto-electronic devices, etc. We emphasize that the emergence of synergetic self-organization and instabilities may arise for systems in out of equilibrium conditions involving ultrafast relaxation processes, as in cases in laser-plasma interactions [116], semiconductor physics [117] and biophysics [118]. The formalism presented below, can be extended to deal with anomalous situations which are associated to disordered media, for example: systems showing a fractal-like characteristics, distinctive behavior of polyatomic structures such as surfactant micelles, polymers, colloidal particles, DNA, biopolymers in liquid solutions [25-27].

We consider, for illustration, the Hamiltonian dynamics of a system consisting of a fluid of interacting particles (subjected to external forces - driving it out of equilibrium) embedded in a fluid acting as a thermal bath in a state of constant equilibrium with an external thermal reservoir at temperature T_0 [113].

Analogously, but at the quantum mechanical case, is the system of carriers embedded in the ionic lattice in photoinjected or doped semiconduc-

tors [119]. We write for the Hamiltonian

$$H = H_S + H_B + W + H_{ext}, \quad (32)$$

The term H_S is given by

$$H_S = \frac{1}{2} \sum_{j \neq k}^N V(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_k|) + \sum_{j=1}^N \frac{p_j^2}{2m}, \quad (33)$$

where the first term is the pair interaction of particles (via central force potential) and the second term the kinetic energy of particles of mass m . The term is the Hamiltonian of the solvent (a bath particles of mass M) given by

$$H_B = \frac{1}{2} \sum_{\mu \neq \nu=1}^{N_B} \Phi_B(|\mathbf{R}_\mu - \mathbf{R}_\nu|) + \sum_{\mu=1}^{N_B} \frac{P_\mu^2}{2M}, \quad (34)$$

consisting of their pair interaction via a central force potential (the first term) plus their kinetic energy (the second term). The term W is the Hamiltonian of the interaction of the particles with the thermal bath, given by

$$W = \sum_{j,\mu} \Phi(|\mathbf{r}_j - \mathbf{R}_\mu|), \quad (35)$$

and H_{ext} is the Hamiltonian regarding to the external force applied on the particles of the system, given by

$$H_{ext} = \sum_i V_{ext}(\mathbf{r}_i, \mathbf{p}_i, t). \quad (36)$$

The macroscopic state of the solvent (bath in constant thermal equilibrium with an external reservoir at temperature T_0) is characterized by the canonical distribution

$$\begin{aligned} \rho_B = & Z^{-1} \exp \left\{ -\beta_0 \sum_{\mu=1}^{N_B} \frac{P_\mu^2}{2M} \right\} \times \\ & \exp \left\{ -\frac{\beta_0}{2} \sum_{\mu \neq \nu=1}^{N_B} \Phi_B(|\mathbf{R}_\mu - \mathbf{R}_\nu|) \right\}, \end{aligned} \quad (37)$$

where Z is the partition function of the solvent, and

$$\beta_0 = \frac{1}{k_B T_0}.$$

Thus, the auxiliary nonequilibrium statistical operator of the whole system is written in the form

$$\bar{R}(t, 0) = \bar{\rho}(t, 0) \times \rho_B, \quad (38)$$

and considering large distance in average between the system particles (that is, dilute solutions), the nonequilibrium state of the system is specified by the single-particle distribution function $f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ then, consequently, the only relevant dynamical operator is $\hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)$. Hence, the auxiliary nonequilibrium statistical operator for the particles embedded in the bath is

$$\bar{\rho}(t, 0) = \exp\{-\phi(t) - \int d^3 r \int d^3 p F_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) \times \hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p})\} = \prod_{j=1}^N \bar{\rho}_j(t, 0), \quad (39)$$

$$\bar{\rho}_j(t, 0) = \exp\{-\phi_j(t) - \int d^3 r \int d^3 p F_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) \times \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}_j) \delta(\mathbf{p} - \mathbf{p}_j)\}, \quad (40)$$

where $\phi(t)$ and $\phi_j(t)$ ensuring the normalization condition and $\bar{\rho}_j$ is a probability distribution for an individual particle, with, and we recall that the statistical operator is given in terms of this auxiliary one in the form indicated in equation (13). The average of \hat{n}_1 over this NESEF-nonequilibrium ensemble, that is

$$f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) = \text{Tr}\{\hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p})\rho_\varepsilon(t)\} = \text{Tr}\{\hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p})\bar{\rho}(t, 0)\}, \quad (41)$$

where the trace operation Tr is in the classical approach an integration over phase space, and we recall that for the basic dynamical variables, and

only for them, the trace with $\rho_\varepsilon(t)$ coincides with the trace taken with $\bar{\rho}(t)$. The Eq. (41) is a NESEF-based Boltzmann-type single-particle distribution function.

If we identify A with $f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)$, we do have in the Markovian approximation that $f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)$ satisfies, according to Eq. (27), the evolution equation

$$\frac{\partial}{\partial t} f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) = J_1^{(0)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) + J_1^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) + J_1^{(2)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t), \quad (42)$$

where the first two terms on the right are

$$J_1^{(0)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) = \text{Tr}\{[\hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}), \hat{H}_0] \bar{\rho}(t, 0) \rho_R\} = -\frac{\mathbf{p}}{m} \cdot \nabla f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t), \quad (43)$$

$$J_1^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) = \text{Tr}\{[\hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}), \hat{H}'] \bar{\rho}(t, 0) \rho_R\} = -\nabla_{\mathbf{p}} V_{ext}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) \cdot \nabla f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) + \nabla V_{ext}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) + \nabla U(\mathbf{r}; t) \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t), \quad (44)$$

with

$$U(\mathbf{r}; t) = \int d^3 r' \int d^3 p' V(|\mathbf{r} - \mathbf{r}'|) f_1(\mathbf{r}', \mathbf{p}'; t), \quad (45)$$

playing the role of a mean-field potential of interaction between the particles. The last term in Eq. (42) is

$$J_1^{(2)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) = \int_{-\infty}^t dt' e^{\varepsilon(t'-t)} \times \text{Tr}\{[\hat{H}'(t'-t)_0, [\hat{H}', \hat{n}_1(\mathbf{r}, \mathbf{p})]] \times \bar{\rho}(t, 0) \rho_R\} + \int_{-\infty}^t dt' e^{\varepsilon(t'-t)} \int d^3 r' \int d^3 p' \times \text{Tr}\{[\hat{H}'(t'-t)_0, [\hat{H}', \hat{n}_1(\mathbf{r}', \mathbf{p}')] \times \bar{\rho}(t, 0) \rho_R\} \frac{\delta J_1^{(1)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)}{\delta f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)}, \quad (46)$$

where H' contains the potential energies V (see equation 33) and Φ (see equation 35). The contributions to $J_1^{(2)}$ come from the second order pair interactions between the system particles, and of the system particles with those of the thermal bath. The lengthy calculations lead to the a generalized kinetic equation, given by

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) + \frac{\mathbf{P}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)}{m} \cdot \nabla f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) + \\ \mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) \cdot \nabla_{\mathbf{p}} f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) - \\ A_2^{[2]}(\mathbf{p}) \cdot [\nabla_{\mathbf{p}} \nabla] f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) - \\ B_2^{[2]}(\mathbf{p}) \cdot [\nabla_{\mathbf{p}} \nabla_{\mathbf{p}}] f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) - B(\mathbf{p}) f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) = \\ = J_S^{(2)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t), \end{aligned} \quad (47)$$

which is the Markovian approximation of a weakly coupled closed gas which we get turning off the interaction with the thermal bath. In Eq. (47):

$$\frac{\mathbf{P}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)}{m} = \frac{\mathbf{p}}{m} - A_1(\mathbf{p}) + \nabla_{\mathbf{p}} V_{ext}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t), \quad (48)$$

$$\mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) = \nabla V_{ext}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) - \mathbf{B}_1(\mathbf{p}) - \mathbf{F}_{nl}(\mathbf{r}; t) - \nabla U(\mathbf{r}; t), \quad (49)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{nl}(\mathbf{r}; t) = \int d^3 r' \int d^3 p' f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t) \times \\ [\mathbf{F}_{nl}(\mathbf{r}' - \mathbf{r}, \mathbf{p}') - \\ \mathbf{B}_{nl}(\mathbf{r}' - \mathbf{r}, \mathbf{p}')]. \end{aligned} \quad (50)$$

In these equations \otimes stands for fully contraction of tensors and “.” for scalar product of vectors. In equations (47) to (50) the vectorial coefficients \mathbf{A}_1 , \mathbf{B}_1 and \mathbf{B}_{nl} , the second-rank tensor coefficients $A_2^{[2]}$ and $B_2^{[2]}$, and the scalar coefficients A_{nl} and B are kinetic coefficients (see Ref. [113]). Moreover, J_S is the collision integral arising out of the two particle interaction.

When the Equation (47) is compared with the Boltzmann kinetic equation, we notice that it

contains many unusual contributions. The term $\mathbf{P}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)$ [see Eq. (48)] is a modified momentum, composed of the linear momentum \mathbf{p} , plus a contribution from the interaction with the thermal bath $m\mathbf{A}_1(\mathbf{p})$, and another given by the \mathbf{p} -gradient of the potential energy associated to the external force. The term $\mathbf{F}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)$ [given by equation (49)] is composed of the external force plus the force $\mathbf{B}_1(\mathbf{p})$ from the interaction with the thermal reservoir (thermal bath). The term $F_{nl}(\mathbf{r}; t)$ is an effective force between pairs of particles from the interaction of each of the pair with the thermal reservoir. The term $[\nabla_{\mathbf{p}} \nabla] f_1$ is related to cross effects of anisotropy caused by non-uniformity. The term $[\nabla_{\mathbf{p}} \nabla_{\mathbf{p}}] f_1$ related to anisotropy and diffusion in momentum space and the term $B(\mathbf{p}) f_1(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)$ related to dynamic frictional force in the Brownian limit. The term $J_S^{(2)}(\mathbf{r}, \mathbf{p}; t)$ is related to the system pair particle collisions (in the weak coupling limit).

In relation to the equation (47), we emphasize that Balescu and Zubarev had the same equation. R. Balescu by using the dynamics of correlations approach of the Brussels school [120] and D. N. Zubarev, V. Morozov and G. Röpke exploring the classical diagram technique to handle the hierarchy of equations for the correlation functions [91]. Other approaches can be found in Refs. [121] and [122]. Here we have derived the equation (47) using the Non-Equilibrium Statistical Ensemble Formalism.

V. THE COMPETITIVE INDUSTRIES AND THE ADVANCED TECHNOLOGIES

Many situations involving manufacturing processes and technological applications, in general, are associated to nonlinear transport and optical properties in systems far from equilibrium, being in constrained geometries and presenting ultrafast relaxation processes and nonlinear behavior.

Here we can not forget the fundamental point in the scientific method of corroborating theory through comparison with experiment [74]. S. J. Gould's pointed out that: "a detail, by itself, is blind; a concept without a concrete illustration is empty", while, Charles Robert Darwin expressed that: "theory and observation are siamese twins, inextricably intertwined and continually interacting" [123]. On this question, R. Kubo pointed out that: "... statistical mechanics exists for the real world, not for fictions. Further progress only can be achieved with close cooperation with experience" [75]. The English theoretical physicist, cosmologist, Stephen Hawking expressed that: "I do not demand that a theory corresponds to reality. [...]. I do not demand that a theory corresponds to reality [...]. All I am concerned with is that the theory should predict the results of measurement" [124].

We reinforce that: boldness and imagination in making theory must always be policed by experience. Any theory in Physics, for its validation, requires to show a good agreement between "calculated values" (theory) and "measured values" (experimental data) [125,126].

Closing this Section we mention seven areas which are of particular interest, at the scientific, technological and at the production line, and therefore of relevance for government and society, successfully analyzed in terms of the formalism just describe. Summarizing, they are:

1. nonconventional thermo-hydrodynamics;
2. ultrafast relaxation processes in semiconduc-

tors devices;

3. nonequilibrium Bose-Einstein-like condensations and coherent states;
4. low-dimensional semiconductors;
5. thermo-statistics of complex structured systems;
6. nonlinear higher-order thermo-hydrodynamics; and
7. nonlinear transport in semiconductors devices.

As final words, this contribution presented some general considerations on the question of the aspect and interrelationships of the quadruple "realms" of Science, Technology, Government and Society, and the role of Thermo-Statistics of non-equilibrium systems that are present in the nowadays highly sophisticated technologies and industrial processes that contribute to the wealth and well being of world society.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to acknowledge partial financial support received from the São Paulo State Research Agency (FAPESP) and the Brazilian National Research Council (CNPq). The author CGR thanks the financial support received from Goiás State Research Agency (FAPEG).

REFERENCES

- [1] D. Normile, Science policy, in news of the week, *Science*, v. 316, p. 186, 2007.
- [2] W. A. Wulf, "Editorial", *Science*, v. 316, p. 1253, 2007.
- [3] C. H. B. Cruz, The university, the company and the research that the country needs, *Humanidades*, v. 45, p. 15-29, 1999.
- [4] J. H. Marburger, Science and government, *Physics Today*, v. 59, n. 6, p. 38-42, 2006.
- [5] R. Doyle, By the numbers: not so revolutionary, *Scientific American*, December issue, p. 18 (2006).
- [6] D. S. Landers, *The unbound Prometheus: technological change and industrial development in Western Europe from 1750 to the present*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1969.
- [7] M. L. Good, The globalization of technology, *Physics Today*, v. 49, n. 8, p. 23-27, 1996.
- [8] W. T. Golden, *Enabling the future: linking science and technology to societal goals. A Report of the Carnegie Commission*, New York, USA, 1992.
- [9] C. H. B. Cruz, Science and research, *Revista Brasileira de Inovação*, v. 4, n. 1, p. 225-261, 2005.
- [10] D. N. Zubarev, *Nonequilibrium statistical thermodynamics*, Plenum-Consultants Bureau, New York, USA, 1974.
- [11] R. Zwanzig, *Where do we go from here?*, in: *Perspectives in statistical mechanics*, North Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1981.
- [12] R. Luzzi, A. R. Vasconcellos, J. G. Ramos, *Predictive statistical mechanics: a nonequilibrium statistical ensemble formalism*, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, 2002.
- [13] R. Luzzi, A. R. Vasconcellos, J. G. Ramos, *The theory of irreversible processes: foundations of a non-equilibrium statistical ensemble formalism*, *Rivista del Nuovo Cimento*, v. 29, n. 2, p. 1, 2006.
- [14] W. Heisenberg, *Physics Today*, May issue, p. 22, 1967.
- [15] R. Landauer, *Nonlinearity: historical and technological view*, in: *Nonlinearity in condensed matter*, Springer, Berlin, Germany, 1987.
- [16] G. Nicolis, *Introduction to nonlinear science*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1995.
- [17] D. Jou, J. Casas-Vazquez, G. Lebon, *Extended irreversible thermodynamics*, Springer, Berlin, Germany, 1993; second edition, 1996, third enlarged edition, 2001.
- [18] R. Luzzi, A. R. Vasconcellos, J. G. Ramos, *Statistical foundations of irreversible thermodynamics*, Teubner-Bertelsmann-Springer, Stuttgart, Germany, 2000.

- [19] R. Luzzi, A. R. Vasconcellos, J. G. Ramos, Irreversible thermodynamics in a nonequilibrium statistical ensemble formalism, *Rivista del Nuovo Cimento*, v. 24, n. 3, p. 1, 2001.
- [20] A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, L. S. Garcia-Colin, Microscopic approach to irreversible thermodynamics I: General theory, *Physical Review A*, v. 43, p. 6622, 1991.
- [21] A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, L. S. Garcia-Colin, Microscopic approach to irreversible thermodynamics II: An example from semiconductor physics, *Physical Review A*, v. 43, p. 6633, 1991.
- [22] A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, L. S. Garcia-Colin, Response function theory for thermal perturbations in informational statistical thermodynamics, *Physica A*, v. 221, p. 478-494, 1995.
- [23] A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, L. S. Garcia-Colin, Diffusion and mobility and generalized Einstein relation, *Physica A*, v. 221, p. 495, 1995.
- [24] M. A. Tenan, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Statistical-mechanical foundations for a generalized thermodynamics of dissipative processes, *Fortschritte der Physik/Progress of Physics*, v. 47, p. 1-30, 1997.
- [25] F. Family, T. Vizsek, editors. *Dynamic of fractal surfaces*, World Scientific, Singapore, 1991.
- [26] T. A. Witten, Insights from soft-condensed matter, *Review of Modern Physics*, v. 71, n. 2, p. 5367, 1999.
- [27] T. A. Witten, T. A. Pincus, *Structured fluids*, Oxford Univ. Press, Oxford, UK, 2004.
- [28] G. Stix, Little big science: an overview, *Scientific American*, v. 285, p. 26, 2001.
- [29] J. M. Hopkings, W. Sibbet, Big payoffs in a flash, *Scientific American*, v. 283, p. 54, 2000.
- [30] R. R. Alfano, *Frontiers of femtosecond and picosecond optical measuring techniques, new techniques and ideas in quantum measurement*, NYAS Annals, v. 480, New York Academy of Sciences, New York, USA, 1996.
- [31] J. C. Diels, W. Rudolph, *Ultrashort laser phenomena, second updated and extended edition*, Academic-Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 2006.
- [32] C. H. B. Cruz, Editor, special issue of *Brazilian Journal of Physics*, v. 26, n. 2, 1996.
- [33] H. Haken, *Synergetics*, Springer, Berlin, Germany, 1977.
- [34] G. Nicolis, I. Prigogine, *Self-organization in nonequilibrium systems*, Wiley-Interscience, New York, USA, 1977.
- [35] G. Nicolis, I. Prigogine, *Exploring complexity*, Freeman, New York, USA, 1989.
- [36] S. Kauffman, *The origins of order*, Oxford Univ. Press, New York, USA, 1993.

- [37] A. R. Vasconcellos, J. G. Ramos, R. Luzzi, Nonlinear higher-order thermo-hydrodynamics: generalized approach in a nonequilibrium ensemble formalism, arXiv.org/cond-mat, USA, 2004.
- [38] J. G. Ramos, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Nonlinear higher-order thermo-hydrodynamics: illustrative examples, arXiv.org/cond-mat/0412231, USA, 2004.
- [39] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Mesoscopic hydro-thermodynamics of phonons in semiconductors: heat transport in III-nitrides, *The European Physical Journal B*, v. 86, p. 200, 2013.
- [40] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Thermal conductivity in higher-order generalized hydrodynamics: characterization of nanowires of silicon and gallium nitride, *Physica E*, v. 60, p. 50, 2014.
- [41] C. A. B. Silva, C. G. Rodrigues, J. G. Ramos, R. Luzzi, Higher-order generalized hydrodynamics: foundations within a nonequilibrium statistical ensemble formalism, *Phys. Rev. E*, v. 91, p. 063011, 2015.
- [42] D. Jou, R. Luzzi, J. C. Vazquez, J. R. Madureira, A. R. Vasconcellos, Higher-order hydrodynamics: extended Fick's law, evolution equation, and Bobylev's instability, *The Journal of Chemical Physics*, v. 116, p. 1571, 2002.
- [43] S. A. Hassan, R. Luzzi, M. V. Mesquita, A. R. Vasconcellos, Morphological ordering in biopolymers: Informational statistical thermodynamic approach, *Physical Review E*, v. 65, p. 041914, 2002.
- [44] M. V. Mesquita, A. R. Vasconcellos, Amplification of coherent polar vibrations in biopolymers Fröhlich condensate, *Physical Review E*, v. 48, n.5, p. 4049, 1983.
- [45] A. R. Vasconcellos, J. G. Ramos, A. Gorenstein, M. U. Kleinke, T. G. S. Cruz, R. Luzzi, Statistical approach to non-fickian diffusion, *International Journal of Modern Physics B*, v. 20, n. 28, p. 4821, 2006.
- [46] S. A. Hassan, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Production and optical properties of steady state photoinjected plasma in quantum wires, *Solid State Communications*, v. 106, p. 253, 1998.
- [47] S. A. Hassan, R. Luzzi, A. R. Vasconcellos, Photoinjected plasma in semiconductor quantum wires: soft-like upper plasmon, *Europhysics Letters*, v. 45, p. 633-637, 1999.
- [48] E. Laureto, A. R. Vasconcellos, E. A. Meneses, R. Luzzi, Characterization of nanometric quantum wells in semiconductor heterostructures by optical spectroscopy, *International Journal of Modern Physics B*, v. 18, n. 12, pp. 1743-1758, 2004.
- [49] A. A. P. Silva, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Resonant Raman scattering of electrons in quantum wells: identification of elementary excitations, *Physical Review. B*, v. 73, p. 235320, 2006.
- [50] A. A. P. Silva, E. A. Meneses, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Optical spectra and Stokes shift in nanometric quantum wells, *Optics and Photonics Journal*, v. 3, p. 1, 2013.

- [51] A. A. P. Silva, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, E. A. Meneses, E. Laureto, Optical properties in complex-structured nanometric quantum wells: photoluminescence, photoluminescence excitation, and Stokes shift, *Journal of Applied Physics*, v. 106, p. 083521, 2009.
- [52] M. S. P. Brasil, R. Luzzi, S. Luyo, W. Carvalho, A. Bernussi, A. R. Vasconcellos, Carrier dynamics investigated by time-resolved optical spectroscopy, *Physica Status Solidi A*, v. 190, p. 647-650, 2002.
- [53] A. R. Vasconcellos, M. S. P. Brasil, R. Luzzi, A. A. P. Silva, H. L. Afonso, Ambipolar diffusion and spatial and time-resolved spectroscopy in semiconductor, *Journal of Applied Physics*, v. 106, p. 043503, 2009.
- [54] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, V. N. Freire, R. Luzzi, Urbach's tail in III-nitrides under an electric field, *Journal of Applied Physics*, v. 90, p. 1879, 2001.
- [55] C. G. Rodrigues, V. N. Freire, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Electron mobility in nitride materials, *Brazilian Journal of Physics*, v. 32, n. 2A, p. 439, 2002.
- [56] A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, C. G. Rodrigues, V. N. Freire, Hot phonon bottleneck in the photoinjected plasma in GaN, *Applied Physics Letters*, v. 82, p. 2455 (2003).
- [57] C. G. Rodrigues, J. R. L. Fernandez, J. R. Leite, V. A. Chitta, V. N. Freire, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Hole mobility in zincblende c-GaN, *Journal of Applied Physics*, v. 95, p. 4914, 2004.
- [58] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Ultrafast relaxation kinetics of photoinjected plasma in III-nitrides, *Journal of Physics D - Applied Physics*, v. 38, p. 3584, 2005.
- [59] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, V. N. Freire, Nonlinear transport properties of doped III-N and GaAs polar semiconductors: a comparison, *Journal of Applied Physics*, v. 98, p. 043703, 2005.
- [60] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Nonlinear charge transport in III-N semiconductors: mobility, diffusion, and a generalized Einstein relation, *Journal of Applied Physics*, v. 99, p. 073701, 2006.
- [61] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Non-linear electron mobility in n-doped III-nitrides, *Brazilian Journal of Physics*, v. 36, n. 2A, p. 255, 2006.
- [62] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Nonlinear transport in n-III-nitrides: selective amplification and emission of coherent LO phonons, *Solid State Communications*, v. 140, p. 135, 2006.
- [63] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Nonlinear hole transport and nonequilibrium thermodynamics in group III-nitrides under the influence of electric fields, *Journal of Applied Physics*, v. 102, p. 073714, 2007.

- [64] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, V. N. Freire, Transient transport in III-nitrides: interplay of momentum and energy relaxation times, *Journal Physics: Condensed Matter*, v. 19, p. 346214, 2007.
- [65] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Theoretical calculations of nonlinear electronic transport behavior in III-nitrides: GaN and AlN, *Physica Status Solidi (b)*, v. 246, n. 2, p. 417 2009.
- [66] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Optical properties of III-nitrides in electric fields, *European Physics Journal B*, v. 72, n. 1, p. 67, 2009.
- [67] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Evolution kinetics of nonequilibrium longitudinal-optical phonons generated by drifting electrons in III-nitrides: longitudinal-optical-phonon resonance, *Journal of Applied Physics*, v. 108, p. 033716, 2010.
- [68] C. G. Rodrigues, A. A. P. Silva, C. A. B. Silva, A. R. Vasconcellos, J. G. Ramos, R. Luzzi, The role of nonequilibrium thermo-mechanical statistics in modern technologies and industrial processes: an overview, *Brazilian Journal of Physics*, v. 40, n. 1, p. 63, 2010.
- [69] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Drifting electron excitation of acoustic phonons: Cerenkov-like effect in n-GaN, *Journal of Applied Physics*, v. 113, n. 11, p. 113701 2013.
- [70] O. Penrose, Foundations of statistical mechanics, *Report of Progress Physics*, v. 42, n. 12, p. 1937, 1979.
- [71] J. W. Gibbs, Elementary principles in statistical mechanics, Yale Univ. Press, New Haven, USA, 1902; reprinted by Dover, New York, USA, 1960.
- [72] R. P. Feynman, The character of physical laws, MIT Press, Cambridge, USA, 1967.
- [73] J. Bronowski, The common sense of science, Harvard Univ. Press, Cambridge, USA, 1978.
- [74] N. Oreskes, N. H. Shrader-Frechette, K. Beltz, Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences, *Science*, v. 263, p. 641-646, 1994.
- [75] R. Kubo, Opening address at the Oji seminar, *Progress of Theoretical Physics (Japan)*, Suppl. 64, p. 1, 1978.
- [76] M. P. Allen, D. J. Tildesley, Computer simulation of liquids, Oxford Univ. Press, New York, USA, 1987.
- [77] M. H. Kalos, P. A. Whitlock, Monte Carlo methods, Wiley-Interscience, New York, USA, 2007.
- [78] D. Frenkel, B. Smit, Understanding molecular simulation, Academic, New York, USA, 2002.
- [79] J. Langer, Computing in physics: are we taking it too seriously? Or not seriously enough?, *Physics Today*, v. 52, n. 7, pp. 11-13, 1999.

- [80] B. J. Alder, T. E. Wainwright, Phase transition for a hard sphere system; studies in molecular dynamics. I. General method, *The Journal of Chemical Physics*, v. 27, p. 1208, 1957.
- [81] A. Rahman, Correlations in the motion of atoms in liquid argon, *Physical Review*, v. 136, n. 2A, p. A405-A411, 1964.
- [82] R. Car, M. Parrinello, Unified approach for molecular dynamics and density-functional theory, *Physical Review Letters*, v. 55, p. 2471, 1985.
- [83] W. G. Hoover, Molecular dynamics, in: *Lecture notes in physics*, v. 258, Springer, Berlin, Germany, 1986.
- [84] J. G. Kirkwood, The statistical mechanical theory of transport processes I. General theory, *The Journal of Chemical Physics*, v. 14, p. 180, 1946.
- [85] Green, M. S., Markoff random processes and the statistical mechanics of time-dependent phenomena, *The Journal of Chemical Physics*, v. 20, p. 1281, 1952.
- [86] H. Mori, I. Oppenheim, J. Ross, Some topics in quantum statistics, in: *Studies in statistical mechanics I*, North Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1962.
- [87] H. Mori, Transport, collective motion, and Brownian motion, *Progress of Theoretical Physics (Japan)*, v. 33, n. 3, p. 423, 1965.
- [88] R. Zwanzig, Statistical mechanics of irreversibility, In: *Lectures in theoretical physics*, v. 3, Wiley-Interscience, New York, USA, 1961.
- [89] A. Salam, V. S. Vladimirov, A. A. Logunov, Tribute in memoriam of Nicolai N. Bogoliubov, *Theoretical Mathematical Physics*, v. 92, p. 817, 1993.
- [90] N. S. Krylov, *Works on foundations in statistical mechanics*, Princeton Univ. Press, Princeton, USA, 1979.
- [91] D. N. Zubarev, V. Morozov, G. Röpke, *Statistical mechanics of nonequilibrium processes*, vols. 1 and 2, Akademie-Wiley VCH, Berlin, Germany, 1996 and 1997 respectively.
- [92] S. V. Peletminskii, A. A. Yatsenko, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, v. 26, p. 773, 1968.
- [93] A. I. Akhiezer, S. V. Peletminskii, *Methods of statistical physics*, Pergamon, Oxford, UK, 1981.
- [94] R. Luzzi, A. R. Vasconcellos, On the Nonequilibrium Statistical Operator Method, *Fortschritte der Physik/Progress of Physics*, v. 38, n. 11, p. 887, 1990.
- [95] R. Luzzi, A. R. Vasconcellos, J. G. Ramos, A nonequilibrium statistical ensemble formalism MaxEnt-NESOM: basic concepts, construction, application, open questions and criticisms, *International Journal of Modern Physics B*, v. 14, n. 28, p. 3189, 2000.

- [96] D. N. Zubarev, V. P. Kalashnikov, *Theoretical and mathematical physics*, v. 1, p. 108, 1971.
- [97] N. N. Bogoliubov, *Problems of a dynamical theory in statistical physics*, in: *Studies in Statistical Physics*, North Holland, Amsterdam, The Netherlands, 1962.
- [98] R. Peierls, *Some simple remarks on the basis of transport theory, transport phenomena*, in: *Lectures notes in physics*, v. 31, Springer, Berlin, Germany, 1974.
- [99] U. Fano, *Description of states in quantum mechanics by density matrix and operator techniques*, *Review of Modern Physics*, v. 29, p. 74, 1957.
- [100] B. Robertson, *Introduction to field operators in quantum mechanics*, *American Journal of Physics*, v. 41, p. 678, 1973.
- [101] N. N. Bogoliubov, *Lectures in quantum mechanics*, vols. 1 and 2, Gordon and Breach, New York, USA, 1967 and 1970 respectively.
- [102] L. Lauck, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, *A nonlinear quantum transport theory*, *Physica A*, v. 168, p. 789, 1990.
- [103] W. M. Elsasser, *On quantum measurements and the role of the uncertainty relations in statistical mechanics*, *Physical Review*, v. 52, p. 987, 1937.
- [104] E. T. Jaynes, *Physics and probability*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, p. 261-275, 1993.
- [105] E. T. Jaynes, *Probability theory as extended logic*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 2002.
- [106] J. Bricmont, *Chance in physics*, Springer, Heidelberg, Germany, 2001.
- [107] R. Courant et al., *Methods of mathematical physics*, Wiley-Interscience, New York, USA, 1953.
- [108] J. R. Madureira, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, L. Lauck, *Markovian kinetic equations in a nonequilibrium statistical ensemble formalism*, *Physical Review E*, v. 57, p. 3637, 1998.
- [109] J. R. Madureira, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, J. Casas-Vazques, D. Jou, *Evolution of dissipative processes via a statistical thermodynamic approach. I. Generalized Mori-Heisenberg-Langevin equations*, *The Journal of Chemical Physics*, v. 108, p. 7568, 1998.
- [110] J. G. Ramos, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, *A classical approach in predictive statistical mechanics: a generalized boltzmann formalism*, *Fortschr. Phys./Prog. Phys.*, v. 43, p. 265, 1995.
- [111] C. G. Rodrigues, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, *A kinetic theory for nonlinear quantum transport*, *Transport Theory and Statistical Physics*, v. 29, p. 733, 2000.
- [112] E. B. Davies, *Markovian master equations*, *Commun. Math. Phys.*, v. 39, p. 91, 1974.

- [113] C. A. B. Silva, J. G. Ramos, A. R. Vasconcellos, R. Luzzi, Kinetic equations for far-from-equilibrium many-body systems, IFGW-Unicamp Internal Report, 2008.
- [114] H. Spohn, Kinetic equations from Hamiltonian dynamics: Markovian limits, *Review of Modern Physics*, v. 53, p. 569, 1980.
- [115] Y. L. Klimontovich, *Statistical theory of open systems, v. 1: a unified approach to kinetic description of processes in active systems*, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, 1995.
- [116] L. N. Tsintsadze, K. Nishikawa, T. Tajima, and J. T. Mendonça, Stationary periodic and solitary waves induced by a strong short laser pulse, *Physical Review E*, v. 60, p. 7435, 1999.
- [117] D. Snoke, Condensed-matter physics: coherent questions, *Nature*, v. 443, p. 403, 2006.
- [118] H. Fröhlich, Evidence for Bose condensation-like excitation of coherent modes in biological systems, *Physics Letters A*, v. 51, p. 21, 1975.
- [119] R. Luzzi, A. R. Vasconcellos, Ultrafast transient response of nonequilibrium plasma in semiconductors, in: *Semiconductor processes probed by ultrafast laser spectroscopy, v. 1*, Academic, New York, USA, p. 135-169, 1984.
- [120] R. Balescu, *Equilibrium and nonequilibrium statistical mechanics*, Wiley-Interscience, New York, USA, 1975.
- [121] R. Balian, *From microphysics to macrophysics: methods and applications of statistical physics, v. 2*, Springer, Berlin, Germany, 2007.
- [122] W. T. Coffey et al., *The Langevin equation*, in *Contemporary Chemical Physics (World Scientific Series)*, v. 14, second edition, World Scientific, Singapore, 2004.
- [123] S. J. Gould, *Dinosaur in a haystack*, Random House, New York, USA, 1995.
- [124] S. Hawking, *The nature of space and time*, Princeton Univ. Press, Princeton, UK, 1996.
- [125] M. Born, *Experiment and theory in physics*, Dover, New York, USA, 1956.
- [126] J. T. Cushing, *Philosophical concepts in physics*, Cambridge Univ. Press., Cambridge, 1998.

Proposta de sequência didática aplicando um monocórdio e o uso de elementos musicais perceptuais como estruturantes para o ensino de conceitos de física ondulatória.

ANDRÉ LUÍS MIRANDA DE BARCELLOS COELHO*

ANTONY MARCO MOTA POLITO†

Universidade de Brasília

Resumo

Nesse trabalho, apresentamos uma proposta de sequência didática para o ensino de conceitos básicos de física ondulatória em turmas de segundo ano do Ensino Médio. Utilizamos elementos musicais perceptuais como alicerces sobre os quais desenvolvemos os conceitos físicos abstratos de comprimento de onda, frequência de oscilação, período de oscilação e velocidade de propagação de uma onda. Toda a sequência se articula em torno da utilização de um monocórdio (construído com materiais de baixo custo) no laboratório de física. Exploramos o funcionamento de um violão para introduzir um monocórdio e tornar significativa a aprendizagem dos conceitos físicos partindo de subsunçores pré-identificados. Observamos através dos dados coletados em laboratório que, ao utilizar a música como elemento estruturante na construção de conceitos físicos abstratos, os alunos demonstram mais interesse em aprender e apresentaram resultados mais satisfatórios nas avaliações.

Palavras-chave: Física ondulatória, Música e física, Aprendizagem significativa, Monocórdio, Laboratório de física.

I. INTRODUÇÃO

Ainda hoje, temos um Ensino Médio em formação. Por um lado, as políticas públicas das últimas duas décadas que buscaram a democratização do acesso a esse segmento foram bem-sucedidas e,

atualmente, há um esforço razoável por parte das instituições de ensino objetivando a melhoria da qualidade do serviço prestado. Por outro lado, há uma evidente dificuldade na articulação dos esforços das diferentes esferas envolvidas no problema, especialmente na tentativa de implementar, de fato,

*Mestre em Ensino de Física. Atua como professor na Secretaria de Educação do Distrito Federal, além de em escolas particulares de Brasília. Endereço de e-mail para contato: prof.barcellos@hotmail.com

†Professor Adjunto do Instituto de Física da Universidade de Brasília. Doutor em Física, na área de Física Estatística. Atualmente, trabalha com História e Filosofia da Física e com Ensino de Física, no âmbito do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (SBF) – IF-UnB.

os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN) em sala de aula [1].

Com a Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (LDB), de dezembro de 1996, o governo federal investiu esforços para caracterizar o Ensino Médio como etapa final da formação básica, tendo como objetivo a consolidação da formação geral do estudante. Para contribuir com essa reforma, foram elaborados, em 1999, os PCN. Neles, está previsto que diversos temas, antes segmentados, agora devem ser interdisciplinares, visando a construção de competências e habilidades em detrimento da focalização unicamente no conhecimento em si.

Portanto, é imperativo para a consolidação desse plano, no âmbito do Ensino Médio, que os docentes e a escola estejam cientes da necessidade de trabalhar seus conteúdos de maneira a contribuir para a formação dessas competências e habilidades. Contudo, apesar da significativa melhora, a partir do início dos anos 2000, ainda observamos um Ensino Médio descaracterizado, centrado nos conhecimentos por si e pouco interdisciplinares [2].

Sensível a essas questões, nosso trabalho propõe um *produto educacional*¹ para o ensino dos conceitos fundamentais da física ondulatória. Buscamos implementar algumas das orientações dos PCN em uma sala de aula do segundo ano do Ensino Médio. Sobre o ensino de física, na página 22, os PCN dizem:

“[A Física é um conhecimento...] incorporado à cultura e integrado como instrumento tecnológico, esse conhecimento tornou-se indispensável à formação da cidadania contemporânea. Espera-se que o ensino de Física, na escola média, contribua para a formação de uma cultura científica efetiva, que permita ao indivíduo a interpretação dos fatos, fenômenos e processos naturais, situando e dimensionando a interação o ser humano com a natureza como parte da própria natureza em transforma-

ção.”

Essa ideia nos motivou a eleger o tema *física ondulatória* como objeto de trabalho, pois os fenômenos ondulatórios, apesar de atualmente muito presentes no cotidiano das pessoas, nem sempre são compreendidos de maneira adequada, pelo menos não pela maior parte dos alunos que passam pela formação habitualmente fornecida pelo Ensino Médio [3 e 4].

Ainda na página 22, lemos, nos PCN: *“Para tanto, [...] É necessário também que essa cultura em Física inclua a compreensão do conjunto de equipamentos e procedimentos, técnicos ou tecnológicos, do cotidiano doméstico, social e profissional”*.

Desde a concepção inicial do nosso trabalho, estávamos convictos de que, no contexto do Ensino Básico, é fundamental o desenvolvimento de atividades experimentais, sobretudo porque a física é, antes de mais nada, uma ciência empírica. Evidentemente, isso não significa que seja estritamente necessário que sempre haja atividades experimentais para ensinar conceitos de física.

Em face disso, acreditamos que uma estratégia para ensinar apropriadamente os conceitos básicos de física ondulatória seria trazer o experimento para dentro da sala de aula. Todavia, se o objetivo é veicular o aprendizado de conceitos de física, não podemos nos restringir a efetuar apenas experimentos demonstrativos, pois eles tendem a não passar de uma mera transposição dos modelos ideais, encontrados nos livros-texto, para uma situação concreta. Uma mera demonstração experimental raramente permite que as especificidades da situação concreta contribuam efetivamente para que os conceitos físicos sejam mais bem aprendidos. Para que tais especificidades se tornem aliadas em um processo de *aprendizagem significativa* – no contexto da teoria ausubeliana [5 e 6] – acreditamos que é

¹Produtos educacionais são materiais didático-pedagógicos que intentam propor ações educacionais no âmbito de sala de aula.

preciso que os experimentos sejam efetivamente manipulados pelos alunos.

Evidentemente, essa manipulação não pode ser mera reprodução daquela que seria efetuada pelo professor, em um experimento demonstrativo. É preciso ir um pouco além. Em geral, a manipulação, pelos alunos, só permitirá uma efetiva aprendizagem conceitual se ela estiver associada às atividades de medição, registro e descrição matemática (tabelas, gráficos, funções) dos fenômenos evidenciados na experiência. Caso contrário, corre-se o risco de que essas atividades degenerem em meras atividades lúdicas.

II. A DICOTOMIA QUALITATIVO / QUANTITATIVO NO ENSINO DE FÍSICA.

Por trás dessa maneira de conceber a atividade didática, encontra-se o fato de que, ao contrário do que se tornou relativamente habitual defender, em alguns contextos, a dicotomia entre *conceitual e matemático* é, flagrantemente, falsa. A matemática não é elemento essencial apenas na *definição* do conceito, mas, principalmente, na sua *estruturação*. É possível, é claro, sustentar uma dicotomia entre uma abordagem qualitativa e uma quantitativa dos fenômenos naturais, mas, no que se refere ao conceito físico, ele agrega, necessariamente, tanto elementos qualitativos, quanto elementos quantitativos [7].

Aparentemente, com essa abordagem, novos obstáculos tendem a aparecer. O mais evidente deles está relacionado com o grau de capacidade para a operacionalização da própria matemática, mas há, também, aqueles envolvidos com a pouca familiaridade dos alunos com procedimentos envolvendo a manipulação de instrumentos de medida, bem como a interpretação das unidades e das dimensões concernentes. Acredita-se, em geral, que

a maioria dos alunos do Ensino Médio são mal preparados para operar com a matemática de maneira contextualizada (e muitas vezes, até não contextualizada). Essa, talvez, seja a principal razão pela qual um bom número de professores de física acaba aderindo à dicotomia qualitativo/quantitativo. Isso significa que se adota, habitualmente, uma de duas propostas: ou se prefere descrever uma classe de fenômenos naturais de maneira simplesmente qualitativa, tratando-os, no máximo, de maneira simplificada ou incompleta, ou se prefere reduzi-los a uma mera instância para a aplicação e a manipulação de fórmulas, cujo significado perde-se quase completamente no processo de sua computação.

A raiz do problema talvez esteja na forma como os currículos de matemática foram construídos, balizados pela ideia moderna de que a matemática é, antes de tudo, um sistema formal, cujo vínculo com a realidade se dá apenas em um segundo momento, no âmbito de suas (possíveis, mas não necessárias) aplicações. O fato de que a matemática se defina dessa forma, entretanto, não implica, necessariamente, que ela deva ser ensinada dessa forma.

É, aparentemente, um consenso, até mesmo entre os professores de matemática, que a adesão irrestrita àquela ideia os levou a ensinar a matemática de maneira puramente algorítmica, como um conjunto de regras operativas abstratas, à revelia da realidade concreta, o que tem provocado, nos estudantes, uma antipatia ao seu aprendizado. Não há dúvidas de que, do ponto de vista do ensino de física, isso compromete o desenvolvimento pleno dos seus conceitos [8].

Evidentemente, não se trata, aqui, de defender que o professor de física deva passar a ensinar matemática, mas ele deve tentar escapar da dicotomia qualitativo/quantitativo. Ele não deve fugir da aplicação da matemática, mas não deve aderir a ela deixando que os problemas de física se tornem apenas problemas de matemática. Acreditamos que a estratégia didática que envolva participação ativa

do estudante em procedimentos experimentais seja a mais viável para alcançar esse objetivo.

Tendo em vista as dificuldades inerentes ao ensino de conceitos de física ondulatória e o seu relativamente elevado grau de abstração, nos propusemos a conceber um produto educacional que tivesse maior conexão com contextos concretos (cotidianos) e que apresentassem um potencialmente elevado grau de apelo intuitivo e motivacional. Um exemplo disso é a música [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19]. Adicionalmente, ela permite uma abordagem prática que se compatibiliza com o nosso interesse pela estratégia experimental. Nesse sentido, um produto educacional que seja capaz de aliar física, música, matemática, teoria e experimentação pode, se bem idealizado e confeccionado, mostrar-se um bom instrumento didático-pedagógico. Essa ideia é o cerne desse trabalho.

Como já mencionado, utilizamos a música não apenas com objetivos motivacionais. Fundamentando nossa proposta na *Teoria da Aprendizagem Significativa* de Ausubel, procuramos lançar mão do conceito de *subsunção*² e utilizar conceitos musicais preexistentes como estruturas sobre as quais desenvolver conceitos físicos. A figura 1 mostra, esquematicamente, quais foram os subsunções utilizados em nossa proposta de produto educacional e suas relações com os conceitos físicos abstratos de comprimento de onda, frequência, período de oscilação e velocidade de propagação de uma onda.

Além disso, música é algo com que os alunos convivem e apreciam. Assim, ela nos parece fornecer também um excelente motivador para o ensino de física. Pensando nisso, sugerimos que, sempre que for possível (e conveniente), se tente descre-

ver fisicamente – ou seja, fenomênica e matematicamente – os fenômenos sonoros observados na prática da música. Para que não corramos o duplo risco de tornar a descrição dos conceitos ainda mais inacessível, já que não são todos os alunos que conhecem a linguagem musical propriamente dita (partituras e símbolos musicais), ou de desviarmos o foco da aprendizagem do conceito físico para o aprendizado de teoria musical (que não é o nosso objetivo), devemos ser cuidadosos para que a música (e seus conceitos) seja(m) utilizada(s) apenas como substrato concreto para a instanciação do fenômeno físico, que é a produção e a propagação da onda sonora. O estudo da acústica, nesses termos, passaria a ser, também, um modo de instanciar conceitos abstratos que podem ser transpostos para o contexto de outros fenômenos ondulatórios, como o das ondas eletromagnéticas.

Evidentemente, por tratar-se da utilização da prática musical – por exemplo, uma composição específica que esteja sendo efetivamente reproduzida, ao vivo –, é indicado que os conceitos de física ondulatória sejam trabalhados a partir do funcionamento de instrumentos musicais, o que permite um tratamento experimental.

Articulamos nosso produto educacional em torno de uma atividade experimental centrada em explorar o funcionamento de um violão. Como não dispúnhamos de muitos recursos financeiros, esta atividade deveria ser de baixo custo e utilizando materiais de fácil acesso. Após alguma pesquisa, elegemos o monocórdio³ como instrumento musical de estudo para os alunos. Depois de pensarmos em construir o modelo do monocórdio pitagórico original, chegamos a um modelo simplificado bastante interessante onde não só é possível medir di-

²*Subsunções*, na teoria ausubeliana, são conceitos pré-existentes ao processo de aprendizagem que funcionam como "ganchos" sobre os quais serão "pendurados", e eventualmente integrados, os novos conhecimentos, na estrutura cognitiva.

³O monocórdio pitagórico foi um instrumento que consistia em uma corda esticada entre dois cavaletes fixos e, entre eles, um cavalete móvel que modificava o tamanho da corda vibrante fazendo com que ela pudesse emitir sons mais agudos quanto menor fosse a distância entre o cavalete móvel e o fixo.

retamente a frequência de oscilação, mas também é possível regular a tensão exercida sobre a corda vibrante. Com esse aparato simples, formulamos uma atividade prática bastante rica, onde abordamos, inclusive, alguns conceitos de acústica. Para auxiliar essa atividade experimental, fizemos uso de alguns equipamentos eletrônicos de uso individual dos alunos. Celulares e "tablets" foram usados como frequencímetro e foram essenciais para o sucesso da prática. De fato, a utilização de tecnologias como ferramentas auxiliares na prática docente é cada vez mais comum e vem se mostrando eficaz [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

III. DESCRIÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Esse trabalho é fruto do desenvolvimento de um produto educacional no Mestrado Profissional de Ensino de Física. Ele se baseia na hipótese de que elementos musicais perceptuais podem ser estruturantes e subsunçores no aprendizado de conceitos de física ondulatória.

Os conceitos musicais de que nos utilizamos foram os de *consonância* e *dissonância*⁴ e os de sons agudos e graves. Nossa hipótese inicial era de que todos eles estavam já disponíveis como conhecimento prévio (intuitivo) dos alunos. Essa hipótese foi verificada em um teste de sondagem, que explorou a associação dos subsunçores com as respectivas percepções auditivas. Além disso, a existência dos subsunçores foi reverificada, na primeira aula expositiva. Só então desenvolvemos o restante da sequência didática apresentada nesse trabalho, de tal forma que acreditamos que esses subsunçores,

de fato, constituem bases sólidas sobre as quais uma sequência didática com os mesmos propósitos que os nossos pode ser construída.

Assim, o referido produto educacional constitui apenas uma possível maneira de desenvolver a aprendizagem de conceitos de física ondulatória partindo de elementos musicais intuitivos. Encorajamos o desenvolvimento de outras práticas que utilizem esses subsunçores e, também, de outros *organizadores prévios*⁵ além daqueles utilizados por nós. Na figura 1, de forma esquemática, mostramos a progressão desses conceitos em termos da teoria de Ausubel.

A sequência didática foi estruturada em sete aulas e objetiva introduzir conceitos básicos de ondulatória a alunos do 2º ano do Ensino Médio. Os conceitos, aqui classificados como básicos, que foram escolhidos são: comprimento de onda, frequência e período de oscilação de uma onda e velocidade de propagação de uma onda. De forma adjacente, também foram trabalhados os seguintes conceitos: formas de propagação das ondas, tipos de ondas e velocidade de propagação de uma onda em uma corda de extremidades fixas, em função da tensão a que ela é submetida. Como já mencionado, utilizou-se um método didático-pedagógico baseado na teoria de Ausubel [5], na experimentação como instrumento de letramento científico [4] e nos indicativos de que o uso de tecnologias podem ser facilitadores na aprendizagem de ciências [13].

Como atividades avaliativas, usamos um pós-teste baseado no teste de sondagem realizado no início da atividade, os mapas conceituais desenvolvidos por cada aluno ao longo da sequência didática e as respostas dadas às perguntas do roteiro experi-

⁴Deixamos claro que os conceitos de consonância e dissonância que identificamos que eram conhecimentos prévios dos alunos eram conceitos primitivos, ou seja, intuitivos, sem nenhuma definição formal.

⁵Organizadores prévios são materiais introdutórios apresentados antes do material de aprendizagem em si. Contrariamente a sumários que são, de um modo geral, apresentados ao mesmo nível de abstração, generalidade e abrangência, simplesmente destacando certos aspectos do assunto, organizadores são apresentados em um nível mais alto de abstração, generalidade e inclusividade [27].

mental. Nosso objetivo com isso era diversificar o máximo possível à avaliação para que fosse possível verificar indícios de aprendizagem significativa, em acordo com a prescrição ausubeliana, segundo a qual as avaliações devem ser capazes de discernir a aprendizagem significativa da mecânica.

I. MATERIAL DIDÁTICO PRODUZIDO

No endereço bit.ly/ondulatoria⁶, encontra-se o site que desenvolvemos para centralizar e organizar as atividades previstas para a sequência didática proposta. Nele, encontra-se o cronograma das aulas, os materiais didáticos utilizados, o teste de sondagem, com os áudios necessários para sua realização, o material de apoio, contendo diversas referências e simulações interessantes sobre o tema, além de uma enquete avaliativa do produto educacional.

Para cada encontro foi produzido um material didático específico. O primeiro a ser utilizado foi uma lista de exercícios sobre os conceitos de período, frequência, tipos de propagação e definição de onda e pulso. Nela, encontram-se situações-problema, questionamentos diretos sobre os conceitos abordados e propostas de pesquisa individual sobre conceitos não trabalhados em sala de aula. As situações-problema dessa lista buscam explorar a capacidade do aluno de relacionar os conceitos trabalhados em sala de aula com situações inusitadas. Dessa forma, incentivou-se o senso crítico e a relevância do que foi exposto nos encontros. Além disso, pedimos a construção de um mapa conceitual⁷ sobre o que foi aprendido, cujo objetivo foi o de hierarquizar os conceitos básicos de física ondulatória de maneira pudesse ficar claro, para os estudantes, a relação entre eles.

⁶Este site foi desenvolvido utilizando a ferramenta gratuita Google Sites. Endereço completo: <https://sites.google.com/site/introducaoondulatoria>

⁷Esses mapas foram utilizados pelos alunos como consulta para a realização do teste final.

Foram produzidos dois roteiros experimentais: um para que o aluno se preparasse para a realização da atividade experimental e outro que serviu para conduzir a sua realização propriamente dita. O roteiro pré-experimental oferece uma descrição do que vai ser desenvolvido em laboratório, quais instrumentos serão usados, além de uma breve explicação teórica sobre os conceitos físicos a serem abordados na prática e que pretende funcionar como um organizador prévio. Ao final desse roteiro, há um questionário avaliativo cujo objetivo principal é garantir que a sua leitura seja efetivamente realizada, ou seja, que a função de organização prévia seja efetivamente alcançada.

O roteiro experimental detalha, em três partes, o que deve ser feito no laboratório. Em formato de passo a passo, acompanhados por exemplos de tabelas e de resultados fictícios, os alunos puderam desenvolver a atividade sem muita interferência do professor. Como o objetivo dessa atividade era permitir a manipulação efetiva do aparato experimental pelos alunos e levá-los a tirar conclusões baseadas no roteiro pré-produzido pelo professor, este cumpriu tão somente o papel de mantenedor do bom andamento da atividade, interferindo o mínimo possível na prática dos alunos. Vale ressaltar que esse roteiro já estava disponível no site desde o início da sequência didática.

II. FERRAMENTAS DA INTERNET

Disponibilizamos cinco links como material de apoio, três deles efetivamente utilizados em nosso produto educacional, enquanto que os outros dois serviram como curiosidades/aprofundamento sobre o tema. Os três links para materiais utilizados na sequência são para:

- o *software* gratuito CmapTools, utilizado

para produzir os mapas conceituais de maneira simples. Os alunos não foram obrigados a usar esse *software*, já que, se preferissem, poderiam fazer os mapas a mão.

- o acesso à simulação “Ondas em uma Corda” do PHeT Colorado[28]. Essa simulação foi utilizada na aula expositiva, mas foi pedido aos alunos, em duas ocasiões (na segunda aula e no roteiro pré-experimental), que eles explorassem essa simulação afim de compreender seu mecanismo de operação.
- o acesso ao aplicativo para celular e “tablet”Guitar Tuner[29]. Esse aplicativo foi utilizado para fazer com que os equipamentos dos alunos funcionassem como frequencímetro na atividade experimental.

Utilizamos dois *softwares* nas aulas expositivas (aula dois e três), o WavePad Audio Editing e o PitchPerfect Musical Instrument Tuner⁸[30], e em no laboratório, o Guitar Tuner. Esse último foi utilizado pelos próprios alunos na atividade laboratorial, já que ele é um aplicativo que transforma um celular ou “tablet”em um frequencímetro (cuja qualidade depende da qualidade do aparelho). Os outros dois foram utilizados pelo próprio professor, na primeira aula, para analisar o comportamento de uma corda vibrante. O WavePad Audio Editing é um *software* que representa os sons captados através de ondas transversais e o PitchPerfect representa esses sons através das frequências de oscilação da corda.

Utilizar o WavePad Audio Editing foi particularmente interessante, pois foi muito fácil mostrar aos alunos a relação que existe entre comprimento de onda e frequência de oscilação, para uma onda que se propaga com velocidade constante, em uma corda de extremidades fixas. Além de mostrar muito claramente as diferenças entre sons agudos

e graves. Após essa exposição, o PitchPerfect nos serviu para associar a imagem pictográfica de uma onda transversal a um número que facilmente foi compreendido como a frequência de oscilação de uma onda.

III. O MONOCÓRDIO

Como já mencionado, toda a sequência se articula em torno da utilização de um monocórdio, projetado e construído especificamente para esse produto educacional. Ele acabou por resultar em um aparato experimental de simples manipulação pelos alunos e com potencial exploratório sobre o comportamento de uma corda oscilante de extremidade fixas. Em nossa montagem, o monocórdio possibilita o estudo simultâneo de dois segmentos de cordas de tamanhos distintos e proporcionais (um para dois), cuja tensão pode ser regulada e conhecida. Dessa forma, é possível evidenciar as relações existentes entre a velocidade de propagação da onda, os comprimentos de onda e as frequências de oscilação.

O aparato completo constitui-se de uma base retangular de madeira que sustenta três parafusos com argola (vide Figura 2). Como a distância entre eles não é a mesma, obtemos dois segmentos de cordas com comprimentos desiguais (indicados pelos números três e quatro na foto). Através dessas argolas, passa-se uma corda de violão. Uma das extremidades fica presa a uma argola, enquanto a outra extremidade é fixada em um reservatório (indicado pelo número 1 na Figura 2). Nesse reservatório, há um orifício (indicado na foto pelo número 2) que permite que o reservatório seja preenchido com facilidade. Também contamos com uma caixa de ressonância (indicado pelo número 5) que objetiva tornar o som, emitido pelo segmento de corda maior, mais preciso do ponto de vista de sua captação pelo frequencímetro.

⁸Ambos podem ser encontrados no site da NCH: <http://www.nch.com.au/>

Ao preencher o reservatório com água, podemos fazer uma boa aproximação em relação ao peso que este exerce sobre a corda⁹. Assim, podem-se realizar medidas de frequência para diversas tensões diferentes. Essa é, em síntese, a atividade experimental proposta nesse produto educacional.

Com esse aparato também é possível explorar o significado e a função de uma caixa de ressonância. Ela tem a função de tornar o som mais nítido para o frequencímetro, já que ela reflete as diversas ondas sonoras emitidas pela corda, que viajam em direções diversas, “concentrando-as” em uma região menor. A caixa de ressonância foi particularmente útil na aplicação do produto educacional, pois o ambiente onde foi realizada a atividade experimental era razoavelmente barulhento. Em um ambiente silencioso, essa caixa é dispensável.

A proposta que apresentamos tem largo potencial para melhoras significativas. Em nossos projetos iniciais, estava prevista a existência de um cavalete móvel que permitisse variar o comprimento da corda vibrante, mas, infelizmente, por questões práticas, ainda não foi possível realizar essa construção. A presença desse cavalete móvel permitiria ao aluno explorar ainda mais profundamente o funcionamento de um violão, o que serviria como suporte para discussões sobre os vários harmônicos produzidos em uma corda com extremidades fixas, além de permitir uma mais completa observação da consonância e da dissonância perceptuais. Evidentemente, isso implicaria algumas modificações no roteiro experimental.

⁹No roteiro disponível para os alunos, foi sugerido que isso fosse feito da seguinte forma: considerando a densidade da água igual a $1g/cm^3$ e conhecendo o volume de água dentro do reservatório, determinamos a massa de água ali presente. Admitindo a aceleração da gravidade local como aproximadamente $9,8m/s^2$, usa-se $P = m.g$ para determinar o peso do reservatório. Esse é equilibrado pela força de tensão da corda que, em módulo, é igual ao peso.

IV. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao longo da aplicação de nosso projeto, recolhemos materiais para posterior análise. Desde impressões pessoais e opiniões dos estudantes sobre as atividades, até gráficos, tabelas e mapas conceituais. Todo esse material nos serviu para ponderar sobre as qualidades e defeitos do produto educacional em questão, porém, de forma alguma, ambicionamos validar o produto educacional no sentido de determinar de maneira definitiva seu desempenho no que se refere a ganhos de aprendizagem ou algo semelhante, pois não temos dados estatísticos o suficiente, nem confiáveis o suficiente, para alcançarmos tais conclusões.

I. ANÁLISE DO TESTE PRÉVIO

O teste prévio foi produzido utilizando uma ferramenta gratuita oferecida pelo Google, chamada GoogleForms, não só pela facilidade de uso e confecção do material, mas pelo impacto positivo que aparentemente há na aprendizagem dos alunos ao utilizarmos esse tipo de recurso no ensino.

Nesse teste, estávamos interessados em investigar e identificar o que já era conhecido pelo aluno em relação a suas habilidades instrumentais/ operacionais, ao conhecimento rudimentar de música e sobre conceitos físicos que seriam desenvolvidos no projeto. As questões foram escritas de tal forma a deixar clara a intenção dos questionamentos, mas usando uma linguagem que cremos ser acessível a um aluno do 2º ano do ensino médio. Com isso, objetivamos identificar sobre qual base poderíamos edificar os novos conhecimentos sobre física ondulatória e, em minha análise, tivemos sucesso nesse

objetivo. Essa etapa é fundamental, segundo Ausubel, para construir um processo onde haja aprendizagem significativa, pois novos conhecimentos só serão corretamente integrados à estrutura cognitiva do aprendiz, de modo hierárquico e categórico, se partirem de subsunçores presentes nessa estrutura.

Para atingir esse objetivo, foi necessário identificar, ainda antes do teste prévio, qual seria o nível da linguagem mais apropriado para a sua confecção assim como utilizado nas aulas. Da mesma forma, também identificamos antes do teste prévio quais exemplos a serem citados seriam significativos, do ponto de vista experiencial, para os alunos. Identificamos, por exemplo, que sons altos e baixos não significavam para eles sons agudos e graves, mas sons de grande e baixa intensidade sonora. Sons graves e agudos para eles eram sons “finos” e “grossos”. Após reconhecer uma linguagem que julgamos apropriada, o professor pôde conduzir suas aulas de forma a intermediar o ganho conceitual dos alunos, ao migrar de uma linguagem que poderíamos classificar como de senso comum para uma mais técnico-científica.

De maneira geral, esta atividade surtiu um efeito positivo na percepção dos alunos em relação ao conteúdo que seria estudado. Logo quando acessaram o site desenvolvido para nosso projeto, eles perceberam que as aulas que viriam não seriam como as que eles habitualmente assistem. Alguns alunos trataram de explorar o site (que tem diversas referências e materiais complementares), o que me pareceu um sintoma de entusiasmo em relação a esse projeto.

II. ANÁLISE DAS AULAS EXPOSITIVAS

Nas aulas expositivas, tentamos nos evadir do formato tradicional em virtude da natureza específica do nosso produto educacional. Apesar de não conseguirmos abrir mão completamente de uma

aula expositiva, introduzimos nela interações com objetos comuns do cotidiano dos estudantes e utilizamos diversas ferramentas tecnológicas para nos auxiliar a estudar esses objetos. É importante salientar que a utilização dessas aulas expositivas não tradicionais e as ferramentas (de diversas naturezas) que as compõem são parte integrante da proposta do nosso produto educacional. Com isso, propiciamos um ambiente de descoberta possível para o aluno, bem diferente de uma aula tradicional que dificulta (ou até impossibilita) a investigação dos fenômenos físicos estudados, por afastá-los de objetos ordinários ou fenômenos conhecidos. Além disso, exploramos a íntima relação que a física tem com a música [20], o que trouxe não só um elemento motivacional, mas também um tom mais prático para um conhecimento que pode parecer, sem o devido tratamento, um conhecimento insosso.

Especificamente na aula dois, para cumprir o papel de facilitador na aprendizagem, utilizamos um violão e uma corda de poliéster comum. Ao apresentar o violão, imediatamente os alunos voltaram sua atenção ao professor, o que possibilitou a participação de alguns alunos que nunca tinham participado de uma aula de física, ativamente, nessa turma. O ganho de utilizar esses objetos concretos em sala de aula foi refletido em algumas falas dos alunos, registradas na avaliação do projeto feita por eles, ao final da sequência didática. Na ocasião, ao serem perguntados se eles aprenderam mais com esse projeto do que em aulas tradicionais, alguns responderam:

- Aluno X: “Sim. Porque foi mais dinâmico e eu aprendo mais na prática do que na teoria.”.
- Aluno Y: “Sim. Acredito que o conteúdo de ondulatória esteja bastante ligado a conceitos visuais, como por exemplo, comprimento de ondas (o que nos ajuda a diferenciá-la de

frequência), e também atividades lúdicas relacionadas a audição ajudam a diferenciar conceitos de grave e agudo que se aplicam em diversos aspectos desta matéria.”

- Aluno Z: “Sim. Por que é mais uma interação, mais uma dinâmica para que não fiquemos somente na teoria de sala de aula!”.

É evidente que esses alunos não têm capacidade de avaliar a prática no que se refere o escopo de sua validade pedagógica no ensino de física, mas essas percepções reforçam o benefício de trazer para a sala de aula situações e objetos da vida cotidiana e fazê-los objetos de estudo sério.

III. ANÁLISE DA PRÁTICA EXPERIMENTAL

Essa prática, dentro da sequência didática, foi a mais surpreendente para o primeiro autor desse trabalho, pois alguns resultados e comentários dos alunos foram completamente não previstos por nós. Ela foi idealizada com o intuito de facilitar a relação entre os conceitos teóricos e objetos cotidianos, dando ao estudante uma sensação de utilidade para aqueles conhecimentos.

Os estudantes dispunham de dois textos relativos à experiência, um para ser lido e resolvido antes da experiência e outro que foi utilizado no laboratório. Esses materiais foram desenvolvidos baseados nos subsunçores identificados nas atividades anteriores. Ademais, já sabíamos que o ambiente de laboratório de física era completamente novo para esses alunos e aproveitamos isso para verificar indícios de aprendizagem significativa, o que, de fato, aconteceu durante essa prática.

IV. ANÁLISE DO TESTE FINAL

O teste final foi elaborado aos moldes do teste prévio, porém, contendo mais questões discursi-

vas e incluindo uma questão sobre a prática experimental realizada. Para a realização desse teste final, escolhemos permitir o uso do mapa conceitual, elaborado individualmente pelos estudantes, ao longo das aulas, como consulta. Ao permitir o uso dessa consulta, foi necessário prestar muita atenção na elaboração da prova. Ela não podia ser uma prova apenas conceitual, de forma que os estudantes apenas copiassem o que tinham escrito no mapa. Muito pelo contrário, a intenção desse teste final é avaliar o real sucesso do processo de aprendizagem. Ou seja, garantir que aqueles estudantes que, de fato, desenvolveram seu mapa conceitual de maneira sistemática (como solicitado na aula três) e, no processo, fizeram suas próprias associações, seriam privilegiados quando comparados àqueles estudantes que copiaram de alguma fonte.

Propositamente, a construção do mapa conceitual não foi acompanhada pelo professor. Não esperávamos mapas conceituais muito completos e corretos. A intenção de usá-los foi verificar, através deles, indícios de formação de novas categorias e/ou a complementação de categorias já existentes, dentro da estrutura cognitiva do estudante (sintomas de aprendizagem). Em uma aplicação futura, aconselha-se que o professor acompanhe essa produção, talvez em um formato em que isso seja feito na própria sala de aula (nos primeiros ou últimos dez minutos de cada aula, por exemplo), pois mais alunos do que esperávamos não fizeram seus mapas.

V. CONCLUSÕES

Nossa hipótese é a de que a música possui elevado potencial como elemento motivador e, principalmente, estruturador/subsunçor para a construção de conceitos básicos de física ondulatória, de modo a constituir um facilitador de sua aprendizagem. Essa hipótese já pôde ser verificada na primeira metade da nossa prática, uma vez que constituíam

subsuncores todos os elementos musicais intuitivos que pretendemos utilizar. Compreendê-los utilizando conceitos físicos e relacioná-los logicamente nos pareceu mais natural do que seria o caso em uma aula tradicional, apoiada apenas em um livro-texto.

Verificamos também o impacto positivo da utilização de um aparato experimental, diretamente manipulável pelo aluno, na aprendizagem de conceitos básicos de física ondulatória. Consideramos que a atividade experimental desempenhou um papel fundamental na consolidação do conhecimento desenvolvido nesse produto educacional. Na percepção dos alunos, o laboratório contribuiu para uma melhor compreensão de como conhecimentos científicos são produzidos. Evidentemente, não é o caso de se comparar práticas didáticas com a experiência real de pesquisa científica, até mesmo porque essa é uma realidade ainda distante do universo do aluno de Ensino Médio. Muito embora seja difícil fazê-los entender em que consiste essa atividade profissional, em toda a sua profundidade, não há como escapar do fato de que é nesse período que os alunos são estimulados a, eventualmente, escolher essas profissões. Isso significa que qualquer que seja a estratégia didática que permita desmistificar a ciência, seja como uma atividade exclusiva de pessoas geniais, seja como uma construção historicamente acabada, deve contribuir para um melhor e um maior estímulo, nessa direção.

Por outro lado, não podemos imaginar que mais do que uma pequena parcela dos alunos de Ensino Médio escolherá seguir carreiras técnico-científicas, de modo que, do ponto de vista social, mais importante ainda é contribuir para o *letramento científico*. Em muitos casos, isso pode requerer que os conhecimentos – por si só já bastante técnicos e abstratos – que os alunos recebem em sua formação de Ensino Básico possuam um mínimo de contextualidade em suas vidas cotidianas. Tal contextualidade não tem apenas a ver com a

possibilidade de se aproximar de um real entendimento, mas também com a possibilidade de esse entendimento vir a converter-se em discernimento e capacidade de ação e decisão, no seio de uma sociedade tecnológica, como é a sociedade moderna.

Muito embora não tenha sido a nossa proposta realizar uma investigação extensiva, de modo a chegar a conclusões inequívocas – o que se deve ao caráter ainda preliminar de nossos estudos – há suficiente suporte, em outros estudos, para se acreditar que práticas como a que realizamos permitem alcançar bons resultados, do ponto de vista da aprendizagem significativa. Foi o que, majoritariamente de modo subjetivo, percebemos. Portanto, acreditamos que houve ganho significativo na compreensão dos conceitos físicos abordados – incluindo suas definições matemáticas formais – advindo dessa prática. Outro ponto interessante foi o de que, apesar da pouca habilidade na aquisição de dados e de seu tratamento matemático (construção de tabelas, gráficos, etc.), alguns alunos que participaram da prática experimental relataram que passaram a entender a matemática como um instrumento interessante na compreensão dos fenômenos físicos.

Do mesmo modo, verificamos que a utilização do monocórdio foi bem-sucedida. Isso também aponta para o fato de que a introdução de aparatos experimentais pode ser, de fato, capaz de tornar as aulas de física mais interativas, interessantes, voltadas para o cotidiano do aluno e, principalmente, mais eficientes. Atribuímos parte dessa percepção à utilização do violão como situação-problema motivadora, desde o início da sequência. Dessa forma, o aparato experimental ganhou um *status* de instrumento de pesquisa usado para compreender o funcionamento de um instrumento musical.

Como era de se esperar, em virtude de o grupo de alunos participantes ser bastante heterogêneo, nem todos apresentaram indícios suficientes de aprendizagem significativa. Além disso, a ativi-

dade prática se mostrou, no caso desses alunos, em particular, um ambiente didático completamente inédito. Como é de se esperar, nessas situações, eles, inicialmente, ficaram um pouco confusos e desorientados. Porém, aqueles que se permitiram refletir sobre a prática a consideraram muito proveitosa sobre vários aspectos. De um ponto de vista “epistemológico”, esses alunos relataram mudanças em sua forma de interpretar as expressões matemáticas que utilizavam para resolver os problemas de física, pois agora começavam a compreender que elas podiam refletir o comportamento *observável* e *mensurável* dos fenômenos associados. Além disso, em virtude das discrepâncias observadas entre observação e previsão teórica, relataram compreender o caráter aproximado associado a muitas dessas expressões matemáticas.

Adicionalmente, parece ter ficado mais claro que situações ideais nem sempre se referem, de modo simplório, a algo que “não existe” (por conseguinte algo inútil) e que podem constituir aproximações suficientemente boas da realidade. De um ponto de vista instrumental, alguns desses alunos relataram que passaram a entender melhor o porquê de serem obrigados a estudar tantas funções matemáticas, na disciplina de matemática. Esses ficaram surpresos ao saber que a maior parte delas (ou sua totalidade) foram “encomendadas”, ou seja, surgiram a partir de uma demanda ou necessidade para descrever algum fenômeno. Para o primeiro autor, que, além de ter concebido e executado todo o projeto, foi o único a se envolver diretamente em sua execução, esse foi um dos pontos altos da aplicação desse produto educacional, tendo certamente mudado sua forma de enxergar o laboratório de

física, bem como a sua importância na formação de um estudante.

A construção do aparato experimental foi uma aventura à parte. Para que ele funcionasse, de fato, foram necessários muitos testes e ajustes, mas o resultado foi satisfatório, já que, com materiais de baixo custo, foi possível construir uma prática extremamente rica para todos os envolvidos no processo. Recomendamos aos professores que venham a utilizar essa sequência que dediquem um tempo para testar previamente os roteiros e, inclusive, os modifiquem, de acordo com a necessidade.

Alguns imprevistos aconteceram ao longo da prática. A cultura da escola na qual ela foi aplicada não favorecia um engajamento muito grande, por parte dos alunos, o que foi frustrante, à princípio, mas compreensível, posteriormente. De fato, alguns alunos, por escolha própria, ficaram marginalizados, nas últimas atividades da sequência didática, pois ou faltaram às aulas, ou simplesmente não estiveram dispostos a investigar os fenômenos mais maduramente. Não seria exagero afirmar que, em quase todas as turmas do Ensino Médio, esse tipo de aluno está presente, porém, para aquele aluno que se interessou e se permitiu refletir sobre os assuntos propostos, a atividades e mostrou bastante rica. Afinal, nosso objetivo não era (e nem é) preparar os alunos que participaram da prática para resolverem questões de vestibular, mas sim para, caso fosse de seu interesse particular, pudessem estar mais capacitados para compreender fenômenos mais complexos e, em particular, compreendam melhor os fenômenos ondulatórios que lhes são comuns.

REFERÊNCIAS

- [1] RICARDO, Elio Carlos. *O ensino das ciências no nível médio: Um estudo sobre as dificuldades na implementação dos Parâmetros Curriculares Nacionais*. Depto. de Física - UFSC Florianópolis – SC. Cad.Bras.Ens.Fís., v.19, n.3: p.351-370, dez. 2002.
- [2] CASTRO, M.H.G.; TIEZZI, S. *A reforma do Ensino Médio e a implantação do ENEM no Brasil*. In: BROCK, C.; SCHWARTZMAN, S. (Org.). Os desafios da educação no Brasil. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, p. 119-154, 2005.
- [3] WALVY, O. W. C. As situações-problema como facilitadoras para a aprendizagem de conceitos físicos no Ensino Médio. XVI Simpósio Nacional de Ensino de Física. Rio de Janeiro: SBF, 2005.
- [4] AZEVEDO, M. C. P. S. *Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula*. In: CARVALHO, A. M. P. (org). Ensino de Ciências. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, p. 19-33, 2004.
- [5] MOREIRA, Marco Antonio. *Teorias da aprendizagem*. São Paulo: EPU, 1999.
- [6] LAWTON, Joseph T., SAUNDERS, Ruth A., MUHS, Paul. *Theories of Piaget, Bruner, and Ausubel: Explications and Implications*. Iniversity of Wisconsin-Madison. The Journal of Genetic Psychology, 136, 121-136, 1980.
- [7] PIETROCOLA, MAURÍCIO, *A matemática como estruturante do conhecimento físico*. Depto de Física – UFSC Florianópolis – SC, Cad. Cat. Ens. Fís., v.19, n.1: p.89-109, ago. 2002.
- [8] KAC, Marck, ROTA, Gian-Carlo. *Discrete Thoughts, Essays on Mathematics, Science, and Philosophy*. Second Edition., SCHWARTZ, Jacob T, 1993.
- [9] HARTMANN, W.M. *The electronic music synthesizer and the physics of music*. Department of Physics, Michigan State University, 1975.
- [10] YAMAMOTO, Issao; BARBETA, Vagner. *Simulações de experiências como ferramenta de demonstração virtual em aulas de teoria de física*. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 23, no.2, Junho, 2001
- [11] PAKER, Barry. *Good Vibrations, The Physics of Music*. The Jonhs Hopkins University Press, 2009.
- [12] GOTO, Mario. *Física e música em consonância*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 2, 2307, 2009.
- [13] MELO, Ruth. *A utilização das TIC's no processo de Ensino e Aprendizagem da Física*. 3º Simpósio Hipertexto e Tecnologias na Educação (Anais Eletrônicos). Universidade Federal de Pernambuco – Núcleo de Estudos de Hipertexto e Tecnologias na Educação, 2010.

- [14] SANTOS, E.M.; MOLINA, C. e TUFÁILE, A.P.B. *Violão e guitarra como ferramentas para o ensino de física*. Rev. Bras. Ensino Fís.[online]. Vol.35, n.2, pp. 1-7. ISSN 1806-1117, 2013.
- [15] CATELLI, Francisco; MUSSATO, Gabriel A. *As frequências naturais de uma corda de instrumento musical a partir de seus parâmetros geométricos e físicos*. Mestrado em Educação e Mestrado profissional em Ensino de Ciências e Matemática, Universidade de Caxias do Sul, RS, Brasil, 2014.
- [16] LAGO, B.L. *A guitarra como um instrumento para o ensino de física ondulatória*. Rev. Bras. Ensino Fís.[online]. Vol.37, n.1 Epub30-Mar-2015. ISSN 1806-9126, 2015.
- [17] COELHO, Suzana Maria. *Acústica e música: uma abordagem metodológica para explorar sons emitidos por tubos sonoros*, Faculdade de Física – PUCPorto Alegre – RS Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 32, n. 1, p. 207-222, abr. 2015.
- [18] MOURA, Daniel De Andrade. *O ensino de acústica no Ensino Médio por meio de instrumentos musicais de baixo custo*. Física na Escola, v. 12, n. 1, SP, Brasil, 2011
- [19] WOOD, Alexander. *The Physics of Music*. M.A., D.SC, Late Fellow of Emanuel College, Cambridge, 2007.
- [20] BLEICHER, Lucas; SILVA, Moésio Medeiros da; RIBEIRO, Júlio Wilson y MESQUITA, Márcio Gurjão. *Análise e Simulação de Ondas Sonoras Assistidas por Computador*. Rev. Bras. Ensino Fís.[online]. vol.24, n.2, pp. 129-133. ISSN 1806-9126, 2002.
- [21] HECKLER, Valmir; SARAIVA, Maria; FILHO, Kepler. *Uso de simuladores, imagens e animações como ferramentas auxiliares no ensino/aprendizagem de óptica*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.29, n.2, p267-273, 2007.
- [22] ARANTES, Alessandra Riposati; MIRANDA, Márcio Santos; STUDART, Nelson. *Objetos de Aprendizagem no ensino de física: usando simulações do PheT*. Física na Escola, v. 11, n. 1, 2010.
- [23] FILHO, Geraldo. *Simuladores Computacionais para o ensino de física básica: uma discussão sobre produção e uso*. Mestrado Profissional em Ensino de Física, Universidade do Rio de Janeiro, 2010.
- [24] HEIDEMANN, Albuquerque; OLIVEIRA, Ângelo; VEIT, Eliane. *Ferramentas online no ensino de ciências: uma proposta com o GoogleDocs*. Universidade do Rio Grande Do Sul - Instituto de Física. Física na Escola, v.11, n.2, 2010.
- [25] CARVALHO, Cristiane. *Uma revisão de literatura sobre o uso de softwares/simuladores/applets e principais referenciais teóricos no ensino de física*. Departamento de Ciências Naturais, Universidade Federal de São João del Rei, 2012.
- [26] GUEDES, Anderson Guimarães. *Estudo de ondas estacionárias em uma corda com a utilização de um aplicativo gratuito para smartphones*. Rev. Bras. Ensino Fís.[online]. Vol.37, n.2, pp. 2502-1-2502-5. ISSN 1806-9126, 2015.

- [27] Moreira, MOREIRA, Marco. Organizadores prévios e aprendizagem significativa. Revista Chilena de Educación Científica, ISSN 0717-9618, Vol. 7, N^o. 2, 2008 , pp. 23-30. Revisado em 2012.
- [28] Simulação de uma onda em Corda. Disponível em: < [https :
//phet.colorado.edu/ptBR/simulation/legacy/wave – on – a – string](https://phet.colorado.edu/ptBR/simulation/legacy/wave-on-a-string) > Acesso em: 12/06/2016.
- [29] Site oficial para o aplicativo Guitar Tuner para android. Disponível em: play.google.com/store/apps/details?id=com.gismart.guitar.tuner. Acesso em: 18/06/2016.
- [30] Site oficial para os softwares WavePad Audio Editing ePitchPerfect Musical Instrument Tuner. Disponível em: <http://www.nch.com.au/> Acesso em: 18/06/2016.

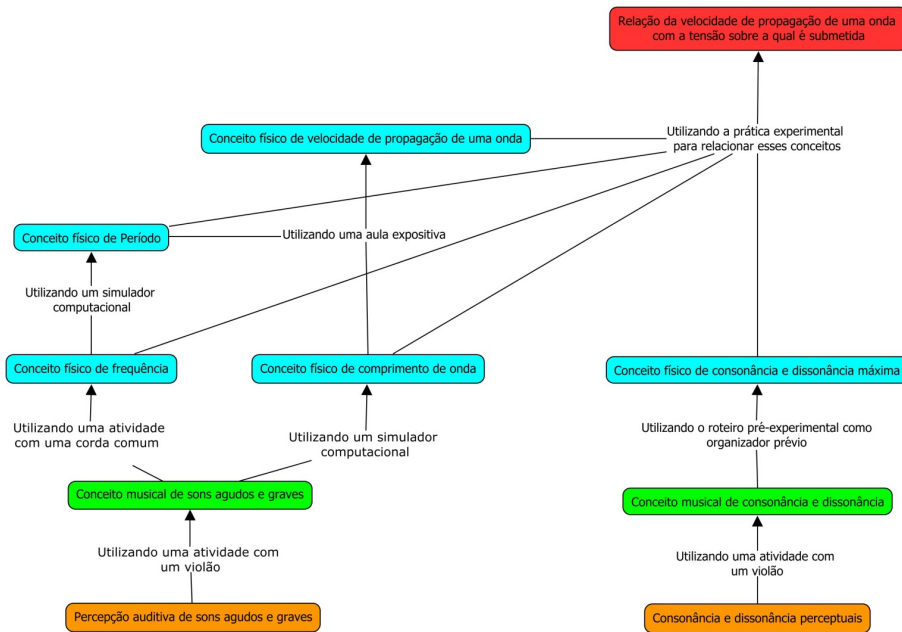


Figura 1: Mapa conceitual mostrando a relação entre as percepções auditivas, os subsunçores identificados e os conceitos físicos abstratos. Em laranja (parte inferior do diagrama) estão as percepções auditivas que originam os subsunçores iniciais. Em verde, os subsunçores utilizados nesse produto educacional. Em azul, os conceitos físicos abstratos relacionados aos subsunçores musicais identificados. Em vermelho, um conceito físico mais complexo que exige articulação entre os conceitos físicos aprendidos



Figura 2: Aparato experimental montado. 1: Reservatório. 2: Orifício lateral para auxiliar o enchimento do reservatório. 3: Estrutura de madeira. 4: Corda de violão. 5: Caixa de ressonância

Aula e Data	O que foi desenvolvido
Aula 1 (Simples)	Teste exploratório + tutorial de como confeccionar mapas conceituais
Aula 2 (Dupla)	Aula expositiva que abordou os seguintes temas: A). Definição de consonância perceptual com o uso de violão. B). Relação entre frequência perceptual (sons agudos e graves) com os comprimentos da corda. C). O que é um pulso? O que é uma onda? D). Comprimento de onda e. E) Frequência e período de uma onda.
Aula 3 (Simples)	Aula expositiva que abordou o seguinte tema: <u>a Velocidade</u> de propagação da onda em uma corda e equação fundamental da onda ($v = f \cdot \lambda$).
Aula 4 (Dupla)	Atividade experimental utilizando o monocórdio. Objetivos: Medir tensão nos dois segmentos de corda e relacioná-la com a frequência emitida por estas. Observar que a frequência medida no segmento de corda menor é aproximadamente o dobro do segmento de corda maior, dessa forma será fácil <u>observar</u> a equação fundamental da ondulatória.
Aula 5 (Simples)	Discussão sobre os dados e análises feitas na aula anterior e explicar, questão a questão, como deve ser confeccionado o relatório experimental.
Aula 6 (Dupla)	Análise dos gráficos obtidos e descrever a equação de Taylor como uma formulação para um caso ideal e correção das atividades.
Aula 7 (Simples)	Pós-teste. FIM DA ATIVIDADE

Figura 3: Tabela

Força gravitacional exercida por uma casca esférica sobre um corpo acelerado dentro dela

FELÍCIA A. PALACIOS* RAFAEL B. PASSAGLIA† FÁBIO M. S. LIMA‡

Instituto de Física, Universidade de Brasília

9 de setembro de 2016

Resumo

Em 1687, Newton, supondo uma força de atração inversamente proporcional ao quadrado da distância, demonstrou que é nula a força gravitacional exercida por uma casca esférica com distribuição uniforme de massa sobre um corpúsculo localizado em qualquer ponto do seu interior. Como a lei de força proposta por Newton não inclui velocidades e acelerações entre os corpos que se atraem, então a força exercida pela casca deve permanecer nula mesmo que o corpúsculo esteja em movimento em relação à casca. Esse mesmo resultado nulo também é previsto pela teoria da Relatividade Geral, de Einstein. Nesta nota, mostramos que a Mecânica Relacional fornece um resultado não-nulo quando o corpo, inicialmente em repouso, é acelerado em relação à casca.

Palavras-chave: Força gravitacional, Teorema das cascas, Princípio de Mach, Mecânica Relacional.

I. INTRODUÇÃO

Nas Seção XII, Proposições 70 e 71, do livro I do monumental *Principia*, publicado em 1687 [1], I. Newton (1642-1727) provou dois teoremas fundamentais para o seu “sistema do mundo” (estabelecido no livro III), quais sejam os Teoremas XXX e XXXI, que determinam a força gravitacional exercida por uma casca esférica com distribuição uniforme de massa sobre um corpúsculo (um corpo com tamanho desprezível em compa-

ração com a casca), de acordo com a sua lei universal de gravitação, estabelecida no livro III do *Principia* [2]. No teorema XXX, Newton provou que a força gravitacional exercida pela casca é **nula** quando o corpo está localizado em qualquer ponto do interior da casca. Nas suas palavras [1]:

Se para cada ponto de uma superfície esférica tenderem forças centrípetas iguais, que diminuam com o quadrado das distâncias a partir desses pontos, afirmo que um

*Graduanda do IF-UnB.

†Graduando do IF-UnB.

‡Prof. Adjunto do IF-UnB. Corresponding author: fabio@fis.unb.br

corpúsculo localizado dentro daquela superfície **não será atraído de maneira alguma** por aquelas forças.

É óbvio que, devido à simetria da casca esférica, qualquer força que só dependa da distância entre os corpos interagentes fornecerá uma resultante nula quando o corpo estiver *no centro* da casca. A parte não-trivial do teorema é que a força também será nula caso o corpo esteja *fora do centro*. Como a lei universal de gravitação de Newton assume que a interação gravitacional só depende do produto das massas gravitacionais e do inverso do quadrado da distância entre elas [2],¹ então a força exercida pela casca deve permanecer nula mesmo que o corpo em seu interior possua alguma velocidade ou aceleração em relação à casca. O teorema XXX foi fundamental para que Newton pudesse desprezar a influência das estrelas distantes sobre o movimento dos corpos nas proximidades da Terra e no sistema solar, já que elas estão distribuídas de forma aleatória e praticamente homogênea por toda a esfera celeste (ver Corolário 2 da Proposição 14, Teorema 14, no livro III).² Esse mesmo resultado nulo também é previsto, quando a esfera está em repouso, pela Teoria da Relatividade Geral (TRG), proposta por A. Einstein (1879-1955) em 1915 [3], numa forma preliminar, e no formato definitivo em 1916 [4]. Este resultado nulo da TRG pode ser facilmente obtido, por exemplo, tomando-se $\omega = 0$ no resultado obtido em 1918 por H. Thirring (1888-1976) para a força gravitacional exercida por uma casca girante sobre um corpo em seu interior (ver Ref. [5] e uma correção na Ref.[6]).

Tendo em vista que a TRG não contempla o princípio de Mach, o qual afirma que a inércia de um corpo é determinada pela distribuição das massas do resto do Universo,³ conforme é amplamente discutido na Ref. [7] e suas referências, o brasileiro A. K. T. Assis propôs em 1989 a Mecânica Relacional como uma teoria alternativa às teorias de gravitação de Newton e de Einstein, com a vantagem de contemplar o princípio de Mach em todas as situações possíveis [8]. Na Mecânica Relacional, postula-se uma versão gravitacional da força eletrodinâmica de Weber, a qual possui, além do termo coulombiano usual (estático), termos que dependem da velocidade e da aceleração relativas entre as cargas interagentes [9]. No livro “Mecânica Relacional”, publicado em 2013 [7], Assis apresenta sua nova mecânica de uma forma bem didática, analisando diversos casos de movimento relativo (translação e rotação) entre uma casca esférica e um corpúsculo movendo-se tanto dentro quanto fora da casca, mostrando que, em geral, o movimento relativo acelerado faz com que um corpo exerça uma força não-nula sobre o outro. Entretanto, no caso em que estamos interessados aqui (um corpo movendo-se aceleradamente no interior da casca), aquele autor afirma que a casca exercerá uma força não-nula sobre o corpo [7, Apêndice A.1], mas não fornece uma demonstração matemática completa. Por ocasião da X Semana da Física, realizada no IF-UnB em 2015, foi ministrado o minicurso “Introdução à Mecânica Relacional”, no qual o palestrante (o próprio Prof. Assis) sugeriu que o cálculo da integral de superfície dos elementos de força, que geralmente

¹Em linguagem moderna, essa lei estabelece que: “Cada partícula de matéria atrai qualquer outra partícula com uma força proporcional ao produto de suas massas gravitacionais e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre elas.”

²O teorema XXXI estabelece que haverá atração gravitacional quando o corpo estiver fora da casca esférica, devendo-se utilizar a distância até o centro da casca. Isto nos permite tratar o Sol e a Terra, por exemplo, como massas puntiformes.

³O nome “princípio de Mach” foi dado por Schlick em 1915 e passou a ser amplamente referido com este nome após a publicação de um artigo de Einstein, em 1918, no qual ele referiu-se diretamente à hipótese levantada por E. Mach (1838-1916), em uma crítica ao espaço absoluto de Newton, de que os efeitos inerciais em um corpo devem ser causados pela interação do corpo com o restante do Universo. De acordo com Mach, um corpo isolado em um espaço vazio não deve possuir inércia.

é bem complexo, fosse feito pelos espectadores no caso mais simples do corpo acelerado, mas inicialmente parado no centro da casca. Nesta nota, apresentaremos a demonstração matemática completa correspondente a essa situação.

II. CÁLCULO DA FORÇA EXERCIDA PELA CASCA ESFÉRICA

Consideremos uma situação particular em que um corpúsculo com massa gravitacional m encontra-se inicialmente parado no centro de uma casca esférica de raio R , cuja massa gravitacional M está uniformemente distribuída com uma densidade superficial $\sigma = M/(4\pi R^2)$. Suponha que, no instante $t = 0$, o corpo passa a ser acelerado na direção do eixo z , como indicado na Fig. 1.⁴ A versão gravitacional da força de Weber exercida por um corpo de massa m_1 sobre um corpo de massa m_2 , como proposta originalmente por Assis, é [8]:⁵

$$\vec{F}_{12} = -\frac{Gm_1m_2}{r^2} \left[1 - \frac{\xi}{c^2} \left(\frac{\dot{r}^2}{2} - r\ddot{r} \right) \right] \hat{r}_{21}, \quad (1)$$

onde $\hat{r}_{21} \equiv (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)/|\vec{r}_2 - \vec{r}_1| = (\vec{r}_2 - \vec{r}_1)/r$, G é a constante universal de gravitação e c é a velocidade da luz no vácuo. Embora ξ seja um parâmetro livre da teoria, Assis observou que $\xi = 6$ leva à correta precessão do periélio do planeta Mercúrio. Com este valor, a força exercida pelo elemento de massa dM de uma casca esférica (que fará o papel de m_1) sobre um corpúsculo de massa m localizado em seu interior fica [7]:

$$d^2\vec{F}_{12} = -\frac{GmdM}{r^2} \left(1 - 3\frac{\dot{r}^2}{c^2} + 6\frac{r\ddot{r}}{c^2} \right) \hat{r}_{21}, \quad (2)$$

onde $dM = \sigma dS$, com $dS = R^2 \sin\theta d\theta d\varphi$ sendo o elemento de área em coordenadas esféricas,

$\hat{r}_{21} = -\vec{r}/r = -\hat{r}$, \hat{r} sendo o vetor unitário na direção radial (das coordenadas esféricas), como indicado na Fig. 1. Note que, além do termo newtoniano, há um termo que depende da velocidade relativa \dot{r} e outro que depende da aceleração relativa \ddot{r} . Para calcular a força total exercida pela casca sobre o corpo, que é a integral de superfície de $d^2\vec{F}_{12}$, primeiramente vamos desprezar o termo newtoniano (que só depende de r), pois, de acordo com o teorema XXX de Newton, ele fornecerá uma integral nula. Isto reduz o problema a:

$$\vec{F}_{12} = -Gm\sigma R^2 \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{1}{r^2} \left(-3\frac{\dot{r}^2}{c^2} + 6\frac{r\ddot{r}}{c^2} \right) \times \hat{r}_{21} \sin\theta d\theta d\varphi. \quad (3)$$

Como o corpo encontra-se inicialmente parado no centro da casca, mantida em repouso em relação a um referencial inercial, teremos $\vec{v}_2(0) = \vec{0}$ e $\vec{v}_1 = \vec{0}$, portanto, o termo que contém a velocidade relativa $\dot{r} = (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \cdot \hat{r}_{21} = -\vec{v}_{21} \cdot \hat{r}$ é nulo em $t = 0$. Resta, assim, somente a integral do termo com \ddot{r} :

$$\vec{F}_0 = \frac{6Gm\sigma R^2}{c^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{\ddot{r}}{r} \hat{r} \sin\theta d\theta d\varphi, \quad (4)$$

onde usamos o fato de que $\hat{r}_{21} = -\hat{r}$. A aceleração relativa \ddot{r} é facilmente determinada observando-se que a casca permanece em repouso, de modo que $\vec{a}_1 = \vec{0}$, enquanto que o corpúsculo é acelerado para baixo em relação a ela, ou seja $\vec{a}_2 = -a\hat{k} = cte.$, onde $a > 0$ é o módulo da aceleração

⁴É claro que esta aceleração está sendo provocada pela ação de alguma força externa, oriunda de outro corpo que não a casca esférica, como ocorreria, por exemplo, nas proximidades da Terra, caso em que a aceleração (de queda livre) seria $\vec{a} = -g\hat{k}$, com $g \cong 9,8 \text{ m/s}^2$.

⁵Como usual, cada derivada temporal é indicada por um ponto acima da variável.

(tangencial) do corpúsculo. Dessa forma:

$$\begin{aligned}
 \ddot{r} &\equiv \frac{d\dot{r}}{dt} = \frac{d(-\vec{v}_{21} \cdot \hat{r})}{dt} = - \left(\frac{d\vec{v}_{21}}{dt} \cdot \hat{r} + \vec{v}_{21} \cdot \frac{d\hat{r}}{dt} \right) \\
 &= - \frac{d(\vec{v}_2 - \vec{v}_1)}{dt} \cdot \hat{r} - \vec{v}_{21} \cdot \frac{d(\vec{r}/r)}{dt} \\
 &= - (\vec{a}_2 - \vec{a}_1) \cdot \hat{r} - \vec{v}_{21} \cdot \left(-\frac{\vec{v}_{21}}{r} - \frac{\dot{r}}{r^2} \vec{r} \right) \\
 &= - \left(-a\hat{k} - \vec{0} \right) \cdot \hat{r} + \frac{\vec{v}_{21} \cdot \vec{v}_{21}}{r} + \vec{v}_{21} \cdot \left(\frac{\dot{r}}{r} \hat{r} \right) \\
 &= a\hat{k} \cdot \hat{r} + \frac{\vec{v}_{21} \cdot \vec{v}_{21}}{r} + \frac{(\vec{v}_{21} \cdot \hat{r})^2}{r}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

o que reduz-se a $\ddot{r} = a\hat{k} \cdot \hat{r}$, já que $\vec{v}_{21} = \vec{0}$ em $t = 0$. Levando este resultado na Eq. (4), obtemos

$$\begin{aligned}
 \vec{F}_0 &= \frac{6Gm\sigma R^2}{c^2} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{(a\hat{k} \cdot \hat{r})}{R} \hat{r} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \\
 &= \frac{6Gm\sigma R}{c^2} a \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (\hat{k} \cdot \hat{r}) \frac{\vec{r}}{R} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \\
 &= \frac{6Gm\sigma R}{c^2} a \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \frac{z}{R} \frac{x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}}{R} \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \\
 &= \frac{6Gm\sigma}{Rc^2} a \int_0^{2\pi} \int_0^\pi z(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}) \sin\theta \, d\theta \, d\varphi. \quad (6)
 \end{aligned}$$

A integral acima pode ser resolvida fazendo-se

$$\begin{aligned}
 &\int_0^{2\pi} \int_0^\pi z(x\hat{i} + y\hat{j} + z\hat{k}) \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \\
 &= \int_0^{2\pi} \int_0^\pi xz \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \hat{i} \\
 &+ \int_0^{2\pi} \int_0^\pi yz \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \hat{j} \\
 &+ \int_0^{2\pi} \int_0^\pi z^2 \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \hat{k} \quad (7)
 \end{aligned}$$

e substituindo-se $x = R \cos\varphi \sin\theta$, $y = R \sin\varphi \sin\theta$ e $z = R \cos\theta$, o que fornece, para cada integral:

$$\begin{aligned}
 &\int_0^{2\pi} \int_0^\pi xz \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \\
 &= R^2 \int_0^{2\pi} \cos\varphi \, d\varphi \int_0^\pi \sin^2\theta \cos\theta \, d\theta \quad (8)
 \end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned}
 &\int_0^{2\pi} \int_0^\pi yz \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \\
 &= R^2 \int_0^{2\pi} \sin\varphi \, d\varphi \int_0^\pi \sin^2\theta \cos\theta \, d\theta, \quad (9)
 \end{aligned}$$

que são ambas nulas porque $\int_0^{2\pi} \cos\varphi \, d\varphi = \int_0^{2\pi} \sin\varphi \, d\varphi = 0$, e

$$\begin{aligned}
 &\int_0^{2\pi} \int_0^\pi z^2 \sin\theta \, d\theta \, d\varphi \\
 &= R^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi \cos^2\theta \sin\theta \, d\theta \\
 &= 2\pi R^2 \int_0^\pi \cos^2\theta \sin\theta \, d\theta \\
 &= 2\pi R^2 \int_{-1}^{+1} u^2 \, du \\
 &= \frac{4}{3} \pi R^2. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Na última integral, fizemos a substituição simples $u = \cos\theta$. Substituindo estes resultados na Eq. (6), obtemos, por fim,

$$\begin{aligned}
 \vec{F}_0 &= \frac{6Gm\sigma}{Rc^2} a \frac{4}{3} \pi R^2 \hat{k} \\
 &= \frac{2GM}{Rc^2} m a \hat{k}, \quad (11)
 \end{aligned}$$

que é o resultado não-nulo que desejávamos obter. Nosso resultado pode ser escrito na forma $\vec{F}_0 = -\gamma m \vec{a}$, onde $\gamma \equiv 2GM/(Rc^2)$ é uma constante positiva, de modo que a força exercida pela casca será sempre no sentido oposto à aceleração \vec{a} do corpúsculo em relação à casca. Este resultado é a base de toda a Mecânica Relacional, sendo essencial para a implementação do princípio de Mach, como feito nas Refs. [7, 8].

III. CONCLUSÃO

Tanto a lei universal de gravitação, de Newton, como a teoria da Relatividade Geral, de Einstein, prevêem que a força gravitacional exercida

por uma casca esférica homogênea (em repouso) sobre um corpúsculo localizado em seu interior é nula, qualquer que seja a sua posição e o seu estado de movimento em relação à casca, como provado no teorema XXX do livro I do *Principia* [1]. Nesta nota, mostramos matematicamente que a Mecânica Relacional fornece um resultado *não-nulo* quando o corpúsculo, inicialmente parado no centro da casca, é acelerado em relação a ela, mostrando assim que o teorema XXX não é válido quando se considera uma força gravitacional do tipo Weber e há uma aceleração relativa entre os corpos.⁶ Este é um dos pontos cruciais em que a Mecânica Relacional se diferencia das teorias de Newton e de Einstein. De fato, justamente por fornecer uma força $-\gamma m \vec{a}$, portanto sempre oposta à aceleração do corpúsculo (como na força de inércia, ou *vis insita*, de Newton), é que a Mecânica Relacional interpreta a origem da inércia como uma consequência da interação gravitacional entre a “casca-universo” (ou seja, a esfera celeste) e um corpo acelerado em relação a ela.⁷

Einstein sempre deixou claro que foi muito influenciado pelo livro “A ciência da mecânica”, de Mach [13]. De fato, ele tentou obter uma teoria capaz de reproduzir quantitativamente as idéias de Mach, como vemos no seguinte comentário de J. B. Barbour [14]:

O próprio Einstein afirmou que a maneira mais simples de realizar o objetivo da Relatividade seria formular as leis do movimento diretamente, e desde o início, **apenas em termos das distâncias relativas e velocidades relativas**. Ele apontou a impraticabilidade desta rota como o motivo para não escolhê-la. De acordo com ele, a história da ciência tinha demonstrado a **impossibilidade prática de dispensar os sistemas de coordenadas**.

Se o *alemão* Einstein tivesse tomado conhecimento da eletrodinâmica de Weber (1846) [9], que é *completamente relacional*, ele certamente não teria dito isto! Como, aparentemente, isto não ocorreu, Einstein acabou seguindo um caminho diferente, que culminou com a TRG, na qual um corpo tem inércia mesmo em um Universo vazio (o Universo de de Sitter), contrariando frontalmente o princípio de Mach e frustrando suas expectativas. Sobre este aspecto negativo da TRG de Einstein, ver as Refs. [15, 16, 17, 18]. Em alguns trabalhos de M. Ghins [19, 20], mostra-se inclusive que o conceito de espaço-tempo, na TRG, é *absoluto*, existindo independentemente da matéria distante (estrelas e galáxias), contrariando novamente as idéias de Mach.

⁶Note que esta semelhança com a força usada na eletrodinâmica de Weber faz com que o mesmo resultado não-nulo seja esperado no caso de uma carga puntiforme q sendo acelerada dentro de uma casca esférica uniformemente carregada com carga Q . De fato, isto foi previsto por Assis em 1993 [10] e observado por Mikhailov em duas ocasiões [11, 12].

⁷Isso não é possível nas teorias de gravitação de Newton e Einstein, pois elas sempre fornecem um resultado nulo para a interação da casca (em repouso) com corpos acelerados em seu interior. Por isso é que elas não conseguem identificar a origem da força de inércia na forma de uma interação gravitacional entre um corpo e o resto do universo.

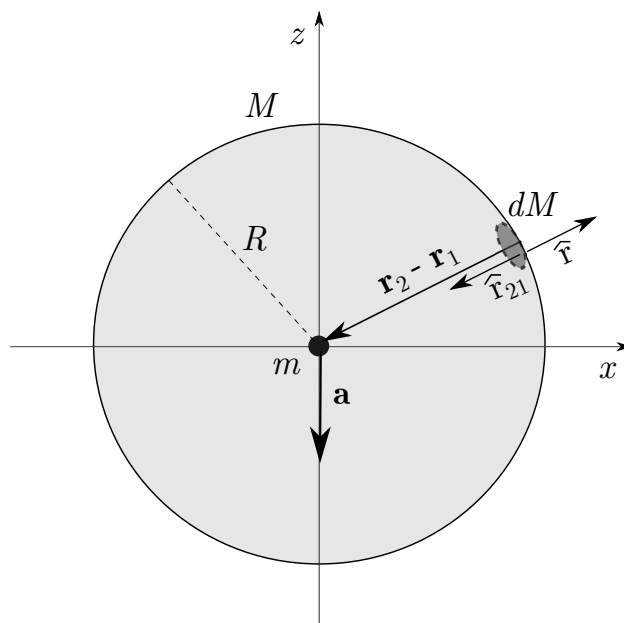


Figura 1: Casca esférica de raio R e massa gravitacional M , em repouso, interagindo com um corpúsculo de massa m , inicialmente parado no centro da casca, com uma aceleração tangencial ao longo da direção do eixo z , isto é $\vec{a} = -a\hat{k}$. Note que, no instante $t = 0$, temos $|\vec{r}_2 - \vec{r}_1| \equiv r = R$.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Newton. *Principia – Princípios Matemáticos de Filosofia Natural. Livro I: O Movimento dos Corpos*. São Paulo: Nova Stella/Edusp, 1990. [Tradução de T. Ricci, L. G. Brunet, S. T. Gehring e M. H. C. Célia]
- [2] I. Newton. *Principia – Princípios Matemáticos de Filosofia Natural. Livro II: O Movimento dos Corpos (em Meios com Resistência) e Livro III: O Sistema do Mundo (tratado matematicamente)*. São Paulo: Edusp, 2008. [Tradução de A. K. T. Assis]
- [3] A. Einstein, *Preussische Akad. der Wissenschaften, Sitzungsberichte* (part 2), 778 (1915). Ver adendo na pág. 801.
- [4] A. Einstein, *Annalen der Physik* **49**, 769 (1916).
- [5] H. Thirring, *Physikalische Zeitschrift* **19**, 33 (1918).
- [6] H. Thirring, *Physikalische Zeitschrift* **22**, 29 (1921).
- [7] A. K. T. Assis. *Mecânica Relacional e implementação do princípio de Mach com a força de Weber Gravitacional*. Montreal, Canada: Apeiron, 2013.
- [8] A. K. T. Assis, *Found. Phys. Lett.* **2**, 301 (1989).

- [9] A. K. T. Assis. *Eletrodinâmica de Weber*. Campinas, São Paulo: Ed. Unicamp, 1995.
- [10] A. K. T. Assis, *J. Phys. Soc. Japan* **62**, 1418 (1993).
- [11] V. F. Mikhailov, *Ann. Fond. Louis de Broglie* **24**, 161 (1999).
- [12] V. F. Mikhailov, *Ann. Fond. Louis de Broglie* **26**, 33 (2001).
- [13] E. Mach. *The science of mechanics*, 6^a Ed. La Salle: Open Court, 1960.
- [14] J. B. Barbour. *Absolute or relative motion?*, Cambridge: Cambridge University Press, 1989.
- [15] D. W. Sciama, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **113**, 34 (1953).
- [16] M. Reinhardt, *Zeit. Naturforschung A* **28**, 529 (1973).
- [17] D. J. Raine, *Rep. Progress Phys.* **44**, 1151 (1981).
- [18] A. Pais. *Subtle is the Lord....* Oxford: Oxford University Press, 1982.
- [19] M. Ghins. *A inércia e o espaço-tempo absoluto*. Campinas, São Paulo: Coleção CLE-Unicamp, 1991.
- [20] M. Ghins. *A equivalência dinâmica segundo Mach e a teoria geral da relatividade*. Em: F. R. R. Évora (editor), *Século XIX: o nascimento da ciência contemporânea*, pp. 161–175. Campinas, São Paulo: Centro de Lógica, Epistemologia e História da Ciência da Unicamp, 1992.



Expediente Physicae Organum – Revista de Estudantes de Física da UnB
Volume 2. Número 2

**Publicação Semestral do Corpo Discente
do Departamento de Física da UnB
Brasília, Setembro de 2016**

Universidade de Brasília
Reitor: Ivan Marques de Toledo Camargo
Vice-Reitora: Sônia Nair Bão

Diretoria do Instituto de Física
José Felipe Beaklini Filho
José Francisco da Rocha Neto

Conselho Editorial
Dr. Olavo Leopoldino da Silva Filho

Comissão Editorial

Lilah Fialho
Lo Rhuama Florscuk
Paulo Ferrari
Bárbara Cavalcante
Patrícia Valero

Comitê Científico

Dra. Adriana Pereira Ibaldo
Dr. Antonio Carlos Pedroza
Dr. Antony Marco Mota Polito
Dr. Bernardo Mello
Dr. Clovis Maia
Dr. Ivan Soares Ferreira
Dr. José David Manguiera Vianna
Dr. Junio Márcio Rosa Cruz
Dra. Leticia Nunes Coelho
Dr. Marcus Bastos Lacerda Santos
Dr. Olavo Leopoldino da Silva Filho
Dra. Reva Garg
Dra. Roseline Strieder
Dra. Vanessa Carvalho
DR. Luciano Nascimento
Frederico Prudente
DR. Amílcar Queiroz
DR. Ademir Santana
DR. Bruno Vieira Ribeiro
DR. Angelo Marconi Maniero
DR. Paulo Lima Junior

Contatos

<http://periodicos.unb.br/index.php/physicae>
physicaeorganum@gmail.com